

Ricerca di Sistema elettrico



Applicazione di tecnologie innovative per il miglioramento della sostenibilità economica ed ambientale di processi tipici dell'industria alimentare (LA2.6)

Gianpiero Pataro

Studio sui trattamenti non termici e sui trattamenti termici innovativi come alternative ai processi tradizionali di pelatura di frutta e vegetali e di estrazione di composti ad alto valore aggiunto dai residui di lavorazione dell'industria alimentare: analisi delle migliori pratiche riportate in letteratura e sviluppo di una metodologia per la valutazione degli impatti economici e ambientali. (LA2.6)

G. Pataro (Dipartimento di Ingegneria Industriale Università degli Studi di Salerno [UNISA_DIIN1])

Con il contributo di Ferrari Giovanna, Donsì Francesco e Eslami Elham (UNISA_DIIN1)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*

Progetto: *Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali*

Linea di attività: 2.6

Responsabile del Progetto: Miriam, Benedetti, ENEA

Responsabile del Work Package: Miriam, Benedetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: UNISA_DIIN1

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte la borsista Dr. Elham Eslami e i tesisti Kimon Sathya Pietro Antoniadis, Vincenzo Pio Abate, Michela Santaniello, Francesco Rizzo.

Indice

1	Risultati attesi	4
1.1	Caso studio 1. Innovazione tecnologica nel processo di produzione di pomodori pelati.	4
1.2	Caso studio 2. Valorizzazione di scarti e sottoprodotti derivanti dal processo di produzione di pomodoro concentrato.	4
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Caso studio 1. Innovazione tecnologica nel processo di produzione di pomodori pelati. 5	
2.2	Caso studio 2. Valorizzazione di scarti e sottoprodotti derivanti dal processo di produzione di pomodoro concentrato.	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Caso studio 1. Innovazione tecnologica nel processo di produzione di pomodori pelati. 11	
7.2	Caso studio 2. Valorizzazione di scarti e sottoprodotti derivanti dal processo di produzione di pomodoro concentrato.	17
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	21
9	Pubblicazioni scientifiche.....	22
10	Eventi di disseminazione	24

Indice delle figure

Figura 1 – Schema di un impianto di produzione di pomodori pelati con una capacità produttiva di 60.000 t/anno.....	15
Figura 2 – Impatti degli indicatori ambientali sulla produzione di pomodori pelati mediante diversi metodi di pelatura. (a) Potenziale di riscaldamento globale (GWP100a), (b) Potenziale di riduzione dello strato di ozono (ODP), (c) Tossicità umana (HT), (d) Deplezione abiotica (combustibili fossili)(AD), (e) Potenziale di acidificazione (AP), e (f) Potenziale di eutrofizzazione (EP)	17
Figura 3 – Schema semplificato della linea di produzione di pomodoro concentrato e del processo di estrazione in cascata di licopene e cutina dagli scarti di lavorazione (bucce e semi)	18
Figura 4 – Curva degli NPV nel tempo per impianti tradizionali e innovativi (PEF) di estrazione di licopene e cutina	20

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Parametri tecnologici e di processo, applicazioni, vantaggi e svantaggi, e TRL delle tecniche tradizionali e innovative di pelatura di frutta e vegetali	14
Tabella 2 – Condizioni operative e indicatori di performance per le tecniche convenzionali e innovative di pelatura dei pomodori	15
Tabella 3 – Effetto delle tecniche innovative di pelatura dei pomodori sul fatturato annuale di un impianto di lavorazione con una capacità di 60.000 ton/anno	16
Tabella 4 – Consumo acqua, energia e NaOH e generazione di acque reflue nella produzione di 1 kg di pomodori pelati in scatola mediante diversi metodi di pelatura	16
Tabella 5 – Condizioni operative per i processi di estrazione del licopene mediante metodi convenzionali e innovativi, e della cutina attraverso idrolisi alcalina	19
Tabella 6 – Costi unitari delle risorse impiegate e valore di mercato di licopene e cutina	19
Tabella 7 – Distribuzione dei costi di capitale e di esercizio per il processo di estrazione tradizionale e innovativo	20
Tabella 8 – Parametri NPV e PBP per il processo di estrazione tradizionale e innovativo	20
Tabella 9 – Emissioni annuali di CO ₂ per il processo di estrazione tradizionale e innovativo	21

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente

1.1 Caso studio 1. Innovazione tecnologica nel processo di produzione di pomodori pelati.

- Analisi di letteratura e pianificazione degli scenari applicativi delle tecniche di pelatura tradizionali ed innovative di frutta e vegetali, con particolare riferimento al processo di produzione di pomodori pelati;
- Definizione di una metodologia di valutazione dei benefici derivanti dall'utilizzo delle tecniche di pelatura innovativa rispetto a quelle tradizionali basata sull'utilizzo di specifici indicatori energetici, economici e di processo;
- Individuazione della tecnica innovativa di pelatura di pomodori più promettente dal punto di vista del miglioramento della sostenibilità ambientale ed economica del processo oltre che della resa e della qualità del prodotto finale;
- Definizione di linee guida per l'applicazione delle tecniche di pelatura innovative nei processi di trasformazione industriale di frutta e vegetali.

1.2 Caso studio 2. Valorizzazione di scarti e sottoprodotti derivanti dal processo di produzione di pomodoro concentrato.

- Analisi di letteratura e pianificazione degli scenari applicativi delle tecniche di estrazione tradizionali e innovative di composti ad alto valore aggiunto da scarti e sottoprodotti dell'industria agro-alimentare, con particolare riferimento alla valorizzazione degli scarti (bucce e semi) generati nel processo di produzione di pomodoro concentrato;
- Definizione di una metodologia di valutazione dei benefici derivanti dall'utilizzo delle tecniche innovative di estrazione rispetto a quelle tradizionali basata sull'utilizzo di specifici indicatori energetici, economici e di processo;
- Individuazione della tecnica di estrazione innovativa più promettente per il recupero di composti ad alto valore aggiunto da scarti della lavorazione del pomodoro dal punto di vista della riduzione dei consumi di energia, della quantità di solventi organici, del tempo di processo oltre che della resa e della qualità degli estratti;
- Valutazione dei benefici economico ed ambientali dei processi di estrazione in cascata nell'ottica di un "uso totale" della biomassa;
- Definizione di linee guida per l'applicazione delle tecniche di estrazione innovative per la valorizzazione degli scarti di lavorazione derivanti dai processi di trasformazione industriale di frutta e vegetali.

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti e relativa percentuale di aderenza ai risultati attesi

2.1 Caso studio 1. Innovazione tecnologica nel processo di produzione di pomodori pelati.

- È stata eseguita un'analisi di letteratura e pianificazione degli scenari applicativi delle tecniche di pelatura tradizionali ed innovative di frutta e vegetali, con particolare riferimento al processo di produzione di pomodori pelati (100%);
- È stata definita una metodologia di valutazione dei benefici derivanti dall'utilizzo delle tecniche di pelatura innovativa rispetto a quelle tradizionali basata sull'utilizzo di specifici indicatori energetici, economici e di processo (100%);
- È stata individuata la tecnica innovativa di pelatura di pomodori più promettente dal punto di vista del miglioramento della sostenibilità ambientale ed economica del processo oltre che della resa e della qualità del prodotto finale (100%);
- Sono state definite linee guida per l'applicazione delle tecniche di pelatura innovative nei processi di trasformazione industriale di frutta e vegetali (100%).

Risultati ottenuti non previsti nel capitolato

- È stata condotta l'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) per quantificare l'impatto ambientale delle tecnologie innovative di pelatura nel processo di produzione dei pomodori pelati.

2.2 Caso studio 2. Valorizzazione di scarti e sottoprodotti derivanti dal processo di produzione di pomodoro concentrato.

- È stata eseguita un'analisi di letteratura e pianificazione degli scenari applicativi delle tecniche di estrazione tradizionali e innovative di composti ad alto valore aggiunto da scarti e sottoprodotti dell'industria agro-alimentare, con particolare riferimento alla valorizzazione degli scarti (bucce e semi) generati nel processo di produzione di pomodoro concentrato (100%);
- È stata definita di una metodologia di valutazione dei benefici derivanti dall'utilizzo delle tecniche innovative di estrazione rispetto a quelle tradizionali basata sull'utilizzo di specifici indicatori energetici, economici e di processo (100%);
- È stata individuata la tecnica di estrazione innovativa più promettente per il recupero di composti ad alto valore aggiunto da scarti della lavorazione del pomodoro dal punto di vista della riduzione dei consumi di energia, della quantità di solventi organici, del tempo di processo oltre che della resa e della qualità degli estratti (100%);
- È stata effettuata una valutazione dei benefici economico ed ambientali dei processi di estrazione in cascata nell'ottica di un "uso totale" della biomassa (100%);
- Sono state definite linee guida per l'applicazione delle tecniche di estrazione innovative per la valorizzazione degli scarti di lavorazione derivanti dai processi di trasformazione industriale di frutta e vegetali (100%).

3 Prodotti attesi

- Rapporto tecnico di dettaglio contenente la descrizione di tutte le attività svolte e dei risultati ottenuti;

4 Prodotti sviluppati

- Rapporto tecnico di dettaglio contenente la descrizione di tutte le attività svolte e dei risultati ottenuti;

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono state riscontrate variazioni rispetto al capitolato tecnico presentato.

Come indicato nel piano dei rischi, i dati di letteratura si sono rivelati insufficienti per descrivere in modo esaustivo le buone pratiche nell'uso delle tecniche innovative nei processi di pelatura di frutta e vegetali e nella valorizzazione degli scarti dell'industria agroalimentare, impedendo una comprensione completa delle sfide e delle variabili nella valutazione dei costi e benefici associati all'adozione di queste tecnologie. L'analisi della letteratura ha evidenziato la scarsità e la difficoltà di comparabilità dei dati sui metodi di pelatura, dovuta alle diverse condizioni operative, impianti, varietà di prodotto e indicatori di performance. Solo in pochi casi è stato possibile effettuare un confronto diretto tra metodi tradizionali e innovativi di pelatura del pomodoro o di estrazione di composti ad alto valore aggiunto dagli scarti di lavorazione. Nonostante ciò, le informazioni raccolte sono state integrate con dati forniti dalla rete di contatti del Co-beneficiario UNISA_DIIN_1, che include aziende conserviere, produttori di macchine e impianti per il settore alimentare ed esperti del settore, per ottenere una visione più completa delle sfide e delle variabili nella valutazione dei costi e dei benefici di queste tecnologie.

Riguardo agli aspetti economici ci sono stati degli scostamenti rispetto quanto riportato nel capitolato che vengono di seguito descritti.

Ci sono state, innanzitutto, variazioni nei costi del personale e nelle ore lavorative, passate da 2.090 a 2.287,5, a causa di cambiamenti nella composizione della compagine di lavoro, aggiornamenti delle tariffe orarie, ritardi nell'avvio della borsa di studio e modifiche ai costi operativi.

- Inizialmente, il personale previsto comprendeva un professore ordinario (PO) e un professore associato (PA). Tuttavia, per soddisfare le esigenze delle attività di ricerca indicate nella LA, è stata aggiunta un'ulteriore unità di personale di tipo PO.
- I costi del personale sono stati soggetti a variazioni per via di un aggiornamento delle tariffe orarie, essendo basati su costi effettivi. In particolare, un professore ordinario (PO) e un professore associato (PA) hanno subito un cambio di classe stipendiale tra il 2023 ed il 2024 con conseguente variazione del costo orario.
- Il ritardo tecnico nella pubblicazione del bando per una borsa di studio annuale ha comportato l'inizio del servizio della borsista il 15 gennaio 2024 anziché il 1° gennaio 2024, riducendo così le ore lavorative dedicate alla LA da 1.500 a 1.437,5 e, di conseguenza, il costo totale da €18.000,00 a €17.322,50.
- Per quanto riguarda i costi di esercizio, erano stati inizialmente preventivati 20.000 € per le voci di spesa C.2 (informazione, pubblicità e diffusione delle attività del progetto) e C.3 (viaggi e missioni). Alla categoria C.1 (materiali e forniture) era stata destinata una quota dei costi totali di esercizio, da impiegare esclusivamente nel caso in cui si rendessero necessarie misurazioni sperimentali di alcuni parametri dei processi studiati non reperibili da altre fonti. Al termine del progetto, sono stati spesi complessivamente 7.160,20 € per attività di disseminazione, principalmente attraverso la partecipazione a congressi (Costi di esercizio di tipo C.2 e C.3). La pubblicazione di un articolo scientifico su una rivista open access, inizialmente prevista nel preventivo di spesa, non ha comportato alcun costo grazie all'utilizzo di un voucher offerto dalla rivista a uno dei coautori del lavoro. Le spese previste per l'acquisto di materie prime e materiale di consumo (Costi di esercizio di tipo C.1) non sono state sostenute, poiché non ritenute necessarie alla luce dei dati raccolti e dei risultati ottenuti.

Le variazioni apportate non hanno avuto impatti negativi sugli obiettivi tecnico-scientifici della LA, garantendone il pieno raggiungimento. Inoltre, tali modifiche non hanno influito sull'importo complessivo previsto per il piano di lavoro (€100.106,50), il quale, a consuntivo, è risultato pari a €100.100,00.

6 Sintesi delle attività svolte

La ricerca ha esplorato l'applicazione di tecnologie innovative, sia termiche (riscaldamento ohmico-OH, riscaldamento a radiazione infrarossa-IR) che non termiche (campi elettrici pulsati-PEF, ultrasuoni-US), per migliorare la sostenibilità economica ed ambientale dei processi nell'industria alimentare, con focus sulla trasformazione del pomodoro. L'Italia, terzo produttore mondiale, trasforma pomodori in pelati e concentrato, con alti consumi di acqua ed energia e scarti come bucce e semi. È stata studiata l'integrazione di tecnologie innovative elettriche come alternative ai metodi tradizionali, puntando a ridurre consumi e valorizzare i sottoprodotti. L'analisi comparativa dei processi ha combinato dati di letteratura e aziendali, utilizzando bilanci di materia ed energia per valutare rese, consumi, emissioni e costi operativi. Sono state effettuate valutazioni LCA sull'impatto ambientale, identificando soluzioni promettenti e linee guida per applicazioni industriali.

7 Dettaglio delle attività svolte

La ricerca si è focalizzata sull'applicazione di tecnologie innovative, sia termiche (riscaldamento ohmico-OH, riscaldamento a radiazione infrarossa-IR) che non termiche (campi elettrici pulsati-PEF, ultrasuoni-US), in processi tipici dell'industria alimentare, per migliorarne la sostenibilità economica e ambientale. L'attenzione principale è stata rivolta al processo di trasformazione del pomodoro per la produzione di pomodori pelati e concentrato di pomodoro. È stata esplorata l'integrazione di tecnologie innovative basate sull'uso di corrente elettrica come alternative o complementi ai metodi tradizionali di pelatura e estrazione di composti bioattivi dai residui, con l'obiettivo di ridurre i consumi di acqua ed energia e valorizzare i sottoprodotti, come bucce e semi.

I casi studio analizzati sono:

1. Innovazione tecnologica nel processo di produzione di pomodori pelati.
2. Valorizzazione di scarti e sottoprodotti (bucce e semi) derivanti dalla produzione di pomodoro concentrato.

Inizialmente, è stata condotta un'analisi approfondita dei processi tradizionali e innovativi per la pelatura dei pomodori e l'estrazione di composti ad alto valore dai residui di lavorazione, combinando dati di letteratura e informazioni da aziende del settore. L'analisi ha esaminato il funzionamento delle tecnologie, le variabili operative, le problematiche di scalabilità e l'integrazione industriale.

È stata definita una metodologia di valutazione costi-benefici che ha incluso la risoluzione dei bilanci di materia ed energia per la determinazione di rese, scarti, consumi energetici, di acqua e solventi, emissioni di CO₂ e costi operativi. È stata condotta una comparazione tra processi tradizionali e innovativi utilizzando indicatori energetici, economici e ambientali per valutare la sostenibilità complessiva. Sono state inoltre eseguite analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) per valutare l'impatto ambientale delle soluzioni tecnologiche. I risultati hanno identificato le tecnologie più promettenti e definito linee guida per la loro applicazione industriale, oltre alla valorizzazione degli scarti.

La metodologia sviluppata per la valutazione costi-benefici e dell'impatto ambientale è applicabile in generale per valutare l'efficienza dei processi e il riutilizzo degli scarti nelle produzioni agroalimentari.

7.1 Caso studio 1. Innovazione tecnologica nel processo di produzione di pomodori pelati.

La pelatura è un'operazione fondamentale nella trasformazione industriale di frutta e vegetali, necessaria per rimuovere parti non edibili, migliorando qualità, sicurezza, conservazione e accessibilità dei prodotti¹.

Nella produzione di pomodori pelati, la pelatura avviene solitamente tramite trattamenti chimici con soluzioni di liscivia a base di idrossido di sodio (8% - 25%) a caldo (85-100°C), o metodi termofisici con vapore in pressione (50-200 kPa). Questi processi, seppur efficaci,

¹ Kohli et al. (2021) Advances in peeling techniques for fresh produce. J Food Process Eng. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13826>

consumano molta energia e acqua. Inoltre, la pelatura per via chimica comporta problemi di smaltimento di reflui ad elevato pH e possibili residui chimici nei frutti².

La ricerca, pertanto, si sta orientando verso tecniche di pelatura innovative e sostenibili che riducono l'uso di sostanze chimiche, il consumo di acqua ed energia, migliorando rese e qualità dei prodotti. Tra queste, sono particolarmente promettenti la pelatura a infrarossi (IR), quella con liscivia assistita da OH (OH-liscivia) o US (US-liscivia) e quella con vapore assistita da PEF (PEF-Vapore)³.

La Tabella 1 riassume i principali parametri tecnologici e di processo che influenzano l'efficienza della pelatura, le applicazioni, i vantaggi e gli svantaggi, nonché il livello di maturità tecnologica (TRL) delle tecnologie tradizionali e innovative per la pelatura di frutta e vegetali. I dati raccolti offrono una visione completa delle sfide e delle variabili nella valutazione dei costi e benefici di queste tecnologie.

² Arnal et al. (2018). Implementation of PEF treatment at real-scale tomatoes processing considering LCA methodology as an innovation strategy in the agri-food sector. *Sustainability*, 10, 979–995.

³ Zhou et al. (2022) Conventional and novel peeling methods for fruits and vegetables: A review. *Innov Food Sci Emerg Technol* 77:102961

Tabella 1. Parametri tecnologici e di processo, applicazioni, vantaggi e svantaggi, e TRL delle tecniche tradizionali e innovative di pelatura di frutta e vegetali

Tecnica di pelatura	Parametri tecnologici e di processo	Applicazione	Vantaggi	Svantaggi	TRL
Vapore	Pressione (temperatura) del vapore e tempo di trattamento (fase di riscaldamento), grado di vuoto (fase di evaporazione rapida)	Pomodoro; kiwi	Metodo fisico Scala industriale Buona pelabilità Ritenzione colore	Perdita di consistenza Resa di pelatura ridotta Elevato consumo di acqua ed energia	9
Liscivia	Concentrazione di NaOH, Temperatura e tempo di trattamento, rapporto liscivia/prodotto	Pomodoro, Kiwi, Pesca, Patate, Nocciole	Buona pelabilità Elevate rese Texture prodotto fresco	Perdita colore iniziale Generazione di reflui ad alto pH Residui di sostanze chimiche Elevato consumo di acqua ed energia	9
PEF-Vapore	PEF: Intensità campo elettrico, energia specifica totale; Vapore: Pressione (temperatura) del vapore e tempo di trattamento (fase di riscaldamento), grado di vuoto (fase di evaporazione rapida)	Pomodoro	Ridotti consumi di acqua e di vapore Ottima pelabilità Elevate rese Prodotti di più alta qualità (Licopene)	Mancanza di ottimizzazione del processo. Elevati costi di impianto	7-8
US-Liscivia	US: Potenza specifica, temperatura e tempo di trattamento Liscivia: Concentrazione di NaOH, Temperatura e tempo di trattamento, rapporto liscivia/prodotto	Pomodoro Pesca	Riduzione della concentrazione di liscivia Elevate rese Riduzione del tempo di pelatura	Scale-up Trattamento acque reflue Elevati costi di impianto	4-6
OH-Liscivia	OH: Intensità campo elettrico Conducibilità elettrica de mezzo di trattamento; Liscivia: Concentrazione di NaOH, Temperatura e tempo di trattamento, rapporto liscivia/prodotto	Pomodoro Pera	Riduzione della concentrazione di liscivia Miglioramento della qualità del prodotto Elevate rese Ridotta generazione di acque reflue	Corrosione degli elettrodi Scale-up Trattamento acque reflue Elevati costi di impianto	5-7
IR	Distanza emettitore prodotto, Intensità della radiazione IR e potenza, temperatura e tempo di esposizione	Pomodoro, Pesca, Giuggiola, Pera, Kiwi, Nocciola, Zenzero	Pelatura a secco (no acqua) Riduzione della perdita di prodotto Miglioramento della qualità del prodotto Minore impatto ambientale	Riscaldamento non uniforme Requisiti più elevati per l'attrezzatura. Elevati costi di impianto	6

Dall'analisi della letteratura sono state identificate le condizioni operative ottimali e gli indicatori di performance, come facilità di pelatura⁴ e perdita di peso⁵, per cinque metodi: pelatura a vapore, con liscivia, US-liscivia, OH-liscivia e IR (Tabella 2).

⁴ E' valutata su una scala soggettiva da 1 (impossibile da pelare) a 5 (facile da pelare). Un punteggio superiore a 4 è ritenuto accettabile.

⁵ La perdita di peso (peeling loss), espressa in percentuale, rappresenta la quantità di pomodoro rimossa come scarto durante la pelatura. L'obiettivo è minimizzare questa perdita mantenendo una facilità di pelatura accettabile (>4).

Tabella 2. Condizioni operative e indicatori di performance per le tecniche convenzionali e innovative di pelatura dei pomodori.

Metodo di pelatura	Condizioni di trattamento ottimali	Facilità di pelatura (scala 1-5)	Perdita di peso (%)
Vapore	Pressione vapore: 120 kPa, (10–40 s) Fase di vuoto: 42 kPa	5.0	15
Liscivia	10% (w/v) NaOH, Rapporto Liscivia-pomodoro: 5:1 (v/w) 95°C, 75 s	4.8	13.6
US-Liscivia	Liscivia: 4% (w/v) NaOH, 97°C, 30 s Rapporto Liscivia-pomodoro: 11:1 (v/w) US: $P_v=31.97$ W/L, 70°C for 50 s	5.0	7.2
OH-Liscivia	Mezzo di trattamento: 0.01/0.5% NaCl/NaOH Rapporto mezzo di trattamento-pomodoro: 1:1 (v/w) OH: $E=1,210$ V/cm, 88 s	4.5	11.4
IR	75 s, gap emettitore-pomodoro 90-mm	4.8	9.8

Le tecnologie e le condizioni operative ottimali della Tabella 2 sono state applicate a un impianto di trasformazione di pomodori in provincia di Salerno, con una capacità di 60.000 t/anno. È stato valutato l'impatto dei metodi di pelatura su produttività, consumi di acqua ed energia, acque reflue e impatto ambientale tramite LCA⁶.

La Figura 1 mostra la sequenza delle operazioni unitarie nel processo di produzione dei pomodori pelati, con flussi intermedi (in t/anno) basati su dati aziendali e letteratura sulle tecniche innovative di pelatura (Tabella 2).

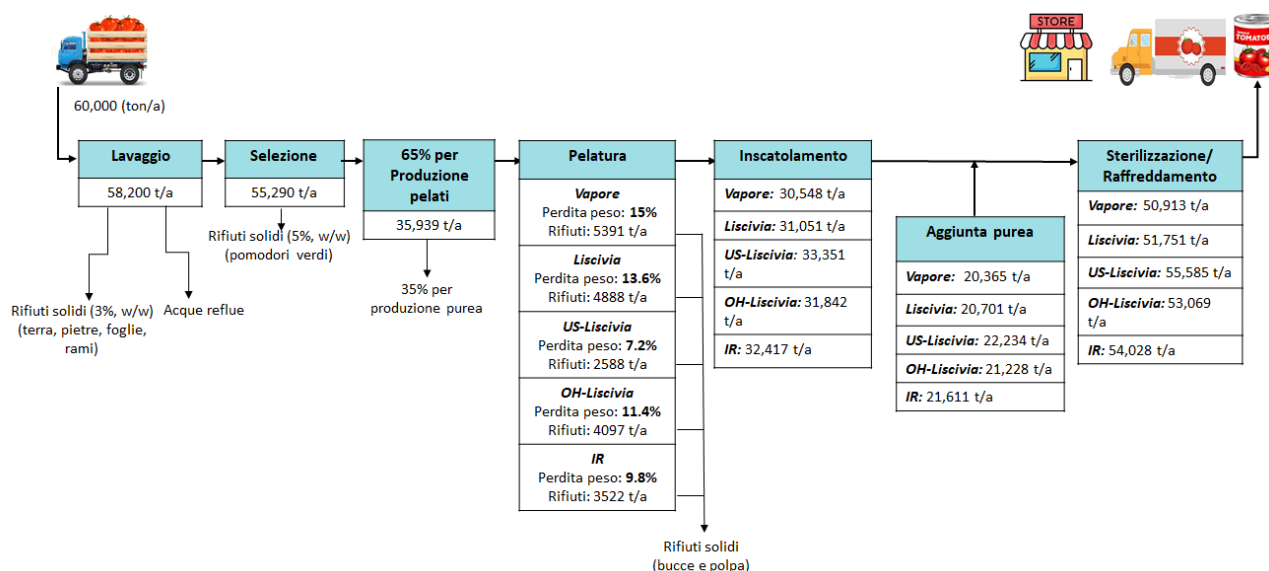


Figura 1. Schema di un impianto di produzione di pomodori pelati con una capacità produttiva di 60.000 t/anno

⁶ Per maggiori informazioni consultare la pubblicazione: Eslami, et al. (2024). Economic and Environmental Impact Analysis of Innovative Peeling Methods in the Tomato Processing Industry. Sustainability, 16, 11272.

La Tabella 3 mostra la quantità totale di pomodori pelati in scatola prodotti con cinque metodi di pelatura, utilizzata per stimare la redditività economica dei metodi innovativi rispetto a quelli convenzionali. La Tabella 4 riporta i consumi di acqua, elettricità, energia termica e NaOH, oltre alla generazione di acque reflue, per produrre 1 kg di pomodori pelati in scatola, composto per il 60% da pomodori pelati interi e per il 40% da purea a 8° Brix.

Tabella 3. Effetto delle tecniche innovative di pelatura dei pomodori sul fatturato annuale di un impianto di lavorazione con una capacità di 60.000 ton/anno.

Metodo di pelatura	N° barattoli da 400g (-10°)	Ricavo lordo (M€)	Ricavo netto (M€)	Margine di profitto (M€)	Margine di profitto (M€)
Vapore	127	53.46	10.69	-	-
Liscivia	129	54.34	10.87	-	-
US-Liscivia	139	58.36	11.67	0.98	0.81
OH-Liscivia	133	55.72	11.14	0.45	0.28
IR	135	56.73	11.35	0.65	0.48

Tabella 4. Consumo acqua, energia e NaOH e generazione di acque reflue nella produzione di 1 kg di pomodori pelati in scatola mediante diversi metodi pelatura.⁷

Metodo di pelatura	Acqua (m ³)	Elettricità (kWh)	Energia termica ⁽²⁾ (kWh)	NaOH (kg)	Acque reflue (m ³)
Steam	0.007(0.001)	0.048(0.003)	0.205(0.073)	0	0.0050(0.0005)
Lye	0.010(0.004)	0.045(0)	0.465(0.332)	0.347	0.0079(0.0035)
US-lye	0.016(0.010)	0.049(0.005)	0.464(0.332)	0.129	0.0147(0.0104)
OH-Lye	0.007(0.000)	0.106(0.061)	0.132(0)	0.002	0.0047(0.0003)
IR	0.006(0)	0.079(0.034)	0.132(0)	0	0.0043(0)

I risultati indicano che l'adozione di tecniche innovative di pelatura, come US-liscivia, OH-liscivia e IR, può aumentare la capacità produttiva dal 2,6% al 9,2%, riducendo i rifiuti solidi dal 16% al 52% rispetto ai metodi convenzionali. OH-liscivia e IR riducono significativamente il consumo di acqua ed energia, mentre US-liscivia ne richiede di più. OH-liscivia e IR riducono o eliminano l'uso di NaOH, diminuendo i costi di trattamento delle acque reflue.

I risultati dell'analisi LCA illustrati in Figura 2 mostrano che i metodi innovativi hanno un impatto ambientale inferiore rispetto alla pelatura chimica, con miglioramenti dal 22% al 92% nei vari indicatori ambientali.

⁷ I valori tra parentesi indicano il contributo relativo esclusivamente alla fase di pelatura.

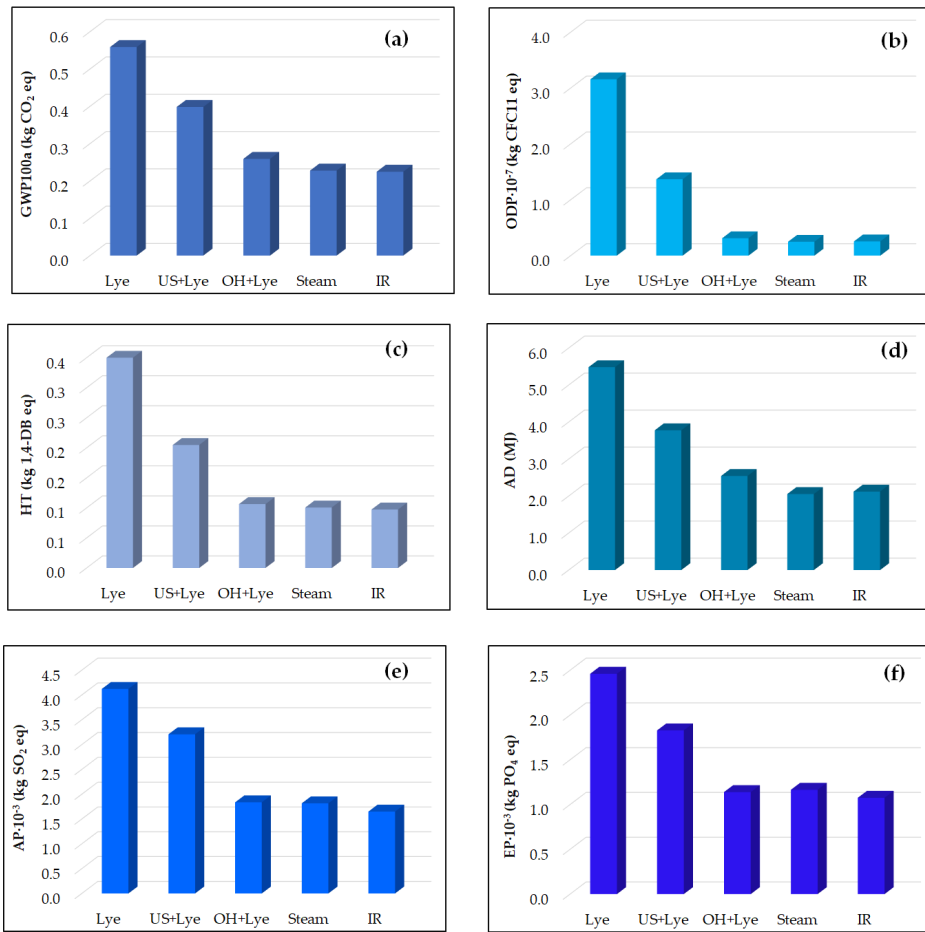


Figura 2. Impatti degli indicatori ambientali sulla produzione di pomodori pelati mediante diversi metodi di pelatura. (a) Potenziale di riscaldamento globale (GWP100a), (b) Potenziale di riduzione dello strato di ozono (ODP), (c) Tossicità umana (HT), (d) Deplezione abiotica (combustibili fossili)(AD), (e) Potenziale di acidificazione (AP), e (f) Potenziale di eutrofizzazione (EP).

La ricerca ha evidenziato i vantaggi economici e ambientali dei metodi innovativi di pelatura, che potrebbero migliorare l'efficienza e la sostenibilità dell'industria dei pomodori. Tuttavia, l'implementazione richiede valutazioni dei costi iniziali e dei benefici a lungo termine. Sono necessarie ulteriori ricerche per ottimizzare queste tecnologie su larga scala, utilizzando dati pilota e industriali, per valutarne la fattibilità tecnica ed economica.

Questo approccio metodologico può essere esteso alla valutazione di processi innovativi per altri prodotti ortofrutticoli.

7.2 Caso studio 2. Valorizzazione di scarti e sottoprodotti derivanti dal processo di produzione di pomodoro concentrato.

Figura 3 illustra il le fasi del processo di produzione del concentrato di pomodoro. Durante l'estrazione del succo, si generano scarti di lavorazione, principalmente bucce e semi, che rappresentano circa il 3-5% dei pomodori processati⁸.

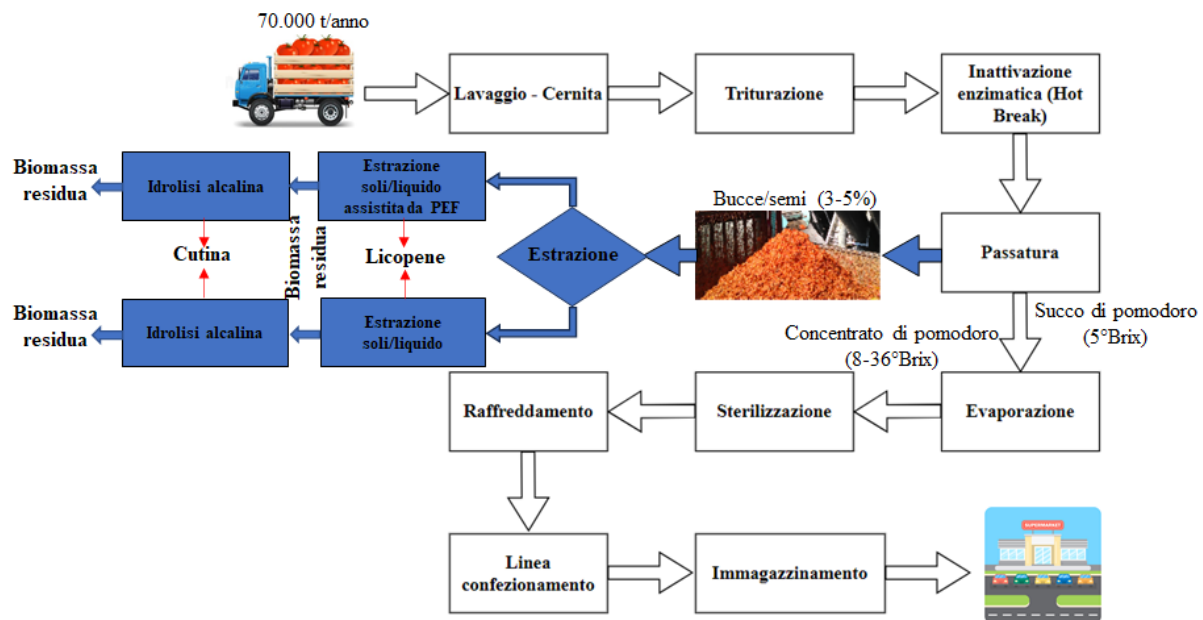


Figura 3. Schema semplificato della linea di produzione di pomodoro concentrato e del processo di estrazione in cascata di licopene e cutina dagli scarti di lavorazione (bucce e semi).

Lo smaltimento di bucce e semi di pomodoro, spesso un onere ambientale per le aziende, è solitamente destinato a mangime animale o compost. Tuttavia, questi scarti rappresentano una fonte economica di composti ad alto valore aggiunto, come carotenoidi, proteine, olio, cutina e fibre, recuperabili per usi alimentari, farmaceutici e cosmetici. L'estrazione convenzionale di questi composti è problematica, richiedendo grandi volumi di solventi, tempi prolungati e alte temperature⁹.

Negli ultimi anni, è cresciuto l'interesse per l'adozione di metodi di estrazione alternativi, che migliorano in modo sostenibile la resa e la qualità degli estratti, seguendo il concetto di "zero rifiuti"¹⁰.

La presente ricerca ha confrontato metodi innovativi e tradizionali per l'estrazione di composti ad alto valore aggiunto dai residui del pomodoro concentrato, adottando un processo in cascata per un uso sostenibile della biomassa. È stata studiata l'estrazione sequenziale di licopene e cutina dai residui di un impianto che processa 70.000 t/anno di pomodori, generando 2.576 t/anno di bucce e semi (Figura 3). Sono stati comparati due processi: quello tradizionale (estrazione solido-liquido del licopene e recupero della cutina con idrolisi alcalina)

⁸ Eslami et al. (2023) Enhancing resource efficiency and sustainability in tomato processing: A comprehensive review. J Clean Prod 425:138996

⁹ Eslami et al. (2023). Comprehensive Overview of Tomato Processing By-Product Valorization by Conventional Methods versus Emerging Technologies. Foods, 12, 166.

¹⁰ Martins et al. (2023). Green Extraction Techniques of Bioactive Compounds: A State-of-the-Art Review. Processes, 11, 2255.

e quello innovativo, che prevede un pretrattamento della biomassa con PEF prima dell'estrazione del licopene, mantenendo invariato il recupero della cutina.

Le condizioni operative ottimali per i processi tradizionale e innovativo, riportate in Tabella 5, sono state derivate da studi di letteratura, che evidenziano come la tecnologia PEF aumenti la resa di estrazione del licopene del 30% rispetto al processo tradizionale^{11,12}.

Tabella 5. Condizioni operative per i processi di estrazione del licopene mediante metodi convenzionali e innovativi, e della cutina attraverso idrolisi alcalina.

Processo di estrazione	Primo stadio	Secondo stadio
	Licopene	Cutina
in cascata		
Tradizionale	Estrazione con solvente: Biomassa/Acetone(1:40, p/v) T=25°C Tempo di estrazione=4 h	Idrolisi alcalina: Rapporto Biomassa/Solvente(1:4, p/v) Solvente: Sol. NaOH(3%) T=130°C Tempo di estrazione=2 h
Innovativo	Pretrattamento PEF: Campo elettrico=5 kV/cm Energia specifica=5 kJ/kg Estrazione con solvente: Acetone(1:40, p/v) T=25°C Tempo di estrazione=4 h	

In Tabella 6 sono riportati i costi unitari delle risorse impiegate oltre al valore di mercato di licopene¹³ e cutina¹⁴.

Tabella 6. Condizioni operative

Elettricità	GPL	Acqua	Acetone	NaOH	HCl	Licopene	Cutina
(€/kWh)	(€/smc)	(€/mc)	(€/L)	(€/kg)	(€/kg)	(€/g)	(€/kg)
0.25	0.72	3.5	0.46	0.301	0.122	15-45	2.82

¹¹ Pataro et al. (2020). Recovery of lycopene from industrially derived tomato processing by-products by pulsed electric fields-assisted extraction. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 63, 102369.

¹² Eslami et al. (2024). Enhancing Cutin Extraction Efficiency from Industrially Derived Tomato Processing Residues by High-Pressure Homogenization. *Foods*, 13, 1415.

¹³ <https://www.chemicalbook.com/Price/Lycopene.htm>.

¹⁴ https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Fatty_Acid_Price.html.

La Tabella 7 mostra la distribuzione dei costi di capitale e di esercizio per i processi tradizionale e innovativo, calcolati utilizzando i bilanci di materia ed energia, basandosi su dati provenienti dalla letteratura e da siti web di aziende del settore.

Tabella 7. Distribuzione dei costi di capitale e di esercizio per il processo di estrazione tradizionale e innovativo

Costi	Processo tradizionale	Processo innovativo
Costi capitale (€)	15,544,045	16,344,038
Costo delle utenze (€/anno)	723,178	723,172
Costo del lavoro (€/anno)	122,800	122,800
Costi relativi alla struttura (€/anno)	7,870	132,412
Costi totali (€/anno)	843,847	968,385

La Tabella 8 riporta gli indicatori economici NPV (Net Present Value) e PBP (Pay Back Period) calcolati su un orizzonte temporale di 10 anni. La Figura 4, invece, illustra l'andamento del NPV dei due processi in funzione del tempo.

Tabella 8. Parametri NPV e PBP per il processo di estrazione tradizionale e innovativo.

Parametro	Processo tradizionale	Processo innovativo
s (anni)	10	10
r (%)	10	10
C_0 (€)	-15,544,045	-16,344,038
C_i (€)	10,404,490	15,366,317
NPV (€)	43,201,969	72,125,025
PBP (anni)	1.89	1.24
Convenienza	+	++

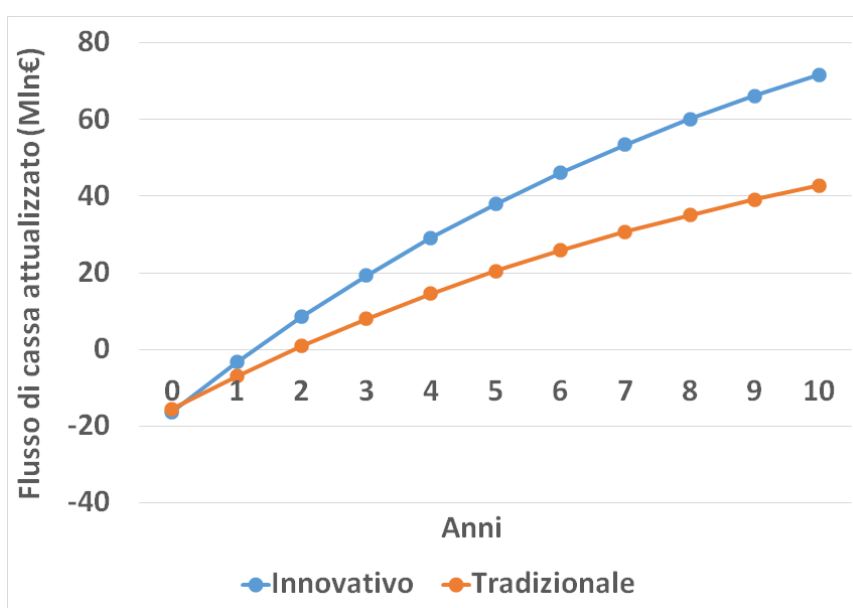


Figura 4. Curva degli NPV nel tempo per impianti tradizionali e innovativi (PEF) di estrazione di licopene e cutina.

I risultati hanno evidenziato che l'integrazione della tecnologia PEF nel processo di estrazione aumenta significativamente la resa di licopene, un composto di maggiore valore rispetto alla cutina (Tabella 6). Questo porta a un incremento dei ricavi annuali di circa il 30% rispetto a una linea di estrazione tradizionale. Sebbene l'investimento iniziale sia più alto, una linea di estrazione PEF ha un periodo di recupero di circa 1,24 anni, rispetto ai 1,89 anni della linea tradizionale. La principale differenza risiede nel margine di profitto, con un NPV dopo 10 anni superiore del 67% per l'investimento nella tecnologia PEF.

L'impatto ambientale dei processi di estrazione tradizionale e innovativo è stato stimato calcolando le emissioni di CO₂ equivalente derivanti da elettricità e gas naturale, con fattori di conversione specifici¹⁵. La Tabella 9 mostra le emissioni annuali di CO₂ per entrambi i metodi, evidenziando emissioni simili e rendendo difficile determinare i vantaggi ambientali della tecnologia PEF. Un'analisi LCA più approfondita potrebbe fornire una valutazione più precisa dell'impatto ambientale.

Tabella 9. Parametri NPV e PBP per il processo di estrazione tradizionale e innovativo.

Parametro	Processo tradizionale	Processo innovativo
CO ₂ equivalente dovuta al consumo di elettricità (kg CO _{2-eq} /anno)	78,633	78,628
CO ₂ equivalente dovuta al consumo di gas (kg CO _{2-eq} /anno)	15,588	15,587
Totale emissione (kg CO _{2-eq} /anno)	94,221	94,215
Convenienza	=	=

I risultati di questo caso studio hanno mostrato che l'adozione di un processo di recupero in cascata, combinato con l'uso della tecnologia di estrazione innovativa basata sui PEF, migliora l'estrazione di licopene dai residui del pomodoro, permettendo la produzione di prodotti ad alto valore aggiunto. Questo approccio favorisce la valorizzazione dei residui, offre vantaggi economici significativi e contribuisce alla riduzione dei rifiuti.

La metodologia adottata potrebbe essere estesa anche alla valorizzazione di altri scarti provenienti dai processi alimentari.

¹⁵ Bastos (2024). Covenant of Mayors for Climate and Energy: Greenhouse gas emission factors for local emission inventories. Publications Office of the European Union.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

Pubblicazioni scientifiche su riviste Internazionali con peer review risultanti dall'attività svolta nella LA2.6

1. Eslami, E.; Landi, G.;Benedetti, M.; Pataro, G. Economic and Environmental Impact Analysis of Innovative Peeling Methods in the Tomato Processing Industry. Sustainability 2024, 16, 11272. <https://doi.org/10.3390/su162411272>

Conference proceedings con peer review risultanti dall'attività svolta nella LA2.6

- Landi, G., Benedetti, M., Eslami, E., Ferrari, G., Pataro, G. Economic and environmental impact analysis of innovative electrical peeling methods in the tomato processing industry. Proceeding of the "24th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering" IEEEIC2024, June 17th to 20th 2024, Rome, Italy.
- Landi, G., Benedetti, M., Eslami, E., Pataro, G. Economic and Environmental Impact Analysis of Innovative Cascaded Extraction of Lycopene and Cutin from Tomato Processing Residue. Proceeding of the international conference "Green Extraction of Natural Products" GENP 2024 October 28-30, 2024. Compiègne, France.

Pubblicazioni scientifiche su riviste Internazionali con peer review risultanti da collaborazioni con altre linee di attività (LA2.5)

- Landi, G., Benedetti, M., Eslami, E., Ferrari, G., Pataro, G. Cost, Energy Efficiency, and Environmental Impact Analysis of Orange Juice Pasteurization: Comparing Pulsed Electric Fields with Traditional Thermal Treatment. 2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEEIC / I&CPS Europe). DOI: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751382
- Landi, G., Benedetti, M., Sforzini, M., Eslami, E., Pataro, G. (2025). Comparative Analysis of Cost, Energy Efficiency and Environmental Impact of Pulsed Electric Fields and Conventional Thermal Treatment with Integrated Heat Recovery for Fruit Juice Pasteurization. Sottomesso sulla rivista FOODS (ID: foods-3462502).

Conference proceedings con peer review risultanti da collaborazioni con altre linee di attività (LA2.5)

- Landi, G., Benedetti, M., Eslami, E., Ferrari, G., Pataro, G. Cost, energy efficiency, and environmental impact analysis of orange juice pasteurization: comparing pulsed electric fields with traditional thermal treatment. Proceeding of the "24th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering" IEEEIC2024, June 17th to 20th 2024, Rome, Italy.
- Landi, G., Benedetti, M., Sforzini, M., Eslami, E., Pataro, G. Comprehensive Analysis of Heat-Assisted Pulsed Electric Fields and Conventional Thermal Treatment for Orange Juice Pasteurization: Cost, Energy Efficiency, and Sustainability Assessment.

Proceedings of the “5 World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields in Biology, Medicine, and Food & Environmental Technologies, September 15–19, 2024, Rome, Italy.

10 Eventi di disseminazione

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta nella LA2.6

- Presentazione orale dal titolo "Economic and environmental impact analysis of innovative electrical peeling methods in the tomato processing industry" al congresso internazionale "24th EEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering" EEEIC2024, tenutosi a Roma da 17 al 20 giugno 2024.
Relatore: Pataro, G.
Co-autori: Landi, G., Benedetti, M., Eslami, E., Ferrari, G., Pataro, G.
- Presentazione orale dal titolo "Analysis of Innovative Cascaded Extraction of Lycopene and Cutin from Tomato Processing Residue" al congresso internazionale "Green Extraction of Natural Products" GENP 2024, tenutosi a Compiègne (Francia) dal 28 al 30 ottobre 2024.
Relatore: Eslami, E.
Co-autori: Landi, G., Benedetti, M., Eslami, E., Ferrari, G.

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti da collaborazioni con altre linee di attività (LA2.5)

- Presentazione orale dal titolo "Cost, energy efficiency, and environmental impact analysis of orange juice pasteurization: comparing pulsed electric fields with traditional thermal treatment" al congresso internazionale "24th EEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering" EEEIC2024, tenutosi a Roma dal 17 al 20 giugno 2024.
Relatore: Landi, G.
Co-autori: Landi, G., Benedetti, M., Eslami, E., Ferrari, G., Pataro, G.
- Presentazione orale dal titolo "Comprehensive Analysis of Heat-Assisted Pulsed Electric Fields and Conventional Thermal Treatment for Orange Juice Pasteurization: Cost, Energy Efficiency, and Sustainability Assessment" al congresso internazionale "5 World Congress on Electroporation and Pulsed Electric Fields in Biology, Medicine, and Food & Environmental Technologies, tenutosi a Roma dal 15 al 19 settembre 2024.
Relatore: Landi, G.
Co-autori: Landi, G., Benedetti, M., Sforzini, M., Eslami, E., Pataro, G.