

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi di sostenibilità ambientale ed economica della produzione di composti ad alto valore aggiunto da vinacce piemontesi



Relatrice

prof.ssa Debora Fino

Correlatrice

prof.ssa Francesca Demichelis

Candidato
Marco Roncarolo

Ottobre 2023

Indice

Introduzione	8
1. Life Cycle Thinking	9
1.1 <i>Definizione del concetto</i>	9
1.2 <i>Life Cycle Assessment</i>	9
1.2.1 <i>Struttura dell'analisi</i>	10
1.2.2 <i>LCIA, metodi e categorie d'impatto</i>	11
1.3 <i>Life Cycle Costing</i>	12
1.4 <i>social Life Cycle Assessment</i>	12
2. Valorizzazione della vinaccia piemontese	13
2.1 <i>Lo scarto vitivinicolo come materia prima</i>	13
2.1.1 <i>Il vino e le vinacce in Piemonte</i>	13
2.1.2 <i>Costituzione della vinaccia</i>	16
2.1.3 <i>Caratteristiche dei polifenoli</i>	17
3. Generalità degli impianti di estrazione	20
3.1 <i>Processi di estrazione</i>	20
3.1.1 <i>Estrazione convenzionale</i>	21
3.1.2 <i>Estrazione ad ultrasuoni</i>	21
3.2 <i>Processo di pirolisi</i>	23
4. LCA: definizione degli obiettivi e inventario	24
4.1 <i>Goal and scope</i>	24
4.2 <i>Inventario</i>	25
4.2.1 <i>Generalità dell'impianto considerato</i>	25
4.2.2 <i>Trasporto</i>	26
4.2.3 <i>Essiccazione</i>	27
4.2.4 <i>Miscelazione</i>	28
4.2.5 <i>Estrazione convenzionale</i>	29
4.2.6 <i>Estrazione ad ultrasuoni</i>	30
4.2.7 <i>Purificazione del prodotto</i>	30
4.2.8 <i>Pre-essiccazione dello scarto</i>	32
4.2.9 <i>Processo di pirolisi e analisi prodotti</i>	34
4.2.10 <i>Riassunto degli step di processo</i>	35
5. Life Cycle Impact Assessment e interpretazione	39
5.1 <i>Life Cycle Impact Assessment</i>	39
5.2 <i>Global warming</i>	39

5.2.1	Risultati	39
5.2.2	Discussione risultati	41
5.3	<i>Water consumption</i>	41
5.3.1	Risultati	41
5.3.2	Confronto con AWARE	43
5.3.3	Discussione risultati	43
5.4	<i>Freshwater eutrophication</i>	43
5.4.1	Risultati	44
5.4.2	Discussione risultati	45
5.5	<i>Fossil resource scarcity</i>	45
5.5.1	Risultati	45
5.5.2	Discussione risultati	47
5.6	<i>CED – Non renewable, fossil</i>	47
5.6.1	Risultati	47
5.6.2	Discussione risultati	49
5.7	<i>Interpretation</i>	49
5.7.1	Analisi di sensitività	50
5.7.2	Conclusioni	54
6	Analisi economica del processo	55
6.1	<i>Introduzione alla valutazione economica</i>	55
6.1.1	Costi capitali	56
6.1.2	Costi operativi	58
6.2	<i>Studio di analisi economica</i>	59
6.2.1	Descrizione del processo	60
6.2.2	Calcolo dei costi capitali	61
6.2.3	Calcolo dei costi operativi	65
6.2.4	Calcolo dei guadagni	69
6.2.5	Risultati ottenuti	70
7	Conclusioni	72
	Bibliografia e sitografia	74
	Appendici	79

Elenco delle figure

Figura 1.1 Rappresentazione del concetto di LCT (Worldsteel Association, 2020).	9
Figura 1.2 Fasi del Life Cycle Assessment (Walter Klopffer, Birgit Grahl, 2014).....	10
Figura 1.3 Struttura del Life Cycle Assessment (Walter Klopffer, Birgit Grahl, 2014).....	11
Figura 2.1 Produzione annuale di uva - anno 2014 (FAO-OIV FOCUS, 2016).	14
Figura 2.2 Produzione mondiale di vino dal 1961 al 2014 (Stefano Castriola, 2020)	16
Figura 2.3 Diagramma semplificato del processo produttivo del vino (Nansen Zhang et al., 2017)	16
Figura 2.4 Classificazione dei polifenoli (Galanakis Charis M., 2018).....	18
Figura 2.5 Principali flavonoidi presenti nelle vinacce (Vasil Georgiev et al., 2014).....	19
Figura 3.1 schema a blocchi del processo equicorrente (a) e controcorrente (b). (Gaia Mazzanti et al., 2022).	21
Figura 3.2 Bagno ad ultrasuoni (A) e sonda ad ultrasuoni (C). (Farid Chemat et al., 2016)..	23
Figura 3.3 ROI per combustione e pirolisi a diverse dimensioni di cantina (Nansen Zhang et al., 2017).	24
Figura 4.1 BFD del processo descritto da (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	26
Figura 4.2 BFD dei pretrattamenti della vinaccia. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	26
Figura 4.3 Descrizione della fase di essiccazione.....	28
Figura 4.4 Descrizione della fase di miscelazione.....	28
Figura 4.5 Descrizione dell'estrazione convenzionale e della purificazione	31
Figura 4.6 Descrizione dell'estrazione a ultrasuoni e della purificazione.....	32
Figura 4.7 Descrizione del processo di essiccazione dello scarto convenzionale.	33
Figura 4.8 Descrizione del processo di essiccazione dello scarto a ultrasuoni.....	33
Figura 4.9 Descrizione della pirolisi convenzionale.....	35
Figura 4.10 Descrizione della pirolisi a ultrasuoni.	35
Figura 5.1 Legenda.	39
Figura 5.2 Emissioni di CO ₂ in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale.	40
Figura 5.3 Focus sulle emissioni per il processo estrattivo convenzionale.	40
Figura 5.4 Emissioni di CO ₂ in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni. ...	40
Figura 5.5 Focus sulle emissioni per il processo estrattivo a ultrasuoni.....	40
Figura 5.6 Consumo di H ₂ O in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale..	42
Figura 5.7 Focus sul consumo per il processo estrattivo convenzionale.	42
Figura 5.8 Consumo di H ₂ O in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni....	42
Figura 5.9 Focus sul consumo per il processo estrattivo a ultrasuoni.	42
Figura 5.10 emissione di P in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale. ..	44
Figura 5.11 Focus sul consumo per il processo estrattivo convenzionale.	44
Figura 5.12 emissione di P in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni.....	45
Figura 5.13 Focus sul consumo per il processo estrattivo a ultrasuoni.	45
Figura 5.14 consumo di petrolio in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale....	46
Figura 5.15 Focus sul consumo per il processo estrattivo convenzionale.	46
Figura 5.16 consumo di petrolio in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni.....	47
Figura 5.17 Focus sul consumo per il processo estrattivo a ultrasuoni.	47
Figura 5.18 consumo di energia non rinnovabile in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale.....	48
Figura 5.19 Focus sul consumo per il processo estrattivo convenzionale.	48
Figura 5.20 consumo di energia non rinnovabile in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni.....	49
Figura 5.21 Focus sul consumo per il processo estrattivo a ultrasuoni.	49

Figura 6.1 Suddivisione dei costi capitali per ogni apparecchiatura.	64
Figura 6.2 Suddivisione dei costi operativi per il processo convenzionale..	68
Figura 6.3 Suddivisione dei costi operativi per il processo a ultrasuoni..	68
Figura 6.4 Descrizione del Cumulative Cash Flow. (Richard Turton et al., 2018).	70
Figura 6.5 Cumulative Cash Flow per il processo convenzionale.....	71
Figura 6.6 Cumulative Cash Flow per il processo a ultrasuoni.	71

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1 Composizione vinaccia espressa in percentuale (%) su base secca.	17
Tabella 3.1 rese del processo di pirolisi (J. M. Encinar et al., 1996).	23
Tabella 4.1 Confronto tra le rese trovate in letteratura.	25
Tabella 4.2 Descrizione portata in ingresso al processo. (Nansen Zhang et al., 2017).....	27
Tabella 4.3 Calcolo del calore di evaporazione per raggiungere la concentrazione desiderata.	27
Tabella 4.4 Descrizione portata post essiccazione. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	27
Tabella 4.5 Descrizione unità di miscelazione (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	28
Tabella 4.6 Descrizione dell'unità di estrazione convenzionale. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	29
Tabella 4.7 Descrizione dell'unità di estrazione ad ultrasuoni. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	30
Tabella 4.8 Calcolo della potenza di pompaggio (FTI S.r.l., 2023; Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	31
Tabella 4.9 Descrizione del processo di essiccazione con lo scarto proveniente dall'estrazione convenzionale. (Ana F. Ferreira et al., 2021; Cristina del Pozo et al., 2022)	32
Tabella 4.10 Calcolo del calore necessario per attuare l'essiccazione.	32
Tabella 4.11 Descrizione del processo di essiccazione con lo scarto proveniente dall'estrazione a ultrasuoni. (Ana F. Ferreira et al., 2021; Cristina del Pozo et al., 2022).	33
Tabella 4.12 Calcolo del calore necessario per attuare l'essiccazione.	33
Tabella 4.13 Descrizione del processo di pirolisi convenzionale. (J. M. Encinar et al., 1996)	34
Tabella 4.14 Calcolo termodinamico del calore necessario a raggiungere i 500°C di pirolisi.....	34
Tabella 4.15 Descrizione del processo di pirolisi a ultrasuoni. (J. M. Encinar et al., 1996)...	34
Tabella 4.16 Calcolo termodinamico del calore necessario a raggiungere i 500°C di pirolisi.	35
Tabella 4.17 Calcolo dell'azoto necessario per la pirolisi convenzionale e ad ultrasuoni.....	35
Tabella 4.18 Riassunto dell'intero processo con estrazione convenzionale. ("/" indica descrizione della corrente già presente, "-" indica la mancanza o non necessità del dato).....	37
Tabella 4.19 Riassunto dell'intero processo con estrazione a ultrasuoni. ("/" indica descrizione della corrente già presente, "-" indica la mancanza o non necessità del dato).....	38
Tabella 5.1 Analisi complessiva del “global warming” per il processo in esame.	39
Tabella 5.2 Analisi complessiva della “water consumption” per il processo in esame.	41
Tabella 5.3 Analisi complessiva della categoria “AWARE”, con anche la normalizzazione, per il processo in esame.....	43
Tabella 5.4 Analisi complessiva della categoria “freshwater eutrophication” per il processo in esame.....	44
Tabella 5.5 Analisi complessiva della categoria “fossil resource scarcity” per il processo in esame.	46
Tabella 5.6 Analisi complessiva della categoria “CED” per il processo in esame.	48
Tabella 5.7 Analisi delle categorie d'impatto per la filiera completa con estrazione convenzionale. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto).....	51
Tabella 5.8 Analisi delle categorie d'impatto per la filiera completa con estrazione a ultrasuoni. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)	51
Tabella 5.9 Analisi delle categorie d'impatto per la produzione di biochar, tramite pirolisi, per il processo con estrazione convenzionale. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)	52
Tabella 5.10 Analisi delle categorie d'impatto per la produzione di biochar, tramite pirolisi, per il processo con estrazione a ultrasuoni. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)..	52

Tabella 5.11 Analisi delle categorie d'impatto per la produzione di polifenoli tramite estrazione convenzionale. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto).....	53
Tabella 5.12 Analisi delle categorie d'impatto per la produzione di polifenoli tramite estrazione a ultrasuoni. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto).....	53
Tabella 5.13 Analisi degli impatti per il processo di digestione anaerobica e di compostaggio.	54
Tabella 5.14 Confronto degli impatti ambientali con l'articolo (Karin Carlqvist et al., 2021). ("/" indica la mancanza del dato).....	55
Tabella 6.1 Livello di dettaglio delle diverse tipologie di analisi. (Richard Turton et al., 2018)...	56
Tabella 6.2 Definizione dei costi operativi di un processo. (Richard Turton et al., 2018)	59
Tabella 6.3 Descrizione degli scarti agricoli entranti nel processo.....	60
Tabella 6.4 Calendario annuale delle biomasse di scarto trattate.	61
Tabella 6.5 Dati per il calcolo dell'area di scambio dell'essiccatore.....	62
Tabella 6.6 Dati per il calcolo dell'area di scambio dell'essiccatore pre-pirolisi.	63
Tabella 6.7 Riassunto delle dimensioni caratteristiche delle apparecchiature considerate.....	63
Tabella 6.8 Calcolo del Purchased Cost.....	63
Tabella 6.9 Calcolo del Bare Module Factor.	64
Tabella 6.10 Calcolo del Total Plant Cost.	64
Tabella 6.11 Costi unitari delle utilities. (Richard Turton et al., 2018; ARERA, 2021)	65
Tabella 6.12 Costi unitari di smaltimento. (Inail, 2023)	66
Tabella 6.13 Costi unitari delle materie prime.....	66
Tabella 6.14 Riassunto dei costi operativi per il processo convenzionale.....	67
Tabella 6.15 Riassunto dei costi operativi per il processo a ultrasuoni.	68
Tabella 6.16 Studio delle rese del processo complessivo convenzionale.	69
Tabella 6.17 Studio delle rese del processo complessivo a ultrasuoni... ..	69
Tabella 6.18 Prezzi di vendita dei prodotti considerati.....	69
Tabella 6.19 Riassunto dei contributi economici per entrambi i processi in esame... ..	70

Introduzione

Recentemente il tema della sostenibilità sta acquisendo sempre più importanza nel contesto internazionale, a causa degli effetti evidenti del cambiamento climatico. L'Unione Europea si è quindi fatta portavoce di un forte cambiamento tecnologico tramite l'accordo di Parigi del 2015, successivamente confermato tramite la COP27 del 2022, con il quale si pone l'obiettivo di diventare la prima società ed economia ad impatto climatico zero entro il 2050. (Consiglio dell'Unione Europea, 2023)

A tal scopo è quindi vitale sviluppare nuove tecnologie e ricercare nuove materie prime che permettano di sostituire l'intensivo consumo di combustibili fossili quali carbone, petrolio e gas naturale. In quest'ottica si è quindi sviluppato il concetto di "*bioraffineria*", ovvero l'utilizzo di materie prime rinnovabili, come le biomasse, all'interno dei classici processi di raffinazione per la produzione di biocarburanti e di prodotti ad alto valore aggiunto. Inizialmente la comunità scientifica si è concentrata sullo sviluppo di bioraffinerie di prima generazione, basate sull'utilizzo di biomasse edibili, ma successivamente, a causa della problematica del conflitto food-fuels di tali biomasse, si è optato per lo sviluppo di bioraffinerie di seconda generazione, tramite l'utilizzo della biomassa di scarto proveniente dal settore agricolo.

In questo contesto tecnico-scientifico il Piemonte ha il dovere di valorizzare le proprie eccellenze del territorio tramite percorsi innovativi per il trattamento e la valorizzazione degli scarti, seguendo i principi della *Green Chemistry* e della *Green Engineering*. Tali principi forniscono una serie di raccomandazioni per minimizzare il rischio e l'impatto ambientale dei processi chimici, tra i quali utilizzare solventi e ausiliari più sicuri, l'utilizzo di materie prime rinnovabili e una progettazione finalizzata all'efficientamento energetico.

A tal scopo, in questa tesi, è stato valutato e scalato a livello pilota un impianto sperimentale di bioraffineria sequenziale costituito da un'unità di estrazione seguito da una pirolisi. L'unità di estrazione di polifenoli ha utilizzato come materia prima, in un primo momento, vinacce piemontesi e infine una serie di prodotti di scarto dell'industria agricola piemontese. Nell'impianto si è inoltre confrontata l'efficienza nell'utilizzo di due diverse tecnologie di estrazione (convenzionale e ad ultrasuoni) e l'efficacia dell'accoppiamento di tale impianto ad un processo di pirolisi che permettesse di trattare ulteriormente lo scarto prodotto dall'estrazione.

Infatti, grazie al processo ulteriore di pirolisi, si è in grado di produrre un ulteriore prodotto con un modesto valore economico, chiamato *biochar*, oltre a produrre un *syngas* utile per sostenere energeticamente il processo estrattivo.

Dopo aver dimensionato l'impianto pilota si è proseguito attuando un'analisi sull'impatto ambientale, tramite metodologia di Life Cycle Assessment (LCA), e sulla profittabilità economica, fornendo nelle conclusioni una panoramica chiara sulle criticità del processo, sui punti di forza e sulle possibili future ottimizzazioni.

1. Life cycle thinking

1.1 Definizione del concetto

Per raggiungere gli obiettivi di sviluppo sostenibile promossi delle Nazioni Unite è necessario adottare un approccio tecnico-scientifico efficace, che rivolga l'attenzione all'uomo e al pianeta. L'industria chimica ha quindi il dovere di evolversi verso un approccio più sostenibile, essendo la terza industria per emissioni globali di gas serra e per tassi di consumo energetico (Kyla Bruce et al., 2023).

In questo contesto è nato il concetto di *Life Cycle Thinking* (LCT), un approccio basato sulla necessità di valutare l'impatto di un determinato prodotto/servizio, adottando una prospettiva olistica, ossia analizzando dall'estrazione della materia prima al fine vita del prodotto ottenuto.

Gli obiettivi che si pone questa tecnica sono sostanzialmente tre: sviluppare un approccio ingegneristico (quantitativo) per la valutazione dell'impatto nell'uso di determinate risorse, evidenziare e quantificare il rischio connesso all'utilizzo di tali sostanze, e misurare le prestazioni ambientali di sistemi complessi (Elena Fregonara, 2015).

Per raggiungere questi obiettivi il LCT utilizza tre diverse tipologie di metodologie:

- LCA (Life Cycle Assessment)
- LCC (Life Cycle Costing)
- sLCA (social Life Cycle Assessment)



Figura 1.1: Rappresentazione del concetto di LCT (Worldsteel Association, 2020)

1.2 Life Cycle Assessment

Il concetto alla base del Life Cycle Assessment viene definito nell'introduzione della normativa internazionale ISO 14040 o nella "Code of Practice" della SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) come la valutazione dei potenziali carichi ambientali ed energetici di un determinato prodotto durante l'intero ciclo vita (cradle-to-grave approach), ossia dal trasporto della materia prima al trattamento del fine vita del prodotto stesso (Elena Fregonara, 2015; Kathrina Simonen, 2014).

Dalla definizione si evince come sia necessario creare uno schema a blocchi del ciclo vita di un determinato prodotto, in cui ogni fase di processo viene considerata come una scatola nera, in cui entrano ed escono solo correnti di materia e di energia (Allan Astrup Jensen et al., 1998; Walter Klopffer, Birgit Grahl, 2014).



Figura 1.2: Fasi del Life Cycle Assessment (Walter Klopffer, Birgit Grahl, 2014)

Comprendere i punti di forza di questa analisi e le sue debolezze è una prerogativa fondamentale per l'interpretazione corretta dei risultati. L'LCA permette, infatti, di ottenere un'analisi quantificabile, comparabile e completa (ovvero che tenga conto di tutte le fasi di processo desiderate), oltre a fornire una panoramica delle possibili ottimizzazioni necessarie al processo. Allo stesso tempo è una tecnica di analisi molto dispendiosa dal punto di vista temporale e in cui, talvolta, si è obbligati a lavorare con dati incompleti; perciò, risulta importante la professionalità dell'analista, a causa di un certo grado di aleatorietà (Walter Klopffer, Birgit Grahl, 2014).

1.2.1 Struttura dell'analisi

La normativa ISO 14040 definisce quali sono gli step da seguire per attuare un'analisi LCA che rispetti gli standard. In ordine, si hanno i seguenti step:

1. *Goal and scope definition*: all'inizio dell'analisi si dovranno definire gli obiettivi che si vogliono perseguire e il campo di applicazione dello studio. Questa fase è molto importante perché influenza le scelte che si terranno durante tutto il processo decisionale, come, ad esempio, le categorie d'impatto da analizzare e l'interpretazione conclusiva dei risultati.
Si dovrà inoltre definire, in base agli obiettivi dichiarati, l'unità funzionale del processo, ossia l'unità di materia o energia a cui tutte le correnti del processo dovranno essere normalizzate (Kathrina Simonen, 2014; Michael Z. Hauschild et al., 2018; Online Browsing Platform, 2006).
2. *Inventory analysis*: dopo aver introdotto lo studio con il primo step, si dovrà proseguire con la fase più importante di tutta l'analisi, la definizione dell'inventario. Si dovrà analizzare ogni singola unità del processo produttivo considerato, descrivendo in modo accurato le correnti di energia e materia entranti ed uscenti, normalizzate all'unità funzionale considerata, ponendo particolare attenzione al rispetto dei bilanci di materia ed energia. Sarà, inoltre, molto importante definire correttamente la tipologia di corrente considerata, se si tratta di una corrente in ingresso, di un prodotto, di un coprodotto, di uno scarto o di una emissione (Kathrina Simonen, 2014; Michael Z. Hauschild et al., 2018; Online Browsing Platform, 2006).

3. *Impact assessment*: definito in modo accurato tutto il processo, si attua la vera e proprio analisi di impatto ambientale, tramite l'utilizzo della *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA). Grazie all'ausilio di software, che contengono una serie di database, è possibile associare ad ogni corrente fisica definita nell'inventario una serie di categorie d'impatto, che riportano, tramite unità di misura standardizzate, tutti gli effetti possibili sull'ambiente. Successivamente, tramite l'aggregazione di tutti i fattori di caratterizzazione di ogni categoria, si esplicita il potenziale impatto ambientale del processo. Quest'analisi può essere attuata al *Midpoint*, ovvero studiando l'impatto del processo sull'ecosistema, o all'*Endpoint*; in cui si analizza il concetto di "danno" sull'uomo, sulla biodiversità e sulle risorse naturali (Kathrina Simonen, 2014; Michael Z. Hauschild et al., 2018; Online Browsing Platform, 2006).
4. *Interpretation*: infine, per interpretare correttamente i risultati e spiegare eventuali limitazioni dello studio, è molto importante controllare, tramite un'analisi di sensitività, la completezza e la consistenza delle fasi precedenti (Kathrina Simonen, 2014; Michael Z. Hauschild et al., 2018; Online Browsing Platform, 2006).

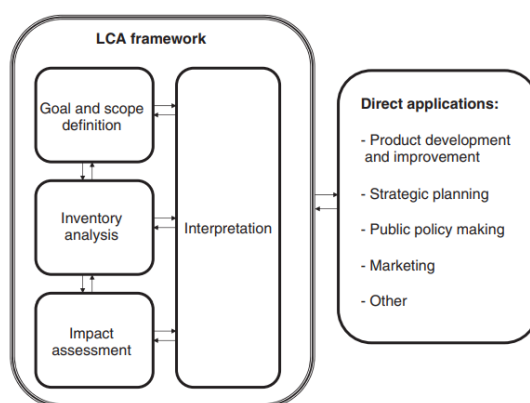


Figura 1.3: Struttura del Life Cycle Assessment (Walter Klopffer, Birgit Grahl, 2014)

1.2.2 LCIA, metodi e categorie d'impatto

Il *Life cycle Impact Assessment* permette, tramite l'utilizzo di Software e di metodologie standardizzate, di associare il contributo di ogni singolo flusso elementare all'impatto ambientale complessivo del processo in esame. Un punto focale per caratterizzare questo studio è la comprensione del concetto di "impatto ambientale", ossia tutti quei cambiamenti, positivi o negativi, che avvengono nell'ambiente a causa di una azione antropogenica. Perciò, grazie a questa fase, si è in grado di caratterizzare, tramite dei fattori di caratterizzazione, flussi antropologici differenti, ma che intervengono in modo congiunto ad un impatto ambientale comune (Allan Astrup Jensen et al., 1998; Michael Z. Hauschild et al., 2018). La normativa ISO 14040/14044 stabilisce gli step da seguire per attuare quest'analisi, suddividendoli in obbligatori ed opzionali. Inizialmente, infatti, sarà obbligatorio selezionare le categorie d'impatto e il modello d'interesse che verrà utilizzato per raggiungere gli obiettivi prefissati, per poi, tramite l'utilizzo di software specifici, classificare (associare ad ogni corrente le categorie d'impatto su cui interviene) e caratterizzare (quantificare l'impatto ambientale nelle varie categorie tramite indicatori specifici) i flussi del processo (Allan Astrup Jensen et al., 1998; Michael Z. Hauschild et al., 2018).

Successivamente si avranno step opzionali aggiuntivi non obbligatori come normalizzare, pesare e raggruppare gli impatti precedentemente calcolati (Allan Astrup Jensen et al., 1998; Michael Z. Hauschild et al., 2018).

La scelta del *metodo* che si utilizza durante lo studio LCA è fondamentale per attuare un'analisi congruente con gli obiettivi dichiarati, perciò, per identificare il metodo migliore, bisogna porsi una serie di domande. I fattori principali da considerare sono: chiedersi quali categorie d'impatto si vuole analizzare e quali si vuole escludere, se si vuole attuare una valutazione al Midpoint o all'Endpoint, quanto è documentato a livello bibliografico il metodo considerato e la collocazione geografica del proprio studio. In base a tutti questi fattori si può poi procedere alla scelta del metodo più adatto in base alle condizioni al contorno (Allan Astrup Jensen et al., 1998; Michael Z. Hauschild et al., 2018).

Al fine di attuare un'interpretazione dei risultati corretta e completa sarà molto importante scegliere correttamente le categorie d'impatto da analizzare. Ogni categoria d'impatto sarà descritta dall'unità di misura dell'indicatore di categoria che permette di associare ogni flusso al contributo di un riferimento comune. Ad esempio, la categoria d'impatto chiamata "climate change" è espressa in kg di CO₂ equivalente; perciò, ogni corrente del nostro processo emessa in ambiente, avrà un effetto sul cambiamento climatico paragonabile all'emissione di un certo quantitativo di kg di CO₂ in atmosfera (Allan Astrup Jensen et al., 1998; Michael Z. Hauschild et al., 2018).

1.3 Life Cycle Costing

La Life Cycle Costing, definita dalla normativa ISO 15685 – parte5, è una tecnica molto versatile inclusa nel concetto di Life Cycle Thinking e ha l'obiettivo di analizzare il costo del ciclo vita di un determinato prodotto/servizio. Si configura pertanto come un mezzo di supporto decisionale che permette di comparare diverse soluzioni progettuali, individuandone le zone di ottimizzazione e calcolando la spesa economica complessiva (Elena Fregonara, 2015).

Una considerazione primaria fondamentale nella descrizione di questa analisi è la scelta della tempistica in cui essa viene attuata. Si può infatti procedere con un'analisi *ex ante*, attuata nelle prime fasi decisionali, in cui, tramite l'utilizzo di stime, si può avere una prima visione dell'impatto economico del processo in studio, modificandone di conseguenza la progettazione. Oppure, in contrapposizione, si può attuare un'analisi *ex post*, che viene condotta nelle fasi conclusive del progetto basandosi su dati reali e consolidati (Michael Z. Hauschild et al., 2018).

Un'altra considerazione rilevante è il *target* dell'analisi, ossia il volume di controllo su cui si basa lo studio. Il target può essere una singola unità funzionale, l'intero processo produttivo o l'intero ciclo vita di un determinato prodotto e, ovviamente, questa decisione influenzerà il livello di dettaglio dell'analisi.

L'analisi viene attuata tramite l'ausilio di una serie di parametri economici, che permettono di analizzarne la sostenibilità economica a breve, medio e lungo termine, conferendo così allo specialista una visione completa del processo sotto esame (Michael Z. Hauschild et al., 2018).

1.4 social Life Cycle Assessment

Una nuova tipologia di analisi che è stata inclusa nel concetto di Life Cycle Thinking è la *social Life Cycle Assessment*. A partire dagli anni '60 infatti si è introdotto il concetto di

sostenibilità, definito come la necessità di soddisfare le esigenze umane senza compromettere le generazioni future e, a questo scopo, sono nate le metodologie LCA e LCC precedentemente descritte. Tuttavia, oltre alle problematiche ambientali ed economiche, il concetto di sostenibilità è fortemente legato anche all'impatto che il ciclo vita di un determinato prodotto ha sulla sfera sociale: sui lavoratori, sui consumatori e sulla comunità. A questo scopo, fin dai primi anni del nuovo millennio, è nata questa nuova tipologia di analisi che ha l'ambizione di analizzare, tramite una serie di fasi procedurali identiche a quelle spiegate per l'LCA, l'impatto sociale del ciclo vita di un prodotto. Ovviamente, essendo una tipologia di analisi ancora "giovane", non è ancora disponibile una letteratura che permetta una standardizzazione consolidata delle procedure, ma si può parlare solo di suggerimenti sugli step metodologici da seguire. Attualmente il primo passo verso una standardizzazione consolidata del metodo è stato compiuto nel documento denominato "Guidelines to s-LCA" dell'UNEP-SETAC (Michael Z. Hauschild et al., 2018).

Perciò, per riassumere il concetto che sta alla base della sLCA, si può affermare che l'obiettivo dell'analisi sia quello di identificare i cambiamenti sociali causati da un prodotto o da un servizio, ma anche caratterizzarli, in modo da valutarne l'effetto sul benessere umano (Michael Z. Hauschild et al., 2018).

2. Valorizzazione della vinaccia piemontese

2.1 Lo scarto vitivinicolo come materia prima

Come si è precedentemente introdotto, il concetto di "bioraffineria" di seconda generazione promuove l'utilizzo di materia agricola di scarto per la produzione di prodotti ad alto valore aggiunto e di biocarburanti, sviluppando un'ottica di economia circolare, in cui ogni scarto di processo viene visto come materia prima. Perciò, la sfida chiave del nostro tempo, per attuare una vera transizione green dei processi, è sviluppare processi di recupero che siano sostenibili a livello ambientale, economico e sociale e che si basino sulle eccellenze del territorio considerato. In quest'ottica il Piemonte ha il dovere di far emergere le proprie eccellenze agricole, non solo per l'altissima qualità dei propri prodotti, ma anche per lo sviluppo di processi di bioraffinazione dagli scarti agricoli, ponendosi come trascinatore di uno sviluppo sostenibile per l'intera filiera italiana.

Per raggiungere questo obiettivo attualmente in letteratura si possono rinvenire numerosi articoli che presentano nuove tecnologie per il trattamento di materiale di scarto; tuttavia, per fornire una visione completa del processo sperimentale sotto esame, sarà fondamentale sviluppare l'impianto a livello pilota ed analizzarlo tramite il concetto di LCT. Questa tesi si pone quindi l'obiettivo di attuare la scalabilità industriale di un impianto sperimentale e di analizzarne la fattibilità tecnico-economica, ma, prima di far ciò, sarà importante introdurre le caratteristiche fondamentali della materia prima considerata e delle soluzioni tecniche analizzate.

2.1.1 Il vino e le vinacce in Piemonte

L'Unione Europea ha stabilito che, per mantenere un'alta qualità nella produzione del vino, l'unica tipologia di uva che si può utilizzare è quella proveniente dalla specie della *Vitis vinifera*, l'uva comunemente conosciuta. Essa si presenta come un arbusto rampicante molto

robusto che viene comunemente coltivato tra il trentesimo e il cinquantesimo parallelo negli emisferi settentrionale e meridionale e ad un'altitudine massima di mille metri.

La pianta presenta naturalmente una geometria irregolare molto sviluppata in lunghezza, mentre, nel caso di coltivazione, si può andare a modularne il portamento in base alla tecnica di potatura (Chiara Samori et al., 2017; Stefano Castriola, 2020).

I frutti sono bacche chiamate *acini*, raggruppati in una struttura definita *grappolo*, che possono assumere una molteplice varietà di forme, dalla classica forma sferica ad una forma più allungata cilindrica o arcuata, mentre il colore dell'acino varia molto in base alla tipologia di vite e alla fase di maturazione considerata (Chiara Samori et al., 2017).

La *Vitis vinifera* è inoltre una pianta caducifoglie che normalmente presenta germogliamento nel periodo primaverile e, soprattutto in questo periodo, la qualità dell'uva prodotta è influenzata da una serie di fattori, tra cui la genetica della pianta, il clima, la tipologia di suolo e la gestione della coltivazione. Per aumentare la qualità del prodotto i coltivatori intervengono principalmente su questi ultimi due fattori, in cui particolare importanza riveste la gestione della potatura. La gestione della chioma vegetativa, infatti, influisce in modo chiave sul microclima creato nell'intorno del frutto, aumentandone ad esempio la presenza di composti chimici quali zuccheri, polifenoli e acidi organici (Chiara Samori et al., 2017; Jansen Moreira Silveira et al., 2023).

L'uva è uno dei principali prodotti agricoli a livello globale con una produzione annua di circa 74 milioni di tonnellate nel 2014, rimasta sostanzialmente invariata nel 2021, e, grazie all'elevata percentuale edibile, all'elevato apporto tecnologico nella produzione e all'elevato valore commerciale, detiene il primato di frutto più prodotto al mondo (FAOSTAT, 2021; FAO-OIV FOCUS, 2016).

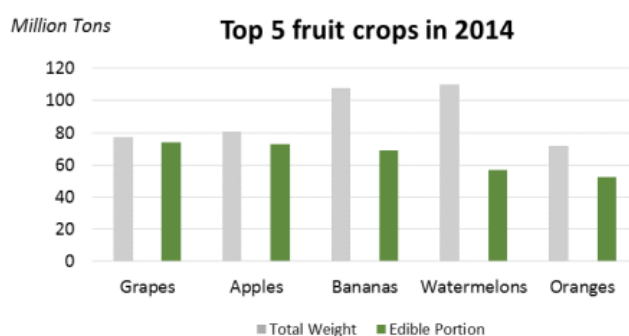


Figura 2.1: Produzione annuale di uva - anno 2014 (FAO-OIV FOCUS, 2016)

Secondo le statistiche fornite dalla *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) la produzione di uva dei paesi dell'Unione Europea nel 2021 è stata di circa 24 milioni di tonnellate, con un consumo di suolo pari a 3 milioni di superficie agraria, in cui una singola unità di superficie agraria è pari a 10000 m² (FAOSTAT, 2021).

L'Italia, grazie alle sue caratteristiche geografiche e climatiche uniche, si identifica come uno dei principali produttori mondiali con una produzione annuale di 8 milioni di tonnellate, ovvero il 33% della produzione mondiale, e il Piemonte, secondo i dati ISTAT del 2021 (ISTAT, 2021), contribuisce a questa percentuale con una produzione di 3.551 milioni di quintali di uva annui.

Successivamente, della portata totale di uva prodotta, si utilizza circa l'80% per la produzione di vino, mentre la parte rimanente viene impiegata per la produzione di prodotti secondari, tra cui l'uvetta, le marmellate e il succo d'uva (Manuel Pinelo et al., 2006).

Il vino è infatti una bevanda prodotta tramite la fermentazione alcolica, parziale o completa, di uva fresca, pigiata o di mostro d'uva, con una gradazione alcolica che generalmente si assesta sul 8.5% in volume. In base poi alle condizioni climatiche, alla tipologia di terreno, alla tipologia di vitigno e alle differenti tradizioni di coltura si considera una gradazione alcolica minima del 7% in volume (OIV, 2021).

Analizzando più nello specifico le caratteristiche organolettiche del vino, lo si può classificare in base alla presenza di zucchero in proporzione alla gradazione alcolica (OIV, 2021):

- *Vino secco*: quando si ha un contenuto massimo di zucchero di 4 g/L o di 9 g/L quando il contenuto di acidità, espresso in massa di acido tartarico per litro, è al massimo di 2 g/L inferiore al contenuto zuccherino.
- *Vino mediamente secco*: quando si ha un contenuto di zucchero superiore al caso precedente, ma inferiore a 12 g/L, o di 18 g/L quando il contenuto di acidità è al massimo di 10 g/L inferiore al contenuto zuccherino.
- *Vino semi-dolce*: quando si ha un contenuto di zucchero superiore al caso precedente, ma inferiore a 45 g/L.
- *Vino dolce*: quando si ha un contenuto zuccherino superiore a 45 g/L.

Un'altra caratteristica identificativa del vino è il grado di frizzantezza dettato dalla differente presenza di anidride carbonica nella sua composizione. Possiamo distinguere facilmente un vino *fermo*, caratterizzato da un contenuto massimo di 4 g/L a 20°C di anidride carbonica, da un vino *frizzante*, nel quale la quantità di anidride carbonica varia tra 3 e 5 g/L a 20°C (OIV, 2021).

Poiché il vino è una delle bevande più antiche, è molto complicato risalire con precisione alle sue origini, ma si può supporre che sia stato scoperto per caso tramite la naturale fermentazione alcolica dell'uva in vasca. Le prime testimonianze della produzione di uva e di una bevanda alcolica simile al vino risalgono al periodo storico compreso tra il 10000 e il 5000 a.C. nelle zone del Medio Oriente, tra Turchia e Iran. La coltivazione dell'uva si è infatti diffusa dalla Mesopotamia al resto del mondo, passando per Egitto e Grecia e successivamente raggiungendo le coste mediterranee di Italia e Spagna. In Italia, ad esempio, si hanno testimonianze di coltivazioni di uva da parte degli Etruschi già nel X secolo a.C. Successivamente, con l'Impero Romano e più recentemente con la scoperta dell'America, il vino venne esportato in tutto il mondo: attualmente sono presenti sul mercato diversi produttori mondiali emergenti, tra cui Argentina, Australia e Stati Uniti (Stefano Castriola, 2020).

È molto interessante notare, tramite i grafici seguenti, come la produzione mondiale di vino sia rimasta pressoché stabile dal 1961 al 2014, sebbene la popolazione mondiale sia passata da 3 a 7,2 miliardi di persone, dato che le nazioni a più alta crescita demografica sono state quelle senza una tradizione consolidata del consumo del vino (Stefano Castriola, 2020).

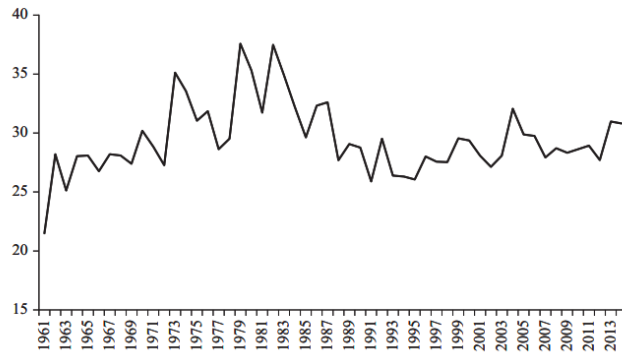


Figura 2.2: Produzione mondiale di vino dal 1961 al 2014 (Stefano Castriola, 2020)

Il processo produttivo del vino genera una notevole quantità di scarto, definito “vinacce”, ossia il residuo della spremitura delle uve, che può essere stimato pari a circa il 13% in peso dell’uva utilizzata (António Graça et al., 2018). Perciò, secondo questi dati e conoscendo la quantità di uva prodotta in Piemonte annualmente, si può stimare una portata annuale di vinacce di circa:

$$\text{Vinaccia annuale in Piemonte} = 3551000 \frac{q}{y} \cdot 0.8 \cdot 0.13 = 369304 \frac{q}{y} = 36930.4 \frac{t}{y}$$

2.1.2 Costituzione della vinaccia

Come si è precedentemente detto, il processo lavorativo dell’uva genera una serie di scarti, tra i quali si osservano le vinacce, i vinaccioli (semi dell’acino d’uva), i raspi e le foglie, che generano una problematica di smaltimento per il settore produttivo (Chiara Samori et al., 2017).

Di questi componenti le vinacce rappresentano circa il 62% dello scarto totale e sono inoltre caratterizzate da un’elevata presenza di acqua. Analizzando quindi le vinacce su base secca si può osservarne la composizione: 51% di buccia, 47% di semi e 2% di raspi; ovviamente la composizione varierà fortemente con la tipologia di vino e in base al processo di produzione considerato (Nansen Zhang et al., 2017).

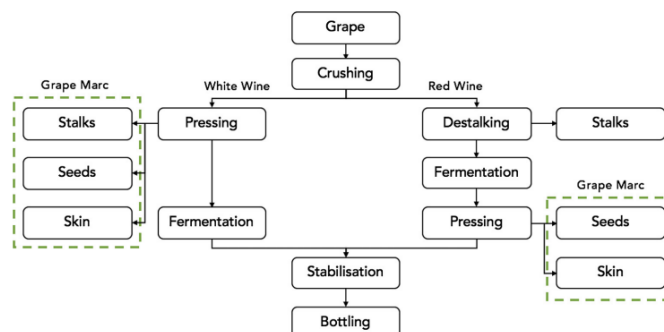


Figura 2.3: Diagramma semplificato del processo produttivo del vino (Nansen Zhang et al., 2017)

Nel seguente studio si è assunta una percentuale di acqua nella portata in ingresso del 60% (Nansen Zhang et al., 2017) con la seguente composizione elementare su base secca:

Tabella 2.1: *Composizione vinaccia espressa in percentuale (%) su base secca*

Composizione vinaccia su base secca (Nansen Zhang et al., 2017)	
C	52.91
H	5.93
O	30.41
N	1.86
Cl	0.05
S	0.03
Ceneri	8.81

La vinaccia complessivamente ha potenziale per essere una biomassa competitiva nella produzione di biocarburanti data l'elevata presenza di monosaccaridi solubili (glucosio e fruttosio) e di polisaccaridi complessi (pectine, eteroxilani, xiloglucani e cellulosa). I monosaccaridi solubili, infatti, possono essere convertiti mediante un processo di fermentazione in etanolo, con la possibilità di aumentarne la resa utilizzando un pretrattamento acido e una seguente idrolisi enzimatica (Chiara Samorì et al., 2017).

Se si paragona però la vinaccia con altri combustibili idrocarburici utilizzati per processi di combustione e pirolisi si nota che, a causa di una minor presenza di carbonio e ad un maggior grado di umidità nella composizione, essa è caratterizzata da un potere calorifico minore che ne aumenta di conseguenza l'emissione di CO₂ per kWh generato. Tuttavia, questi svantaggi sono parzialmente compensati dal basso costo della vinaccia e dal fatto che essa sia una materia organica rinnovabile (Nansen Zhang et al., 2017).

Tradizionalmente la vinaccia si utilizza per la produzione di una serie di distillati a base alcolica, come la grappa, ma il principale problema di questi processi è la gestione dello stoccaggio, dato che spesso in questa fase il materiale di scarto subisce processi di fermentazione spontanei che portano alla produzione di composti indesiderati (Charalambos Fotakis et al., 2012; Nansen Zhang et al., 2017; Esther Gomez-Mejía et al., 2022).

Attualmente, invece, uno dei processi di trattamento più utilizzato è il compostaggio che garantisce un processo economico per la produzione di un ammendante, tramite una decomposizione biologica aerobica e una successiva stabilizzazione del substrato organico. Questo processo in letteratura è ampiamente studiato e permette di trattare le vinacce ottenendo un fertilizzante utile, ma con basso valore economico (Nansen Zhang et al., 2017; E. Bertran et al., 2004).

Negli ultimi anni, seguendo un'ottica di economia circolare, in cui prima si recupera materia e solo successivamente energia, è notevolmente aumentato l'interesse verso specifici composti ad alto valore aggiunto che possono essere ricavati dai sottoprodotti dell'industria vitivinicola. Le stesse aziende, per attuare un decremento del volume di rifiuti e un contenimento dei costi di smaltimento, stanno investendo nella ricerca per il trattamento delle vinacce esauste, ricche di composti bioattivi (polifenoli, proteine e acidi grassi polinsaturi) attualmente utilizzati in diverse filiere, come la cosmetica e la nutraceutica (Chiara Samorì et al., 2017).

2.1.3 Caratteristiche dei polifenoli

Negli ultimi anni è cresciuto notevolmente l'interesse dei consumatori verso tutti quei prodotti alimentari chiamati "super alimenti" che sono caratterizzati da un elevato contenuto di

polifenoli. L'interesse della comunità scientifica verso questi prodotti è dettato dalle loro elevate proprietà antiossidanti e il loro probabile ruolo nella prevenzione di malattie come il cancro, le patologie cardiovascolari e quelle neurodegenerative, grazie alla mitigazione dello stress ossidativo. Per questo negli ultimi anni la comunità europea ha condotto numerose indagini sul tasso di consumo di questi composti nell'alimentazione quotidiana, studiando con particolare interesse quali composti sono inclusi nella definizione di "polifenoli", quali sono presenti nella nostra dieta e quali tra questi presentano un effetto più efficace sulle malattie (Esther Gomez-Mejía et al., 2022; Galanakis Charis M., 2018; Jacqueline Barona et al., 2012). Chimicamente con il termine "polifenoli" si intende una vasta gamma di biomolecole naturali caratterizzate da una struttura fenolica, ma, nel corso della storia, il significato di questa parola è stato alquanto confuso, a causa dell'elevato numero di composti inclusi nella definizione. Grazie al forte aumento a partire dagli Anni Cinquanta del secolo scorso della ricerca scientifica riguardo a questi composti, due scienziati di nome Bate-Smith e Swain proposero nel 1962 una prima definizione del concetto di "polifenoli naturali" come un insieme di composti fenolici vegetali, solubili in acqua, con dimensione compresa tra i 500 e i 3000 Da e con la presenza di proprietà particolari, tra cui la capacità di precipitare proteine dalla soluzione. Successivamente questa definizione è stata più volte perfezionata, mantenendo però sempre il concetto di base espresso dalla precedente descrizione (Galanakis Charis M., 2018).

Sebbene questi composti in generale siano identificati da una struttura polifenolica, ossia con la presenza di diversi gruppi idrossilici su anelli aromatici, si possono identificare diversi sottogruppi di polifenoli. La diversità strutturale e l'ampio range di biomolecole incluse nella definizione hanno quindi reso necessaria una classificazione espressa dalla figura 2.4 seguente (Galanakis Charis M., 2018; Vasil Georgiev et al., 2014):

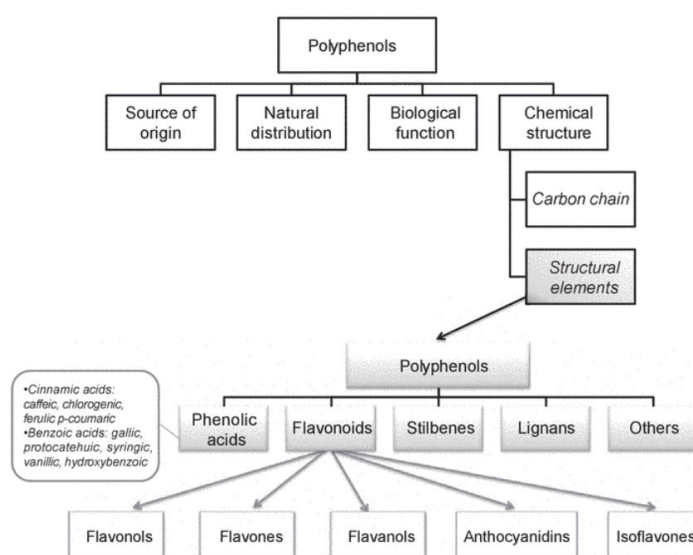


Figura 2.4: Classificazione dei polifenoli (Galanakis Charis M., 2018)

La classificazione comunemente utilizzata è quella basata sulla struttura chimica, ossia in base alla lunghezza della catena carboniosa o in base al numero di anelli fenolici e agli elementi strutturali che legano questi anelli internamente alla molecola. In accordo con la seconda tipologia di classificazione si possono distinguere cinque famiglie di polifenoli: acidi fenolici,

flavonoidi, stilbeni, lignani e altri. Si possono perciò analizzare più nel dettaglio le seguenti categorie (Galanakis Charis M., 2018; Vasil Georgiev et al., 2014):

- *Flavonoidi*: sono i composti maggiormente studiati dalla comunità scientifica oltre a quelli più presenti negli alimenti vegetali. All'interno di questa classe ci sono numerose variazioni strutturali, di circa 8000 tipologie note di composti, in base al grado di idrogenazione e idrossilazione degli anelli aromatici. Si accumulano prevalentemente nei vinaccioli e nella buccia dell'acino e la concentrazione dei flavonoidi aumenta notevolmente con il susseguirsi della maturazione. Le principali tipologie di flavonoidi presenti nell'uva sono la (+)-catechina, l'(-)-epicatechina e le proantocianidine, con una concentrazione che varia molto anche in base alla tipologia di uva considerata; per l'uva rossa i flavonoidi costituiscono il 13-30% dei polifenoli totali, mentre nel vino bianco il 46-56% (Galanakis Charis M., 2018; Vasil Georgiev et al., 2014).

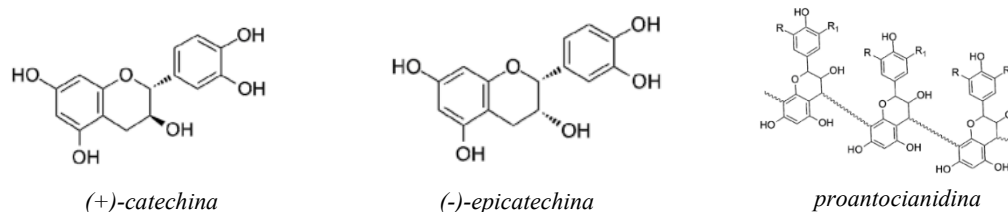


Figura 2.5: Principali flavonoidi presenti nelle vinacce
(Vasil Georgiev et al., 2014)

- *Acidi fenolici*: in questi composti si possono identificare acidi benzoici (sette atomi di carbonio), acidi cinnamici (nove atomi di carbonio) e i loro derivati che sono caratterizzati dalla presenza di un anello benzenico, un gruppo carbossilico e uno o più gruppi idrossilici. L'aumento in numero di gruppi idrossilici generalmente favorisce l'attività antiossidante dell'acido fenolico e, per questo motivo, l'acido cinnamico ha un'attività più elevata rispetto all'acido benzoico (Galanakis Charis M., 2018).
- *Lignani*: sono costituiti da due unità di fenilpropano e le maggiori concentrazioni di questi composti si trovano nella materia vegetale, come i semi di lino (Galanakis Charis M., 2018).
- *Stilbeni*: sono i composti meno presenti nella classica dieta umana e si trovano in basse quantità nel vino rosso (Galanakis Charis M., 2018).

Le proprietà fisiche e chimiche dei polifenoli dipendono fortemente dalle caratteristiche strutturali e funzionali delle differenti molecole, presentando gradi di solubilità in soluzioni acquose crescenti all'aumentare dei gruppi idrossilici presenti nella struttura interna e diversi gradi di assorbimento della luce ultravioletta (Galanakis Charis M., 2018).

Con il termine “bioattivo” si va a identificare tutta quella vasta gamma di composti biologicamente attivi che generano effetti benefici sulla salute degli esseri viventi. Nella dieta classica degli esempi comuni sono le vitamine e i carotenoidi (Chiara Samorì et al., 2017).

I polifenoli fanno parte di questa categoria di composti grazie ai loro differenti effetti benefici sulla salute umana; attualmente, infatti, è presente sul mercato una vasta gamma di prodotti con alti valori nutraceutici derivanti dai prodotti di scarto delle vinacce.

Grazie, infatti, al forte aumento di questo mercato si prevede che la dimensione globale del commercio dei polifenoli cresca del 7,4% dal 2023 al 2030 rispetto ai 1,68 miliardi di dollari stimati nel 2022. In quest'ultimo anno circa il 45,6% del fatturato totale deriva dalla regione

dell'Asia del Pacifico, grazie al forte aumento demografico e al forte aumento del pil pro-capite dei principali paesi (Cina, Australia e Giappone) (Grand View Research, 2021).

3. Generalità degli impianti di estrazione

3.1 Processi di estrazione

La fase principale del processo considerato è l'estrazione dei composti ad alto valore aggiunto dalla biomassa di interesse. Il recupero di composti da matrice solida tramite tecniche estrattive solido-liquido (lisciviazione) è ampiamente studiato a livello teorico, essendo uno dei processi più diffusi nell'industria chimica. Tramite l'utilizzo di un solvente liquido, ad esempio una miscela polare etanolo-acqua, affine al materiale solido da estrarre, avviene il passaggio del componente di interesse dalla fase solida alla fase liquida. Il processo può essere ulteriormente ottimizzato fornendo calore al processo; tuttavia, il calore non dovrà eccedere un certo valore per non deteriorare il substrato (Gaia Mazzanti et al., 2022).

Perciò le tecniche estrattive forniscono una forte base di innovazione nell'ambito del recupero di composti ad alto valore aggiunto da materia rinnovabile, come la biomassa, evitando di produrre gli stessi composti utilizzando fonti fossili.

Le problematiche di questi processi sono tuttora il raggiungimento di rese adeguate che possano rendere queste soluzioni sostenibili a livello ambientale ed economico.

In quest'ottica, grazie ad una spinta ambientalistica dell'industria chimica, si sono sviluppate nuove tecniche estrattive che implementano soluzioni innovative, utilizzando solventi green e processi di ottimizzazione del trasferimento di calore. Si vanno a proporre alcuni esempi di queste tecnologie (Gaia Mazzanti et al., 2022):

- *Ultrasuoni*: è un classico processo di lisciviazione in cui si utilizza un riscaldamento tramite ultrasuoni che ottimizza il contatto tra matrice e solvente promuovendo l'estrazione del composto desiderato.
- *Fluidi supercritici*: si utilizzano come solventi per il processo estrattivo fluidi a temperature e pressioni superiori al punto critico, ottenendo una diminuzione del solvente totale utilizzato per il raggiungimento dello stesso risultato.
- *Microonde*: è un ulteriore processo di ottimizzazione del trasferimento di calore tramite l'utilizzo di onde elettromagnetiche con frequenze comprese tra 0.3-300 GHz. Questa tecnica permette di ottenere rese maggiori tramite l'utilizzo di un riscaldamento molto più omogeneo, che evita hot-spot e quindi gradienti di temperatura. Si ottiene anche una diminuzione nell'utilizzo di solvente e una decrescita dello scarto prodotto.
- *Capo elettrico pulsato*: il sistema solido-liquido viene irradiato tramite un campo elettrico pulsato prodotto da un generatore. La creazione di un potenziale elettrico associato al campo elettrico promuove la degradazione della membrana cellulare della matrice ottimizzando il rilascio in soluzione del composto target.

Ovviamente queste sono solo alcune delle tecniche presenti in letteratura e ognuna presenta un indice TRL (Technology Readiness Level) differente, che le rende diversamente applicabili nella realtà. In questa tesi si è deciso di analizzare e comparare il processo estrattivo convenzionale con l'utilizzo di ultrasuoni, scegliendo la tecnica di ottimizzazione a ultrasuoni per l'elevata ricerca bibliografica presente in letteratura e per il buon TRL della tecnologia.

3.1.1 Estrazione convenzionale

Come precedentemente accennato il processo estrattivo solido-liquido, chiamato lisciviazione, avviene ponendo a contatto la matrice solida con un solvente che ha la capacità di estrarre il composto di interesse sotto particolari condizioni di processo (temperatura e pressione). Per massimizzare la resa del processo si andranno quindi ad attuare una serie di stadi di estrazione, ovvero fasi in cui si ha l'intimo contatto tra solvente e matrice con la promozione dell'estrazione del soluto.

Le fasi presenti nel processo sono quindi tre: la matrice solida, il composto di interesse da estrarre chiamato soluto e il solvente, ovvero la miscela liquida, generalmente polare, che promuove l'estrazione. La resa di estrazione dipenderà ovviamente da una molteplicità di parametri, come la concentrazione di soluto nella matrice in ingresso, la qualità e la quantità di solvente, la temperatura e il tempo di contatto tra solido e liquido (Gaia Mazzanti et al., 2022; Di Pietro S., 1998).

Successivamente al processo estrattivo otterremo una soluzione liquida composta dal solvente e dal soluto e una matrice solida bagnata esausta, in cui il liquido presente, se si considera un processo ideale di estrazione, ha la stessa composizione della soluzione liquida. L'assunzione di idealità è una semplificazione teorica, perciò, durante il reale dimensionamento del processo, si dovrà considerare una certa efficienza (η) con un valore compreso tra 0 e 1. Quindi, dopo aver calcolato il numero di stadi ideali di estrazione necessari al raggiungimento della resa estrattiva desiderata, si dovrà dividere quel numero per l'efficienza, in modo da ottenere il numero di stadi reali.

Si può quindi affermare che la lisciviazione è un processo estrattivo a stadi multipli e questi stadi possono essere organizzati in due modalità: *equicorrente*, in cui la matrice solida viene posta a contatto con solvente fresco in ogni stadio, e *controcorrente*, in cui matrice e solvente viaggiano in direzioni opposte (Gaia Mazzanti et al., 2022; Di Pietro S., 1998).

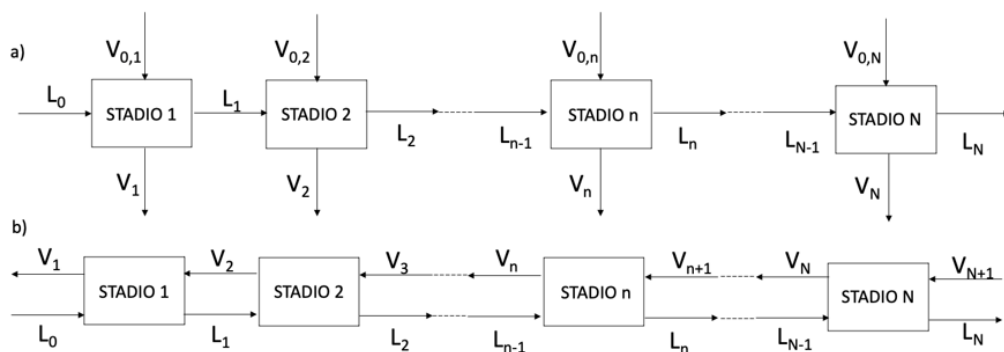


Figura 3.1: schema a blocchi del processo equicorrente (a) e controcorrente (b). (Gaia Mazzanti et al., 2022)

3.1.2 Estrazione ad ultrasuoni

L'estrazione ad ultrasuoni utilizza i fenomeni di cavitazione, ossia la formazione, la crescita e infine il collasso di cavità di vapore molto piccole nel bulk del liquido, per la promozione del processo estrattivo. L'implosione delle cavità genera dei micro-getti di liquido che raggiungono localmente temperature e pressioni molto elevate, instaurando una macro-turbolenza e una micro-miscelazione e ottenendo quindi rese più elevate. Dagli studi empirici si è notato che il processo ad ultrasuoni non agisce secondo un singolo meccanismo, ma consiste nella combinazione di più fenomeni indipendenti: frammentazione, erosione, capillarità, detesturazione e sonoporazione (Farid Chemat et al., 2016).

- *Frammentazione*: da diversi studi si può notare come nei primi minuti di sonificazione avvenga la frammentazione della matrice che provoca la riduzione della granulometria delle particelle solide e, di conseguenza, ottimizza il processo estrattivo. Una diretta conseguenza della riduzione della dimensione delle particelle è l'aumento della superficie specifica di solido, con conseguente aumento del trasferimento di massa e quindi maggior velocità di estrazione. Questo meccanismo può essere causato dalla collisione tra le particelle della matrice e le onde d'urto create dal collasso delle bolle di cavitazione presenti nel liquido.
- *Erosione*: l'esplosione delle bolle a contatto con la superficie della matrice provoca l'erosione superficiale del substrato e ciò promuove l'accessibilità del solvente acquoso alla zona interna del solido, aumentandone di conseguenza la resa estrattiva.
- *Capillarità ultrasonica*: tramite l'utilizzo di ultrasuoni si riesce ad aumentare la profondità e la velocità di penetrazione del solvente nei pori interni della matrice. Questo fenomeno è stato confermato dalla misura di una serie di variabili, tra cui l'aumento del 70% della ritenzione idrica del materiale solido e l'aumento del circa 5% dell'indice di gonfiore, che promuovono il meccanismo di diffusione del soluto.
- *Detutturazione*: l'estrazione a ultrasuoni, a differenza di quella convenzionale, distrugge le strutture cellulari dopo circa un'ora di trattamento e questo potrebbe indicare un miglior grado di contatto tra solvente e soluto.
- *Sonoporazione*: a causa dell'impatto delle onde sonore si creano dei pori sulla membrana cellulare delle particelle solide promuovendo il rilascio del contenuto cellulare all'interno del solvente e conseguentemente l'estrazione.

Le bolle di cavitazione prodotte dal trattamento possono essere *stabili*, ossia bolle che oscillano intorno alla loro dimensione di equilibrio in modo non lineare, o *transitorie*, bolle che esistono al massimo per pochi cicli acustici nei quali si espandono in modo molto veloce fino a raddoppiare la loro dimensione per poi collassare violentemente. In entrambi i casi il collasso delle bolle di cavitazione, che avviene al raggiungimento di una certa dimensione critica, è un fenomeno altamente energetico che crea hot-spot puntuali (a circa 5000K e 50-1000 atm) capaci di aumentare notevolmente la reattività del mezzo (Farid Chemat et al., 2016).

Proprietà come la frequenza, la lunghezza d'onda e l'ampiezza dell'onda acustica influenzano notevolmente il fenomeno di cavitazione e quindi l'estrazione, mentre il dimensionamento e il design del reattore influenzano il processo nella sua globalità.

L'ultrasuono ad alta potenza può essere applicato a livello sperimentale utilizzando due differenti dispositivi: un bagno a ultrasuoni o un dispositivo contenente una sonda. Il bagno a ultrasuoni è il dispositivo più comune, è un sistema economico che può trattare più campioni contemporaneamente ed è costituito da una vasca in acciaio inox contenente uno o più trasduttori (generalmente piezoelettrici). Tuttavia, l'elevata presenza di liquido nella vasca attenua l'intensità della frequenza assorbita dal campione.

I sistemi ad ultrasuoni a sonde sono invece generalmente utilizzati per le applicazioni estrattive data la maggior intensità ultrasonica emessa. Questo sistema, infatti, utilizza un trasduttore legato ad una sonda immersa direttamente nel reattore, promuovendo in questo modo un'erogazione diretta della potenza ultrasonica minimizzando le perdite (Farid Chemat et al., 2016).

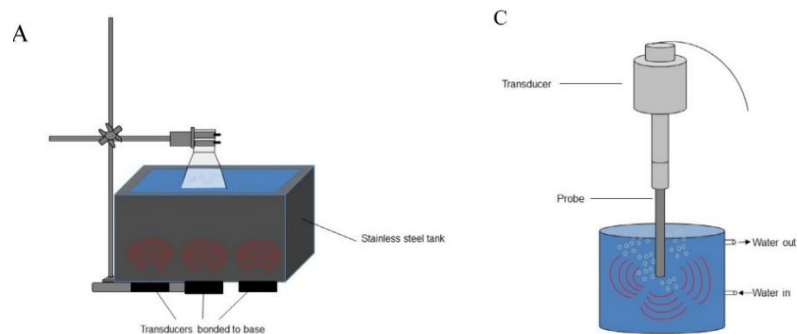


Figura 3.2: Bagno ad ultrasuoni (A) e sonda ad ultrasuoni (C). (Farid Chemat et al., 2016)

3.2 Processo di pirolisi

Lo scarto solido rimanente dalla fase di estrazione, in un’ottica di economia circolare, può essere ulteriormente trattato attraverso una serie di processi con lo scopo di produrre composti utili, dal modesto valore economico. Il prodotto di interesse per questa tesi è il “biochar”, ossia un composto carbonioso solido, a basso costo, ottenuto dalla decomposizione termica della biomassa per carbonizzazione, pirolisi o gassificazione. Il processo in presenza limitata di ossigeno garantisce una stabilità al biochar che lo rende resistente alla degradazione nel tempo, mentre la qualità del biochar dipende fortemente dalla biomassa in ingresso al processo e dalle condizioni operative considerate. Il biochar può essere utilizzato per diverse applicazioni ambientali: riduce gli apporti di fertilizzanti chimici nella coltivazione fungendo da ammendante, migliora la qualità del terreno e dell’acqua adsorbendo i contaminanti, mitiga le emissioni di gas serra associate al trattamento degli scarti agricoli e può essere utilizzato come combustibile grazie al buon potere calorifico (Ana F. Ferreira et al., 2021).

Il processo di *pirolisi lenta* permette di convertire in modo efficiente la biomassa in biochar, in un liquido chiamato bio-olio e in syngas, ossia un gas contenente una porzione di metano che può, quindi, essere utilizzato come combustibile. In questo processo di trattamento termico, in atmosfera contenente azoto (carenza di ossigeno), si attua la decomposizione della cellulosa ad una temperatura di circa 240-350°C, dell’emicellulosa a circa 220-315°C e infine della lignina ad una temperatura minore di 585°C (Cristina del Pozo et al., 2022).

Dagli articoli presenti in letteratura si nota come, assumendo un solido in ingresso al processo di pirolisi con una concentrazione di umidità al circa 10%wt, le condizioni ottimali di processo siano una temperatura di circa 500°C e circa 1h di trattamento. Si avrà, quindi, una prima essiccazione dello scarto solido per raggiungere la concentrazione desiderata di umidità e successivamente l’ingresso nel pirolizzatore (Ana F. Ferreira et al., 2021; Nansen Zhang et al., 2017). In queste condizioni operative, con particelle solide di diametro compreso tra 0.6-1 mm e considerando come biomassa in ingresso la vinaccia, si assumono le seguenti rese:

Tabella 3.1: rese del processo di pirolisi (J. M. Encinar et al., 1996)

(J. M. Encinar et al., 1996)	resa		potere calorifico	
biochar	44.3	%wt	28.08	MJ/kg_biochar
bio-oil	26.9	%wt		
syngas	28.8	%wt	0.35	MJ/kg_bagassa

Comparando, inoltre, a livello economico il processo di pirolisi col processo di combustione, come evidenziato dalla figura 3.3, si nota che il ritorno d'investimento, misurato tramite il ROI (“Return on Investment”), dipenda fortemente dalla dimensione dell'azienda e dal processo di trattamento considerato. Infatti, all'aumentare della dimensione dell'azienda, si ha una diminuzione dell'influenza dei costi capitali rispetto ai guadagni operativi e, per un processo di pirolisi, si ottiene un ROI positivo del +13% trattando una portata minima di vinaccia di 10000-20000 tonnellate, mentre per il processo di combustione si rimane a valori di ROI negativi anche per portate elevate. Il risultato ricavato per il processo di pirolisi sarà però soggetto a numerose fluttuazioni dovute al prezzo di mercato dei prodotti, causando una forte volatilità nel tempo del ROI ottenuto.

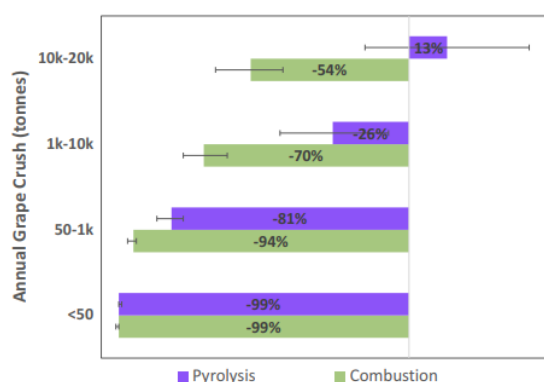


Figura 3.3: ROI per combustione e pirolisi a diverse dimensioni di cantina (Nansen Zhang et al., 2017)

4. LCA: definizione degli obiettivi e inventario

4.1 Goal and scope

L'obiettivo del seguente studio LCA è la valutazione dell'impatto ambientale del processo di trattamento di vinaccia di scarto con l'obiettivo di produrre composti ad alto valore aggiunto (polifenoli) e, successivamente, trattare lo scarto solido proveniente dal processo estrattivo tramite pirolisi. La vinaccia è uno degli scarti agricoli maggiormente prodotto in Piemonte, perciò, in un'ottica di economia circolare, è fondamentale sviluppare ed analizzare processi competitivi a livello ambientale ed economico. Si è quindi attuata la scalabilità industriale di un processo sperimentale per valutarne l'effettiva sostenibilità ambientale anche a scale dimensionali maggiori e per identificare le fasi di processo maggiormente impattanti.

Come *unità funzionale* del processo si è considerata la portata di vinacce totali prodotte in Piemonte annualmente che, come precedentemente citato, può essere calcolata conoscendo la produzione annuale di uva in Piemonte, la percentuale di uva utilizzata per la produzione di vino e la percentuale di scarto dell'uva utilizzata (António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006). Da questi dati si riscontra la seguente portata annuale di vinaccia:

$$\begin{aligned}
 \text{Vinaccia prodotta in Piemonte nel 2021} &= 3551000 \frac{q}{y} \cdot 0.8 \cdot 0.13 = 369304 \frac{q}{y} \\
 &= 36930.4 \frac{t}{y}
 \end{aligned}$$

In questo studio si è deciso applicare la metodologia LCA tramite l'utilizzo del database Ecoinvent 3.8 con il software SimaPro 9.4.0.2, applicando un'analisi al MidPoint utilizzando il metodo gerarchico ReCiPe 2016.

4.2 Inventario

Come si è precedentemente descritto, la fase di analisi chiamata "inventario" consiste nella definizione delle differenti unità funzionali del processo considerato, in cui, per ogni unità, si dovranno specificare i flussi di materia e di energia entranti ed uscenti, con particolare attenzione al rispetto delle equazioni di bilancio. Tramite un diagramma a blocchi si andranno perciò a definire le fasi costituenti il processo d'interesse per attuare, successivamente, una definizione delle correnti in termini qualitativi e quantitativi.

4.2.1 Generalità dell'impianto considerato

Dopo aver attuato un attento studio bibliografico si è deciso di approfondire tramite un'analisi LCA il processo di estrazione dei polifenoli descritto dall'articolo (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020), con successivamente l'aggiunta dello step di pirolisi dello scarto. Si è optato per l'utilizzo di questo articolo dato l'elevato grado di dettaglio utilizzato nella descrizione delle fasi di processo e per l'elevata resa di estrazione del processo convenzionale e ad ultrasuoni. La problematica principale del processo è l'utilizzo di una miscela etanolo-acqua come solvente, essendo l'etanolo prodotto generalmente da combustibili fossili, ma, grazie all'elevato grado di recupero, si può mitigare l'impatto negativo a livello ambientale. Sebbene, inoltre, l'etanolo provochi le problematiche ambientali precedentemente citate, il suo utilizzo risulta fondamentale per massimizzare le rese estrattive.

Confronto rese					
	T (°C)	t (h)	solvente	estrazione	resa
(Carla Brazinha et al., 2014)	70	6	etanolo-acqua: 60-40 %wt	conv	3.21 (g _{GAE} /L)
(Carla Brazinha et al., 2014)	70	6	etanolo-acqua: 60-40 %wt + acido citrico	conv	3.96 (g _{GAE} /L)
(M. Corrales et al., 2007)	70	1	etanolo-acqua: 50-50 %wt	us	6.37 (g _{GAE} /100 g _{DM})
(M. Corrales et al., 2007)	70	1	etanolo-acqua: 50-50 %wt	conv	3.74 (g _{GAE} /100 g _{DM})
(Aarón de la Cerda-Carrasco et al., 2014)	20	1	metanolo-acqua: 80-20 %v + acetone-acqua: 80-20 %v	doppia conv	2.00 (g _{GAE} /100 g _{DM})
(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	50	0.5	etanolo-acqua: 57-43 %v	us	6.36 (g _{GAE} /100 g _{DM})
(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)	50	0.5	etanolo-acqua: 57-43 %v	conv	3.20 (g _{GAE} /100 g _{DM})

Tabella 4.1: Confronto tra le rese trovate in letteratura.

Si può descrivere l'impianto preso in esame tramite il Block Flow Diagram riportato in figura 4.1:

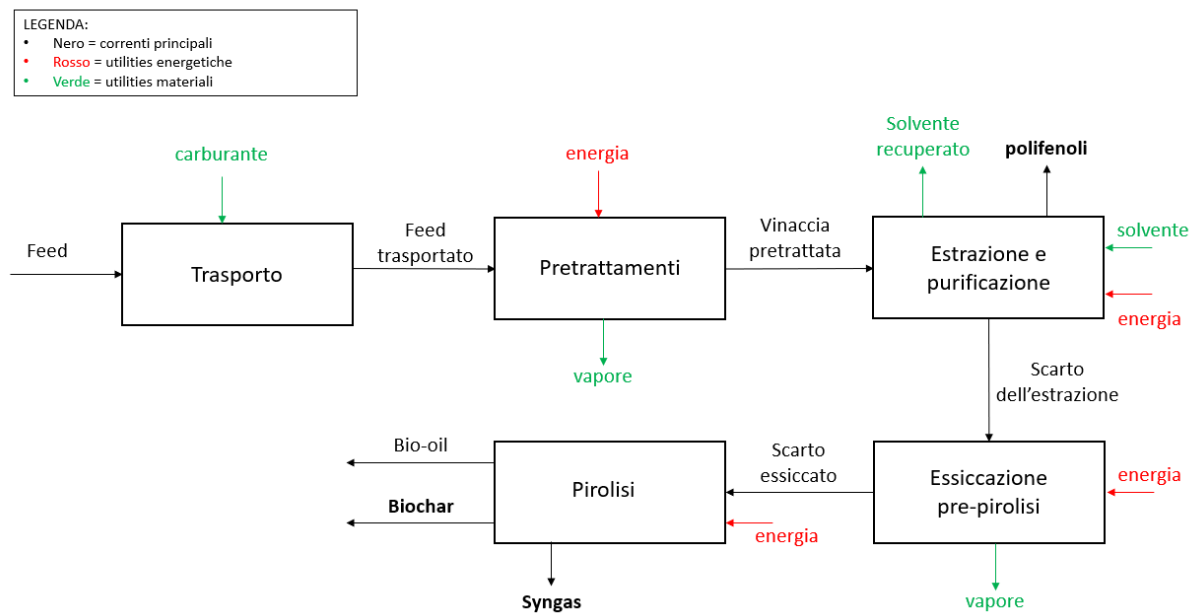


Figura 4.1: BFD del processo descritto da (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

Si possono ulteriormente descrivere i pretrattamenti subiti dalla biomassa in ingresso al processo tramite la figura 4.2:

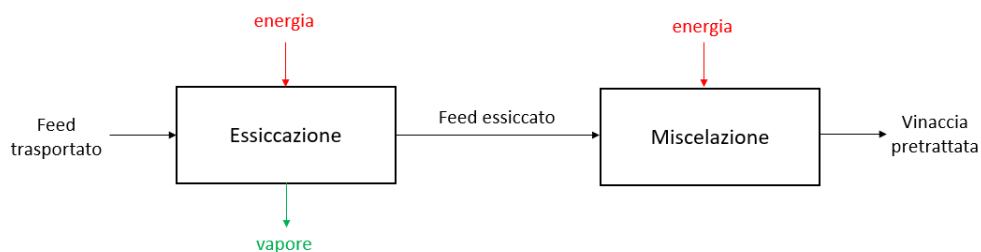


Figura 4.2: BFD dei pretrattamenti della vinaccia. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

4.2.2 Trasporto

Per quantificare l'impatto ambientale causato dal trasporto della vinaccia si considera un trasporto su strada tramite un camion euro6 che può trasportare da 7.5 a 16 tonnellate. Il parametro richiesto dal software SimaPro è il prodotto tra i chilometri percorsi e le tonnellate trasportate (kmt) perciò si calcola innanzitutto la distanza da percorrere per trasportare la vinaccia all'impianto.

La distanza è calcolata approssimando l'area totale della regione Piemonte, ossia 25387.07 km², ad un cerchio, per poi considerare la distanza pari al raggio di questo cerchio. Secondo le seguenti ipotesi si calcola la variabile desiderata:

$$distanza_{trasporto} = raggio_{cerchio} = \left(\frac{area_{piemonte}}{\pi} \right)^{0.5} = \left(\frac{25387.07 \text{ km}^2}{3.14} \right)^{0.5} = 90 \text{ km}$$

$$\text{trasporto} = 36930.4 \text{ ton} \cdot 90 \text{ km} = 3323736 \text{ kmt}$$

4.2.3 Essiccazione

La prima unità di processo consiste nell'essiccazione della vinaccia in ingresso. La vinaccia entrante è caratterizzata da una concentrazione di umidità del 60 %wt e da una composizione in base secca descritta dall'articolo (Nansen Zhang et al., 2017). Secondo i seguenti dati, riportati interamente nella sezione 2.1.2, si ricavano le seguenti composizioni e portate:

Composizione vinaccia (%wt) e portate in ingresso								
C	H	N	Cl	S	O	ceneri	H2O	TOT
21.164	2.372	0.744	0.02	0.012	12.164	3.524	60	100

Portata vinaccia in ingresso	36930.4	t/y
Portata solida in ingresso	14772.16	t/y
Portata di H2O in ingresso	22158.24	t/y

Tabella 4.2: Descrizione portata in ingresso al processo. (Nansen Zhang et al., 2017)

Dopo aver caratterizzato la portata in ingresso al processo si attua un'essiccazione termodinamica con lo scopo di raggiungere una concentrazione di umidità pari al 10.96 %wt. Si è inoltre supposto che il calore specifico della vinaccia sia uguale a quello dell'acqua. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ingresso} \cdot c_p \cdot \Delta T + \dot{m}_{evap} \cdot \lambda_{H2O}$$

Portata di H2O evaporata	20339.9	t/y
Calore necessario	57832569.9	MJ/y
ΔT	75	K
C_{pH2O}	4187	J/kg/K
λ_{H2O}	2272000	J/kg

Tabella 4.3: Calcolo del calore di evaporazione per raggiungere la concentrazione desiderata.

Infine, si è analizzata la portata uscente dal processo di essiccazione:

Portata post essiccazione	16590.48	t/y	Concentrazione solido	0.8904
Portata solida	14772.16	t/y	Concentrazione umidità	0.1096
Portata di H2O	1818.32	t/y		

Tabella 4.4: Descrizione portata post essiccazione. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

Si può quindi schematizzare la prima unità di processo secondo la figura 4.3:

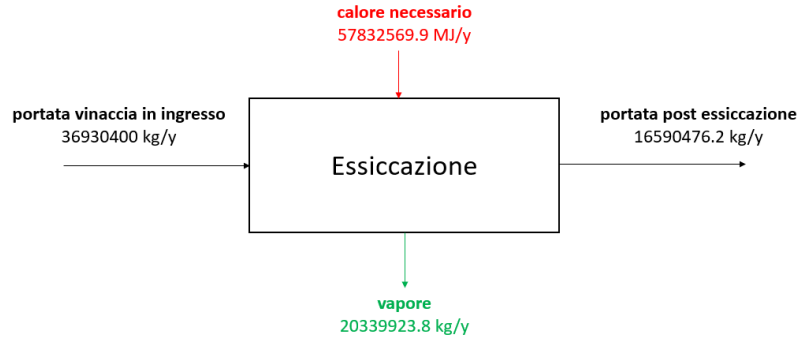


Figura 4.3: Descrizione della fase di essiccazione.

4.2.4 Miscelazione

La portata essiccata entrerà successivamente in un processo di miscelazione con lo scopo di diminuire la dimensione delle particelle solide ad un valore di circa 0.66 mm (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020).

In questa unità di processo non si ha quindi variazione delle portate massiche, ma solo un consumo di potenza elettrica dovuto alla miscelazione. Per il calcolo della potenza elettrica necessaria si è considerato un mulino a cono LIMING capace di trattare una portata massima di 45 t/h con una potenza elettrica massima di 160 kW (Directindustry, 2023), perciò, considerando un lavoro continuativo di 40 ore settimanali per le 52 settimane annuali, per trattare l'intera portata in ingresso, avremo le seguenti portate:

Portata post miscelazione	16590.48	t/y
Potenza elettrica	160	kW
Tempo di miscelazione	2080	h/y
Energia elettrica consumata	332800	kWy

Tabella 4.5: Descrizione unità di miscelazione (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

Questa unità di processo può quindi essere schematizzata tramite la figura 4.4:

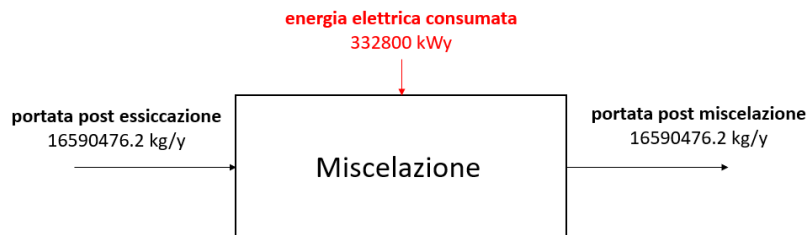


Figura 4.4: Descrizione della fase di miscelazione.

4.2.5 Estrazione convenzionale

Dopo aver attuato i pretrattamenti necessari alla vinaccia si procede con l'estrazione tramite l'utilizzo come solvente di una soluzione etanolo-acqua al 57-43 %vol. In questa tesi si analizzano due tipologie di estrazioni: l'estrazione convenzionale e l'estrazione ad ultrasuoni, in modo da compararne gli impatti ambientali ed economici.

Analizzando l'estrazione convenzionale, l'articolo (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020) specifica un trattamento di 5g di vinaccia per 60 min a 50°C con 250 mL di solvente, ottenendo una resa di 3.20 g_{GAE} su 100g di materia secca.

Secondo queste specifiche si procede con il dimensionamento dell'unità di processo utilizzando le seguenti equazioni:

$$\dot{V}_{solvente} = 250 \text{ mL} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{portata \text{ post miscelazione}}}{0.005 \text{ kg}} \right) \cdot \frac{1}{10^6} \frac{\text{m}^3}{\text{mL}}$$

$$\dot{m}_{etanolo} = (\dot{V}_{solvente} \cdot 0.57) \cdot \rho_{etanolo}$$

$$\dot{m}_{acqua} = (\dot{V}_{solvente} \cdot 0.43) \cdot \rho_{acqua}$$

Si ottengono le rese di estrazione definite dalle seguenti equazioni:

$$\dot{m}_{polifenoli} = \dot{m}_{portata \text{ post miscelazione}} \cdot C_{solido} \cdot \left(\frac{3.20 \text{ g}_{GAE}}{100 \text{ g}_{DM}} \right)$$

$$\dot{m}_{scarto} = \dot{m}_{portata \text{ post miscelazione}} - \dot{m}_{polifenoli}$$

Portata post miscelazione	16590.48	t/y
Polifenoli _{convenzionale}	472.71	t/y
Scarto _{convenzionale}	16117.77	t/y
Portata volumica solvente	829523.81	m ³ /y
Portata massica di etanolo	373061.74	t/y
Portata massica di acqua	355625.15	t/y
$\rho_{etanolo}$	789	kg/m ³
ρ_{acqua}	998	kg/m ³

Tabella 4.6: Descrizione dell'unità di estrazione convenzionale. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

Non avendo indicazioni sul consumo energetico dell'apparecchiatura nell'articolo considerato, si è ricavata la potenza elettrica consumata dall'estrattore tramite la seguente

scheda tecnica (Gerhardt Analytical Systems, 2023) che fornisce una potenza di 800 W. Perciò, considerando un funzionamento in continuo di 40 h lavorative settimanali per circa 52 settimane all'anno, si calcola:

$$\text{energia elettrica consumata} = 0.8 \text{ kW} \cdot 40 \text{ h} \cdot 52 = 1664 \text{ kWy}$$

4.2.6 Estrazione a ultrasuoni

Analogamente al caso precedente si procede con la descrizione del processo di estrazione tramite tecnologia ad ultrasuoni. L'articolo (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020) descrive un trattamento continuo di 2g di vinaccia per 30 min a 50°C con 100 mL di solvente, ottenendo una resa di 6.36 g_{GAE} su 100g di materia secca. Il sistema è immerso a bagnomaria ed accoppiato ad un processore ad ultrasuoni da 200W e 26 kHz.

Utilizzando le equazioni descritte per l'estrazione convenzionale si possono descrivere le portate massiche ed energetiche dell'unità di processo:

Portata post miscelazione	16590.48	t/y
Polifenoli _{ultrasuoni}	939.51	t/y
Scarto _{ultrasuoni}	15650.97	t/y
Portata volumica solvente	829523.81	m ³ /y
Portata massica di etanolo	373061.74	t/y
Portata massica di acqua	355625.15	t/y
ρ _{etanolo}	789	kg/m ³
ρ _{acqua}	998	kg/m ³

Tabella 4.7: Descrizione dell'unità di estrazione ad ultrasuoni. (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

Per quanto riguarda il consumo energetico, l'articolo considerato utilizza un processore da 200W per gli ultrasuoni oltre al consumo precedentemente considerato per l'estrazione convenzionale (800W), perciò, con le stesse considerazioni utilizzate per l'estrazione convenzionale, si calcola l'energia elettrica annuale consumata:

$$\text{energia elettrica consumata} = 1 \text{ kW} \cdot 40 \text{ h} \cdot 52 = 2080 \text{ kWy}$$

4.2.7 Purificazione del prodotto

La fase di purificazione del prodotto consiste in una filtrazione per via osmotica della corrente contenente i polifenoli tramite carta da filtro in cellulosa. Si dovrà perciò calcolare il consumo energetico di pompaggio necessario a vincere il Δp generato dalla membrana ottenendo così la separazione tra il solvente e i polifenoli prodotti (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020).

Successivamente, grazie a tecniche specifiche di distillazione, si considererà un recupero della miscela azeotropica etanolo-acqua del 99% in peso.

Per il calcolo del consumo di pompaggio si utilizza come indicazione delle perdite di carico della membrana il valore fornito dalla scheda tecnica (FTI S.r.l., 2023), si assume la densità della vinaccia pari a quella dell'acqua e le portate volumiche uscenti dall'estrazione convenzionale e ad ultrasuoni uguali. Perciò, sotto queste ipotesi, si può calcolare il consumo energetico tramite le seguenti equazioni:

$$P_{pompaggio} = \dot{V} * \Delta p = \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot [Pa] = \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot \left[\frac{N}{m^2} \right] = \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot \left[\frac{kg}{m * s^2} \right] = \left[\frac{kg * m^2}{s^3} \right] = [W]$$

$$\dot{V} = \frac{(\dot{m}_{polifenoli} + \dot{m}_{etanolo} + \dot{m}_{acqua})}{\rho_{acqua}}$$

$$\Delta p = 1,5 \text{ bar} = 150000 \text{ Pa} \quad (FTI \text{ S.r.l.}, 2023)$$

Potenza _{pompaggio}	3.45	kW
Polifenoli _{ultrasuoni}	939.51	t/y
Portata massica di etanolo	373061.74	t/y
Portata massica di acqua	355625.15	t/y
ρ_{acqua}	998	kg/m ³
Δp	150000	Pa

Tabella 4.8: Calcolo della potenza di pompaggio (FTI S.r.l., 2023; Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

Si può quindi calcolare l'energia consumata per il pompaggio della corrente durante tutto il funzionamento annuale come nei precedenti casi:

$$\text{energia elettrica}_{pompaggio} = 3.45 \text{ kW} \cdot 40 \text{ h} \cdot 52 = 7176 \text{ kW}y$$

Perciò, l'unità di processo che comprende l'estrazione e la purificazione può essere schematizzata per il processo convenzionale dalla figura 4.5, mentre per il processo a ultrasuoni dalla figura 4.6:

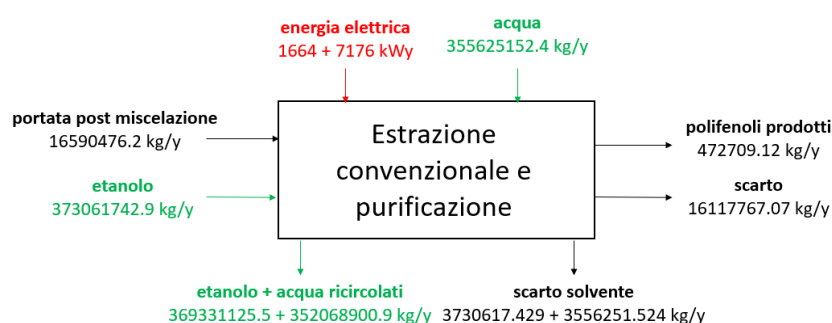


Figura 4.5: Descrizione dell'estrazione convenzionale e della purificazione

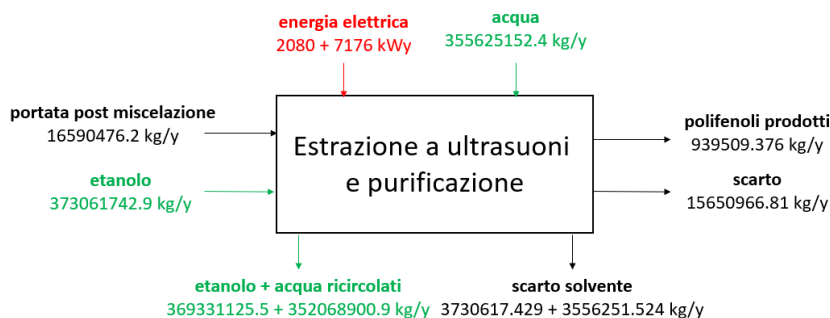


Figura 4.6: Descrizione dell'estrazione a ultrasuoni e della purificazione

4.2.8 Pre-essiccazione dello scarto

Lo scarto solido uscente dalla fase estrattiva del processo può, successivamente, essere trattato per pirolisi, implementando il concetto di economia circolare tramite un primo recupero di materia (polifenoli e biochar) ed un successivo recupero energetico (syngas).

Prima di attuare il processo di pirolisi sarà necessario essiccare lo scarto solido in ingresso al processo ad una concentrazione di umidità pari al 10% in peso, mentre in uscita dall'unità estrattiva si assume una concentrazione del 10.96% in peso (uguale alla concentrazione della biomassa in uscita dai pretrattamenti) (Ana F. Ferreira et al., 2021; Cristina del Pozo et al., 2022). Si nota, quindi, come la differenza di umidità sia minima, ma si rende comunque necessario considerare questo step di processo a causa dell'elevata portata in ingresso, che rende significativo anche questo consumo energetico.

La modellazione dello step di essiccazione rispecchia le equazioni utilizzate in precedenza nella sezione 4.2.2, ottenendo le seguenti portate uscenti e il seguente consumo energetico:

Pre-essiccazione scarto convenzionale				
Portata scarto in inlet	16117.77	t/y		
Portata solido in inlet	14351.26	t/y	$C_{\text{solido_inlet}}$	89.04 %
Portata solido in outlet	14351.26	t/y	$C_{\text{solido_outlet}}$	90 %
Portata acqua in outlet	1594.58	t/y	$C_{\text{acqua_outlet}}$	10 %
Portata totale in outlet	15945.84	t/y		
Portata di H ₂ O evaporata	171.92	t/y		

Tabella 4.9: Descrizione del processo di essiccazione con lo scarto proveniente dall'estrazione convenzionale. (Ana F. Ferreira et al., 2021; Cristina del Pozo et al., 2022)

Portata di H ₂ O evaporata	171.92	t/y
Calore necessario _{CONV}	5462113.28	MJ/y
ΔT	75	K

$C_{p_{H_2O}}$	4187	J/kg/K
λ_{H_2O}	2272000	J/kg

Tabella 4.10: Calcolo del calore necessario per attuare l'essiccazione.

Analizzando invece il processo ad ultrasuoni avremo i seguenti risultati:

Pre-essiccazione scarto a ultrasuoni				
Portata scarto in inlet	15650.97	t/y		
Portata solido in inlet	13935.62	t/y	C_{solido_inlet}	89.04 %
Portata solido in outlet	13935.62	t/y	C_{solido_outlet}	90 %
Portata acqua in outlet	1548.40	t/y	C_{acqua_outlet}	10 %
Portata totale in outlet	15484.02	t/y		
Portata di H ₂ O evaporata	166.94	t/y		

Tabella 4.11: Descrizione del processo di essiccazione con lo scarto proveniente dall'estrazione a ultrasuoni. (Ana F. Ferreira et al., 2021; Cristina del Pozo et al., 2022)

Portata di H ₂ O evaporata	166.94	t/y
Calore necessario _{US}	5303920.41	MJ/y
ΔT	75	K
$C_{p_{H_2O}}$	4187	J/kg/K
λ_{H_2O}	2272000	J/kg

Tabella 4.12: Calcolo del calore necessario per attuare l'essiccazione.

Perciò l'unità di processo di pre-essiccazione dello scarto solido estrattivo può essere descritta dalle figure 4.7 e 4.8:

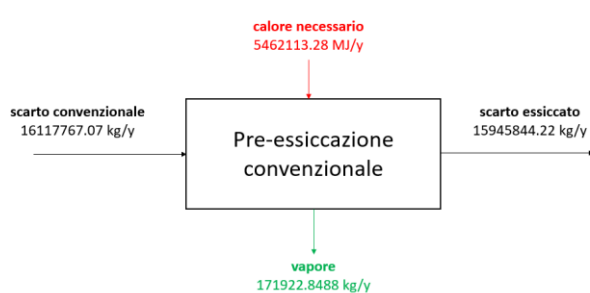


Figura 4.7: Descrizione del processo di essiccazione dello scarto convenzionale.

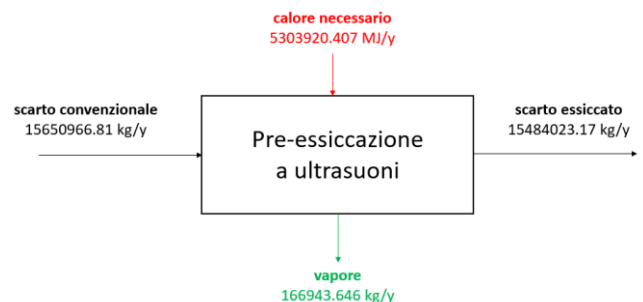


Figura 4.8: Descrizione del processo di essiccazione dello scarto a ultrasuoni.

4.2.9 Processo di pirolisi e analisi dei prodotti

Dopo aver essiccato alla concentrazione di umidità desiderata lo scarto solido uscente dalla fase di estrazione si procede con il processo di pirolisi, in cui, tramite un riscaldamento a 500°C in assenza di ossigeno, si producono tre differenti prodotti: un biochar solido caratterizzato da un valore economico modesto, un bio-olio liquido che in questa tesi è considerato uno scarto, non essendoci processi di purificazione, e un syngas utilizzato per sostenere energeticamente l'impianto. Le rese del processo e il potere calorifico del syngas sono stati definiti in precedenza nella tabella 3.1, nel paragrafo 3.2.

Secondo queste considerazioni si possono definire le portate che interessano la pirolisi del processo convenzionale secondo le tabelle 4.11 e 4.12:

Pirolisi convenzionale				
Portata scarto in inlet	15945.84	t/y	rese	
Portata biochar in outlet	7064.01	t/y	biochar	44.3 %
Portata bio-oil in outlet	4289.43	t/y	bio-oil	26.9 %
Portata syngas in outlet	4592.40	t/y	syngas	28.8 %
Portata energetica syngas	5581045	MJ/y	HV _{syngas}	0.35 [MJ/kg _{bagassa}]

Tabella 4.13: Descrizione del processo di pirolisi convenzionale. (J. M. Encinar et al., 1996)

Calore necessario _{CONV}	31713493.63	MJ/y
Portata scarto in inlet	15945.84	t/y
ΔT	475	K
C _{pH2O}	4187	J/kg/K

Tabella 4.14: Calcolo termodinamico del calore necessario a raggiungere i 500°C di pirolisi.

Per l'estrazione a ultrasuoni invece si avranno le tabelle 4.13 e 4.14:

Pirolisi a ultrasuoni				
Portata scarto in inlet	15484.02	t/y	rese	
Portata biochar in outlet	6859.42	t/y	biochar	44.3 %
Portata bio-oil in outlet	4165.20	t/y	bio-oil	26.9 %
Portata syngas in outlet	4459.40	t/y	syngas	28.8 %
Portata energetica syngas	5419408	MJ/y	HV _{syngas}	0.35 [MJ/kg _{bagassa}]

Tabella 4.15: Descrizione del processo di pirolisi a ultrasuoni. (J. M. Encinar et al., 1996)

Calore necessario _{US}	30795012.38	MJ/y
Portata scarto in inlet	15484.02	t/y
ΔT	475	K
C_{pH_2O}	4187	J/kg/K

Tabella 4.16: Calcolo termodinamico del calore necessario a raggiungere i 500°C di pirolisi.

Successivamente, per garantire che il processo di pirolisi avvenga in atmosfera inerte, si dovrà calcolare la portata di azoto da aggiungere al processo per eliminare la presenza di ossigeno, in modo da evitare che la reazione si avvicini alla combustione o alla gassificazione. Si considera inoltre che l'azoto inserito vada a diluire la portata di syngas uscente dal processo. Nell'articolo (A. Ibn Ferjani et al., 2019) si evidenzia la necessità di inserire 5 L/h di azoto per il trattamento di 4 kg/h di vinaccia, quindi, dimensionando correttamente rispetto al nostro impianto, si avranno le seguenti portate:

$$\dot{m}_{N_2} = \left(\frac{5 \text{ L} \cdot \dot{m}_{\text{scarto in inlet}}}{4 \text{ kg}} \right) \cdot \frac{1}{1000} \frac{\text{m}^3}{\text{L}} \cdot \rho_{N_2}$$

Portata di azoto _{CONV}	24.92	t/y
Portata di azoto _{US}	24.19	t/y
Portata scarto in inlet _{CONV}	15945.84	t/y
Portata scarto in inlet _{US}	15484.02	t/y
ρ_{N_2}	1.25	kg/m ³

Tabella 4.17: Calcolo dell'azoto necessario per la pirolisi convenzionale e ad ultrasuoni.

Perciò l'ultima unità di processo può essere così schematizzata:

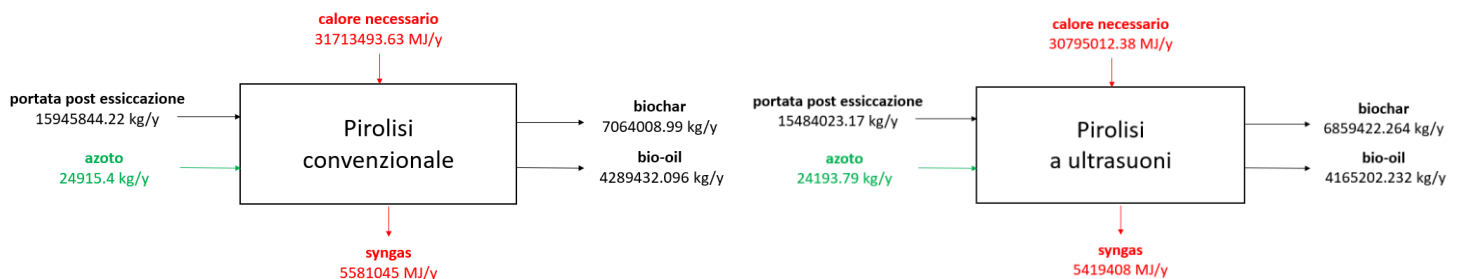


Figura 4.9: Descrizione della pirolisi convenzionale.

Figura 4.10: Descrizione della pirolisi a ultrasuoni.

4.2.10 Riassunto degli step di processo

In conclusione, si attua un riassunto completo degli step di processo e delle portate che interessano ogni singola fase e che successivamente saranno inserite in Simapro:

Processo di estrazione convenzionale (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	3323736	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	36930.4	t/y	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	36930.4	t/y	//	//
	heat, natural gas	57832570	MJ/y	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	16590.48	t/y	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	20339.92	t/y	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	16590.48	t/y	//	//
	consumo elettrico	332800	kWy	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	16590.48	t/y	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione convenzionale + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	16590.48	t/y	//	//
	etanolo	373061.74	t/y	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	355625.15	t/y	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	consumo elettrico	1664 + 7176	kWy	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	472.71	t/y	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	scarto estrazione	16117.77	t/y	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	369331.13	t/y	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	352068.90	t/y	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	7286.87	t/y	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	16117.77	t/y	//	//
	heat, natural gas	5462113.28	MJ/y	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	15945.84	t/y	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico

	H2O evaporata	171.92	t/y	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	15945.84	t/y	//	//
	heat, natural gas	31713493.63	MJ/y	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	24.92	t/y	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	7064.01	t/y	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	4289.43	t/y	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	5581045	MJ/y	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Tabella 4.18: Riassunto dell'intero processo con estrazione convenzionale. ("//" *indica descrizione della corrente già presente, "-" indica la mancanza o non necessità del dato*)

Processo di estrazione a ultrasuoni (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)					
In/out	Nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	3323736	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	36930.4	t/y	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	36930.4	t/y	//	//
	heat, natural gas	57832569.9	MJ/y	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	16590.48	t/y	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	20339.92	t/y	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	16590.48	t/y	//	//
	consumo elettrico	332800	kWy	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	16590.48	t/y	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione a ultrasuoni + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	16590.48	t/y	//	//
	etanolo	373061.74	t/y	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	355625.15	t/y	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

	consumo elettrico	2080+7176	kWy	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	939.51	t/y	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	scarto estrazione	15650.97	t/y	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	369331.13	t/y	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	352068.90	t/y	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	7286.87	t/y	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	15650.97	t/y	//	//
	heat, natural gas	5303920.41	MJ/y	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	15484.02	t/y	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	166.94	t/y	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	15484.02	t/y	//	//
	heat, natural gas	30795012.38	MJ/y	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	24.19	t/y	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	6859.42	t/y	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	4165.20	t/y	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	5419408	MJ/y	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Tabella 4.19: Riassunto dell'intero processo con estrazione a ultrasuoni. ("//" *indica descrizione della corrente già presente, "-" indica la mancanza o non necessità del dato*

5. Life Cycle Impact Assessment e interpretazione

5.1 Life Cycle Impact Assessment

La terza fase dello studio LCA consiste nell'utilizzo di un software, contenente un determinato database, per il calcolo degli impatti ambientali del processo descritto nell'inventario. In questa tesi, come precedentemente esplicitato, si è utilizzato per l'analisi il database Ecoinvent 3.8 con il software SimaPro e il metodo globale ReCiPe 2016, decidendo di analizzare le seguenti categorie d'impatto: global warming, water consumption, AWARE, freshwater eutrophication, fossil resource scarcity e CED (cumulative energy demand).

Questa fase permette di quantificare l'impatto ambientale del processo, confrontando in modo efficace le principali differenze tra il processo estrattivo convenzionale e quello ad ultrasuoni, oltre a valutare l'effetto benefico del processo di pirolisi conclusivo. Si procede perciò con l'analisi puntuale di ogni singola categoria d'impatto considerata.

5.2 Global warming

La categoria d'impatto chiamata "global warming" è legata alle emissioni di gas serra in atmosfera, quantificando, di conseguenza, gli effetti negativi che il processo considerato provoca sulla salute dell'ecosistema, sulla salute umana e sul benessere materiale. Il fattore di caratterizzazione di questa categoria d'impatto è su scala globale e rappresenta il potenziale di riscaldamento per un orizzonte di 100 anni (GWP100), espresso in kilogrammi di CO2 equivalente. (SimaPro, 2020)

5.2.1 Risultati

Si procede con l'analisi dei risultati per il processo descritto nella fase d'inventario:

Global warming				
nome corrente	convenzionale		ultrasuoni	
emissione etanolo	7.57E+8	kg _{CO2}	7.57E+8	kg _{CO2}
emissione etanolo - evitata	-7.50E+8	kg _{CO2}	-7.50E+8	kg _{CO2}
emissione tap water	1.72E+5	kg _{CO2}	1.72E+5	kg _{CO2}
emissione tap water - evitata	-1.71E+5	kg _{CO2}	-1.71E+5	kg _{CO2}
consumo elettrico	6.16E+4	kg _{CO2}	6.16E+4	kg _{CO2}
heat, natural gas	7.65E+6	kg _{CO2}	7.57E+6	kg _{CO2}
heat, syngas	-4.49E+5	kg _{CO2}	-4.36E+5	kg _{CO2}
nitrogen	1.02E+2	kg _{CO2}	9.92E+1	kg _{CO2}
trasporto	7.36E+5	kg _{CO2}	7.36E+5	kg _{CO2}

Tabella 5.1: Analisi complessiva del "global warming" per il processo in esame.

Si possono riassumere i risultati espressi dalla tabella 5.1 tramite i seguenti grafici:

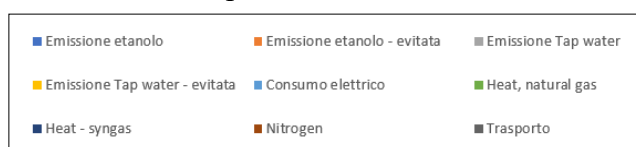


Figura 5.1: Legenda.

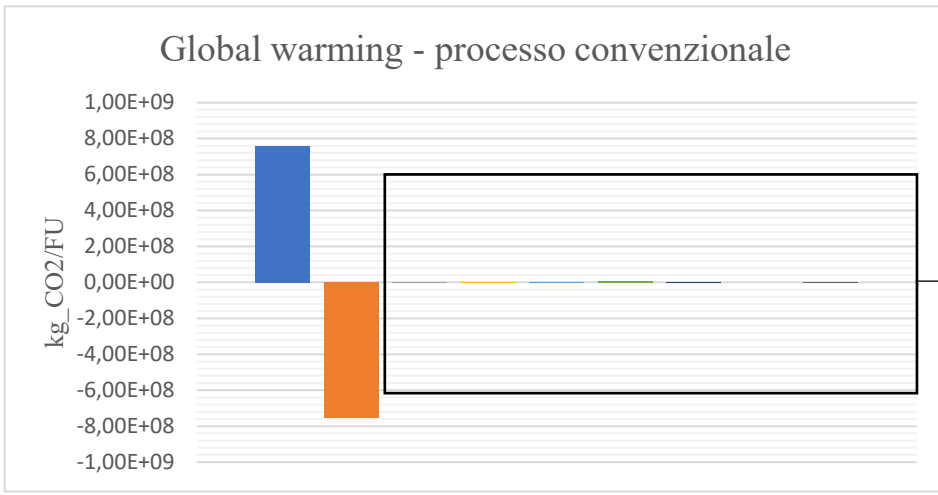


Figura 5.2: Emissioni di CO2 in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale.

Figura 5.3: Focus sulle emissioni per il processo estrattivo convenzionale.

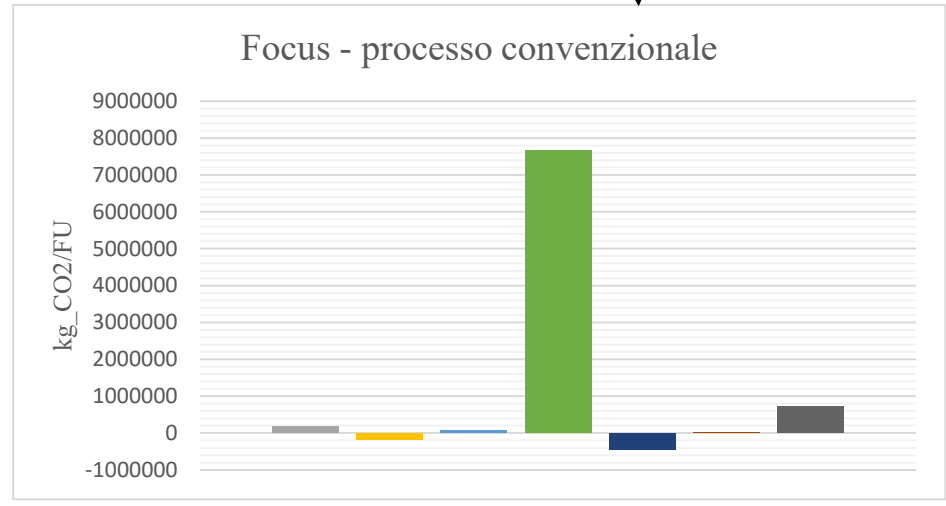


Figura 5.4: Emissioni di CO2 in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni.

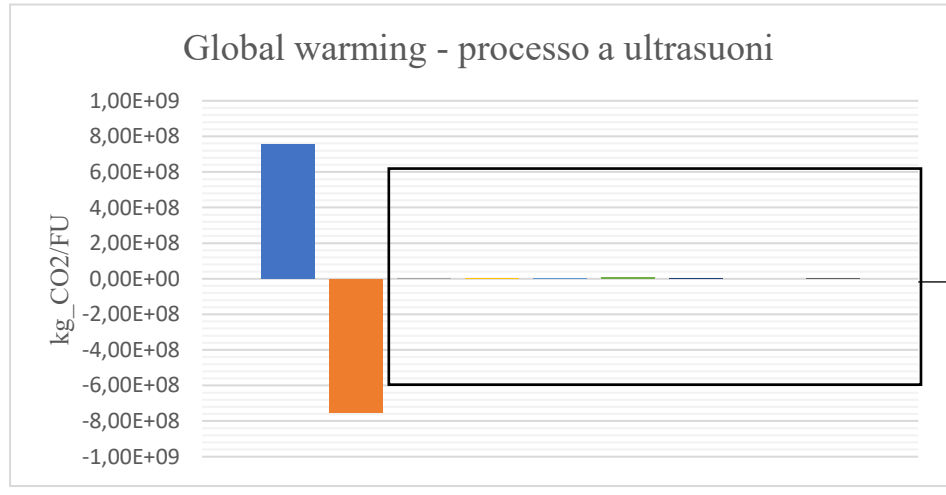
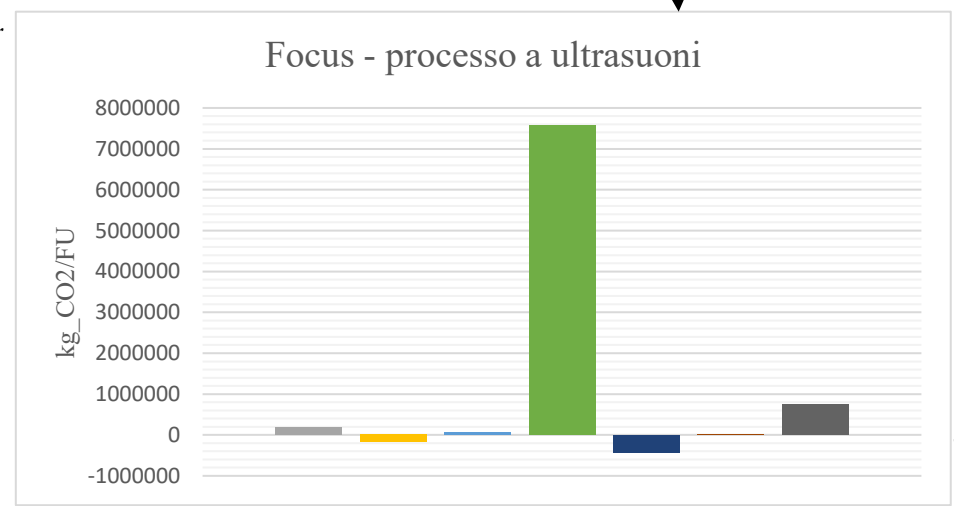


Figura 5.5: Focus sulle emissioni per il processo estrattivo a ultrasuoni.



5.2.2 Discussione risultati

Dai risultati riportati precedentemente si può notare come l'utilizzo intensivo di solventi (etanolo e acqua) nel processo estrattivo sia fonte di una notevole emissione; risultato in linea con i risultati ricavati dall'articolo (Karin Carlqvist et al., 2022), ma, grazie ad un recupero quasi totale del 99%, si riesce a limitarne gli effetti negativi. Nel complesso, quindi, l'emissione totale è principalmente associata al consumo di calore utilizzato per le fasi di essiccazione della biomassa e dello scarto di estrazione e per il processo di pirolisi. Grazie alla pirolisi si riesce a produrre un syngas che contribuisce a ridurre questo consumo, seppur in minima parte, data la bassa resa e il basso potere calorifico.

Nel complesso non si notano particolari differenze tra il processo convenzionale e il processo a ultrasuoni grazie all'effetto di bilanciamento promosso dalla pirolisi. Il processo a ultrasuoni impatterà in modo maggiore nella fase estrattiva a causa del maggior consumo energetico, ma, avendo una resa di polifenoli doppia rispetto al processo convenzionale, impatterà in modo minore nella fase di pirolisi, avendo meno scarto in ingresso.

5.3 Water consumption

La categoria d'impatto chiamata "water consumption" è legata al consumo di acqua dolce, utilizzando, come mezzo di quantificazione, un fattore di caratterizzazione espresso in m³ (SimaPro, 2020).

5.3.1 Risultati

Si procede con l'analisi dei risultati per il processo descritto nella fase d'inventario:

Water consumption				
nome corrente	convenzionale		ultrasuoni	
emissione etanolo	6.73E+5	m ³ _{H2O}	6.73E+5	m ³ _{H2O}
emissione etanolo - evitata	-6.66E+5	m ³ _{H2O}	-6.66E+5	m ³ _{H2O}
emissione tap water	3.57E+5	m ³ _{H2O}	3.57E+5	m ³ _{H2O}
emissione tap water - evitata	-3.54E+5	m ³ _{H2O}	-3.54E+5	m ³ _{H2O}
consumo elettrico	4.19E+2	m ³ _{H2O}	4.19E+2	m ³ _{H2O}
heat, natural gas	6.98E+2	m ³ _{H2O}	6.90E+2	m ³ _{H2O}
heat, syngas	-4.10E+1	m ³ _{H2O}	-3.98E+1	m ³ _{H2O}
nitrogen	3.71E-1	m ³ _{H2O}	3.61E-1	m ³ _{H2O}
trasporto	1.68E+3	m ³ _{H2O}	1.68E+3	m ³ _{H2O}

Tabella 5.2: Analisi complessiva della "water consumption" per il processo in esame.

Si possono quindi riassumere i risultati espressi dalla tabella 5.2 tramite i seguenti grafici, considerando la stessa legenda espressa dalla figura 5.1:

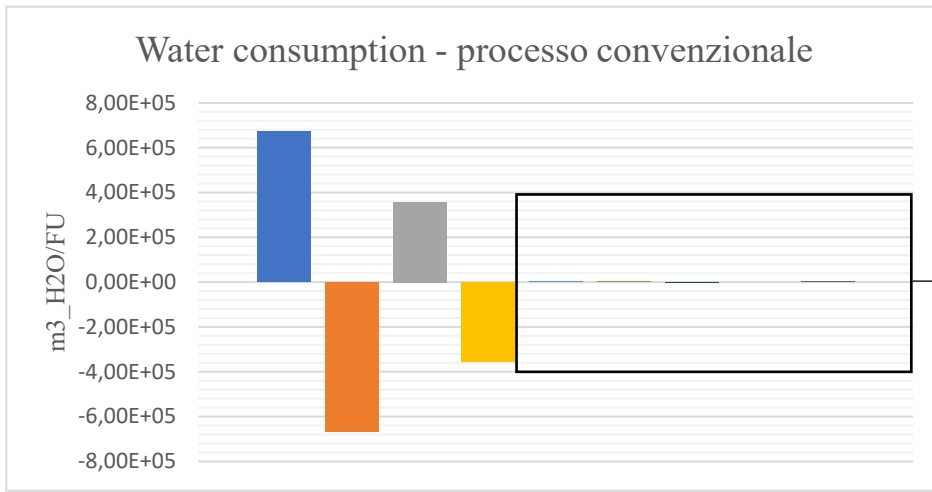


Figura 5.6: Consumo di H2O in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale.

Figura 5.7: Focus sul consumo per il processo estrattivo convenzionale.

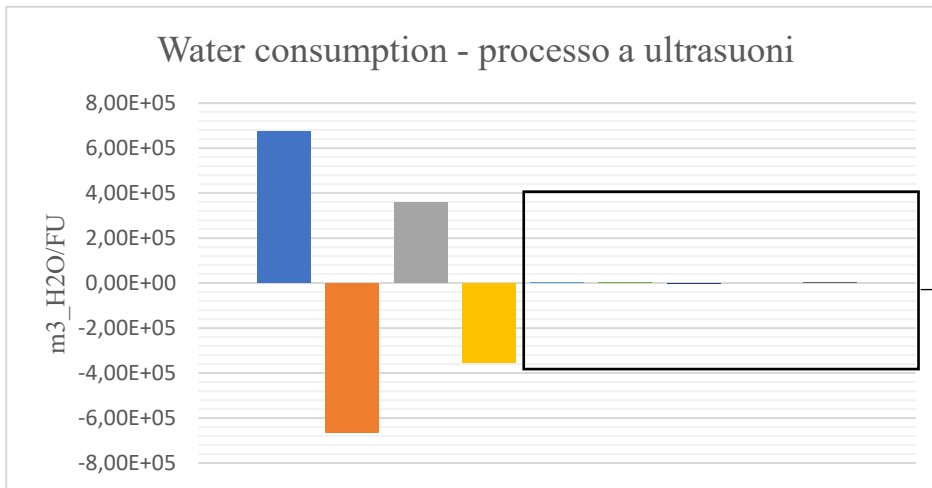
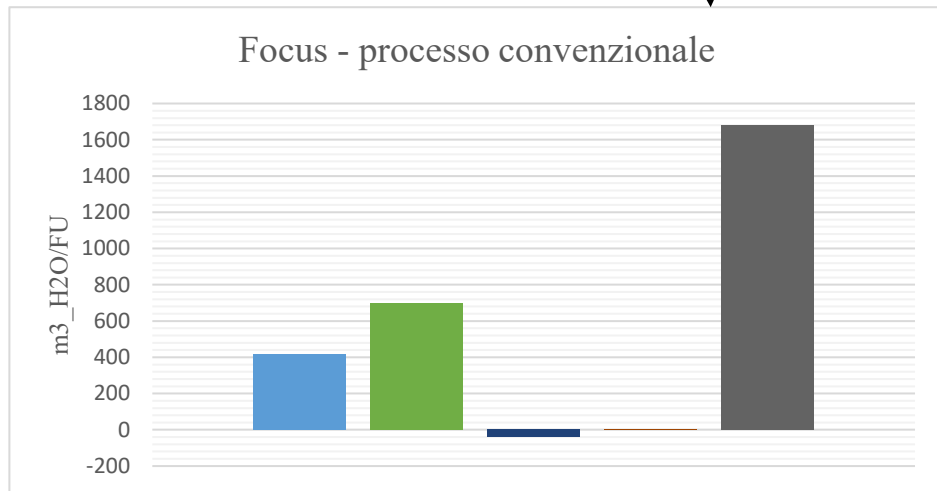
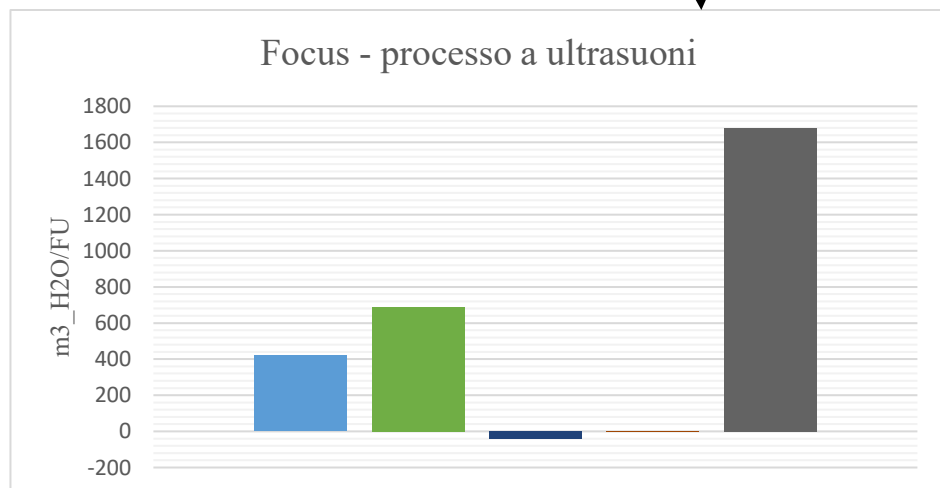


Figura 5.8: Consumo di H2O in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni.

Figura 5.9: Focus sul consumo per il processo estrattivo a ultrasuoni.



5.3.2 Confronto con AWARE

AWARE (Available Water REmaining) è un indicatore al Midpoint che quantifica il potenziale di privazione dell'acqua, basandosi sul concetto che meno acqua si ha disponibile in un determinato territorio e maggiore sarà la probabilità che un certo utente ne rimanga privo. Il valore restituito dall'indice sarà compreso tra 0.1 e 100 e rappresenta il consumo relativo rispetto ai consumi medi di m³ d'acqua registrati nel mondo. Perciò, se si ha un valore di 10, significa che nell'area considerata si avrà una disponibilità di acqua 10 volte minore alla media mondiale (SimaPro, 2020).

AWARE				
nome corrente	convenzionale		ultrasuoni	
emissione etanolo	2.86E+7	m ³ _{H2O}	2.86E+7	m ³ _{H2O}
emissione etanolo - evitata	-2.83E+7	m ³ _{H2O}	-2.83E+7	m ³ _{H2O}
emissione tap water	1.36E+7	m ³ _{H2O}	1.36E+7	m ³ _{H2O}
emissione tap water - evitata	-1.34E+7	m ³ _{H2O}	-1.34E+7	m ³ _{H2O}
consumo elettrico	1.75E+4	m ³ _{H2O}	1.75E+4	m ³ _{H2O}
heat, natural gas	2.63E+4	m ³ _{H2O}	2.60E+4	m ³ _{H2O}
heat, syngas	-1.54E+3	m ³ _{H2O}	-1.50E+3	m ³ _{H2O}
nitrogen	7.64E+0	m ³ _{H2O}	7.42E+0	m ³ _{H2O}
trasporto	3.65E+4	m ³ _{H2O}	3.65E+4	m ³ _{H2O}

Tabella 5.3: Analisi complessiva della categoria "AWARE", con anche la normalizzazione, per il processo in esame.

5.3.3 Discussione risultati

Tramite i seguenti grafici si nota come, anche per questa categoria d'impatto, il consumo maggiore di acqua è racchiuso nell'utilizzo dei solventi, ma, grazie al recupero spinto degli stessi, si riesce a ridurre il consumo di acqua dolce complessivo. Concentrandosi, invece, sugli altri indici si nota come il trasporto acquisisca una forte importanza sulla seguente categoria d'impatto, con un consumo di acqua di circa tre volte quello del calore utilizzato. In generale si può affermare che si ha un consumo di acqua moderato e questo è un aspetto fondamentale in una regione come il Piemonte a forte rischio di siccità.

5.4 Freshwater eutrophication

L'eutrofizzazione, nota anche come "nutrification", comprende tutti gli impatti ambientali causati da livelli eccessivi di macronutrienti presenti nelle acque dolci. Questa categoria d'impatto presenta come fattore di caratterizzazione il potenziale di nutrizione NP, misurato in chilogrammi di fosforo (P) equivalenti emessi in ambiente. (SimaPro, 2020)

5.4.1 Risultati

Si procede con l'analisi dei risultati per il processo descritto nella fase d'inventario:

Freshwater eutrophication				
nome corrente	convenzionale		ultrasuoni	
emissione etanolo	6.00E+5	kg_P	6.00E+5	kg_P
emissione etanolo - evitata	-5.94E+5	kg_P	-5.94E+5	kg_P
emissione tap water	7.35E+1	kg_P	7.35E+1	kg_P
emissione tap water - evitata	-7.25E+1	kg_P	-7.25E+1	kg_P
consumo elettrico	7.09E+0	kg_P	7.10E+0	kg_P
heat, natural gas	8.28E+1	kg_P	8.18E+1	kg_P
heat, syngas	-4.86E+0	kg_P	-4.72E+0	kg_P
nitrogen	3.29E-2	kg_P	3.19E-2	kg_P
trasporto	1.79E+2	kg_P	1.79E+2	kg_P

Tabella 5.4: Analisi complessiva della categoria "freshwater eutrophication" per il processo in esame.

Si riassumono i risultati della tabella 5.4 grazie ai grafici seguenti, utilizzando sempre la legenda descritta nella figura 5.1:

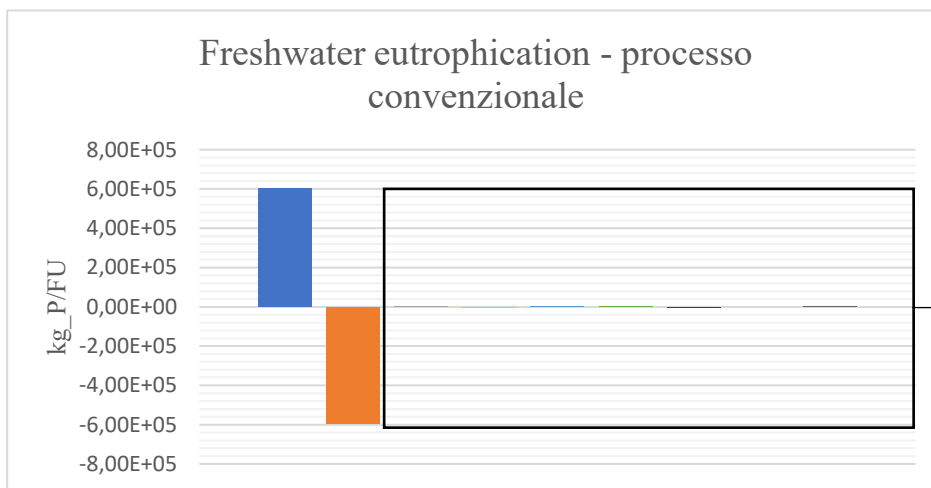
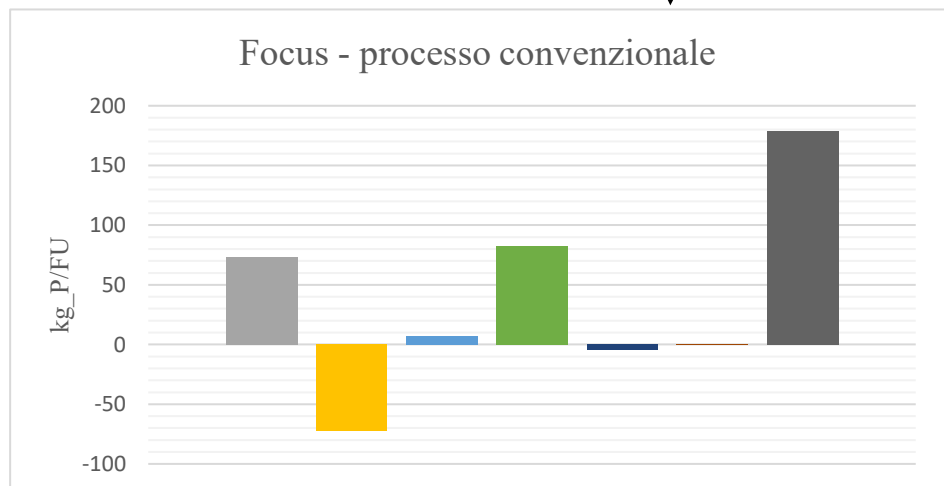


Figura 5.10: emissione di P in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale.

Figura 5.11: Focus sull'emissione per il processo estrattivo convenzionale.



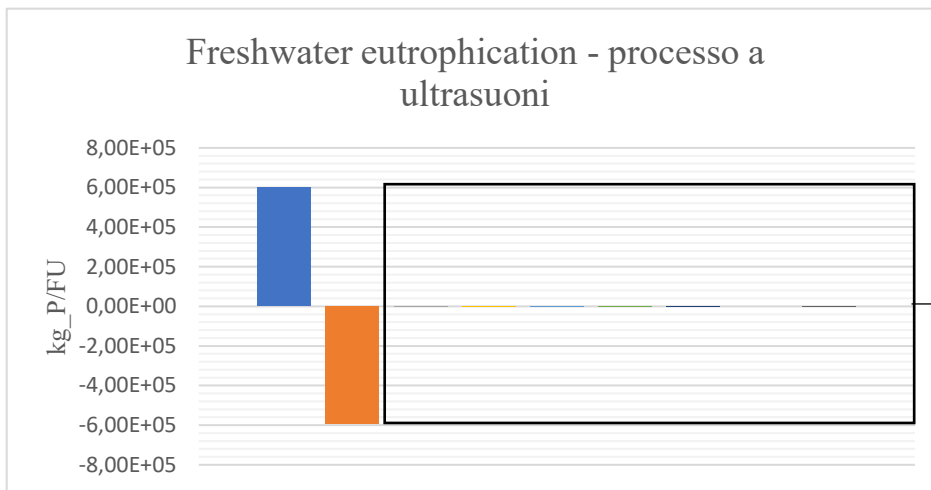
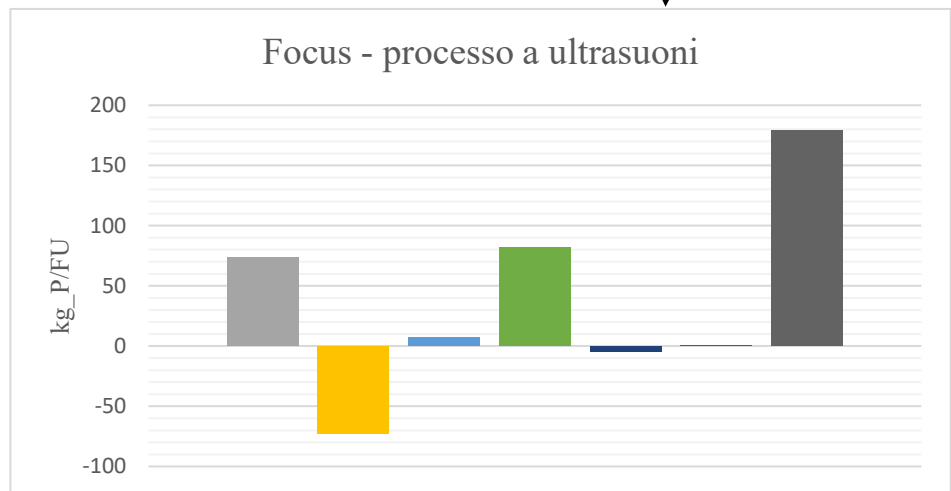


Figura 5.12: emissione di P in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni.

Figura 5.13: Focus sull'emissione per il processo estrattivo a ultrasuoni.



5.4.2 Discussione risultati

Dai risultati ottenuti si può notare come il processo analizzato impatti su questa categoria in modo minimo, preservando di conseguenza la flora e la fauna delle acque dolci. Questo aspetto è molto positivo per un territorio come quello piemontese ricco di corsi d'acqua, come il Po, essenziali per il territorio nazionale. Inoltre, i risultati ottenuti sono in linea con i valori riscontrati in letteratura per l'estrazione a ultrasuoni (Karin Carlqvist et al., 2022) e sono inferiori al solo processo di pirolisi dello scarto (Carol Huang et al., 2022), confermando, quindi, la bontà dell'analisi.

5.5 Fossil resource scarcity

Il fattore di caratterizzazione della categoria d'impatto chiamata "fossil resource scarcity" è il consumo potenziale di combustibili fossili, basato sul potere calorifico superiore ed espresso in chilogrammi di petrolio (oil) equivalenti (SimaPro, 2020).

5.5.1 Risultati

Si procede dunque con l'analisi dei risultati per il processo descritto nella fase d'inventario, riportandoli nella seguente tabella:

Fossil resource scarcity				
nome corrente	convenzionale		ultrasuoni	
emissione etanolo	4.92E+8	kg_oil	4.92E+8	kg_oil
emissione etanolo - evitata	-4.87E+8	kg_oil	-4.87E+8	kg_oil
emissione tap water	5.29E+4	kg_oil	5.29E+4	kg_oil
emissione tap water - evitata	-5.24E+4	kg_oil	-5.24E+4	kg_oil
consumo elettrico	2.13E+4	kg_oil	2.14E+4	kg_oil
heat, natural gas	2.76E+6	kg_oil	2.73E+6	kg_oil
heat, syngas	-1.63E+5	kg_oil	-1.58E+5	kg_oil
nitrogen	3.34E+1	kg_oil	3.24E+1	kg_oil
trasporto	2.49E+5	kg_oil	2.49E+5	kg_oil

Tabella 5.5: Analisi complessiva della categoria "fossil resource scarcity" per il processo in esame.

Si riassumono i risultati della tabella 5.5 grazie ai grafici seguenti, utilizzando sempre la legenda descritta nella figura 5.1:

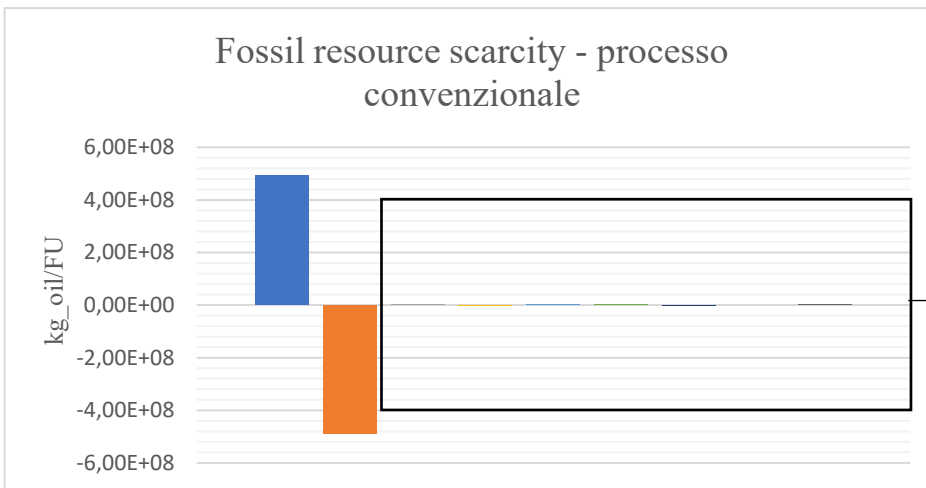
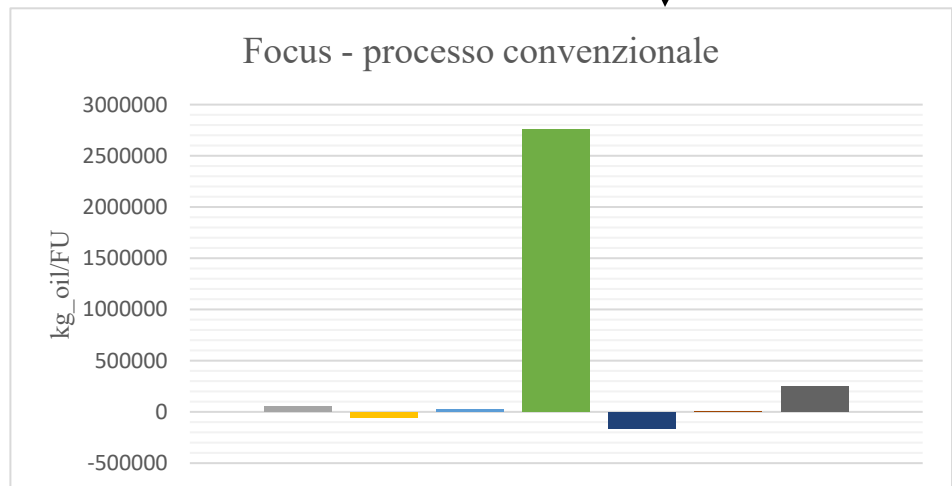


Figura 5.14: consumo di petrolio in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale.

Figura 5.15: Focus sul consumo per il processo estrattivo convenzionale.



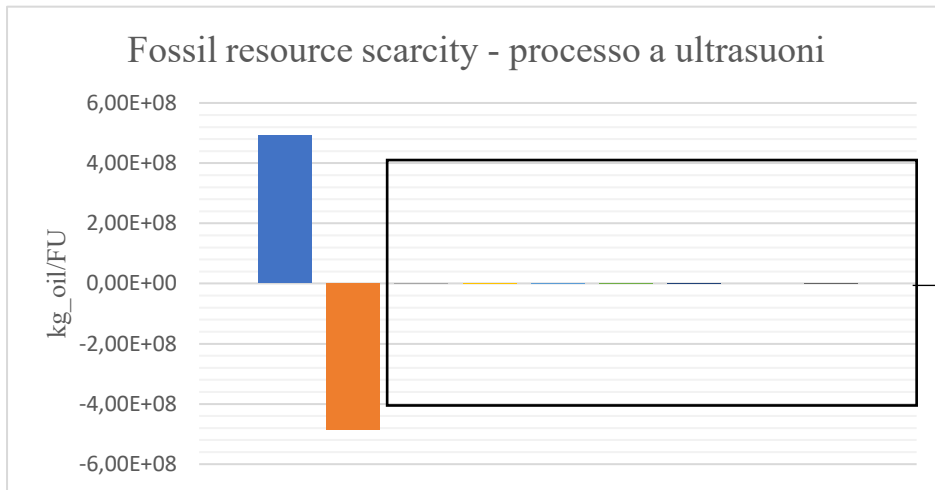
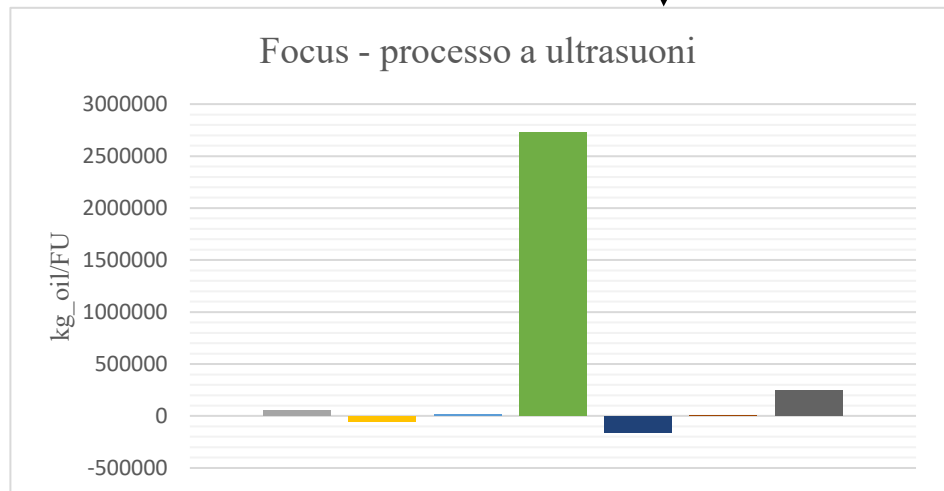


Figura 5.16: consumo di petrolio in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni.

Figura 5.17: Focus sul consumo per il processo estrattivo a ultrasuoni.



5.5.2 Discussione risultati

I risultati per la seguente categoria d’impatto rispecchiano l’andamento delle emissioni di CO₂, essendo fortemente legate all’utilizzo di etanolo come solvente, al consumo di energia termica per i processi di essiccazione e al trattamento di pirolisi. Questo aspetto è inoltre confermato anche a livello bibliografico dall’articolo (Karin Carlqvist et al., 2022). In generale si nota come quantitativo di petrolio equivalente utilizzato per queste fasi di processo è particolarmente elevato; perciò, si potrebbero analizzare sistemi di ottimizzazione dello scambio di calore.

5.6 CED – Non renewable, fossil

La *Cumulative Energy Demand* quantifica il consumo totale di energia, proveniente da diverse tipologie di risorse, utilizzata per sostenere energeticamente il processo in esame, tramite un fattore di caratterizzazione espresso in MJ. In particolare, in un’ottica di promuovere processi ambientalmente sostenibili, si è deciso di analizzare l’energia fossile non rinnovabile richiesta dal processo (SimaPro, 2020).

5.6.1 Risultati

Si procede dunque con l'analisi dei risultati per il processo descritto nella fase d'inventario, riportandoli nella seguente tabella:

CED – Non renewable, fossil				
nome corrente	convenzionale		ultrasuoni	
emissione etanolo	2.47E+10	MJ	2.47E+10	MJ
emissione etanolo - evitata	-2.44E+10	MJ	-2.44E+10	MJ
emissione tap water	2.42E+6	MJ	2.42E+6	MJ
emissione tap water - evitata	-2.40E+6	MJ	-2.40E+6	MJ
consumo elettrico	9.74E+5	MJ	9.75E+5	MJ
heat, natural gas	1.26E+8	MJ	1.25E+8	MJ
heat, syngas	-7.41E+6	MJ	-7.20E+6	MJ
nitrogen	1.53E+3	MJ	1.49E+3	MJ
trasporto	1.14E+7	MJ	1.14E+7	MJ

Tabella 5.6: Analisi complessiva della categoria "CED" per il processo in esame.

Si riassumono i risultati della tabella 5.6 grazie ai grafici seguenti, utilizzando sempre la legenda descritta nella figura 5.1:

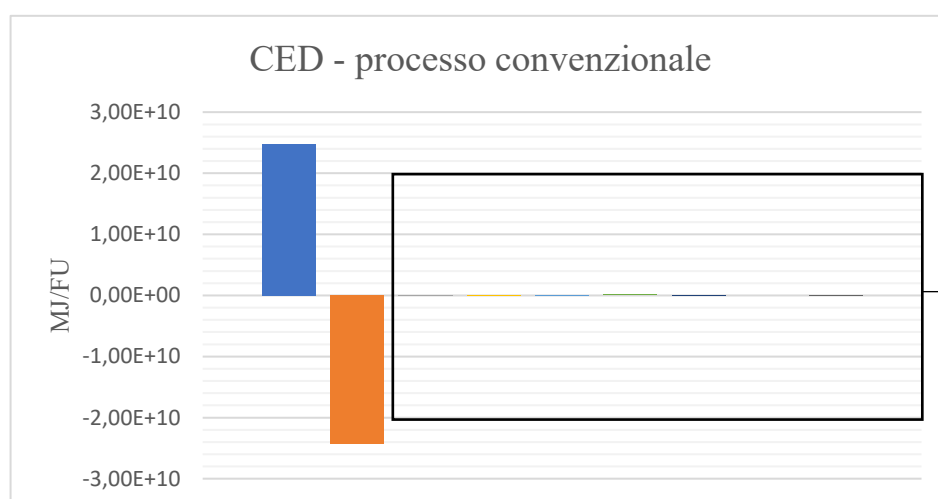
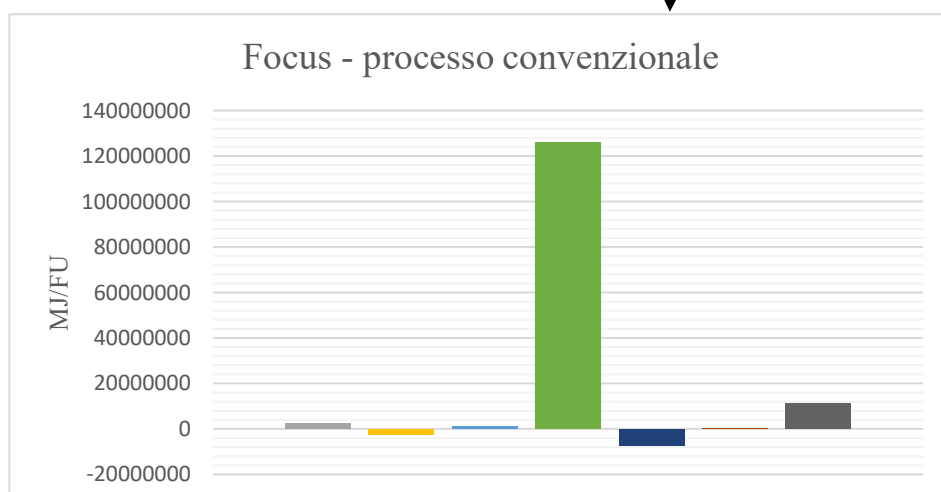


Figura 5.18: consumo di energia non rinnovabile in funzione della FU per il processo estrattivo convenzionale.

Figura 5.19: Focus sul consumo di energia non rinnovabile per il processo estrattivo convenzionale.



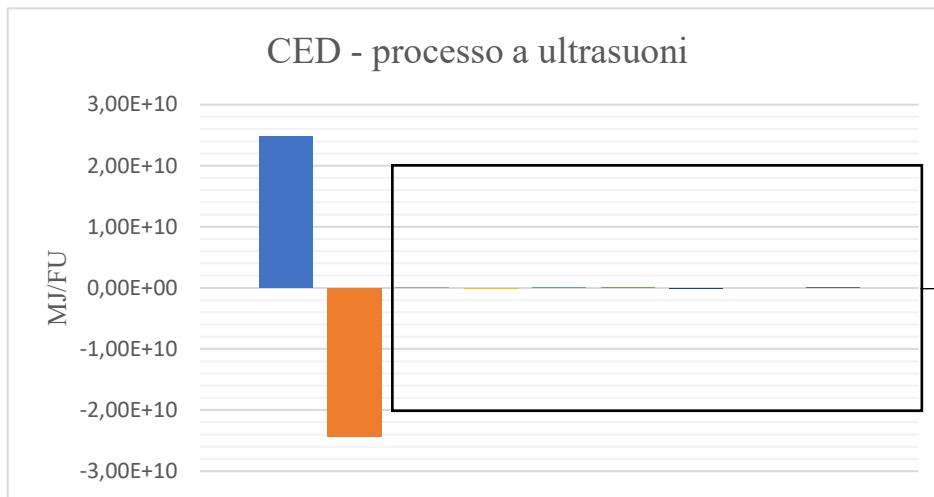
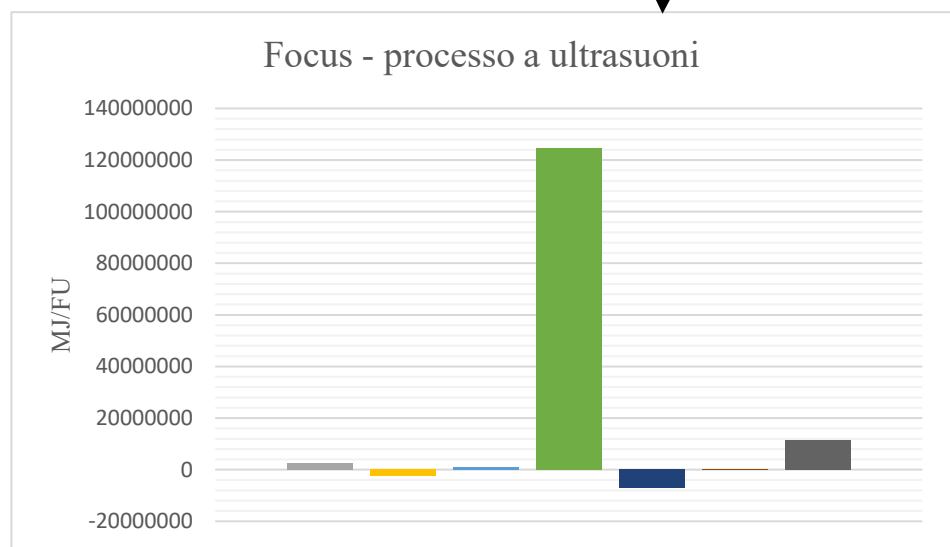


Figura 5.20: consumo di energia non rinnovabile in funzione della FU per il processo estrattivo a ultrasuoni.

Figura 5.21: Focus sul consumo di energia non rinnovabile per il processo estrattivo a ultrasuoni.



5.6.2 Discussione risultati

Dall'analisi della "cumulative energy demand" si può osservare come il consumo di energia non rinnovabile, proveniente da fonti fossili, sia strettamente legato al calore utilizzato durante il processo, grazie all'intensivo recupero di etanolo. I grafici riscontrati rispecchiano, come ci si poteva aspettare, le categorie d'impatto legate alla CED, ossia "global warming" e "fossil resource scarcity".

5.7 Interpretation

Nella fase conclusiva dell'analisi LCA si procede alla trattazione dei risultati restituiti dall'analisi di impatto ambientale, verificando la consistenza e correttezza dei dati e traducendo le misure in considerazioni pratiche sul processo in esame. In particolare, per verificare la correttezza e la scalabilità dello studio, si è proceduto con un'analisi di sensitività, per poi, successivamente, confrontare i risultati ottenuti coi classici processi di trattamento della biomassa disponibili attualmente sul mercato.

5.7.1 Analisi di sensitività

Per attuare un'analisi di sensitività completa si è applicato lo studio precedentemente descritto variando la FU, ovvero la portata di vinaccia in ingresso al processo. Si è deciso di analizzare le seguenti portate:

- *FU prima analisi*: si è assunta una portata di vinaccia in ingresso pari alla metà della portata considerata nello studio, perciò:

$$\dot{m}_{prima\ analisi} = \frac{36930.4 \frac{t}{y}}{2} = 18465.2 \frac{t}{y}$$

- *FU seconda analisi*: si è assunta una portata di vinaccia in ingresso pari alla metà della portata considerata nella prima analisi di sensitività:

$$\dot{m}_{seconda\ analisi} = \frac{18465.2 \frac{t}{y}}{2} = 9232.6 \frac{t}{y}$$

- *FU polifenoli*: si è assunta come unità funzionale 1 kg di polifenoli prodotti, analizzando l'impatto ambientale associato. Perciò, assumendo come unità funzionale una portata fissa di prodotti uscenti dal processo, avremo diverse portate in ingresso di vinaccia per il processo con estrazione convenzionale e con estrazione a ultrasuoni.

Per l'estrazione convenzionale si ha una resa di processo pari a 3.20 gGAE su 100g di materiale secco (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020), con una concentrazione di solido nella vinaccia in ingresso pari al 40%wt, quindi:

$$\dot{m}_{polifenoli\ CONV} = \left(\frac{100 \frac{g}{y}}{3.2 \frac{g}{y}} \cdot 1 \frac{kg}{y} \right) \cdot \frac{1}{0.4} = 78.125 \frac{kg}{y}$$

Per l'estrazione a ultrasuoni invece avremo una resa di 6.36 gGAE su 100g di materiale secco (Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020), con sempre una concentrazione di solido in ingresso del 40%wt:

$$\dot{m}_{polifenoli\ US} = \left(\frac{100 \frac{g}{y}}{6.36 \frac{g}{y}} \cdot 1 \frac{kg}{y} \right) \cdot \frac{1}{0.4} = 39.3 \frac{kg}{y}$$

Definite le diverse portate da trattare si sono seguite le fasi precedentemente descritte per andare a definire gli inventari associati ad ogni portata e gli impatti calcolati tramite SimaPro. Confrontando, perciò, le medesime categorie d'impatto considerate nell'analisi principale, si sono analizzati gli impatti relativi per tre differenti sezioni d'impianto: la produzione di polifenoli, il trattamento di pirolisi e, successivamente, la filiera completa, ossia l'intero processo combinando le due porzioni d'impianto. Si sono ottenuti i seguenti risultati:

Analisi filiera – convenzionale – $(*/(\text{kg}_{\text{polifenoli}} + \text{kg}_{\text{biochar}}))$				
	FU vinaccia	FU prima analisi	FU seconda analisi	FU polifenoli
<i>Portata considerata (kg/y)</i>	36930400	18465200	9232600	78.125
Global warming (kgCO ₂)	2.06E+0	2.21E+0	2.21E+0	2.21E+0
Water consumption (m ³ H ₂ O)	1.74E-3	2.10E-3	2.10E-3	2.10E-3
AWARE (m ³ H ₂ O)	6.60E-2	7.50E-2	7.50E-2	7.50E-2
Fresh water eutrophication (kgP)	8.30E-4	8.70E-4	8.70E-4	8.70E-4
Fossil resource scarcity (kg _{oil})	1.03E+0	1.08E+0	1.08E+0	1.08E+0
CED (MJ)	5.02E+1	5.23E+1	5.23E+1	5.23E+1

Tabella 5.7: Analisi delle categorie d'impatto per la filiera completa con estrazione convenzionale. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)

Analisi filiera – ultrasuoni – $(*/(\text{kg}_{\text{polifenoli}} + \text{kg}_{\text{biochar}}))$				
	FU vinaccia	FU prima analisi	FU seconda analisi	FU polifenoli
<i>Portata considerata (kg/y)</i>	36930400	18465200	9232600	39.3
Global warming (kgCO ₂)	1.97E+0	2.12E+0	2.13E+0	2.13E+0
Water consumption (m ³ H ₂ O)	1.68E-3	2.10E-3	2.10E-3	2.10E-3
AWARE (m ³ H ₂ O)	6.40E-2	7.20E-2	7.20E-2	7.20E-2
Fresh water eutrophication (kgP)	8.00E-4	8.40E-4	8.40E-4	8.40E-4
Fossil resource scarcity (kg _{oil})	1.00E+0	1.04E+0	1.04E+0	1.04E+0
CED (MJ)	4.83E+1	5.03E+1	5.03E+1	5.03E+1

Tabella 5.8: Analisi delle categorie d'impatto per la filiera completa con estrazione a ultrasuoni. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)

Analisi produzione biochar – convenzionale – (* /kg_{biochar})				
	FU vinaccia	FU prima analisi	FU seconda analisi	FU polifenoli
<i>Portata considerata (kg/y)</i>	36930400	18465200	9232600	39.3
Global warming (kg _{CO2})	3.60E-1	3.60E-1	3.60E-1	3.60E-1
Water consumption (m ³ _{H2O})	3.30E-5	3.30E-5	3.30E-5	3.30E-5
AWARE (m ³ _{H2O})	1.23E-3	1.23E-3	1.23E-3	1.23E-3
Fresh water eutrophication (kg _P)	4.00E-6	4.00E-6	4.00E-6	4.00E-6
Fossil resource scarcity (kg _{oil})	1.30E-1	1.30E-1	1.30E-1	1.30E-1
CED (MJ)	5.95E+0	5.95E+0	5.95E+0	5.95E+0

Tabella 5.9: Analisi delle categorie d'impatto per la produzione di biochar, tramite pirolisi, per il processo con estrazione convenzionale. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)

Analisi produzione biochar – ultrasuoni – (* /kg_{biochar})				
	FU vinaccia	FU prima analisi	FU seconda analisi	FU polifenoli
<i>Portata considerata (kg/y)</i>	36930400	18465200	9232600	39.3
Global warming (kg _{CO2})	3.60E-1	3.60E-1	3.60E-1	3.60E-1
Water consumption (m ³ _{H2O})	3.30E-5	3.30E-5	3.30E-5	3.30E-5
AWARE (m ³ _{H2O})	1.23E-3	1.23E-3	1.23E-3	1.23E-3
Fresh water eutrophication (kg _P)	4.00E-6	4.00E-6	4.00E-6	4.00E-6
Fossil resource scarcity (kg _{oil})	1.30E-1	1.30E-1	1.30E-1	1.30E-1
CED (MJ)	5.95E+0	5.95E+0	5.95E+0	5.95E+0

Tabella 5.10: Analisi delle categorie d'impatto per la produzione di biochar, tramite pirolisi, per il processo con estrazione a ultrasuoni. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)

Analisi produzione polifenoli – convenzionale – (* /kg _{polifenoli})				
	FU vinaccia	FU prima analisi	FU seconda analisi	FU polifenoli
<i>Portata considerata (kg/y)</i>	36930400	18465200	9232600	39.3
Global warming (kg _{CO2})	2.75E+1	2.98E+1	2.98E+1	2.98E+1
Water consumption (m ³ _{H2O})	2.70E-2	3.40E-2	3.40E-2	3.40E-2
AWARE (m ³ _{H2O})	1.04E+0	1.18E+0	1.18E+0	1.18E+0
Fresh water eutrophication (kg _P)	1.32E-2	1.40E-2	1.40E-2	1.40E-2
Fossil resource scarcity (kg _{oil})	1.45E+1	1.53E+1	1.53E+1	1.53E+1
CED (MJ)	7.10E+2	7.46E+2	7.46E+2	7.46E+2

Tabella 5.11: Analisi delle categorie d'impatto per la produzione di polifenoli tramite estrazione convenzionale. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)

Analisi produzione polifenoli – ultrasuoni – (* /kg _{polifenoli})				
	FU vinaccia	FU prima analisi	FU seconda analisi	FU polifenoli
<i>Portata considerata (kg/y)</i>	36930400	18465200	9232600	39.3
Global warming (kg _{CO2})	1.38E+1	1.50E+1	1.50E+1	1.50E+1
Water consumption (m ³ _{H2O})	1.36E-2	1.70E-2	1.70E-2	1.70E-2
AWARE (m ³ _{H2O})	5.20E-1	6.00E-1	6.00E-1	6.00E-1
Fresh water eutrophication (kg _P)	6.60E-3	7.00E-3	7.00E-3	7.00E-3
Fossil resource scarcity (kg _{oil})	7.32E+0	7.70E+0	7.70E+0	7.70E+0
CED (MJ)	3.58E+2	3.75E+2	3.75E+2	3.75E+2

Tabella 5.12: Analisi delle categorie d'impatto per la produzione di polifenoli tramite estrazione a ultrasuoni. (* indica l'unità di misura della categoria d'impatto)

5.7.2 Conclusioni

Dalle seguenti tabelle si può affermare che l'analisi effettuata presenta una forte consistenza, in quanto, al variare della FU considerata, i risultati rimangono pressoché uguali. Le leggere variazioni possono essere giustificate con l'utilizzo di proporzioni lineari per la definizione degli inventari delle portate considerate.

Dai risultati ottenuti si possono osservare le seguenti conclusioni:

- La sezione d'impianto più impattante è la produzione dei polifenoli tramite estrazione, essendo la fase di processo contenente più apparecchiature. In generale si ha un impatto relativo decisamente minore per il processo di estrazione a ultrasuoni, grazie ad una resa in polifenoli che è doppia rispetto al processo di estrazione convenzionale.
- La sezione di pirolisi impatta in modo fortemente marginale rispetto al processo complessivo, grazie ad un numero minore di apparecchiature utilizzate e ad una produzione di biochar molto elevata. Non si osservano differenze tra il processo a ultrasuoni e il processo convenzionale data la minima variazione della portata di scarto entrante in questa fase di processo.
- Analizzando la filiera complessiva si può notare come l'aggiunta del processo di pirolisi provochi un avvicinamento delle emissioni relative tra le due tecnologie estrattive, seppur con un minimo vantaggio in termini di impatto ambientale per il processo a ultrasuoni. Questo andamento è spiegato dall'unità di misura che si è scelta di adottare, perché, avendo una portata di biochar prodotto notevolmente superiore ai polifenoli, l'emissione tenderà ad avvicinarsi ai valori stabiliti per la fase di pirolisi.
Se si modulasse l'emissione non in base alle portate massiche prodotte, ma in base al valore economico dei prodotti, si osserverebbe una tendenza ad avvicinarsi alle emissioni della fase estrattiva, avendo i polifenoli un costo di mercato superiore al biochar.

In conclusione, si è attuata una analisi comparativa degli impatti del processo considerato rispetto ai processi di smaltimento dei rifiuti organici maggiormente utilizzati a livello industriale, ossia il compostaggio e la digestione anaerobica.

Tramite l'utilizzo del database Ecoinvent 3.8 di SimaPro si sono stabiliti per i due processi i seguenti impatti relativi:

Processi convenzionali di trattamento dello scarto – (* /kg _{biowaste})		
	Digestione anaerobia	Compostaggio
Global warming (kg _{CO2})	-3.93E-2	1.63E-2
Water consumption (m ³ _{H2O})	5.78E-3	-7.74E-4
AWARE (m ³ _{H2O})	-2.48E-2	-2.91E-2
Fresh water eutrophication (kg _P)	-8.77E-4	-9.04E-6
Fossil resource scarcity (kg _{oil})	-7.00E-3	-5.00E-3
CED (MJ)	-3.08E-1	-2.44E-3

Tabella 5.13: Analisi degli impatti per il processo di digestione anaerobica e di compostaggio.

Si osserva quindi come il processo di trattamento della biomassa per la produzione di polifenoli e biochar abbia un impatto ambientale notevolmente superiore ai classici processi di trattamento della biomassa di scarto, ma questi risultati sono giustificabili con il fatto che si riesce a produrre un prodotto ad alto valore aggiunto (polifenoli), oltre ad un solido simile

al carbone che può essere utilizzato come adsorbente, ammendante o per fini energetici. Sarà ovviamente importante attuare un successivo studio di ottimizzazione e intensificazione del processo descritto per diminuirne ulteriormente gli impatti ambientali ed economici.

Confrontando inoltre i risultati ottenuti con l'articolo (Karin Carlqvist et al., 2021) si riscontrano i seguenti risultati:

Confronto delle categorie d'impatto			
	(Karin Carlqvist et al., 2021)	Produzione polifenoli US	Filiera completa US
Global warming (kg _{CO2})	1.10E+1	1.38E+1	1.97E+0
Water consumption (m ³ _{H2O})	4.10E-1	1.36E-2	1.68E-3
AWARE (m ³ _{H2O})	/	5.20E-1	6.40E-2
Fresh water eutrophication (kg _P)	2.50E-3	6.60E-3	8.00E-4
Fossil resource scarcity (kg _{oil})	3.20E+0	7.32E+0	1.00E+0
CED (MJ)	/	3.58E+2	4.83E+1

Tabella 5.14: Confronto degli impatti ambientali con l'articolo (Karin Carlqvist et al., 2021). ("/" indica la mancanza del dato)

Si può notare quindi come gli impatti della fase estrattiva a ultrasuoni siano paragonabili con quelli esplicitati nell'articolo (Karin Carlqvist et al., 2021), ma, grazie alla costruzione della filiera completa con il processo di pirolisi, si nota una diminuzione notevole degli impatti ambientali del processo, oltre alla produzione di due prodotti con un valore economico.

6. Analisi economica del processo

6.1 Introduzione alla valutazione economica

La valutazione economica di un impianto è un'analisi fondamentale a livello ingegneristico perché permette, tramite una serie di analisi sempre più specifiche, di avere un'idea chiara sulla sostenibilità economica del processo considerato. Durante la progettazione e la successiva realizzazione di un impianto industriale si dovranno attuare diverse analisi, a livello di dettaglio crescente, che possano permettere al "management" aziendale di avere una stima realistica dei costi di costruzione, dei costi operativi e dei guadagni stimati. Perciò, col proseguire temporale del processo di progettazione si dovranno attuare i seguenti studi (Richard Turton et al., 2018):

- *Oder-of-Magnitude Estimate*: analisi molto preliminare dei costi basati principalmente sui costi stimati per processi simili in letteratura. Quest'analisi è a livello temporale la prima che viene attuata per avere un'idea generale della fattibilità dell'idea di realizzazione, perciò, essendo preliminare, richiederà la stesura di un semplice Block Flow Diagram (BFD).
- *Study Estimate*: questa tipologia di stima utilizza un elenco delle principali apparecchiature del processo, dimensionate in modo approssimativo e schematizzate in un Process Flow Diagram (PFD), in modo da calcolare una prima stima del costo capitale.
- *Preliminary Design Estimate*: rispetto al caso precedente questo studio richiede un dimensionamento più dettagliato delle apparecchiature, in cui si approfondiscono anche le

utilities utilizzate e un layout approssimativo delle tubazioni e delle utenze elettriche. Anche in questo studio le analisi si basano su un PFD.

- *Definitive Estimate*: questa analisi richiede un dimensionamento completo di tutte le apparecchiature, le utilities, la strumentazione e l'impianto elettrico, costruendo perciò un PFD completo e una prima versione del P&ID (Piping and Instrumentation Diagram).
- *Detailed Estimate*: il passo successivo è una stima completa di tutti i sistemi di controllo e sicurezza, con la stesura completa del P&ID. Dopo questa ultima fase di analisi l'impianto sarà pronto per passare alla fase di costruzione. Avvenuta la costruzione sarà fondamentale la fase di "Commissioning" per controllare che il processo sia stato realizzato in modo congruente con la seguente analisi.

Ognuna di queste analisi è caratterizzata da un grado di precisione descritto dalla seguente tabella:

Tipologia di analisi	Livello di definizione [% della completa definizione]
Oder-of-Magnitude Estimate	0-2
Study Estimate	1-15
Preliminary Design Estimate	10-40
Definitive Estimate	30-70
Detailed Estimate	50-100

Tabella 6.1: Livello di dettaglio delle diverse tipologie di analisi. (Richard Turton et al., 2018)

In questa tesi si è attuata un'analisi *Study Estimate*, con il livello di dettaglio ridotto rispetto ad un'analisi economica completa.

I costi di produzione associati ad un impianto si dividono in costi fissi (CF) e costi variabili (CV). I primi sono costi indipendenti dal tempo e costanti con la produttività che racchiudono le spese per le apparecchiature, le assicurazioni, il personale e la manutenzione, mentre la seconda tipologia di costi è direttamente proporzionale alla produttività, includendo tutta una serie di parametri come il costo delle materie prime, delle utilities e della porzione variabile del personale. (Gaia Mazzanti et al., 2022)

In generale si possono andare a suddividere i costi di un impianto in *costi capitali*, associati al costo delle principali apparecchiature presenti nel processo e in *costi operativi*, necessari a mantenere in funzione l'impianto garantendo una produzione continua ed efficiente. Si approfondisce nei seguenti paragrafi la metodologia di calcolo e le sottocategorie racchiuse in queste due definizioni.

6.1.1 Costi capitali

Il costo capitale è stato calcolato a partire dalle apparecchiature descritte nel processo di estrazione dei polifenoli e successiva pirolisi dello scarto estrattivo. Dopo aver effettuato tutti i bilanci di materia ed energia necessari ad un corretto dimensionamento delle apparecchiature si è proceduto col calcolo del costo capitale tramite il metodo *Bare Module Cost*, utilizzando la seguente formula (Richard Turton et al., 2018):

$$C_{BM} = C_p^0 F_{BM} = C_p^0 (B_1 + B_2 F_M F_P)$$

Si possono individuare le seguenti variabili:

- C_{bm} è il costo complessivo di una certa apparecchiatura ed è chiamato *Bare Module Cost*.
- C_p^0 è il costo dell'apparecchiatura standard, ossia costruita in acciaio al carbonio e alla pressione atmosferica, e viene chiamato *Purchased Cost*.
- F_{bm} è un fattore correttivo che considera variazioni nel materiale di costruzione e nelle condizioni di processo e viene chiamato *Bare Module Factor*. Questo fattore può essere un valore unico definito per certe apparecchiature oppure può essere calcolato in base a quattro differenti parametri: due costanti B_1 e B_2 , il *Material Factor* F_M , definito in base al materiale costruttivo dell'apparecchiatura, e il *Pressure Factor* F_P associato alla pressione di esercizio.

Si dovranno perciò andare a definire i seguenti parametri per poter ottenere il *Bare Module Cost*. Innanzitutto, si procede con la definizione del *Purchased Cost* C_p^0 (Richard Turton et al., 2018):

$$\log_{10}C_p^0 = K_1 + K_2\log_{10}(A) + K_3[\log_{10}(A)]^2$$

In cui K_1 , K_2 e K_3 sono tre costanti definite in base alla tipologia di apparecchiatura, mentre A definisce la dimensione caratteristica. Questa relazione viene associata ad un certo range della dimensione caratteristica dell'apparecchiatura, perciò, laddove la dimensione trovata non rientri nel range previsto, il valore di C_p^0 è valutato tramite la seguente relazione (Richard Turton et al., 2018):

$$\frac{C_p^0}{C_{p,min}^0} = \left(\frac{A_p^0}{A_{p,min}^0} \right)^n$$

- $C_{p,min}^0$ è il costo dell'apparecchiatura con dimensione uguale al minimo dell'intervallo di validità della relazione.
- $A_{p,min}^0$ è la dimensione minima dell'intervallo.
- A_p^0 è la dimensione di riferimento dell'apparecchiatura.
- C_p^0 è il costo dell'apparecchiatura sotto esame ed è il nostro obiettivo di calcolo.
- n è il valore che si aggira di norma tra 0.3 e 0.84, perciò per questo studio è stato considerato sempre uguale a 0.6.

Il secondo fattore di interesse è il *Bare Module Factor* F_{bm} che, come si è precedentemente definito, dipende dalla tipologia di materiale di costruzione dell'apparecchiatura e dalle condizioni di pressione in cui opera. Quando si rende necessario il calcolo del *Pressure Factor* F_P risulta fondamentale individuare la relazione corretta da utilizzare in funzione della tipologia di apparecchiatura considerata (Richard Turton et al., 2018):

$$F_{P,vessel} = \frac{\frac{PD}{2SE - 1.2P} + CA}{t_{min}}$$

- P è la pressione in barg.
- D è il diametro del serbatoio.
- S è il massimo sforzo sostenuto dall'acciaio pari a 944 bar.
- E è l'efficienza di saldatura pari a 0.9.
- CA è il fattore di corrosione posto pari a 0.00315 m.
- t_{min} è lo spessore minimo richiesto per le pareti del serbatoio posto pari a 0.0063 m.

Se il risultato del calcolo è minore di zero allora F_P si pone uguale a 1, se la pressione è inferiore a -0.5 barg si pone uguale a 1.25, mentre per tutti gli altri casi si utilizza la seguente relazione, in cui C_1 , C_2 e C_3 sono costanti e P è la pressione definita in barg (Richard Turton et al., 2018):

$$\log_{10}F_P = C_1 + C_2\log_{10}P + C_3[\log_{10}P]^2$$

L'analisi è stata attuata in prima istanza in dollari per poi convertire lo studio in euro tramite una proporzione unitaria.

Dopo aver calcolato il valore di C_{bm} risulta fondamentale per la validità dell'analisi tener conto del *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI), ossia un fattore correttivo che tiene conto dell'incremento di costo dovuto all'azione inflattiva in base all'anno considerato. L'analisi è stata attuata ricavando i parametri dalla fonte (Richard Turton et al., 2018) che riporta dati tabulati per l'anno 2001 con un CEPCI di 397. In questa tesi invece si è deciso di tabulare i costi rispetto al 2019, essendo l'ultimo anno in cui l'inflazione non ha risentito della pandemia e della guerra in Ucraina, considerando un CEPCI di 592. Secondo queste ipotesi si può ritabulare il costo dell'apparecchiatura tramite la seguente relazione:

$$C_{BM,2019} = C_{BM,2001} \left(\frac{CEPCI_{2019}}{CEPCI_{2001}} \right)$$

Ricavato perciò il valore di C_{BM} nell'anno corrente si può valutare il costo capitale netto totale (*Total Plant Cost, FCI*) tramite un certo fattore moltiplicativo, ricavato da una valutazione statistica di diverse industrie chimiche. Si ottiene perciò la seguente relazione conclusiva (Richard Turton et al., 2018):

$$C_{TM} = FCI = 1.18 \cdot \int_{i=1}^n C_{Bmi}$$

Successivamente si calcola il *Total Overnight Cost* aggiungendo i costi di start-up, finanziamento, inventario e spese generali (rispettivamente 2%, 2.7%, 0.5% e 15%)

6.1.2 Costi operativi

Successivamente alla valutazione del costo complessivo fisso dell'impianto si procede col calcolo dei costi operativi del processo che sono quindi caratterizzati da una forte dipendenza alla produttività d'impianto. Si andrà quindi a calcolare il *Cost of Manufacturing* o *Total General Manufacturing costs* (COM) che è costituito sostanzialmente da tre contributi:

- DCM (*Direct Manufacturing Cost*): in questo termine sono racchiusi tutti i costi legati all'acquisto delle materie prime, allo smaltimento dei rifiuti del processo, al costo delle utilities utilizzate e al costo della manodopera per il processo. È interessante approfondire in modo più completo come si può procedere per il calcolo del costo della manodopera, iniziando col calcolo del numero di dipendenti necessari:

$$N_{OL} = (6.29 + 31.7 P^2 + 0.23 N_{np})^{0.5}$$

In cui P è il numero di step di processo che includono particelle solide, mentre N_{np} è il numero di step che non includono particolato. Successivamente considerando uno stipendio annuale C_{DP} si calcola il costo complessivo:

$$C_{OL} = 4.5 \cdot N_{OL} \cdot C_{DP}$$

- **FMC (Fixed Manufacturing Cost):** sono i costi associati all'ammortamento, alle tasse e assicurazioni locali e ai costi generali dell'impianto.
- **GE (General Expenses):** è una categoria molto generale che comprende i costi dovuti alla gestione degli uffici di amministrazione, dei costi di distribuzione e vendita e dei costi di ricerca e sviluppo.

Si possono riassumere i seguenti costi tramite la seguente tabella fornita dalla fonte (Richard Turton et al., 2018):

Direct Manufacturing Cost	
Raw materials	C_{RM}
Waste treatment	C_{WT}
Utilities	C_{UT}
Operating labor	C_{OL}
Direct supervisory and clerical labor	$0.18 C_{OL}$
Maintenance and repairs	$0.06 FCI$
Operating supplies	$0.009 FCI$
Laboratory charges	$0.15 C_{OL}$
Patents and royalties	$0.03 COM$
Fixed Manufacturing Cost	
Depreciation	$0.1 FCI$
Local taxes and insurance	$0.032 FCI$
Plant overhead costs	$0.708 C_{OL} + 0.036 FCI$
General Expenses	
Administration cost	$0.177 C_{OL} + 0.009 FCI$
Distribution and selling costs	$0.11 COM$
Research and development	$0.05 COM$
Total costs	
DMC + FMC + GE	

Tabella 6.2: Definizione dei costi operativi di un processo. (Richard Turton et al., 2018)

6.2 Studio di analisi economica

Dopo aver introdotto a livello teorico i passaggi chiave per attuare un'analisi economica di un impianto si procede attuando lo studio sull'impianto sotto esame in questa tesi, descrivendo in un primo momento le materie prime trattate e, successivamente, calcolando i costi capitali, i costi operativi e i parametri economici principali.

6.2.1 Descrizione del processo

Nel seguente studio si è attuata l'analisi economica del processo estrattivo di polifenoli con successiva pirolisi dello scarto di estrazione considerando come materie prime entranti le principali produzioni agroalimentari della regione Piemonte, in un'ottica di economia circolare. In questo modo, oltre ad aumentare la resa estrattiva del processo, si è proposto un impianto capace di trattare differenti scarti alimentari, ottenendo quindi un maggior grado di flessibilità e modularità.

Si è optato per la scelta di tre diversi scarti frutticoli che fossero caratterizzati da un'elevata produzione annuale e con proprietà chimico-fisiche simili alla vinaccia e, assumendo uno scarto produttivo del 1 %wt, si sono ottenute le seguenti portate annuali:

Descrizioni delle portate considerate			
Tipologia di scarto	Produzione annuale in Piemonte (t/y)	Scarto annuale prodotto (t/y)	Periodo di produzione
Mele	190218	1902.18	Tra novembre e maggio
Kiwi	100310	1003.10	Tra dicembre e aprile
Susine	29507	295.07	Tra luglio e settembre
fonte	(Ilaria Borri, Stefano Trione, 2020)	1%wt della produzione annuale	(Latino Gianfranco et al., 2007)

Tabella 6.3: Descrizione degli scarti agricoli entranti nel processo.

Ricavate le portate annuali di scarto si sono calcolate le portate di scarto mensili e, successivamente, si è costruito un calendario annuale di trattamento di queste biomasse, suddividendo nei dodici mesi le vinacce, essendo lo scarto di maggior interesse su cui si basa il processo, e integrando stagionalmente questa portata con gli altri scarti agricoli, in modo da proporre un sistema integrato che tenga conto della stagionalità della produzione agricola, limitando di conseguenza lo stoccaggio.

Di seguito sono riportate le portate mensili considerate e il calendario stagionale completo:

$$\dot{m}_{\text{vinaccia mensile}} = \frac{36930.4 \frac{t}{y}}{12 \frac{\text{mesi}}{y}} = 3077.53 \frac{t}{\text{mese}}$$

$$\dot{m}_{\text{susine mensile}} = \frac{295.07 \frac{t}{y}}{2 \frac{\text{mesi}}{y}} = 147.53 \frac{t}{\text{mese}}$$

$$\dot{m}_{\text{kiwi mensile}} = \frac{1003.1 \frac{t}{y}}{3 \frac{\text{mesi}}{y}} = 334.37 \frac{t}{\text{mese}}$$

$$\dot{m}_{mele\ mensile} = \frac{1902.18 \frac{t}{y}}{4 \frac{mesi}{y}} = 475.54 \frac{t}{mese}$$

Si considera perciò il seguente calendario:

CALENDARIO ANNUALE		
Mese dell'anno	Portata mensile (t/mese)	Scarti trattati nel mese
Gennaio	3411.90	Vinaccia + kiwi
Febbraio	3411.90	Vinaccia + kiwi
Marzo	3553.08	Vinaccia + mele
Aprile	3553.08	Vinaccia + mele
Maggio	3553.08	Vinaccia + mele
Giugno	3553.08	Vinaccia + mele
Luglio	3225.07	Vinaccia + susine
Agosto	3225.07	Vinaccia + susine
Settembre	3077.53	Vinaccia
Ottobre	3077.53	Vinaccia
Novembre	3077.53	Vinaccia
Dicembre	3411.90	Vinaccia + kiwi

Tabella 6.4: Calendario annuale delle biomasse di scarto trattate.

Si è quindi dimensionato l'impianto complessivo assumendo in entrata la portata mensile maggiore. Considerando, perciò, quattro settimane mensili ognuna con 40h lavorative si è calcolata la seguente portata oraria:

$$\dot{m}_{inlet} = 3553.078 \frac{t}{mese} \cdot \frac{1}{160} \frac{mese}{h} = 22.21 \frac{t}{h}$$

6.2.2 Calcolo dei costi capitali

Per poter calcolare i costi capitali si deve innanzitutto dimensionare le apparecchiature utilizzate durante l'intero processo considerando la portata oraria precedentemente calcolata. Il dimensionamento avviene calcolando la dimensione caratteristica dell'apparecchiatura richiesta per la definizione del parametro *Purchased Cost* C_p^0 :

- *Scambiatore di calore per l'essiccazione*: si dovrà calcolare l'area di scambio necessaria a fornire tutto il calore richiesto dall'essiccazione termodinamica. Applicando gli stessi calcoli riportati nel paragrafo 4.2.3 si ottengono i seguenti dati da cui si può calcolare il risultato desiderato:

Q	34775.49	MJ/h	9659859	W
U	56.78	W/m ² K	-	-
ΔT	75	K	-	-

Tabella 6.5: Dati per il calcolo dell'area di scambio dell'essiccatore.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = 2268.37 \text{ m}^2$$

- *Miscelatore*: si calcola il volume del miscelatore necessario al trattamento dell'intera portata oraria, assumendo la densità della biomassa di scarto entrante uguale alla densità dell'acqua e un fattore moltiplicativo di 1.2 per garantire un sufficiente spazio di testa vuoto all'apparecchiatura. Perciò, secondo le seguenti ipotesi, si ottiene questo volume:

$$V_{blender} = \frac{m_{biomassa}}{\rho_{H2O}} = \frac{9976.07 \text{ kg}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 1.2 = 11.97 \text{ m}^3$$

- *Estrattore*: si calcola il volume necessario per l'estrazione assumendo le stesse ipotesi semplificative considerate per il miscelatore, perciò:

$$V_{estr} = \frac{m_{biomassa} + m_{etanolo} + m_{H2O}}{\rho_{H2O}} \cdot 1.2 = \frac{448145.18 \text{ kg}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 1.2 = 537.77 \text{ m}^3$$

- *Pompa*: si calcola la potenza elettrica necessaria per il pompaggio dell'estratto nel filtro tramite le relazioni descritte nel paragrafo 4.2.7. Come portata entrante alla filtrazione si assume quella uscente dal processo di estrazione a ultrasuoni, essendo quella maggiore, e si ottiene il seguente risultato:

$$P = Q \cdot \Delta p = 18300 \text{ W} = 18.30 \text{ kW}$$

- *Filtro*: per il filtro la dimensione caratteristica riportata nel calcolo del C_p^0 è l'area filtrante; perciò, si calcola innanzitutto il volume totale di estrazione, per poi assumere un'area filtrante utile ad avere una dimensione consona per la progettazione di un impianto reale.

$$V_{filtro} = V_{US} \cdot 1.2 = 438.73 \text{ m}^3 \cdot 1.2 = 526.48 \text{ m}^3$$

Perciò assumo un'area filtrante di circa 200 m², in modo da ottenere una lunghezza del filtro di circa 2.5 m.

- *Scambiatore di calore per l'essiccazione pre-pirolisi*: si attua il dimensionamento analogamente al primo essiccatore, considerando come portata entrante quella del processo estrattivo convenzionale essendo la maggiore. Si ottiene perciò la seguente area di scambio:

Q	3189.32	MJ/h	885922.22	J/s
U	56.78	W/m ² K	-	-
ΔT	75	K	-	-

Tabella 6.6: Dati per il calcolo dell'area di scambio dell'essiccatore pre-pirolisi.

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T} = 208 \text{ m}^2$$

- *Pirolizzatore:* in questo caso si calcola il calore necessario da fornire che si è ricavato tramite il bilancio termodinamico. Si dovrebbe considerare la differenza tra estrazione convenzionale e ad ultrasuoni, ma, essendo minima, si decide di trascurarla assumendo la portata termica maggiore dell'estrazione convenzionale. Perciò si ottiene:

$$Duty = 18517.45 \frac{MJ}{h} = 5143736.11 \frac{J}{s} = 5143.74 \text{ kW}$$

Dopo aver dimensionato tutte le apparecchiature presenti nel processo in esame si è proceduto con il calcolo del *Purchased Cost* C_p^0 tramite le relazioni riportate nel paragrafo 6.1.1. I calcoli sono stati riassunti nelle seguenti tabelle:

Descrizione delle apparecchiature (Richard Turton et al., 2018)					
Apparecchiatura	Descrizione	Unità	min	max	A
dryer	drum	area (m ²)	0.5	50	2268.37
blender	kneader	volume (m ³)	0.14	3	11.97
tower	tray and packed	volume (m ³)	0.3	520	537.77
pump	centrifugal	potenza (kW)	1	300	18.30
filter	cartridge	area (m ²)	15	200	200
dryer	drum	area (m ²)	0.5	50	208
furnace	pyrolysis furnace	duty (kW)	3000	100000	5143.74

Tabella 6.7: Riassunto delle dimensioni caratteristiche delle apparecchiature considerate.

Calcolo del Purchased Cost (Richard Turton et al., 2018)					
Apparecchiatura	Descrizione	K1	K2	K3	C_p^0 (k€)
dryer	drum	4.5472	0.2731	0.134	2466.19
blender	kneader	5.0141	0.5867	0.3224	534.57
tower	tray and packed	3.4974	0.4485	0.1074	328.50
pump	centrifugal	3.3892	0.0536	0.1538	5.03
filter	cartridge	3.2107	0.7597	0.0027	93.99
dryer	drum	4.5472	0.2731	0.134	588.08
furnace	pyrolysis furnace	2.3859	0.9721	-0.0206	512.74

Tabella 6.8: Calcolo del Purchased Cost.

Successivamente si procede con la stima dei costi capitali andando a ricavare il *Bare Module Factor* F_{bm} tramite le relazioni riportate nel paragrafo 6.1.1, ottenendo i seguenti risultati:

Calcolo del Bare Module Factor (Richard Turton et al., 2018)					
Apparecchiatura	B1	B2	F _p	F _m	F _{bm}
dryer					1.6
blender					1.12
tower	2.25	1.82	1	1	4.07
pump	1.89	1.35	1	1.6	4.05
filter					1.65
dryer					1.6
furnace					4

Tabella 6.9: Calcolo del Bare Module Factor.

Infine, grazie alla conoscenza dei *Purchased Costs* e *Bare Module Factors*, si può procedere col calcolo del *Total Plant Cost* C_{TM} , convertito tramite l'indice CEPCI all'anno 2019.

Calcolo del Total Plant Cost (Richard Turton et al., 2018)					
Apparecchiatura	C _p ⁰ (k€)	F _{bm}	C _{bm} - 2001 (k€)	C _{bm} - 2019 (k€)	C _{TM} (k€)
dryer	2466.17	1.6	3945.90	5884.06	
blender	534.57	1.12	598.72	892.80	
tower	328.50	4.07	1337.01	1993.73	
pump	5.03	4.05	20.39	30.41	
filter	93.991	1.65	155.09	231.26	
dryer	588.08	1.6	940.93	1403.09	
furnace	512.74	4	2050.96	3058.37	
TOT			9048.99	13493.71	15922.58

Tabella 6.10: Calcolo del Total Plant Cost.

$$\text{Total Overnight Cost} = C_{TM} + (0.02 + 0.027 + 0.005 + 0.15) \cdot C_{TM} = \mathbf{19138.94 \text{ k€}}$$

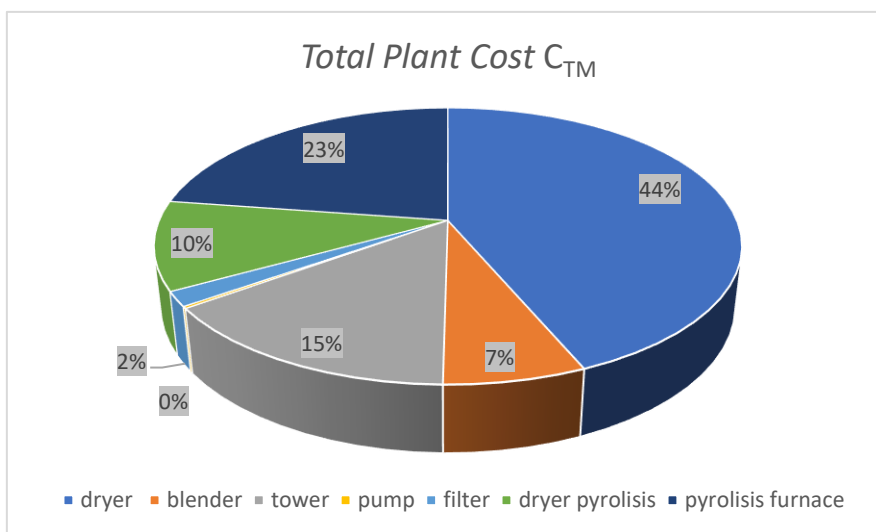


Figura 6.1: Suddivisione dei costi capitali per ogni apparecchiatura.

Dal grafico riportato si riscontra come il 65% del costo capitale totale sia legato all'acquisto del pirolizzatore e del primo essiccatore, mentre le apparecchiature sostanzialmente ininfluenti sono il filtro e la pompa, utilizzati per la fase di purificazione. Risulta importante, perciò, analizzare ulteriormente processi di intensificazione basati sullo scambio termico negli essiccatori per diminuirne il dimensionamento e di conseguenza i costi.

6.2.3 Calcolo dei costi operativi

Nel calcolo dei costi operativi vengono inclusi tutte le tipologie di costi dipendenti dal tempo e dalla produttività, come il costo dello smaltimento dei rifiuti, il costo delle materie prime, il costo delle utilities e il costo della manodopera e successivamente, tramite le relazioni statistiche derivanti da studi empirici riportate nel paragrafo 6.1.2, si possono ricavare una vasta gamma di costi annessi al mantenimento dell'impianto in funzione. Si procede dunque col calcolo dei contributi chiave, basandosi sulle tabelle riassuntive poste in appendice, per poter completare la tabella 6.2.

- *Calcolo del costo della manodopera C_{OL}* : il calcolo del costo del personale non dipenderà dalla tipologia di processo considerato dato che è influenzato solo dal numero di apparecchiature considerate. In questa tesi si è considerato di avere un'apparecchiatura trattante solido ($P=1$), ossia il miscelatore, e le rimanenti apparecchiature non trattanti solido ($N_{np}=5$). Tramite queste considerazioni, utilizzando la formula riportata nel paragrafo 6.1.2, si ricava il numero di dipendenti necessari al mantenimento in funzione dell'impianto:

$$N_{OL} = (6.29 + 31.7 P^2 + 0.23 N_{np})^{0.5} = 6.26 = 7 \text{ persone}$$

Perciò per stabilire il costo del personale si è assunto di assumere due quadri valori e cinque operai, ricavando lo stipendio base delle suddette figure in Italia nella fonte (GAZZETTA UFFICIALE DELLA REPUBBLICA ITALIANA, 2021). Basandosi su questi dati si riscontra il seguente costo:

$$C_{DP} = 2 \cdot 58084.2 \frac{\text{€}}{y} + 5 \cdot 24000 \frac{\text{€}}{y} = 236168.4 \frac{\text{€}}{y}$$

$$C_{OL} = 4.5 \cdot C_{DP} = 1062.76 \frac{k\text{€}}{y}$$

- *Calcolo del costo delle utilities C_{UT}* : il costo delle utilities dipenderà dalla tipologia di processo considerato, essendoci delle variazioni tra il processo convenzionale e il processo a ultrasuoni. I costi ricavati sono stati esplicitati per entrambi i processi dalle relazioni riportate di seguito:

Costi unitari delle utilities			
steam from boilers	2.03	€/GJ	(Richard Turton et al., 2018)
kWh mix ITA	0.297	€/kWh	(ARERA, 2021)
azoto	20	€/kg	

Tabella 6.11: Costi unitari delle utilities. (Richard Turton et al., 2018; ARERA, 2021)

Per il costo dell'energia elettrica si è assunto il valore del quarto semestre 2021, per non influenzare l'analisi con l'attuale situazione geopolitica mondiale. Nel costo totale si è considerato anche il costo dello stoccaggio in celle refrigerate della vinaccia di scarto acquistata, essendo l'unica portata distribuita sull'intero anno (Centro Studio Galileo, 2022). Secondo questi dati si riscontrano perciò i seguenti costi:

$$C_{UT_CONV} = 1667.82 \frac{k\text{€}}{y}$$

$$C_{UT_US} = 1642.003 \frac{k\text{€}}{y}$$

- *Calcolo del costo dello smaltimento dei rifiuti C_{WT}* : anche in questo caso il costo di smaltimento delle sostanze esauste dipende dalla tipologia di processo. Dopo aver attribuito un codice CER alle sostanze smaltite si è proseguito con la ricerca del costo di smaltimento:

Costi unitari di smaltimento			
bio-olio (CER 130204*)	0.067	€/kg	(Inail, 2023)
miscela etanolo-acqua (CER 140603)	1.15	€/kg	(Inail, 2023)

Tabella 6.12: Costi unitari di smaltimento. (Inail, 2023)

Tenendo conto di questi dati si sono dunque calcolati i costi:

$$C_{WT_CONV} = 9418.26 \frac{k\text{€}}{y}$$

$$C_{WT_US} = 9409.07 \frac{k\text{€}}{y}$$

- *Costo delle materie prime C_{RM}* : questo parametro non sarà influenzato dalla tipologia di processo, ma dall'anno considerato. Infatti, nel primo anno si dovrà acquistare l'intera quantità di solvente, mentre, negli anni successivi, basterà eguagliare il solvente acquistato al solvente perso nel recupero. Il costo della biomassa di scarto entrante al processo è stato normalizzato al costo della vinaccia.

Costi unitari delle materie prime utilizzate			
etanolo	1.138	€/kg	(Richard Turton et al., 2018)
tap water	1.3143	€/m ³	(ARERA, 2022)
vinaccia	0.032	€/kg	(Qing Jin et al., 2021)

Tabella 6.13: Costi unitari delle materie prime.

Si procede dunque col calcolo del costo complessivo delle correnti materiali necessarie ad avviare il processo:

$$C_{RM \text{ avvio}} = 106548.71 \frac{k\text{€}}{y}$$

Negli anni successivi invece basterà acquistare solo l'1% dei solventi; perciò, si avrà il seguente costo annuale:

$$C_{RM} = 5902.63 \frac{k\text{€}}{y}$$

Conclusa l'analisi dei diversi contributi del costo operativo si utilizza la tabella 6.2 nel paragrafo 6.1.2 per definire i costi complessivi. Si calcola inizialmente il valore di COM (*Total Manufacturing Cost*) considerando il deprezzamento, per poi procedere con la compilazione delle successive tabelle:

$$COM = 0.28 \cdot FCI + 2.73 \cdot C_{OL} + 1.23 \cdot (C_{UT} + C_{WT} + C_{RM})$$

$$COM_{US} = 27538.15 \frac{k\text{€}}{y}$$

$$COM_{CONV} = 27581.21 \frac{k\text{€}}{y}$$

Direct Manufacturing Cost (convenzionale)		
Raw materials	5902.63	k€/y
Waste treatment	9418.26	k€/y
Utilities	1397.18	k€/y
Operating labor	1062.76	k€/y
Direct supervisory and clerical labor	191.30	k€/y
Maintenance and repairs	955.35	k€/y
Operating supplies	143.30	k€/y
Laboratory charges	159.41	k€/y
Patents and royalties	817.45	k€/y
Fixed Manufacturing Cost (convenzionale)		
Depreciation	1592.26	k€/y
Local taxes and insurance	509.52	k€/y
Plant overhead costs	1325.64	k€/y
General Expenses (convenzionale)		
Administration cost	331.41	k€/y
Distribution and selling costs	2997.32	k€/y
Research and development	1362.42	k€/y
Total costs (convenzionale)		
	28166.21	k€/y

Tabella 6.14: Riassunto dei costi operativi per il processo convenzionale.

Direct Manufacturing Cost (ultrasuoni)		
Raw materials	5902.63	k€/y
Waste treatment	9409.07	k€/y
Utilities	1379.33	k€/y
Operating labor	1062.76	k€/y
Direct supervisory and clerical labor	191.30	k€/y
Maintenance and repairs	955.35	k€/y
Operating supplies	143.30	k€/y
Laboratory charges	159.41	k€/y
Patents and royalties	816.45	k€/y
Fixed Manufacturing Cost (ultrasuoni)		
Depreciation	1592.26	k€/y
Local taxes and insurance	509.52	k€/y
Plant overhead costs	1325.64	k€/y
General Expenses (ultrasuoni)		
Administration cost	331.41	k€/y
Distribution and selling costs	2993.66	k€/y
Research and development	1360.75	k€/y
Total costs (ultrasuoni)		
	28132.86	k€/y

Tabella 6.15: Riassunto dei costi operativi per il processo a ultrasuoni.

I seguenti grafici diagrammano l'impatto economico suddividendolo nei tre differenti contributi per entrambi i processi analizzati:

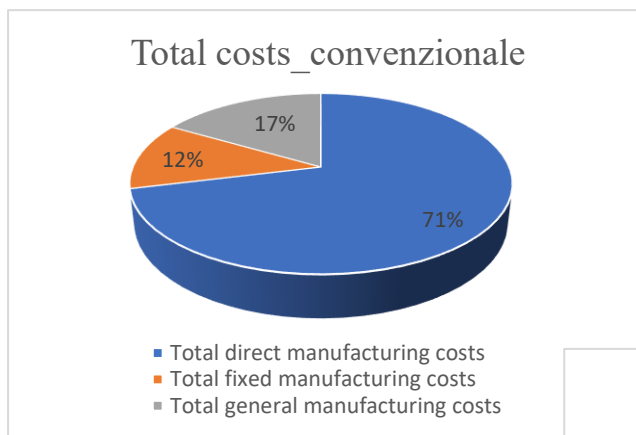
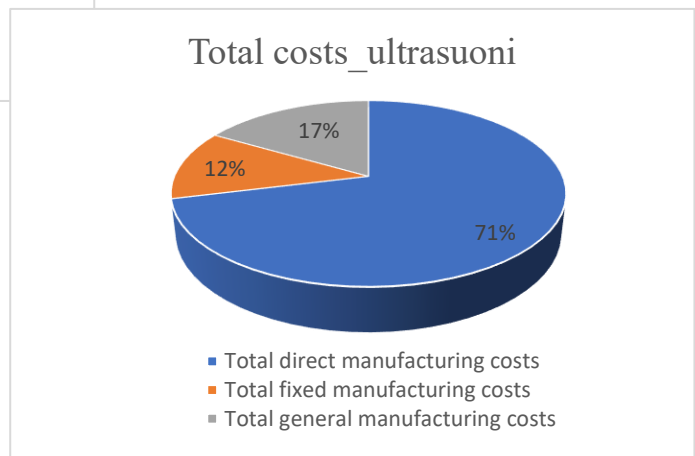


Figura 6.3: Suddivisione dei costi operativi per il processo a ultrasuoni.

Figura 6.2: Suddivisione dei costi operativi per il processo convenzionale.



Nei seguenti grafici si nota come il contributo principale ai costi operativi deriva dai *Total Direct Manufacturing Costs* con una percentuale del 71% per entrambi i processi. Nella seguente categoria il maggiore impatto deriva per il 47% dal *Waste Treatment* e per il 29% dai *Raw Materials*.

6.2.4 Calcolo dei guadagni

Prima di analizzare il guadagno complessivo del processo a ultrasuoni e del processo convenzionale si sono stabilite le rese estrattive delle diverse tipologie di biomasse entranti, in funzione della stagionalità. In particolare, ottenute le differenti rese estrattive delle biomasse considerate, si è applicata una semplice proporzione in funzione della frazione di portata massica entrante al processo. Secondo questa logica si sono ottenuti i risultati riassunti nelle seguenti tabelle:

Rese complessive in base alla stagionalità - CONV			
	resa complessiva (g _{GAE} /100g _{DM})	resa specifica biomassa evidenziata (g _{GAE} /100g _{DM})	fonte
vinacce + mele	3.54	5.73	(Parinaz Hobbi et al., 2023)
vinacce + kiwi	2.96	0.78	(Ying-Hui Mai et al., 2022)
vinacce + susine	3.12	1.367	(Beatrix Sik et al., 2022)

Tabella 6.16: Studio delle rese del processo complessivo convenzionale.

Rese complessive in base alla stagionalità - US			
	resa complessiva (g _{GAE} /100g _{DM})	resa specifica biomassa evidenziata (g _{GAE} /100g _{DM})	fonte
vinacce + mele	7.04	11.46	(Parinaz Hobbi et al., 2023)
vinacce + kiwi	5.89	1.55	(Ying-Hui Mai et al., 2022)
vinacce + susine	6.19	2.734	(Beatrix Sik et al., 2022)

Tabella 6.17: Studio delle rese del processo complessivo a ultrasuoni.

Per stabilire il guadagno annuo del processo in esame si è analizzato il prezzo unitario di vendita dei due composti prodotti: i polifenoli e il biochar, nel quale è stato anche considerato il valore aggiuntivo come credito energetico. Secondo queste ipotesi si sono stabiliti i seguenti prezzi unitari di vendita:

Prezzo di vendita unitario dei prodotti			
polifenoli	40	€/kg	(Giuliano Cavaglià et al., 2018)
biochar	0.255	€/kg	(Nansen Zhang et al., 2017)

Tabella 6.18: Prezzi di vendita dei prodotti considerati.

Dai prezzi di vendita si ottengono i seguenti guadagni:

$$Guadagno_{CONV} = 22742.21 \frac{k\text{€}}{y}$$

$$Guadagno_{US} = 43347.53 \frac{k\text{€}}{y}$$

6.2.5 Risultati ottenuti

In conclusione, per analizzare la sostenibilità economica del processo in esame, si sono inclusi tutti i costi e i guadagni precedentemente calcolati nel *Cumulative Cash Flow*, ossia una metrica di liquidità che valuta quanto l'impianto sia effettivamente vantaggioso a livello economico. Perciò si è considerata una vita dell'impianto di 15 anni e un tempo di costruzione di 5 anni con un interesse del 5%, basandosi per lo studio sui seguenti dati:

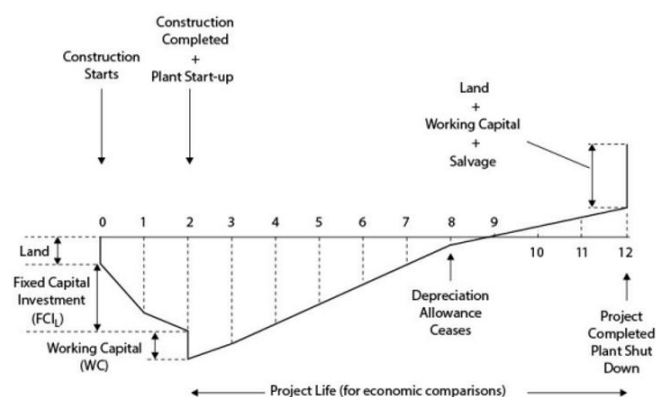


Figura 6.4: Descrizione del Cumulative Cash Flow. (Richard Turton et al., 2018)

Riassunto dei contributi economici		
Costi d'investimento fissi	19138.94	k€/y
Costo materie prime – primo anno	106548.71	k€/y
Costi operativi - CONV	28166.21	k€/y
Costi operativi - US	28132.86	k€/y
Guadagni - CONV	22742.21	k€/y
Guadagni - US	43347.53	k€/y
Costo del trasporto	243.73	k€/y
Costo del terreno	318.45	k€/y

Figura 6.19: Riassunto dei contributi economici per entrambi i processi in esame.

Basandosi perciò sui dati riportati e sullo schema riportato nella figura 6.4, si è costruito il Cumulative Cash Flow per il processo di estrazione di polifenoli da vinaccia di scarto con tecnica estrattiva convenzionale:

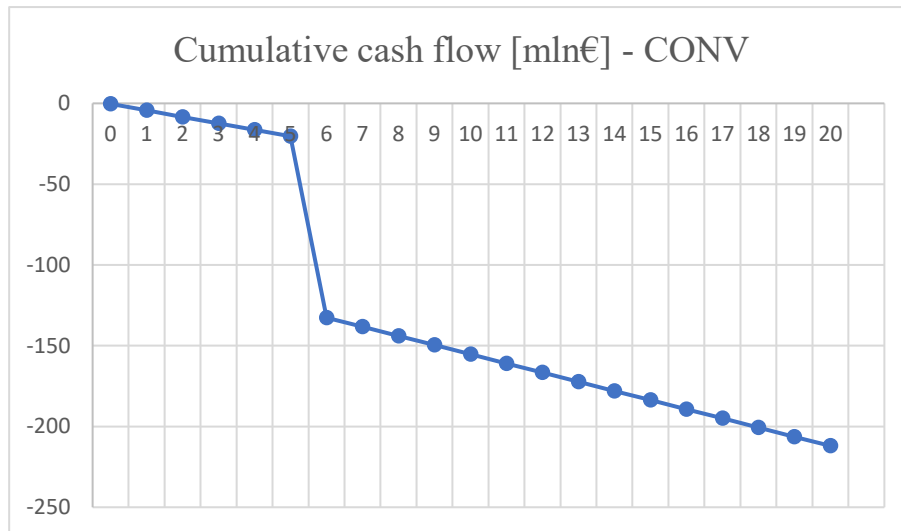


Figura 6.5: Cumulative Cash Flow per il processo convenzionale.

Dal grafico riportato si nota come il processo non sia economicamente sostenibile, con una estrattiva troppo bassa che implica dei guadagni inferiori ai costi operativi annuali dell'impianto. Ciò provoca un aumento monotono della perdita economica totale, con una perdita complessiva completati i 20 anni di circa 220 milioni di euro.

Se si analizza, invece, tramite la stessa tipologia di grafico, il processo estrattivo che utilizza la tecnologia a ultrasuoni, si può notare un netto miglioramento del flusso di cassa grazie all'elevata resa estrattiva del processo che permette di ottenere guadagni annui nettamente maggiori ai costi operativi:

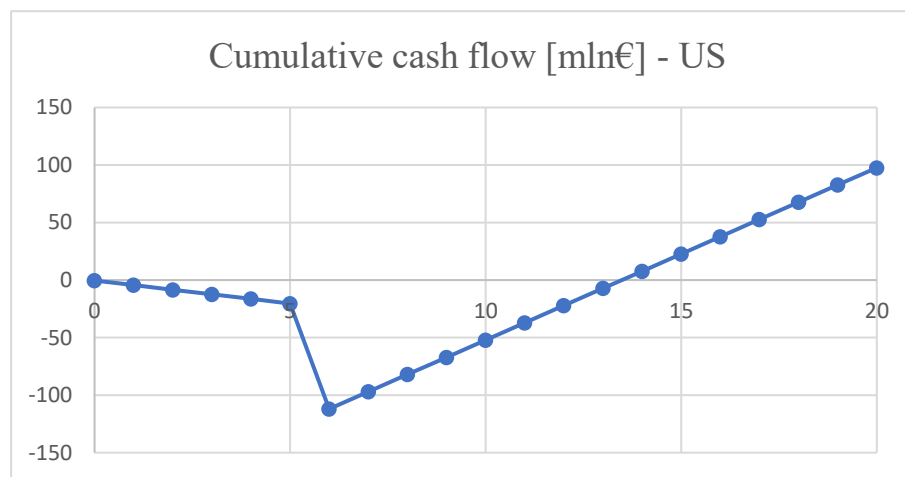


Figura 6.6: Cumulative Cash Flow per il processo a ultrasuoni.

Durante il periodo di funzionamento l'impianto presenta un flusso di cassa positivo che porta dopo i 20 anni di funzionamento ad avere un guadagno di circa 100 milioni di euro. Dalle tabelle riassuntive poste in appendice si possono calcolare una serie di parametri che forniscono informazioni più dettagliate sull'impatto economico del processo in esame (Richard Turton et al., 2018):

- *Pay Back Period (PBP)*: parametro che indica quanto tempo è necessario dall'avvio dell'impianto per ripagare il costo capitale (FCI).

$$PBP = 1.28 \text{ year}$$

- *Cumulative Cash Ratio (CCR)*: parametro adimensionato che indica il valore del progetto al fine vita, relazionandolo al costo d'investimento iniziale.

$$CCR = 1 + \frac{\text{Cumulative Cash Position}}{\text{Land} + \text{WC} + \text{FCI}} = 1.77$$

- *Rate of Return on Investment (ROROI)*: indica la velocità con la quale l'investimento iniziale viene ripagato.

$$ROROI = \frac{\text{slope}}{\text{FCI}} - \frac{1}{n} = 4.48\%$$

Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi è analizzare dal punto di vista ambientale ed economico due impianti che mirano a valorizzare gli scarti provenienti dalla filiera agroalimentare piemontese, con particolare attenzione per il settore vitivinicolo, un'industria di grande importanza commerciale in Piemonte, grazie ai suoi prodotti di eccellenza riconosciuti in tutto il mondo. Nella progettazione degli impianti si sono presi in considerazione due tipologie di tecniche estrattive: l'estrazione convenzionale e l'estrazione ad ultrasuoni, confrontandole in termini di impatti ambientali ed economici. Tali impianti hanno lo scopo di estrarre e purificare prodotti con un elevato interesse commerciale, come i polifenoli, per poi attuare sugli scarti estrattivi un ulteriore processo di pirolisi, ottenendo un recupero energetico ed una produzione di biochar.

I processi analizzati si suddividono in tre fasi principali: un primo pretrattamento della biomassa, la fase estrattiva caratterizzata da una differenza resa in polifenoli e il successivo trattamento a pirolisi dello scarto.

Assumendo come portata di riferimento la produzione annuale di vinacce piemontesi, si è inizialmente attuato uno studio di impatto ambientale, tramite metodologia LCA, analizzando nel dettaglio varie categorie d'impatto specifiche per il territorio in esame. La sezione d'impianto più impattante risulta essere la produzione dei polifenoli tramite estrazione, con ha un impatto relativo decisamente minore per il processo di estrazione a ultrasuoni, grazie ad una resa in polifenoli che è doppia rispetto al processo di estrazione convenzionale, mentre la successiva sezione di pirolisi impatta in modo fortemente marginale rispetto al processo complessivo.

È interessante notare che, analizzando la filiera complessiva, l'aggiunta del processo di pirolisi provochi un avvicinamento delle emissioni relative tra le due tecnologie estrattive, seppur con un minimo vantaggio in termini di impatto ambientale per il processo a ultrasuoni. Infatti, analizzando come categoria d'impatto il *Climate Change*, si ottiene un'emissione specifica del processo estrattivo a ultrasuoni di 1.98 kgCO₂ per chilogrammo di prodotto, mentre per il processo convenzionale di 2.06 kgCO₂.

Da un punto di vista ambientale risulta perciò più conveniente l'utilizzo della tecnologia estrattiva a ultrasuoni, senza però un notevole scarto in termini di emissioni rispetto alla tecnologia convenzionale. Successivamente, per ottenere una visione ingegneristica completa degli impianti in esame, si è attuata l'analisi economica di entrambi i processi, considerando in ingresso la portata di vinacce precedentemente citata, oltre a una serie di altre biomasse di scarto tipiche del territorio piemontese, in modo da evidenziare la flessibilità del processo. Grazie ad una attenta progettazione delle apparecchiature e ad un calcolo accurato delle portate coinvolte si sono potuti calcolare i costi

capitali e i costi operativi (in k€) dei due impianti, utilizzati per stabilire i *Cumulative Cash Flow* e di conseguenza la sostenibilità economica dei processi. Assumendo un prezzo di vendita dei polifenoli di 40 €/kg si evince dai risultati come il processo estrattivo convenzionale non sia economicamente sostenibile, con un prezzo di vendita necessario per uguagliare le prestazioni del processo a ultrasuoni di almeno 76 €/kg, quasi il doppio dell'attuale prezzo di mercato. Analizzando invece il processo a ultrasuoni si ottiene, grazie all'elevata resa del processo estrattivo, un guadagno netto complessivo di circa 97 mln€, rispetto ad una esposizione capitale iniziale di 19 mln€, con un PBP (*Pay Back Period*) di 1.27, un ROROI (*Rate of Return on Investment*) di 4.47% e un CCR (*Cumulative Cash Ratio*) di 1.775.

In questa tesi si è attuata un'analisi *Study Estimate*, con un livello di dettaglio ridotto rispetto ad un'analisi economica completa; perciò, basandosi sui seguenti risultati incoraggianti, studi futuri potrebbero approfondire l'analisi economica ad un livello di dettaglio successivo.

Oggigiorno la sostenibilità è il cardine della ricerca di nuove tecnologie progettate per affrontare l'esaurimento delle risorse. I due impianti qui presentati sono solo il punto di partenza per ulteriori studi che avranno lo scopo di assicurare la rinnovabilità delle risorse e il rispetto dell'ambiente, che per lungo tempo è stato trascurato.

Bibliografia e sitografia

- A. Ibn Ferjani, M. Jeguirim, S. Jellali, L. Limousy, C. Courson, H. Akrouf, N. Thevenin, L. Ruidavets, A. Muller, S. Bennici, *The use of exhausted grape marc to produce biofuels and biofertilizers: Effect of pyrolysis temperatures on biochars properties*, (2019), Renewable and Sustainable Energy Reviews, DOI:10.1016/j.rser.2019.03.034.
- Aarón de la Cerda-Carrasco, Remigio López-Solís, Hugo Nuñez-Kalasic, Álvaro Peña-Neira, Elías Obreque-Slier, *Phenolic composition and antioxidant capacity of pomaces from four grape varieties*, (2014), Society of Chemical Industry, DOI: 10.1002/jsfa.6856.
- Allan Astrup Jensen, Leif Hoffman, Birgitte T. Møller, Anders Schmidt, *Life Cycle Assessment, A guide to approaches, experiences and information sources*, (1998), European Environment Agency, ISBN 92-9167-079-0, pagine 51-70.
- Ana F. Ferreira, Joao P. Ribau, Mario Costa, *A decision support method for biochars characterization from carbonization of grape pomace*, (2021), Biomass and Bioenergy, DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105946.
- Andrea Natolino, Carla Da Porto, *Kinetic models for conventional and ultrasound assistant extraction of polyphenols from defatted fresh and distilled grape marc and its main components skins and seeds*, (2020), Chemical Engineering Research and Design, DOI: 10.1016/j.cherd.2020.01.009.
- António Graça, John Corbet-Milward, Hans R. Schultz, Cengiz Ozer, Mario de la Fuente, *MANAGING BY-PRODUCTS OF VITIVINICULTURAL ORIGIN*, (2018), OIV - International Organisation of Vine and Wine, ISBN 979-10-91799-90-4, pagina 9.
- ARERA, *Andamento del prezzo dell'energia elettrica per il consumatore domestico tipo in maggior tutela*, (2021), <https://www.arera.it/it/dati/eep35.htm>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- ARERA, *APPLICAZIONE DELLA DELIBERAZIONE ARERA N. 665/2017/R/IDR DEL 28/09/2017 (TICSI) - ARTICOLAZIONE TARIFFARIA PER IL SERVIZIO IDRICO INTEGRATO ANNO 2022*, (2022), <https://www.smatorino.it/wp-content/uploads/2022/05/tariffe-sii-2022-MTI3-app-ARERA-prima-agg.pdf>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- Beatrix Sik, Zsolt Ajtony, Erika Lakatos, Rita Székelyhidi, *The effects of extraction conditions on the antioxidant activities, total polyphenol and monomer anthocyanin contents of six edible fruits growing wild in Hungary*, (2022), Heliyon, DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e12048.
- Carla Brazinha, Mafalda Cadima, and Joao G. Crespo, *Optimization of Extraction of Bioactive Compounds from Different Types of Grape Pomace Produced at Wineries and Distilleries*, (2014), Journal of Food Science, DOI: 10.1111/1750-3841.
- Carol Huang, Badr A. Mohamed, Loretta Y. Li, *Comparative life-cycle assessment of pyrolysis processes for producing bio-oil, biochar, and activated carbon from sewage sludge*, (2022), Resources, Conservation & Recycling, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106273.
- Centro Studio Galileo, *PROBLEMATICHE ENERGETICHE: ALCUNI APPROFONDIMENTI*, (2022), <https://www.centrogalileo.it/nuovaPA/Articoli%20tecnici/Billiard/problematiche%20ener>

getiche%20refrigerazione.htm#:~:text=Di%20conseguenza%20un%20magazzino%20frigorifero ,kWh%2Fanno%2Fm3, ultima consultazione: 20/06/2023.

Charalambos Fotakis, Dionysis Christodouleas, Katerina Kokkotou, Maria Zervou, Panagiotis Zoumpoulakis, Panagiotis Moulos, Maria Liouni, Antony Calokerinos, *NMR metabolite profiling of Greek grape marc spirits*, (2012), Food Chemistry, DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.11.128.

Chiara Samori, Andrea Pasteris, Lorenzo Piccinini, *Estrazione di principi attivi da scarti agroindustriali mediante protocolli sostenibili*, (2017), Università di Bologna, pag. 5-12.

Consiglio dell'Unione Europea, *Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici*, (2023), <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/>, ultima consultazione: 20/06/2023.

Cristina del Pozo, Filipe Rego, Neus Puy, Jordi Bartrolí, Esteve Fabregas, Yang Yang, Anthony V. Bridgwater, *The effect of reactor scale on biochars and pyrolysis liquids from slow pyrolysis of coffee silverskin, grape pomace and olive mill waste, in auger reactors*, (2022), Waste Management, DOI:10.1016/j.wasman.2022.05.023.

Di Pietro S., *Tecnologie chimiche industriali*, (1998), Hoepli, ISBN: 9788820356248.

Directindustry, Mulino a cono MTW series, (2023), <https://www.directindustry.it/prod/henan-liming-heavy-industry-science-and-technology/product-57173-2381819.html>, ultima consultazione: 20/06/2023.

E. Bertran, X. Sort, M. Soliva, I. Trillas, *Composting winery waste: sludges and grape stalks*, (2004), Bioresource Technology, DOI: 10.1016/j.biortech.2003.07.012.

Elena Fregonara, *Valutazione sostenibilità progetto*, (2015), FrancoAngeli, ISBN: 978-88-917-2689-6, pagine 99-106.

Esther Gomez-Mejía, David Vicente-Zurdo, Noelia Rosales-Conrado, María Eugenia León-Gonzalez, Yolanda Madrid, *Screening the extraction process of phenolic compounds from pressed grape seed residue: Towards an integrated and sustainable management of viticultural waste*, (2022), LWT – Food Science and Technology, DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113988.

FAO-OIV FOCUS, *Table and dried grapes*, (2016), International Organisation of Vine and Wine and Food and Agriculture Organization of the United Nations, pagina 1.

FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations), *Crops and livestock products*, (2021), <https://www.fao.org/faostat/en/>, ultima consultazione: 20/06/2023.

Farid Chemat, Natacha Rombaut, Anne-Gaëlle Sicaire, Alice Meullemiestre, Anne-Sylvie Fabiano-Tixier, Maryline Abert-Vian, *Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review*, (2016), Ultrasonics Sonochemistry, DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.06.035.

FTI S.r.l., *SupaCarb*, (2023), <https://www.ftisrl.it/wp-content/uploads/2022/11/06-SupaCarb.pdf>, ultima consultazione: 20/06/2023.

- Gaia Mazzanti, Debora Fino, Samir Bensaid, Tonia Tommasi, *Impianti per la valorizzazione di scarti di caffè in un'ottica di economia circolare*, (2022), Politecnico di Torino.
- Galanakis Charis M., *Polyphenols : properties, recovery, and applications*, (2018), Cambridge, Massachusetts, ISBN : 0-12-813573-5, pagine: 1-43.
- GAZZETTA UFFICIALE DELLA REPUBBLICA ITALIANA, *TABELLA DELLE RETRIBUZIONI CONVENZIONALI 2021*, (2021), <https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-tabelle-circolare-n-12-del-15-aprile-2021.pdf>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- Gerhardt Analytical Systems, *SOX THERM – estrattore rapido per estrazioni solido-liquido - ESTRAZIONI IN COMPLETA AUTOMAZIONE*, (2023), https://www.gerhardt.de/fileadmin/Redaktion/downloads/Broschueren/SOX THERM/brochure_S OX THERM_italian.pdf, ultima consultazione: 20/06/2023.
- Giuliano Cavaglia, Massimo Secondo, Matteo Villa, Jacopo Parolin, Giancarlo Cravotto, *VALORIZZAZIONE DEGLI SCARTI VEGETALI DELLA FILIERA DELL'ULIVO E DELLA VITE. UNA PROPOSTA DI INNOVAZIONE RADICALE*, (2018), CHIMICA & TECNOLOGIA, DOI: 10.17374/CI.2018.100.4.20.
- Grand View Research, *Rapporto sulle dimensioni del mercato dei polifenoli, quota e analisi delle tendenze per prodotto (semi d'uva, tè verde, mela, cacao), per applicazione (bevande, alimenti, mangimi), per regione e previsioni di segmento, 2023-2030*, (2021), <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/polyphenols-market-analysis>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- Ilaria Borri, Stefano Trione, *L'AGRICOLTURA NEL PIEMONTE IN CIFRE 2020*, (2020), CREA, ISBN: 9788833850740.
- Inail, *elenco prezzi servizio raccolta e smaltimento rifiuti speciali*, (2023), <https://www.inail.it/cs/internet/docs/ammt-det-contr-servizi-integrati-uffici-inail-dca-all-2c-bis.pdf>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- ISTAT, *Coltivazioni: uva, vino, olive, olio*, (2021), <http://dati.istat.it/Index.aspx?QueryId=33706>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- J. M. Encinar, F. J. Beltran, A. Bernalte, A. Ramiro, J. F. Gonzalez, *PYROLYSIS OF TWO AGRICULTURAL RESIDUES: OLIVE AND GRAPE BAGASSE. INFLUENCE OF PARTICLE SIZE AND TEMPERATURE*, (1996), Biomass and Bioenergy, PII: S0961-9534(96)00029-3.
- Jacqueline Barona, Christopher N. Blesso, Catherine J. Andersen, Youngki Park, Jiyoung Lee, Maria Luz Fernandez, *Grape Consumption Increases Anti-Inflammatory Markers and Upregulates Peripheral Nitric Oxide Synthase in the Absence of Dyslipidemias in Men with Metabolic Syndrome*, (2012), Nutrients, DOI: 10.3390/nu4121945.
- Jansen Moreira Silveira, Cesar Valmor Rombaldi, Juan Saavedra del Aguila, Marcos Gabbardo and Wellynthon Machado da Cunha, *Agronomic and physicochemical parameters of must and wine as a function of changes in 'Cabernet Sauvignon' grapevine canopy*, (2023), Acta Scientiarum, DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.56441>.

- Karin Carlqvist, Ola Wallberg, Gunnar Liden, Pål Borjesson, *Life cycle assessment for identification of critical aspects in emerging technologies for the extraction of phenolic compounds from spruce bark*, (2021), Journal of Cleaner Production, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130093.
- Kathrina Simonen, *Life Cycle Assessment*, (2014), Routledge, ISBN: 978-0-415-70241-6, pagine 14-34.
- Kyla Bruce, Kyle M.D. Reyes, Shegufta Shetranjiwalla, *Connecting the periodic table to the planet with systems, life cycle and circularity thinking*, (2023), Sustainable Chemistry and Pharmacy, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101018>.
- Latino Gianfranco, Quaranta Simone, Gimondo Mariella, Scarzello Daniela, *Frutta e ortaggi del Piemonte*, (2007), Regione Piemonte.
- M. Corrales, S. Toepfl, P. Butz, D. Knorr, B. Tauscher, *Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonics, high hydrostatic pressure or pulsed electric fields: A comparison*, (2007), Innovative Food Science and Emerging Technologies, DOI: 10.1016/j.ifset.2007.06.002.
- Manuel Pinelo, Anis Arnous, Anne S. Meyer, *Upgrading of grape skins: Significance of plant cell-wall structural components and extraction techniques for phenol release*, (2006), Trends in Food Science & Technology, DOI: 10.1016/j.tifs.2006.05.003, 579-590.
- Michael Z. Hauschild, Ralph K. Rosenbaum, Stig Irving Olsen, *Life Cycle Assessment, theory and practice*, (2018), Springer, ISBN 978-3-319-56474-6, pagine 59-401.
- Nansen Zhang, Andrew Hoadley, Jim Patel, Seng Lim, Chao'en Li, *Sustainable options for the utilization of solid residues from wine production*, (2017), Waste Management, DOI: 10.1016/j.wasman.2017.01.006.
- OIV (International Organisation of Vine and Wine), *INTERNATIONAL CODE OF OENOLOGICAL PRACTICES*, (2021), ISBN: 978-2-85038-030-3, pagine 43-45.
- Online Browsing Platform (OBP), *ISO 14040:2006(en)*, (2006), <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- Parinaz Hobbi, Oseweuba Valentine Okoro, Maryam Hajiabbas, Masoud Hamidi, Lei Nie, Véronique Megalizzi, Paul Musonge, Gianina Dodi, Amin Shavand, *Chemical Composition, Antioxidant Activity and Cytocompatibility of Polyphenolic Compounds Extracted from Food Industry Apple Waste: Potential in Biomedical Application*, (2023), Molecules, DOI:10.3390/molecules28020675.
- Qing Jin, Sean F. O'Keefe, Amanda C. Stewart, Andrew P. Neilson, Young-Teck Kim, Haibo Huang, *Techno-economic analysis of a grape pomace biorefinery: production of seed oil, polyphenols, and biochar*, (2021), Elsevier, S0960308521000201.
- Richard Turton, Joseph A. Shaeiwitz, Debangsu Bhattacharyya, Wallace B. Whiting, *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*, (2018), Pearson Education, Inc, ISBN-13: 978-0-13-417740-3.

- SimaPro, *SimaPro Database Manual - Methods Library*, (2020), <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/DatabaseManualMethods.pdf>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- Stefano Castriola, *Wine Economics*, (2020), Cambridge: The MIT Press, ISBN: 9780262361026.
- Vasil Georgiev, Anthony Ananga, Violeta Tsoleva, *Recent Advances and Uses of Grape Flavonoids as Nutraceuticals*, (2014), Nutrients, DOI: 10.3390/nu6010391.
- Walter Klopffer, Birgit Grahl, *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*, (2014), Wiley-VCH, ISBN: 1-5231-1546-7.
- Worldsteel Association, *Pensiero del ciclo di vita*, (2020), <https://worldsteel.org/steel-topics/life-cycle-thinking/>, ultima consultazione: 20/06/2023.
- Ying-Hui Mai, Qi-Guo Zhuang, Qiao-Hong Li, Kui Du, Ding-Tao Wu, Hua-Bin Li, Yu Xia, Fan Zhu, Ren-You Gan, *Ultrasound-Assisted Extraction, Identification, and Quantification of Antioxidants from 'Jinfeng' Kiwifruit*, (2022), Foods, DOI: 10.3390/foods11060827.

Appendici

Processo di estrazione convenzionale – solo vinacce (settembre - ottobre - novembre)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	-	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	9232600	kg/3 mesi	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	9232600	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	14458142.47	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	4147619.047	kg/3 mesi	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	5084980.952	kg/3 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	4147619.047	kg/3 mesi	//	//
	consumo elettrico	83200	kW/3 mesi	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	4147619.047	kg/3 mesi	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione convenzionale + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	4147619.047	kg/3 mesi	//	//
	etanolo	93265435.7	kg/3 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	88906288.09	kg/3 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	consumo elettrico	2210	kW/3 mesi	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	118177.28	kg/3 mesi	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	scarto estrazione	4029441.767	kg/3 mesi	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	92332781.35	kg/3 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	88017225.2	kg/3 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	1821717.238	kg/3 mesi	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%

Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	4029441.767	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	1365528.32	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	3986461.055	kg/3 mesi	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	42980.712	kg/3 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	3986461.055	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	7928373.408	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	6228.948	kg/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	1766002.247	kg/3 mesi	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	1072358.024	kg/3 mesi	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	1395261.369	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Processo di estrazione a ultrasuoni – solo vinacce (settembre - ottobre - novembre)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	-	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	9232600	kg/3 mesi	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	9232600	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	14458142.47	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	4147619.047	kg/3 mesi	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	5084980.952	kg/3 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	4147619.047	kg/3 mesi	//	//
	consumo elettrico	83200	kW/3 mesi	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)

out	vinaccia post miscelazione	4147619.047	kg/3 mesi	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione a ultrasuoni + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	4147619.047	kg/3 mesi	//	//
	etanolo	93265435.7	kg/3 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	88906288.09	kg/3 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	consumo elettrico	2314	kW/3 mesi	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	234877.344	kg/3 mesi	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	scarto estrazione	3912741.703	kg/3 mesi	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	92332781.35	kg/3 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	88017225.2	kg/3 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	1821717.238	kg/3 mesi	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	3912741.7	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	1325980.1	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	3871005.79	kg/3 mesi	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	41735.91	kg/3 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	3871005.79	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	7698753.09	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	6048.45	kg/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	1714855.6	kg/3 mesi	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	1041300.6	kg/3 mesi	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	1354852	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Processo di estrazione convenzionale – vinacce e mele (marzo - aprile - maggio - giugno)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	-	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	14212313	kg/4 mesi	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	14212313.3	kg/4 mesi	//	//
	heat, natural gas	22256314.7	MJ/4 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	6384687	kg/4 mesi	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	7827626.3	kg/4 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	6384687	kg/4 mesi	//	//
	consumo elettrico	128074.9	kW/4 mesi	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	6384687	kg/4 mesi	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione convenzionale + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	6384687	kg/4 mesi	//	//
	etanolo	143569265	kg/4 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	136858959	kg/4 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	consumo elettrico	3402	kW/4 mesi	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	201246.36	kg/4 mesi	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020; Parinaz Hobbi et al., 2023)
	scarto estrazione	6183440.7	kg/4 mesi	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	142133572	kg/4 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	135490369	kg/4 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	2804282.24	kg/4 mesi	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	6183440.7	kg/4 mesi	//	//
	heat, natural gas	2095492.1	MJ/4 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	6117484	kg/4 mesi	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico

	H2O evaporata	65956.7	kg/4 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	6117484	kg/4 mesi	//	//
	heat, natural gas	12166605.1	MJ/4 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	9558.73	kg/4 mesi	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	2710045	kg/4 mesi	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	1645603.2	kg/4 mesi	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	2141119.4	MJ/4 mesi	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Processo di estrazione a ultrasuoni – vinacce e mele (marzo - aprile - maggio - giugno)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	-	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	14212313	kg/4 mesi	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	14212313.3	kg/4 mesi	//	//
	heat, natural gas	22256314.7	MJ/4 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	6384687	kg/4 mesi	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	7827626.3	kg/4 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	6384687	kg/4 mesi	//	//
	consumo elettrico	128074.9	kW/4 mesi	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	6384687	kg/4 mesi	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione a ultrasuoni + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	6384687	kg/4 mesi	//	//
	etanolo	143569265	kg/4 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	136858959	kg/4 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)

	consumo elettrico	3562.1	kW/4 mesi	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	400218.74	kg/4 mesi	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020; Parinaz Hobbi et al., 2023)
	scarto estrazione	5984468.3	kg/4 mesi	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	142133572	kg/4 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	135490369	kg/4 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	2804282.24	kg/4 mesi	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	5984468.3	kg/4 mesi	//	//
	heat, natural gas	2028063	MJ/4 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	5920634	kg/4 mesi	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	63834.33	kg/4 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	5920634	kg/4 mesi	//	//
	heat, natural gas	11775105	MJ/4 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	9251	kg/4 mesi	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	2622841	kg/4 mesi	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	1592650	kg/4 mesi	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	2072222	MJ/4 mesi	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Processo di estrazione convenzionale – vinacce e susine (luglio - agosto)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	-	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	6450136.7	kg/2 mesi	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	6450136.7	kg/2 mesi	//	//

	heat, natural gas	10100838	MJ/2 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	2897635.5	kg/2 mesi	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	3552501	kg/2 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	2897635.5	kg/2 mesi	//	//
	consumo elettrico	58125.7	kW/2 mesi	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	2897635.5	kg/2 mesi	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione convenzionale + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	2897635.5	kg/2 mesi	//	//
	etanolo	65157681	kg/2 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	62112266	kg/2 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	consumo elettrico	1544	kW/2 mesi	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	80497.7	kg/2 mesi	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020; Beatrix Sik et al., 2022)
	scarto estrazione	2817138	kg/2 mesi	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	64506104	kg/2 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	61491143.5	kg/2 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	1272699.5	kg/2 mesi	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	2817138	kg/2 mesi	//	//
	heat, natural gas	954693.4	MJ/2 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	2787088	kg/2 mesi	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	30049.5	kg/2 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	2787088	kg/2 mesi	//	//
	heat, natural gas	5543031	MJ/2 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	4354.9	kg/2 mesi	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	1234680	kg/2 mesi	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	749726.8	kg/2 mesi	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	975480.9	MJ/2 mesi	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Processo di estrazione a ultrasuoni – vinacce e susine (luglio - agosto)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	-	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	6450136.7	kg/2 mesi	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	6450136.7	kg/2 mesi	//	//
	heat, natural gas	10100838	MJ/2 mesi	RER - market group for, consecuzionale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	2897635.5	kg/2 mesi	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	3552501	kg/2 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	2897635.5	kg/2 mesi	//	//
	consumo elettrico	58125.7	kW/2 mesi	high voltage mix ITA - consecuzionale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	2897635.5	kg/2 mesi	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione a ultrasuoni + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	2897635.5	kg/2 mesi	//	//
	etanolo	65157681	kg/2 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	62112266	kg/2 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	consumo elettrico	1616.6	kW/2 mesi	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	159963.4	kg/2 mesi	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020; Beatrix Sik et al., 2022)
	scarto estrazione	2737672	kg/2 mesi	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	64506104	kg/2 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	61491143.5	kg/2 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	1272699.5	kg/2 mesi	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	2737672	kg/2 mesi	//	//
	heat, natural gas	927763.5	MJ/2 mesi	RER - market group for, consecuzionale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	2708470	kg/2 mesi	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico

	H2O evaporata	29201.8	kg/2 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	2708470	kg/2 mesi	//	//
	heat, natural gas	5386673	MJ/2 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	4232	kg/2 mesi	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	1199852	kg/2 mesi	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	728578.5	kg/2 mesi	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	947964.6	MJ/2 mesi	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Processo di estrazione convenzionale – vinacce e kiwi (dicembre - gennaio - febbraio)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	-	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	10235700	kg/3 mesi	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	10235700	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	16028985	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	4598248	kg/3 mesi	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	5637452	kg/3 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					
in	vinaccia post essiccazione	4598248	kg/3 mesi	//	//
	consumo elettrico	92239.5	kW/3 mesi	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	4598248	kg/3 mesi	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione convenzionale + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	4598248	kg/3 mesi	//	//
	etanolo	103398503	kg/3 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	98565744.5	kg/3 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	consumo elettrico	2450	kW/3 mesi	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)

out	polifenoli prodotti	121190.7	kg/3 mesi	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020; Ying-Hui Mai et al., 2022)
	scarto estrazione	4477057	kg/3 mesi	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	102364518	kg/3 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	97580087	kg/3 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	2019642.5	kg/3 mesi	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	4477057	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	1517219.7	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	4429302	kg/3 mesi	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	47755	kg/3 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	4429302	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	8809107	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	6921	kg/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	1962180.8	kg/3 mesi	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	1191482	kg/3 mesi	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	1550255.7	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Processo di estrazione a ultrasuoni – vinacce e kiwi (dicembre - gennaio - febbraio)					
in/out	nome corrente	valore	unità	descrizione	fonti
Trasporto					
in	trasporto	-	kmt	trasporto su strada con camion da 7.5-16 ton euro6	-
out	vinaccia trasportata	10235700	kg/3 mesi	vinacce totali prodotte in Piemonte in un anno	(António Graça et al., 2018; ISTAT, 2021; Manuel Pinelo et al., 2006)
Essiccazione					
in	vinaccia trasportata	10235700	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	16028985	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	vinaccia post essiccazione	4598248	kg/3 mesi	percentuale di umidità al 10.96 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	5637452	kg/3 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Miscelazione					

in	vinaccia post essiccazione	4598248	kg/3 mesi	//	//
	consumo elettrico	92239.5	kW/3 mesi	high voltage mix ITA - consequenziale	(Directindustry, 2023)
out	vinaccia post miscelazione	4598248	kg/3 mesi	particelle solide di 0.66 mm	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
Estrazione a ultrasuoni + purificazione					
in	vinaccia post miscelazione	4598248	kg/3 mesi	//	//
	etanolo	103398503	kg/3 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	tap water	98565744.5	kg/3 mesi	at plant/RER mass	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020)
	consumo elettrico	2565	kW/3 mesi	high voltage mix ITA - estrazione + pompaggio	(Gerhardt Analytical Systems, 2023; FTI S.r.l., 2023)
out	polifenoli prodotti	241153	kg/3 mesi	allocazione fisica – 100%	(Andrea Natolino, Carla Da Porto, 2020; Ying-Hui Mai et al., 2022)
	scarto estrazione	4357095	kg/3 mesi	allocazione fisica – 0%	-
	etanolo	102364518	kg/3 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	tap water	97580087	kg/3 mesi	at plant/RER mass - 99% - prodotti evitati	recupero del 99%
	waste inorganic	2019642.5	kg/3 mesi	1% etanolo + 1% water - flussi dei rifiuti finali	scarto del 1%
Essiccazione pre-pirolisi					
in	scarto estrazione	4357095	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	1476566	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
out	scarto post essiccazione	4310619	kg/3 mesi	percentuale di umidità al 10 %wt	calcolo termodinamico
	H2O evaporata	46475.7	kg/3 mesi	evapotranspiration - emissione nell'aria	calcolo termodinamico
Pirolisi					
in	scarto post essiccazione	4310619	kg/3 mesi	//	//
	heat, natural gas	8573067	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	calcolo termodinamico
	nitrogen	6735.3	kg/3 mesi	RER - market group for, consequenziale	(A. Ibn Ferjani et al., 2019)
out	biochar	1909604.3	kg/3 mesi	-	(J. M. Encinar et al., 1996)
	bio-oil	1159556.6	kg/3 mesi	oil waste - flussi dei rifiuti finali	(J. M. Encinar et al., 1996)
	heat, syngas	1508716.7	MJ/3 mesi	RER - market group for, consequenziale - syngas	(J. M. Encinar et al., 1996)

Cumulative Cash Flow - CONV				
Anno	Spesa (k€)	Guadagno (k€)	Totale_cum (k€)	Totale_cum (mln€)
0	318.45		-318.45	-0.32
1	4019.18		-4337.63	-4.34
2	4019.18		-8356.81	-8.36
3	4019.18		-12375.99	-12.38
4	4019.18		-16395.16	-16.39
5	4019.18		-20414.34	-20.41
6	134958.65	22742.21	-132630.79	-132.63
7	28409.94	22742.21	-138298.52	-138.30
8	28409.94	22742.21	-143966.26	-143.97
9	28409.94	22742.21	-149634.00	-149.63
10	28409.94	22742.21	-155301.73	-155.30
11	28409.94	22742.21	-160969.47	-160.97
12	28409.94	22742.21	-166637.20	-166.64
13	28409.94	22742.21	-172304.94	-172.30
14	28409.94	22742.21	-177972.67	-177.97
15	28409.94	22742.21	-183640.41	-183.64
16	28409.94	22742.21	-189308.15	-189.31
17	28409.94	22742.21	-194975.88	-194.98
18	28409.94	22742.21	-200643.62	-200.64
19	28409.94	22742.21	-206311.35	-206.31
20	28409.94	22742.21	-211979.09	-211.98

Cumulative Cash Flow - US				
Anno	Spesa (k€)	Guadagno (k€)	Totale_cum (k€)	Totale_cum (mln€)
0	318.45		-318.45	-0.32
1	4019.18		-4337.63	-4.34
2	4019.18		-8356.81	-8.36
3	4019.18		-12375.99	-12.38
4	4019.18		-16395.16	-16.39
5	4019.18		-20414.34	-20.41
6	134925.30	43347.53	-111992.12	-111.99
7	28376.59	43347.53	-97021.18	-97.02
8	28376.59	43347.53	-82050.25	-82.05
9	28376.59	43347.53	-67079.31	-67.08
10	28376.59	43347.53	-52108.37	-52.11
11	28376.59	43347.53	-37137.44	-37.14
12	28376.59	43347.53	-22166.50	-22.17
13	28376.59	43347.53	-7195.57	-7.19
14	28376.59	43347.53	7775.37	7.77
15	28376.59	43347.53	22746.30	22.75
16	28376.59	43347.53	37717.24	37.72
17	28376.59	43347.53	52688.17	52.69

18	28376.59	43347.53	67659.11	67.66
19	28376.59	43347.53	82630.05	82.63
20	28376.59	43347.53	97600.98	97.60