

# Ricerca di Sistema elettrico



Studio sui trattamenti di natura non termica e trattamenti termici innovativi in sostituzione di processi termici tradizionali nell'industria alimentare: sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni per le aziende (LA2.5)

Giovanni Landi, Miriam Benedetti

STUDIO SUI TRATTAMENTI DI NATURA NON TERMICA E TRATTAMENTI TERMICI INNOVATIVI IN SOSTITUZIONE DI PROCESSI TERMICI TRADIZIONALI NELL'INDUSTRIA ALIMENTARE: SVILUPPO DI STRUMENTI DI SOPPORTO ALLE DECISIONI PER LE AZIENDE (LA2.5)

G.Landi, M. Benedetti (ENEA)

Con la collaborazione di Giovanni Puglisi (ENEA)

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*

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

Linea di attività: 2.5

Responsabile del Progetto: Miriam, Benedetti, ENEA

Responsabile del Work Package: Miriam, Benedetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

## Indice

1	Risultati attesi .....	5
2	Risultati ottenuti.....	6
3	Prodotti attesi .....	7
4	Prodotti sviluppati .....	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte .....	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Campi elettrici pulsati (PEF) per la pastorizzazione di alimenti liquidi.....	11
7.2	Riscaldamento ohmico (OH) per la sterilizzazione di alimenti solidi-liquidi .....	20
7.3	Metodologia di valutazione energetica ed economica (MVEE) .....	21
7.4	Valutazione del potenziale di penetrazione dei PEF .....	27
7.5	Considerazioni finali e ricadute pratiche .....	28
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	29
9	Pubblicazioni scientifiche.....	30
10	Eventi di disseminazione .....	31

## Indice delle figure

Figura 1 – Schema di un sistema commerciale basato su HTST e PEF a calore assistito per la pastorizzazione del succo d'arancia.....	12
Figura 2 – Confronto dell'energia specifica totale per (a) il processo di pastorizzazione del succo d'arancia a $T_1 = 90^\circ\text{C}$ mediante trattamento HTST ( $W_{th,HTST}$ ) e (b) per il processo di pastorizzazione PEF ( $W_T = W_{PEF} + W_{th}$ ) in funzione dell'efficienza di recupero del calore residuo WHR e delle temperature di preriscaldamento del succo d'arancia.....	13
Figura 3 – Confronto del consumo di energia elettrica per la pastorizzazione (a) HTST del succo d'arancia a $T_1 = 90^\circ\text{C}$ e (b) PEF in funzione di WHR e $T_1$ .....	14
Figura 4 – Confronto del consumo di gas metano per la pastorizzazione (a) HTST del succo d'arancia a $T_1 = 90^\circ\text{C}$ e (b) PEF in funzione di WHR e $T_1$ .....	14
Figura 5 – Confronto delle emissioni GHG per la pastorizzazione (a) HTST del succo d'arancia a $T_1 = 90^\circ\text{C}$ e (b) PEF in funzione di WHR e $T_1$ .....	14
Figura 6 – Confronto del consumo di acqua per la pastorizzazione (a) HTST del succo d'arancia a $T_1 = 90^\circ\text{C}$ e (b) PEF in funzione di WHR e $T_1$ .....	15
Figura 7 – (a) Confronto del costo unitario di pastorizzazione del succo d'arancia utilizzando sia il processo PEF che HTST e (b) l'andamento del PBP in funzione dell'efficienza del recupero del calore di scarto WHR e della temperatura di preriscaldamento per il processo PEF.....	17
Figura 8 – PBP per vari scenari di costo energetico.....	18
Figura 9 – Correlazione tra le emissioni di gas serra e l'impronta idrica a varie temperature di preriscaldamento e livelli di efficienza del recupero termico per l'impianto PEF.....	19
Figura 10 – Confronto (a) dell'energia specifica, (b) delle emissioni di CO2 e (c) del costo unitario tra il trattamento termico convenzionale e il riscaldamento ohmico per la sterilizzazione dei fagioli in liquido di governo.....	21
Figura 11 – Applicazione del foglio di calcolo come strumento per l'analisi costi-benefici nella valutazione (a) dei PEF per la pastorizzazione degli alimenti liquidi e (b) degli OH per la sanitizzazione degli alimenti solido-liquidi.....	26
Figura 12 – Distribuzione delle aziende analizzate sul territorio nazionale per (a) la produzione di succhi di frutta e ortaggi e per (b) il trattamento del latte.....	27

## Indice delle tabelle

Tabella 1 – Condizioni operative per il processo di pastorizzazione del succo d'arancia.....	12
Tabella 2 – Valori di $W_{PEF}$ ottimale in funzione della temperatura di preriscaldamento ( $T_1$ ) del succo.....	13
Tabella 3 – Confronto dei costi del processo di pastorizzazione mediante impianti commerciali PEF e HTST per il succo d'arancia.....	16
Tabella 4 – Confronto dei costi del processo di sterilizzazione mediante impianti commerciali OH e termico mediante autoclave dei fagioli in liquido di governo.....	20

Tabella 5 - Elenco degli indicatori normalizzati utilizzati nella presente analisi. ....	22
Tabella 6 - Valori aggiornati dei coefficienti pesati in funzione al loro impatto. ....	22
Tabella 7 - Estratto dal foglio di calcolo Excel che implementa la metodologia MVEE per la pastorizzazione del succo di frutto. ....	24
Tabella 8 - Confronto tra pastorizzazione tradizionale e tecnologia PEF nel trattamento del latte e del succo d'arancia, basato sulle diagnosi energetiche . ....	28

# 1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente

- Consolidamento/estensione dell'analisi di letteratura delle tecnologie non termiche, termiche innovative e tradizionali nei processi industriali per il trattamento degli alimenti;
- Definizione di una serie di indicatori di valutazione dei benefici non-energetici ed ambientali, formulati dalla valutazione dei nuovi casi di studio, da integrare a quelli di carattere energetico, economico e di resa materiale;
- Integrazione/modifica della precedente metodologia di valutazione da applicare ai casi di studio per valutare l'efficacia e l'impatto ambientale dei TNNT e TTI rispetto ai processi termici tradizionali nell'industria alimentare;
- Definizione di una strategia di supporto alle decisioni basata su un metodo di analisi multicriterio che minimizzi gli sprechi energetici e l'impatto ambientale e massimizzi l'efficienza e la qualità della produzione;
- Implementazione della metodologia di valutazione e confronto tra i vari trattamenti industriali in un foglio di calcolo utile alle aziende per fornire un set di informazioni completo e chiaro a supporto dei loro processi decisionali;
- Applicazione del foglio di calcolo come strumento per l'analisi costi-benefici nella valutazione di altri casi studio;
- Integrazione/modifica delle buone pratiche con i dati delle diagnosi energetiche del 2023 e con i risultati ottenuti dal foglio di calcolo per ulteriori casi di studio/tipologie di processi produttivi;
- Stesura di uno strumento pratico (guida, infografica o simili) che traduce lo studio delle buone pratiche in modo facilmente comprensibile e divulgabile per le aziende;
- Valutazione dei potenziali di penetrazione dei TNNT e TTI nei processi industriali del settore alimentare, combinati con i dati delle diagnosi energetiche del 2023;
- Creazione di linee guida per le aziende contenenti i benefici energetici e non energetici nell'utilizzo delle tecnologie non termiche ed innovative in sostituzione a quelle termiche tradizionali.

## 2 Risultati ottenuti

### Lista dei risultati ottenuti

- È stato consolidato ed esteso l'analisi di letteratura delle tecnologie non termiche, termiche innovative e tradizionali nei processi industriali per il trattamento degli alimenti;
- Sono stati definiti una serie di indicatori di valutazione dei benefici non-energetici ed ambientali, formulati dalla valutazione dei nuovi casi di studio, da integrare a quelli di carattere energetico, economico e di resa materiale;
- È stata integrata e modificata la precedente metodologia di valutazione da applicare ai casi di studio per valutare l'efficacia e l'impatto ambientale dei TNNT e TTI rispetto ai processi termici tradizionali nell'industria alimentare;
- È stata definita una strategia di supporto alle decisioni basata su un metodo di analisi multicriterio che minimizzasse gli sprechi energetici e l'impatto ambientale e massimizzasse l'efficienza e la qualità della produzione;
- È stata implementata la metodologia di valutazione e confronto tra i vari trattamenti industriali in un foglio di calcolo utile alle aziende per fornire un set di informazioni completo e chiaro a supporto dei loro processi decisionali;
- È stato applicato il foglio di calcolo come strumento per l'analisi costi-benefici nella valutazione di altri casi studio;
- Sono state integrate e modificate le buone pratiche con i dati delle diagnosi energetiche del 2023 e con i risultati ottenuti dal foglio di calcolo per ulteriori casi di studio/tipologie di processi produttivi;
- È stato redatto uno strumento pratico (guida, infografica o simili) che traduce lo studio delle buone pratiche in modo facilmente comprensibile e divulgabile per le aziende;
- È stata valutata la potenziale penetrazione dei TNNT e TTI nei processi industriali del settore alimentare, combinata con i dati delle diagnosi energetiche del 2023;
- Sono state create linee guida per le aziende contenenti i benefici energetici e non energetici nell'utilizzo delle tecnologie non termiche ed innovative in sostituzione a quelle termiche tradizionali.

### 3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente attesi per la LA

- Rapporto tecnico di dettaglio contenente la descrizione di tutte le attività svolte e dei risultati ottenuti;
- Foglio di calcolo relativo all'implementazione di una strategia di supporto alle decisioni.

## 4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti hardware/software eventualmente sviluppati nella LA

- Rapporto tecnico di dettaglio contenente la descrizione di tutte le attività svolte e dei risultati ottenuti;
- Foglio di calcolo relativo all'implementazione di una strategia di supporto alle decisioni.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nella presente attività non c'è stato nessun scostamento tecnico/economico rispetto al preventivo.

## 6 Sintesi delle attività svolte

L'industria alimentare affronta elevati costi operativi a causa dell'uso di processi termici ad alta energia. La ricerca esplora soluzioni alternative come i campi elettrici pulsati (PEF) e il riscaldamento ohmico (OH), che offrono significativi vantaggi in termini di risparmio energetico, efficienza e riduzione dell'impatto ambientale. L'applicazione de PEF alla pastorizzazione consente di ridurre del 30% il consumo di energia elettrica e del 60% quello di gas. L'OH per la sterilizzazione dei fagioli riduce il consumo energetico del 54%. È stata ottimizzata, in un foglio di calcolo, la metodologia MVEE introducendo la normalizzazione degli indici e rendendola più applicabile. L'analisi delle diagnosi energetiche del 2023 ha evidenziato il potenziale dei PEF nelle industrie di succhi e lattiero-casearie, con risparmi energetici significativi che variano dal 30% nel latte al 22% nel succo d'arancia, con una riduzione dei TEP consumati.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

L'industria alimentare sostiene elevati costi operativi dovuti alla sua dipendenza da processi termici ad alta intensità energetica, come pastorizzazione, sterilizzazione, essiccazione e cottura degli alimenti<sup>1</sup>. I costi energetici costituiscono una parte rilevante delle spese totali di produzione, variando dal 20% al 50%<sup>2</sup>. L'introduzione di tecnologie più efficienti e sostenibili è cruciale per ridurre il consumo energetico e la dipendenza dai combustibili fossili, contribuendo a ridurre le emissioni di gas serra<sup>3</sup>. L'attività di ricerca si è concentrata sull'analisi delle applicazioni di trattamenti termici innovativi (TTI) e non termici (TNNT) in processi chiave dell'industria alimentare, con l'obiettivo di valutarne l'efficacia come alternative sostenibili ai tradizionali processi termici<sup>4</sup>.

Di seguito sono descritte le tecnologie dei campi elettrici pulsati (PEF) e del riscaldamento ohmico (OH), adottate in alternativa ai processi termici tradizionali, per la pastorizzazione di alimenti liquidi e la sanitizzazione di matrici solido-liquide su impianti commerciali.

L'obiettivo è il calcolo gli indicatori necessari all'applicazione della metodologia di valutazione energetica ed economica (MVEE) sviluppata.

### 7.1 Campi elettrici pulsati (PEF) per la pastorizzazione di alimenti liquidi

Tra le tecnologie non termiche i PEF hanno ricevuto crescente attenzione come alternative o complementi ai metodi tradizionali di conservazione termica degli alimenti liquidi. I PEF offrono significativi vantaggi, tra cui un potenziale risparmio energetico rispetto ai trattamenti ad alta temperatura e breve durata (HTST), una maggiore efficienza energetica, costi operativi ridotti, una qualità del prodotto migliorata e un minore impatto ambientale<sup>5</sup>. L'efficacia

---

<sup>1</sup> Smith, P.G. Introduction to Food Process Engineering; Food Science Text Series; Springer US: Boston, MA, 2011; ISBN 978-1-4419-7661-1.

Kermani, N.A.; Holm, F.; Elmegaard, B.; A Systematic Review of Electrification Technologies for Danish Food and Beverage Industry.; APA, 2022.

<sup>2</sup> Clairand, J.-M.; Briceno-Leon, M.; Escriva-Escriva, G.; Pantaleo, A.M. Review of Energy Efficiency Technologies in the Food Industry: Trends, Barriers, and Opportunities. IEEE Access 2020, 8, 48015–48029, doi:10.1109/ACCESS.2020.2979077.

<sup>3</sup> Rodriguez-Gonzalez, O.; Buckow, R.; Koutchma, T.; Balasubramaniam, V.M. Energy Requirements for Alternative Food Processing Technologies-Principles, Assumptions, and Evaluation of Efficiency. Compr Rev Food Sci Food Saf 2015, 14, 536–554, doi:10.1111/1541-4337.12142.

Arshad, R.N.; Abdul-Malek, Z.; Roobab, U.; Munir, M.A.; Naderipour, A.; Qureshi, M.I.; El-Din Bekhit, A.; Liu, Z.W.; Aadil, R.M. Pulsed Electric Field: A Potential Alternative towards a Sustainable Food Processing. Trends Food Sci Technol 2021, 111, 43–54, doi:10.1016/j.tifs.2021.02.041.

Meitz, S.; Reiter, J.; Fluch, J.; Tugores, C.R. Decarbonization of the Food Industry—The Solution for System Design and Operation. Sustainability 2023, 15, 14262, doi:10.3390/su151914262.

<sup>4</sup> Questi processi, spesso caratterizzati da temperature elevate e tempi di trattamento prolungati, possono comportare un notevole dispendio energetico con conseguenti implicazioni per l'ambiente.

<sup>5</sup> Per maggiori dettagli si confronti:

- G. Landi, M. Benedetti, E. Eslami, G. Ferrari, and G. Pataro, "Cost, Energy Efficiency, and Environmental Impact Analysis of Orange Juice Pasteurization: Comparing Pulsed Electric Fields with Traditional Thermal Treatment," in 2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), IEEE, Jun. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751382.

dell'inattivazione microbica con PEF assistita da calore dipende dai parametri del processo e dalla forma e dimensione dei microrganismi<sup>6</sup>. Tuttavia, i dati disponibili sulla fattibilità economica, l'efficienza energetica e l'impatto ambientale dell'uso della tecnologia PEF per la pastorizzazione rispetto alla HTST sono limitati.

In Figura 1 è riportato lo schema di un sistema commerciale basato su HTST e PEF a calore assistito per la pastorizzazione del succo d'arancia. Il succo crudo ( $T_0 = 4^\circ\text{C}$ ) viene prima preriscaldato in uno stadio (R) fino a un  $T_1$  che dipende dall'efficienza del recupero del calore di scarto (WHR) da 0 a 65% utilizzando il calore del succo pastorizzato.  $Q_H$  è la potenza termica fornita nella fase di riscaldamento per entrambi i trattamenti di pastorizzazione HTST e PEF.  $F = 3000 \text{ L/h}$  rappresenta la portata di ingresso dell'impianto.

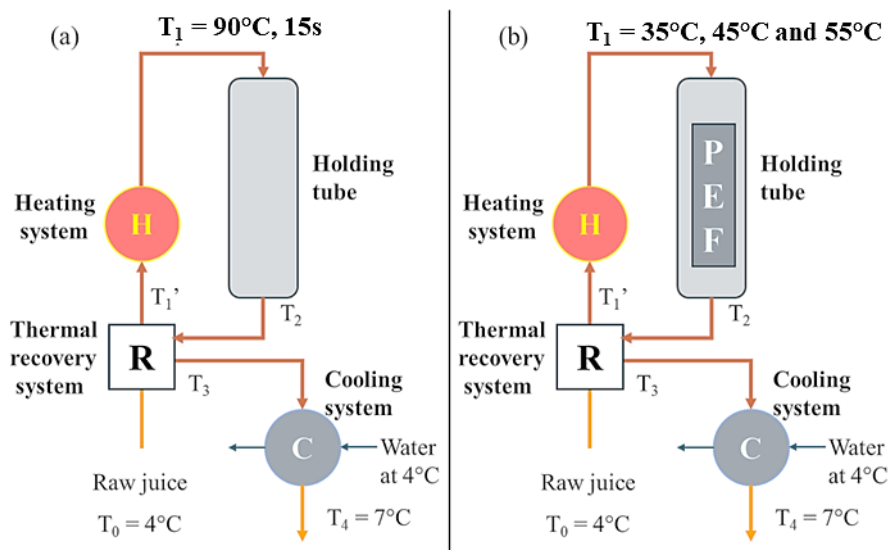


Figura 1 - Schema di un sistema commerciale basato su HTST e PEF a calore assistito per la pastorizzazione del succo d'arancia.

Tabella 1 - Condizioni operative per il processo di pastorizzazione del succo d'arancia.

Tecnologia	WHR (%)	$T_1$ ( $^\circ\text{C}$ )
HTST	da	90
Heat-assisted PEF	0% to 65%	35, 45, 55

Per la PEF assistita dal calore, l'energia specifica totale ( $W_T$ ) comprende sia i contributi legati al calore ( $W_{th} = Q_H/F$ ) sia quelli legati alla PEF  $W_{PEF}$ <sup>7</sup>. In Tabella 2 sono riportate i valori di  $W_{PEF}$  per una riduzione di 5 log in funzione di  $T_1$ . Come si osserva dalla Figura 2, all'aumentare

- G. Landi, M. Benedetti, M. Sforzini, E. Eslami, and G. Pataro, "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", *Foods* (mdpi), Gennaio 2025, Under review. Manuscript ID: foods-3517270.

<sup>6</sup> Ad esempio, nei succhi di frutta sono presenti diversi microrganismi, tra cui batteri (es. *Escherichia coli*, *B. megaterium*, *Listeria innocua*), lieviti (es. *Saccharomyces cerevisiae*) e muffe (es. *Penicillium spp.*).

<sup>7</sup> Si noti che i valori di energia specifica totale ( $W_T$ ) sono calcolati come la somma dell'energia consumata dal trattamento a campi elettrici pulsati ( $W_{PEF}$ ) e dell'energia termica richiesta ( $W_{th}$ ) nella fase di preriscaldamento del succo.

dell'efficienza WHR, il contributo termico  $W_{th}$  diminuisce mentre il contributo PEF rimane costante.

Tabella 2 – Valori di  $W_{PEF}$  ottimale in funzione della temperatura di preriscaldamento ( $T_1$ ) del succo<sup>8</sup>.

$T_1$ (°C)	$W_{PEF}$ (kJ/kg)
35	102
45	79
55	38

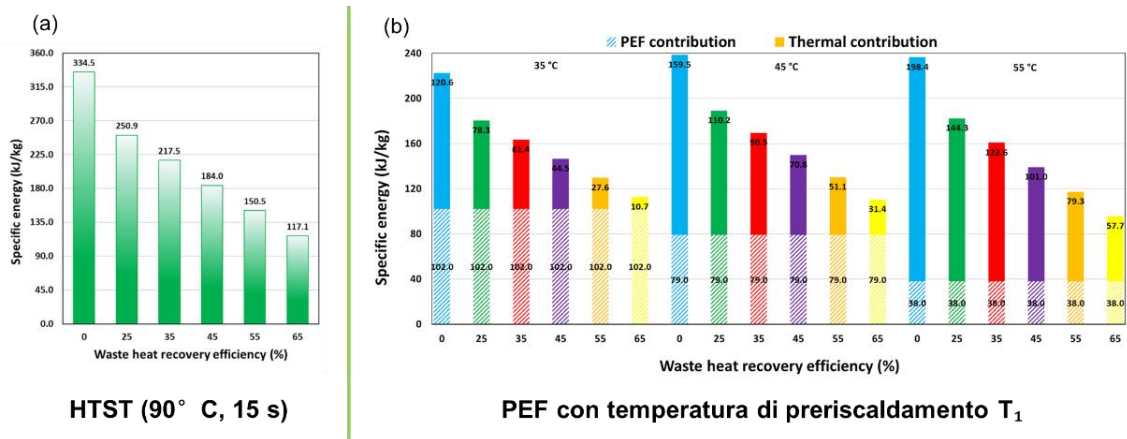
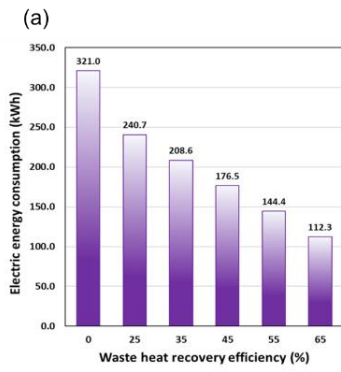


Figura 2 – Confronto dell'energia specifica totale per (a) il processo di pastorizzazione del succo d'arancia a  $T_1 = 90^\circ\text{C}$  mediante trattamento HTST ( $W_{th,HTST}$ ) e (b) per il processo di pastorizzazione PEF ( $W_T = W_{PEF} + W_{th}$ ) in funzione dell'efficienza di recupero del calore residuo WHR e delle temperature di preriscaldamento del succo d'arancia.

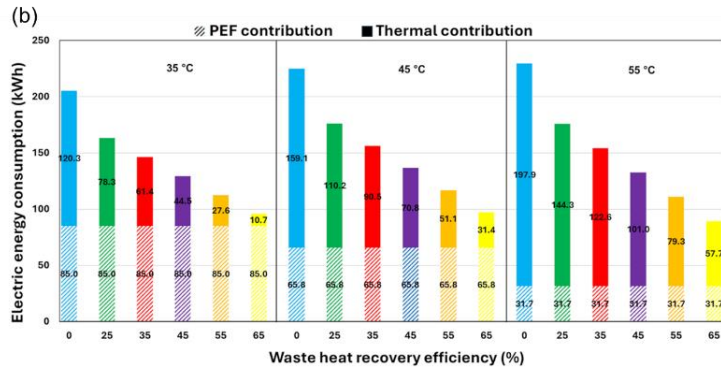
Rispetto alla configurazione HTST (Figura 2), l'impiego dell'unità PEF per la pastorizzazione consente una riduzione significativa del fabbisogno energetico specifico (-30% in media), traducendosi in risparmi sui costi operativi e in un miglioramento dell'efficienza energetica complessiva. Il consumo di energia elettrica si riduce mediamente del 30% (Figura 3). Per il PEF assistito dal calore, si osserva una riduzione media del 60% nel consumo di gas grazie al recupero di calore (Figura 4). Il consumo di gas è esclusivamente attribuito al generatore di vapore; quindi, un aumento del recupero del calore comporta una diminuzione del consumo di combustibile. Per il PEF assistito dal calore si osserva una riduzione media delle emissioni di  $\text{CO}_2$  del 40% (Figura 5). Infine, per il PEF assistito dal calore si osserva una riduzione media del consumo di acqua del 6% (Figura 6)<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> Per maggiori informazioni sui valori ottimali della WPEF si confronti Toepfl, S. Pulsed Electric Field Food Treatment - Scale up from Lab to Industrial Scale. Procedia Food Sci 2011, 1, 776-779, doi:10.1016/j.profoo.2011.09.117.

<sup>9</sup> La maggior parte del consumo di acqua è dovuta al sistema di raffreddamento, con solo il 2-4% utilizzato per la generazione di vapore.

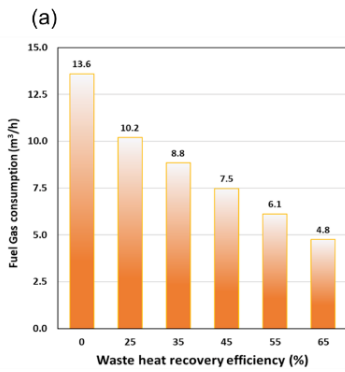


HTST (90° C, 15 s)

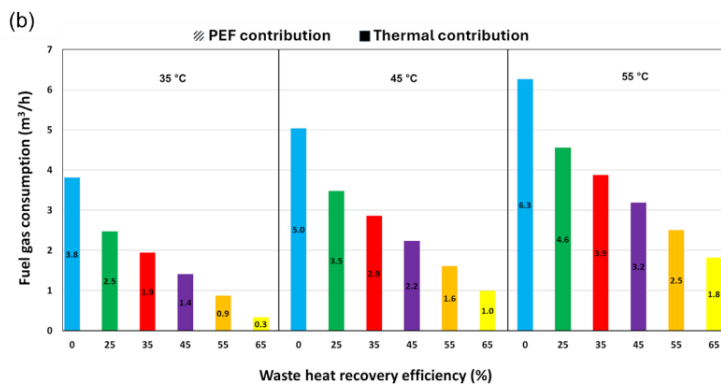


PEF con temperatura di preriscaldamento T<sub>1</sub>

Figura 3 - Confronto del consumo di energia elettrica per la pastorizzazione (a) HTST del succo d'arancia a T<sub>1</sub> = 90°C e (b) PEF in funzione di WHR e T<sub>1</sub>.

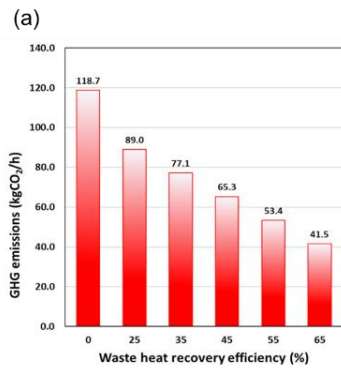


HTST (90° C, 15 s)

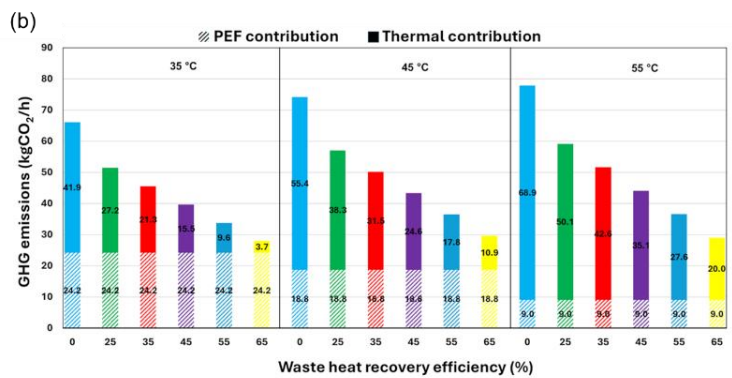


PEF con temperatura di preriscaldamento T<sub>1</sub>

Figura 4 - Confronto del consumo di gas metano per la pastorizzazione (a) HTST del succo d'arancia a T<sub>1</sub> = 90°C e (b) PEF in funzione di WHR e T<sub>1</sub>.



HTST (90° C, 15 s)



PEF con temperatura di preriscaldamento T<sub>1</sub>

Figura 5 - Confronto delle emissioni GHG per la pastorizzazione (a) HTST del succo d'arancia a T<sub>1</sub> = 90°C e (b) PEF in funzione di WHR e T<sub>1</sub>.

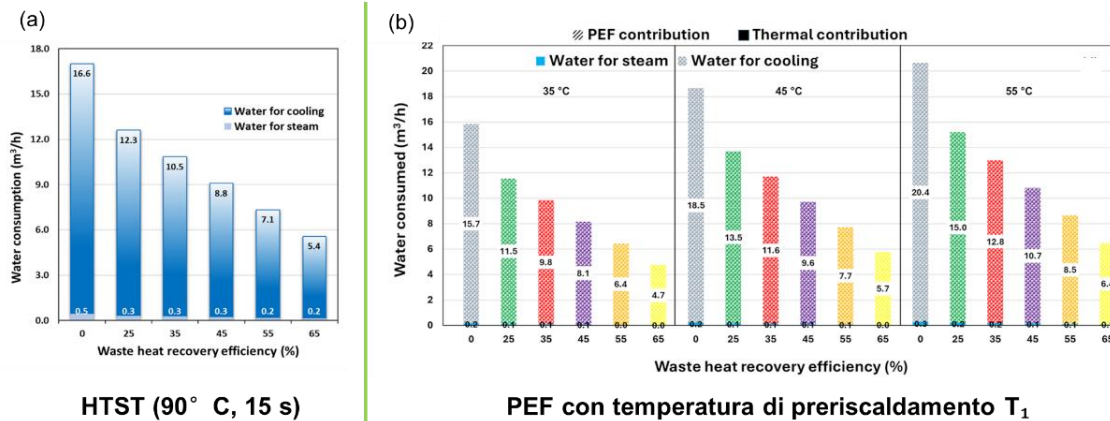


Figura 6 - Confronto del consumo di acqua per la pastorizzazione (a) HTST del succo d'arancia a  $T_1 = 90^\circ\text{C}$  e (b) PEF in funzione di WHR e  $T_1$ .

Per valutare la fattibilità economica della sostituzione della pastorizzazione termica con il PEF assistito dal calore, è stato sviluppato un modello dei costi considerando temperature di preriscaldamento di  $35^\circ\text{C}$ ,  $45^\circ\text{C}$  e  $55^\circ\text{C}$  ed efficienze di recupero termico da 0 a  $65\%$ <sup>10</sup>.

La Tabella 3 mostra un esempio del modello adottato, comprensivo dei costi di investimento iniziali ( $C_0$ ) e delle spese per utenze, manodopera e strutture<sup>11</sup>. I costi per l'energia (elettricità, gas naturale e acqua) sono stati calcolati in base all'efficienza di recupero del calore e alla temperatura di trattamento, come illustrato nella Figura 1, utilizzando tariffe unitarie:  $3,5 \text{ €/m}^3$  per l'acqua,  $1,5 \text{ €/smc}$  per il gas naturale e  $0,25 \text{ €/kWh}$  per l'elettricità<sup>12</sup>.

Come mostrato nella Tabella 3, il processo PEF commerciale presenta un costo unitario di pastorizzazione inferiore ( $3,7 \text{ c€/L}$ ) rispetto al processo termico di riferimento ( $4,5 \text{ c€/L}$ ), con un risparmio annuale di circa  $130000 \text{ €}$  rispetto al trattamento termico. La Figura 7 (a) mostra come i costi unitari di pastorizzazione PEF siano inferiori rispetto al trattamento termico convenzionale in tutte le condizioni operative valutate, con il vantaggio del PEF che diminuisce con l'aumento di WHR e delle temperature di preriscaldamento, a causa dei costi operativi crescenti.

La Figura 7 (b) illustra la variazione del periodo di recupero dell'investimento (PBP) in funzione di WHR e  $T_1$ . A temperature di preriscaldamento basse, il PBP è di circa 3,2 anni, ma aumenta fino a 9,5 anni a  $35^\circ\text{C}$  e con un'efficienza WHR del 55%. Oltre questo valore, il PBP supera i 10 anni, indicando uno scenario economico meno favorevole, dove il recupero dei costi dell'investimento in PEF richiederebbe un periodo più lungo. A valori fissi di WHR, l'aumento della temperatura di preriscaldamento porta a un PBP più alto, riducendo la competitività economica del processo PEF rispetto all'HTST.

<sup>10</sup> È stata valutata la fattibilità economica della sostituzione della pastorizzazione termica HTST commerciale del succo d'arancia a  $90^\circ\text{C}$  per 15 s con un processo PEF assistito dal calore. È stato sviluppato un modello di costo applicato a diverse efficienze di recupero del calore (0-65%) e temperature di ingresso nelle camere PEF ( $35^\circ\text{C}$ ,  $45^\circ\text{C}$  e  $55^\circ\text{C}$ ).

<sup>11</sup> I costi di capitale sono stati stimati sulla base dei prezzi dell'attrezzatura:  $746000 \text{ €}$  per il sistema PEF e  $288000 \text{ €}$  per il sistema HTST.

<sup>12</sup> Fonte Eurostat.

Tabella 3 – Confronto dei costi del processo di pastorizzazione mediante impianti commerciali PEF e HTST per il succo d'arancia.

Process parameters	HTST WHR 35% at $T_1 = 90^\circ\text{C}$	PEF WHR 35% at $T_1 = 45^\circ\text{C}$
Annual production (h/yr)	5500	5500
F (L/h)	3000	3000
$C_0$ Total capital costs (€)	287683	746166
Utility costs (€/yr)	568629	362245
Labour costs (€/yr)	127875	127875
<b>Facility costs</b>		
Estimated plant life	10	10
Maintenance charges (%)	2	3
Administration charges (%)	2.5	2.5
Annual depreciation (€/yr)	29419	74617
Maintenance and administration charges (€/yr)	13239	41039
Facility-related costs (€/yr)	42658	115656
Total annual costs (€/yr)	739162	605776
Unit pasteurization cost (€/L)	0.045	0.037

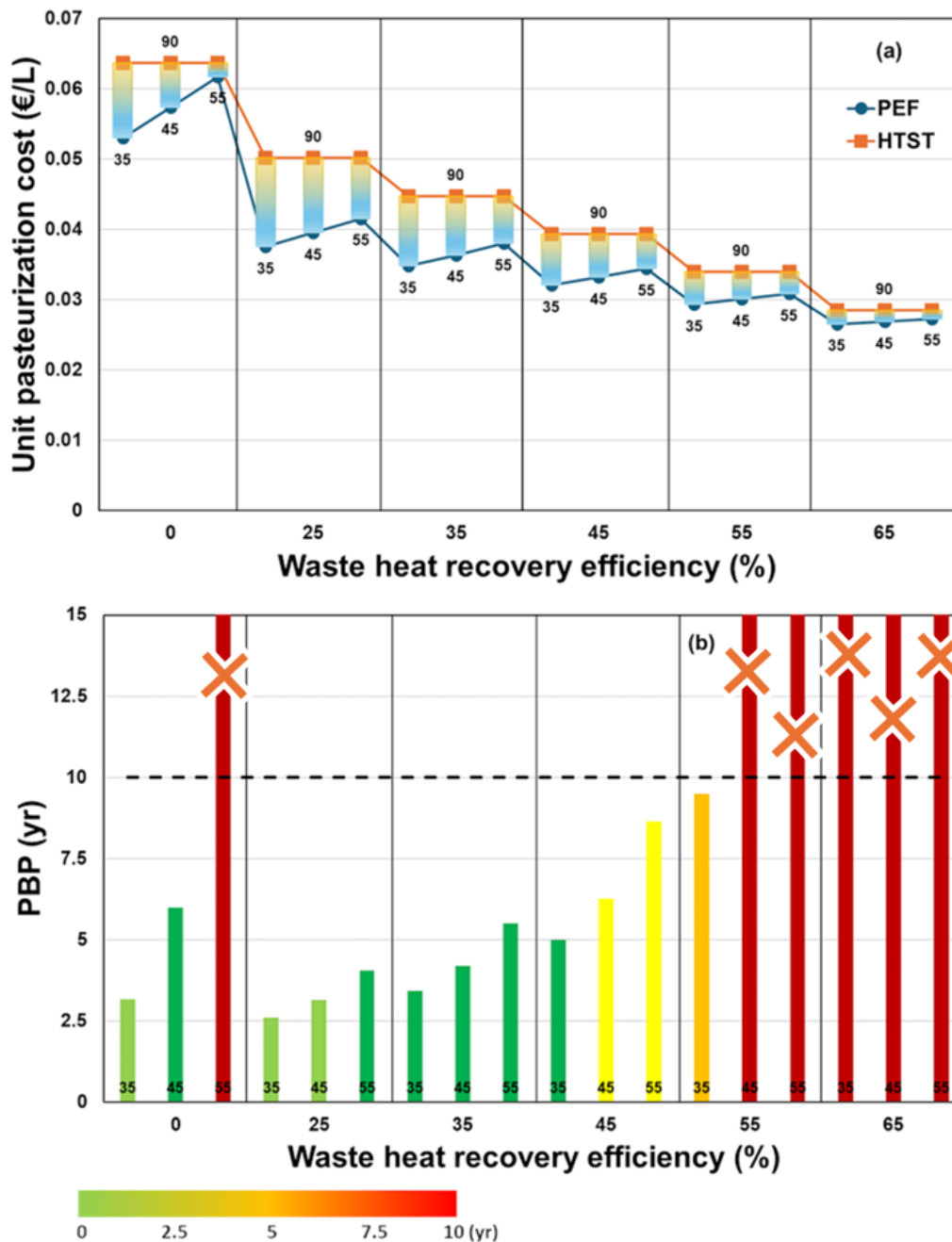


Figura 7 - (a) Confronto del costo unitario di pastorizzazione del succo d'arancia utilizzando sia il processo PEF che HTST e (b) l'andamento del PBP in funzione dell'efficienza del recupero del calore di scarto WHR e della temperatura di preriscaldamento per il processo PEF<sup>13</sup>.

Un NPV negativo è indicato come investimento non conveniente (NBI)(Figura 8)<sup>14</sup>. Si noti che lo Scenario 4, con costi più alti di elettricità e gas, mostra PBP più brevi rispetto ad altri scenari

<sup>13</sup> Le temperature dei processi sono riportate come etichette vicino agli indicatori. La scala dei colori indica diversi periodi di ritorno dell'investimento: verde chiaro per PBP da 0 a 2,5 anni, verde scuro per PBP da 2,5 a 5 anni, arancione per PBP da 5 a 7,5 anni e rosso per PBP superiori a 10 anni.

<sup>14</sup> Lo studio analizza diversi scenari energetici considerando le variazioni dei costi di elettricità e gas naturale, mantenendo costante il costo dell'acqua. Lo Scenario 1 rappresenta costi energetici e di gas più bassi (0,25 €/kWh e 0,6 €/smc), mentre lo Scenario 4 riflette costi più elevati (0,35 €/kWh e 1,5 €/smc). Gli Scenari 2 e 3 analizzano l'impatto delle variazioni di costo individuali.

a parità di condizioni operative ( $T_1$  e WHR). Questo evidenzia la maggiore efficacia economica e la minore sensibilità del sistema PEF ai costi energetici crescenti.

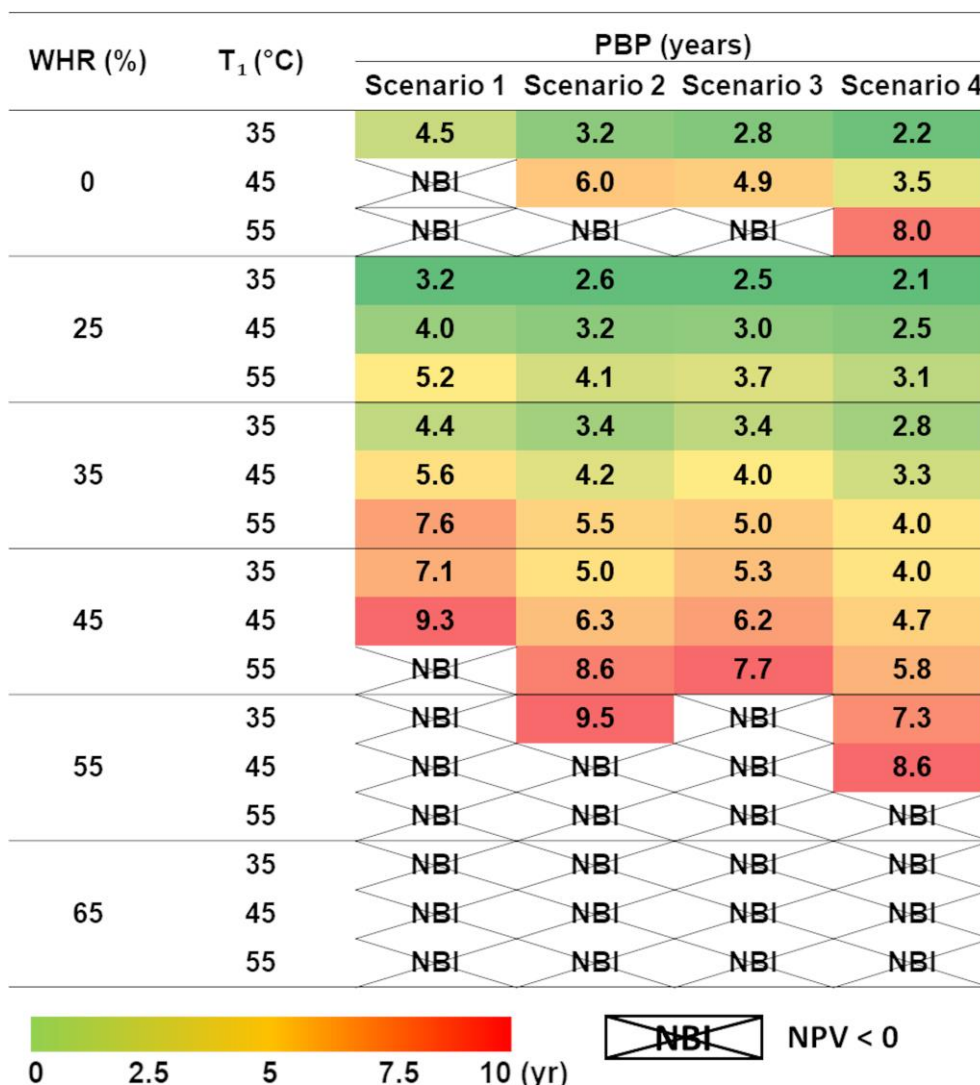


Figura 8 - PBP per vari scenari di costo energetico<sup>15</sup>.

Tra le configurazioni analizzate (Figura 8), l'impianto PEF più sostenibile si individua valutando emissioni di CO<sub>2</sub> e consumo d'acqua (Figura 9). Una configurazione con WHR al 35% e  $T_1 = 35^\circ\text{C}$  minimizza entrambi rispetto a  $T_1 = 45^\circ\text{C}$ , pur mantenendo requisiti energetici simili. L'aumento di  $T_1$  migliora l'efficacia del PEF contro microrganismi resistenti, come batteri (*E. coli*, *Salmonella spp.*), lieviti e muffe, risultando essenziale per la sicurezza alimentare. Il trattamento PEF a  $T_1 = 45^\circ\text{C}$  è stato considerato ottimale per garantire un'efficace inattivazione microbica e una maggiore sostenibilità.

<sup>15</sup> Valori di PBP derivanti dall'implementazione della tecnologia PEF nel processo di pastorizzazione del succo d'arancia, sostituendo il trattamento termico convenzionale HTST. La scala cromatica indica i diversi periodi di payback: verde chiaro per PBP da 0 a 2,5 anni, verde scuro per PBP da 2,5 a 5 anni, arancione per PBP da 5 a 7,5 anni e rosso per PBP superiori a 10 anni. NBI sta per Investimento Non Benefico con un NPV negativo.

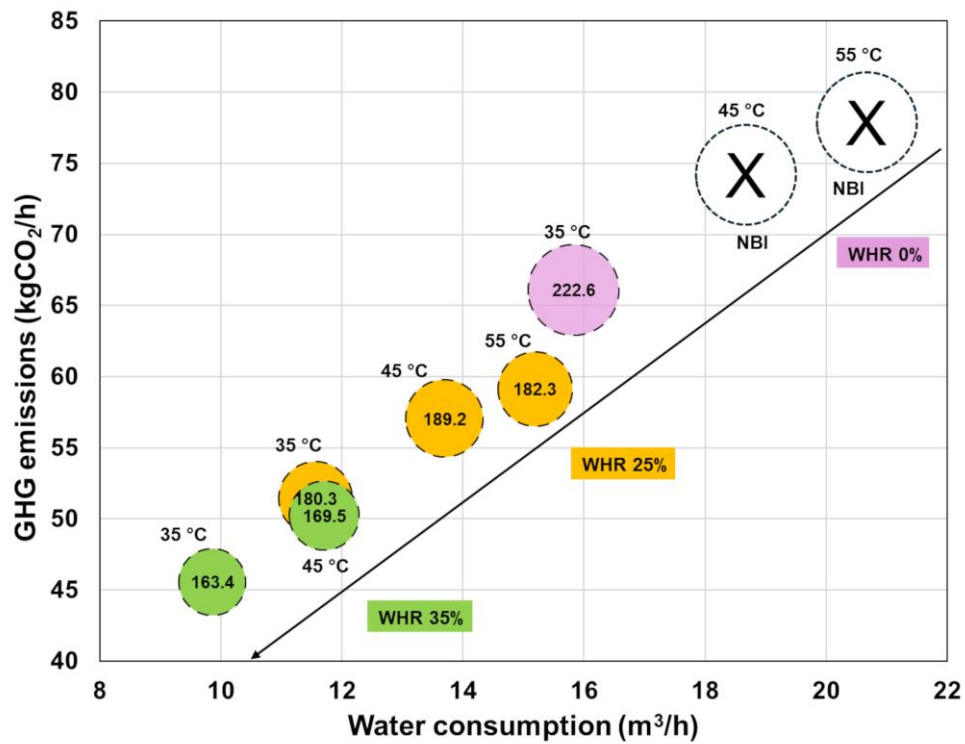


Figura 9 - Correlazione tra le emissioni di gas serra e l'impronta idrica a varie temperature di preriscaldamento e livelli di efficienza del recupero termico per l'impianto PEF<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> I dati sono segmentati in tre serie di dati, ciascuna associata a valori distinti di energia specifica totale  $W_T$ , indicati come etichette all'interno delle bolle. La freccia indica l'aumento dei valori WHR. I costi unitari corrispondono allo Scenario 1.

## 7.2 Riscaldamento ohmico (OH) per la sterilizzazione di alimenti solidi-liquidi

Lo studio ha approfondito la sterilizzazione dei fagioli utilizzando il riscaldamento ohmico OH con un aggiornamento dell'analisi costi-benefici e dei relativi fogli di calcolo<sup>17</sup>. Il trattamento ohmico è risultato più efficiente rispetto a quello termico, con una riduzione del 54% dell'energia richiesta (0,021 kWh/kg contro 0,037 kWh/kg). Nonostante un investimento iniziale più elevato di 900.000 € contro i 329.000 €, i costi operativi annuali del trattamento ohmico sono risultati inferiori (199.046 € contro 583.353 €, -65%) (Tabella 4). L'energia specifica necessaria è stata di 121,14 kJ/kg per il trattamento ohmico rispetto a 266,2 kJ/kg per quello convenzionale. Inoltre, le emissioni di CO<sub>2</sub> si sono ridotte significativamente, passando da 527,2 kgCO<sub>2</sub>/h a 67 kgCO<sub>2</sub>/h (Figura 10). I risultati mostrano che il riscaldamento ohmico è una soluzione sostenibile per il settore alimentare, offrendo vantaggi in termini energetici, economici e ambientali, con un grande potenziale commerciale nel lungo termine.

Tabella 4 - Confronto dei costi del processo di sterilizzazione mediante impianti commerciali OH e termico mediante autoclave dei fagioli in liquido di governo.

Process parameters	Thermal	OH
Annual production (h/yr)	1600	1600
F (L/h)	11250	11250
<b>C<sub>0</sub></b> Total capital costs (€)	<b>329000</b>	<b>900000</b>
Utility costs (€/yr)	<b>583353</b>	<b>199046</b>
Labour costs (€/yr)	<b>37200</b>	<b>37200</b>
<b>Facility costs</b>		
Estimated plant life	10	10
Maintenance charges (%)	2	3
Administration charges (%)	2.5	2.5
Annual depreciation (€/yr)	32900	90000
Maintenance and administration charges (€/yr)	14805	49500
Facility-related costs (€/yr)	<b>47705</b>	<b>139500</b>
Total annual costs (€/yr)	<b>668258</b>	<b>375746</b>
Unit pasteurization cost (€/L)	<b>0.037</b>	<b>0.021</b>

<sup>17</sup> Per il trattamento ohmico, è stato utilizzato un tubo ohmico con diametro di 8 cm e lunghezza di 120 cm, alimentato da un generatore da 300 kW a 25 kHz. Il rapporto in peso acqua-fagioli è del 60/40, con una temperatura iniziale dei fagioli di 55°C. La temperatura di sterilizzazione raggiunta è di 121°C e la temperatura di raffreddamento è di 45°C. Nel trattamento termico tradizionale, invece, sono utilizzati due autoclave e una caldaia a tubi d'acqua. Anche in questo caso, il rapporto acqua-fagioli è del 60/40, la temperatura iniziale dei fagioli è di 55°C, la temperatura di sterilizzazione è di 121°C e quella di raffreddamento è di 45°C.

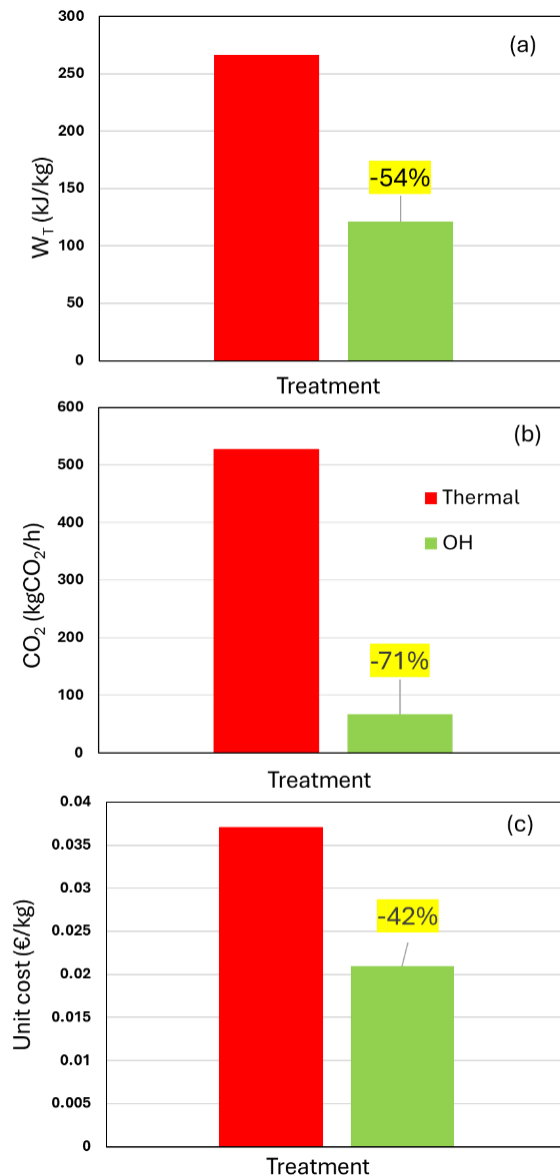


Figura 10 – Confronto (a) dell'energia specifica, (b) delle emissioni di CO<sub>2</sub> e (c) del costo unitario tra il trattamento termico convenzionale e il riscaldamento ohmico per la sterilizzazione dei fagioli in liquido di governo.

### 7.3 Metodologia di valutazione energetica ed economica (MVEE)

In questa LA sono stati definiti indicatori normalizzati di tipo energetico, economico e ambientale, successivamente integrati nella metodologia di valutazione sviluppata nella prima LA. Tale metodologia è stata applicata a casi di studio reali per valutare l'efficacia e l'impatto ambientale dei TTI e TNNT in confronto ai processi termici tradizionali nell'industria alimentare.

Nel calcolo dell'indice aggregato MVEE, è stata applicata una normalizzazione utilizzando come riferimento i valori del processo termico tradizionale<sup>18</sup>. Le formule per la normalizzazione e il

<sup>18</sup> Questo approccio ha consentito una valutazione uniforme e comparabile delle diverse condizioni di funzionamento dell'impianto. La normalizzazione di ciascun indice, che include aspetti economici, ambientali e di processo, è stata calibrata in base alle caratteristiche specifiche del dataset, assicurando una ponderazione equilibrata e coerente degli indicatori nell'indice finale.

calcolo degli indici sono riportate nella Tabella 5, mentre la Tabella 6 dettaglia i valori aggiornati dei coefficienti pesati in funzione al loro impatto. La metodologia MVEE è stata arricchita con nuovi indici, una procedura di normalizzazione rinnovata e una riduzione delle soglie di impatto a 4, rendendola così più pratica e applicabile.

Tabella 5 - Elenco degli indicatori normalizzati utilizzati<sup>19</sup>.

Indici economici			
NPV (Net Present Value) $NPV_{norm} = \frac{NPV_i}{NPV_{Ref}}$	Internal rate of return (IRR)	Payback period (PBP) $PBP_{norm} = \frac{10 + PBP_i}{10}$	Investimento iniziale (C <sub>0</sub> ) $C_{0,norm} = \frac{C_{0,i}}{C_{0,ref}}$
Indici ambientali			
Emissioni di CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /h) $CO2_{norm} = \frac{CO2_i}{CO2_{Ref}}$	Consumo di acqua (m <sup>3</sup> /h) $H2O_{norm} = \frac{H2O_i}{H2O_{Ref}}$	LCA (Life Cycle Assessment)	LCC (LIFE CYCLE COST)
Indici di processo			
Rapporto riduzione microbica/energia specifica (RME) (log-cycles/(kj/kg)) $RME_{norm} = \left(\frac{RME_i}{RME_{Ref}}\right)^{-1}$	Energia specifica (kj/kg) $WT_{norm} = \frac{WT_i}{WT_{Ref}}$	Costo totale del processo di trattamento (€/kg) oppure (€/L) $UC_{norm} = \frac{UC_i}{UC_{Ref}}$	

Tabella 6 - Valori aggiornati dei coefficienti pesati in funzione al loro impatto<sup>20</sup>.

Impatto	Soglie
molto basso	0 - 0.25
basso	0.26 - 0.5
medio	0.51 - 0.75
alto	0.76 - 1

<sup>19</sup> Nella presente analisi tutti gli indici riportati sono normalizzati rispetto a valori di riferimento, che in questo studio corrispondono a quelli della tecnologia termica da sostituire. La normalizzazione avviene generalmente come semplice rapporto tra l'indice i-esimo e il valore di riferimento. Tuttavia, per alcuni indici, come  $PBP_{norm}$  ed  $RME_{norm}$ , la formula è stata adattata per tener conto delle specificità dell'indicatore e garantire una valutazione coerente. Ad esempio, per  $PBP_{norm}$ , è stato aggiunto un offset costante per evitare valori negativi e facilitare il confronto, mentre per  $RME_{norm}$ , l'inversione del rapporto consente di valorizzare gli impatti ridotti rispetto al riferimento, enfatizzando i miglioramenti ottenuti con tecnologie alternative.

<sup>20</sup> Per convalidare e testare la metodologia proposta, sono stati definiti tre profili di utilizzatori, ognuno con diverse priorità di interesse nei confronti degli indici. Questi profili includono un utente con un interesse uniforme su tutti gli indici, un utente maggiormente interessato agli indici di natura finanziaria e un utente maggiormente interessato agli indici ambientali. Nella pratica, la metodologia suggerisce i pesi per ciascun indicatore, ma tali

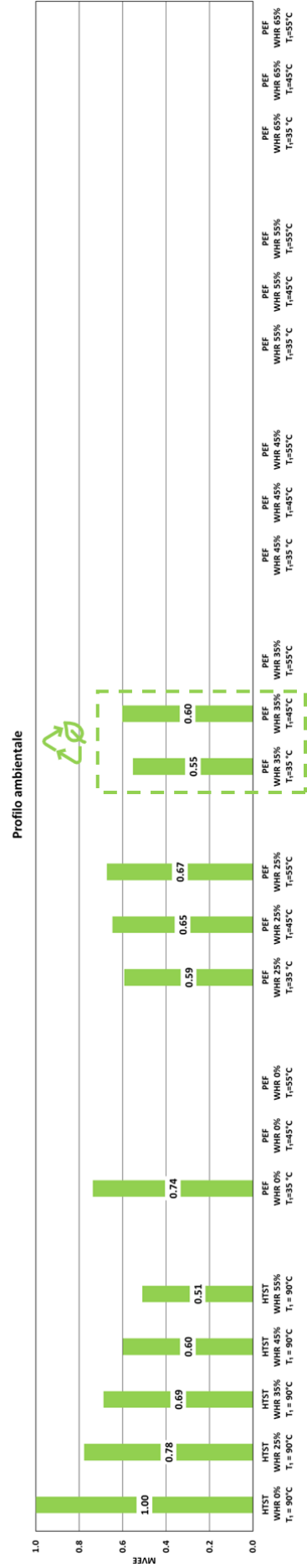
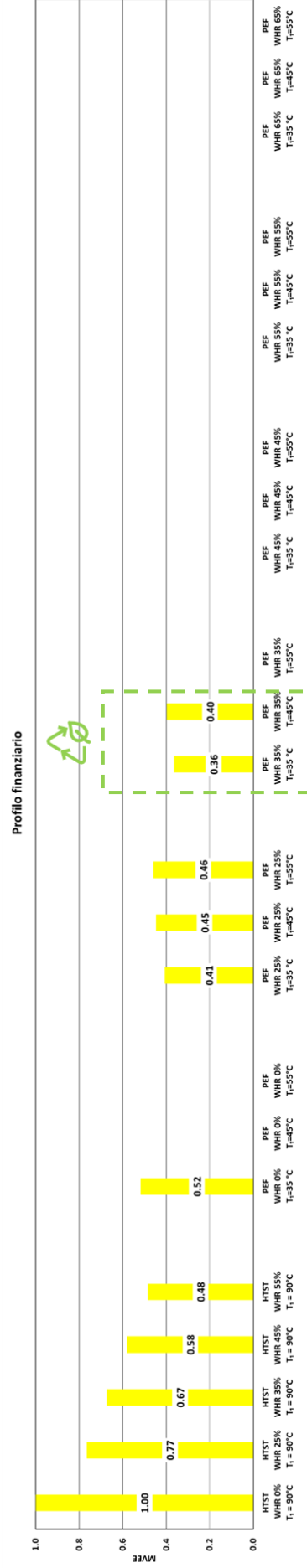
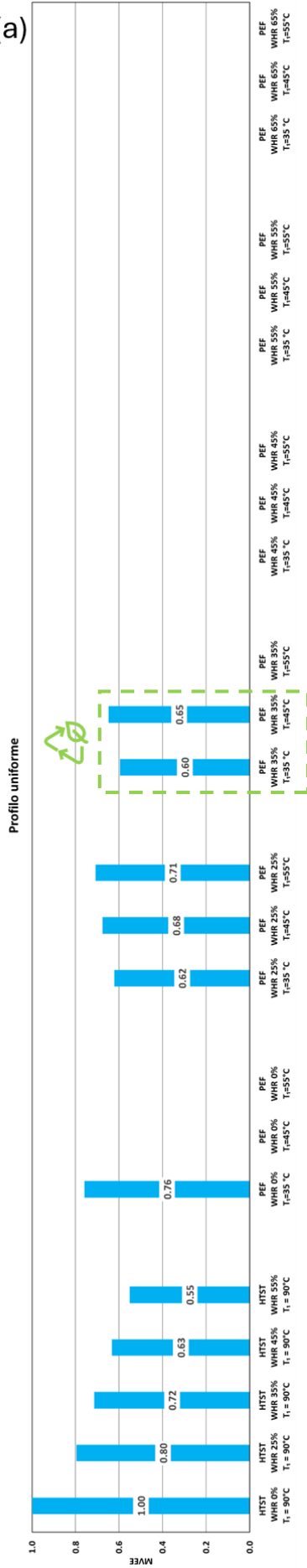
La metodologia è stata implementata in un foglio di calcolo (Tabella 7), progettato per fornire alle aziende informazioni chiare e complete, supportando i processi decisionali. È stato applicato anche per l'analisi energetica ed economica di casi di studio specifici, come mostrato in Figura 11 (a) e (b). La MVEE conferma l'efficacia delle tecnologie PEF per la pastorizzazione del succo di frutta e OH per la sanitizzazione dei fagioli in scatola evidenziando i vantaggi in termini di efficienza energetica, riduzione dei costi operativi e miglioramento della qualità. Questo approccio favorisce l'innovazione e la sostenibilità nell'industria alimentare, aiutando le aziende a selezionare tecnologie alternative adatte alle loro esigenze.

---

coefficienti possono essere adattati liberamente dall'azienda in base alle sue specifiche esigenze e priorità. Questi profili simulano tre diverse aziende o utilizzatori dell'analisi, ciascuno con diverse necessità e priorità, al fine di fornire una valutazione completa e adattabile dell'indice aggregato MVEE.



(a)



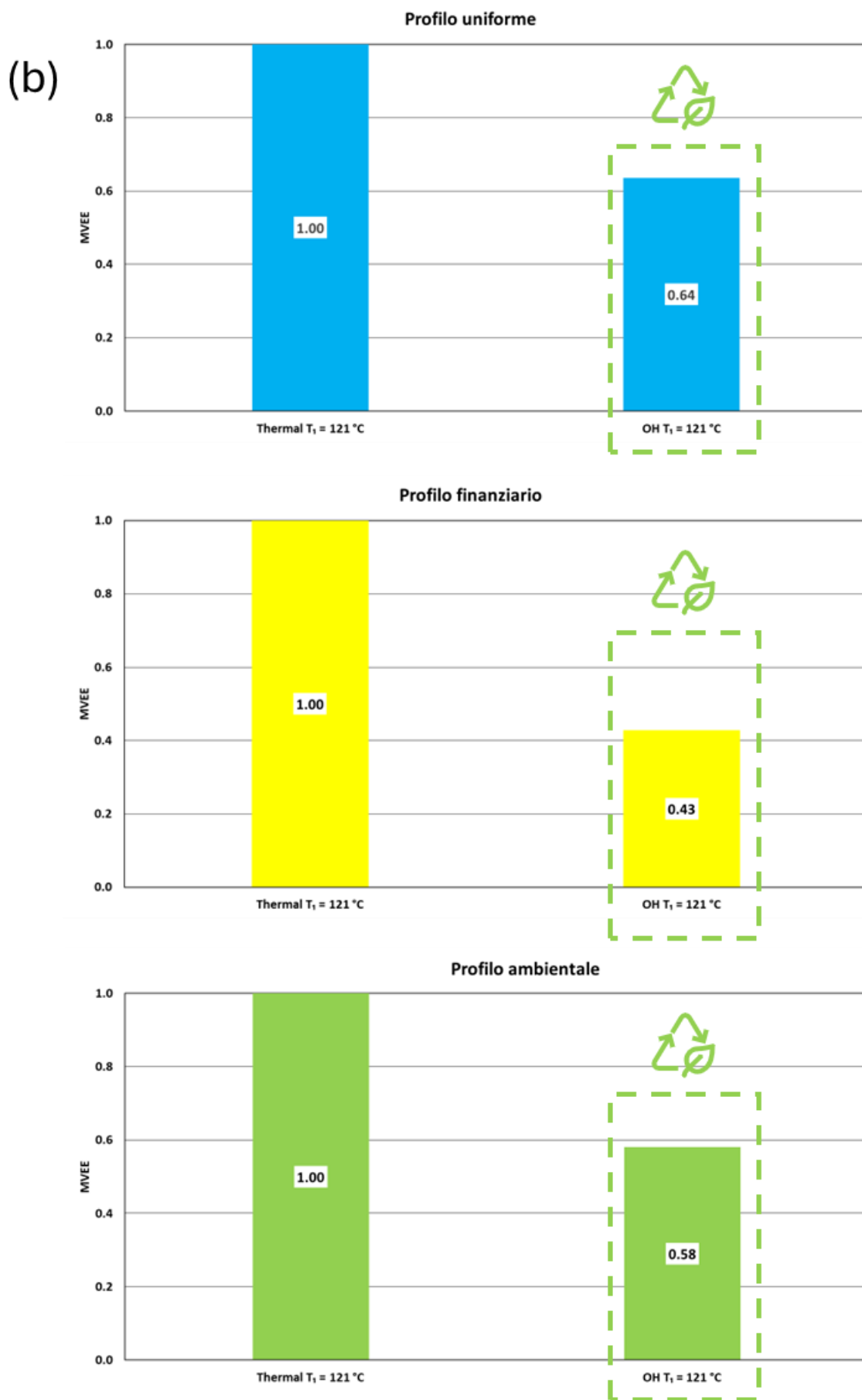


Figura 11 - Applicazione del foglio di calcolo come strumento per l'analisi costi-benefici nella valutazione (a) dei PEF per la pastorizzazione degli alimenti liquidi e (b) degli OH per la sanitizzazione degli alimenti solido-liquidi.

## 7.4 Valutazione del potenziale di penetrazione dei PEF

La ricerca ha analizzato le diagnosi energetiche nel 2023 delle industrie di succhi di frutta e lattiero-casearie (Figura 12), identificando le fasi produttive e le relative esigenze energetiche. I consumi sono stati suddivisi in tre aree funzionali: attività principali, servizi ausiliari e generali<sup>21</sup>.

La pastorizzazione, che incide mediamente per il 30% del consumo energetico, è emersa come la fase più energivora, rendendola prioritaria per l'adozione di tecnologie alternative, come i PEF, per migliorarne l'efficienza.

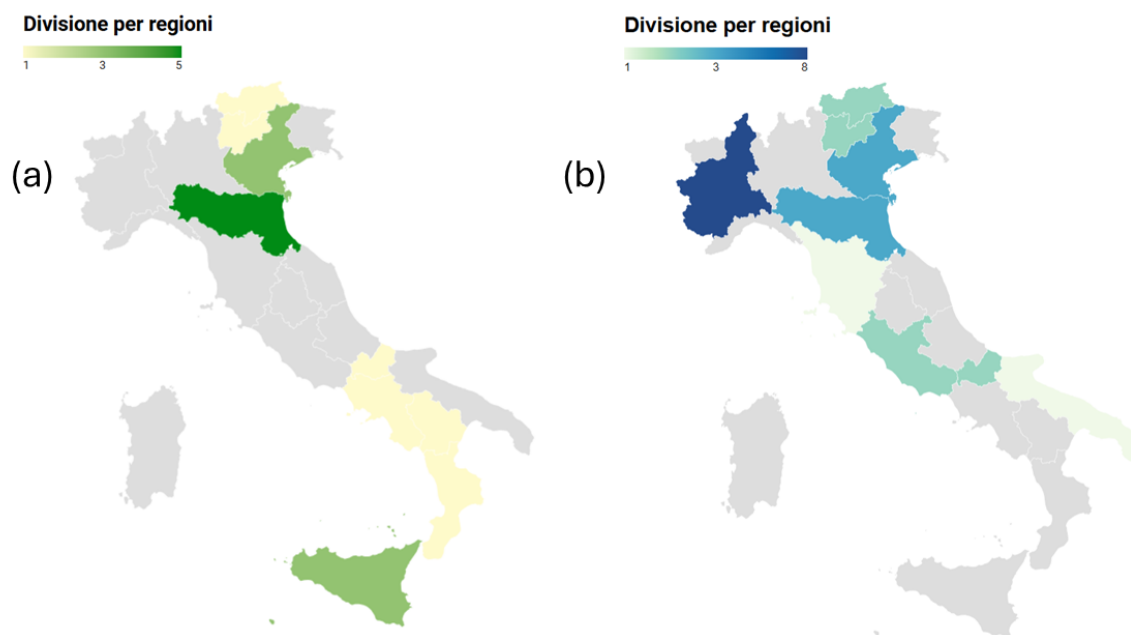


Figura 12 - Distribuzione delle aziende analizzate sul territorio nazionale per (a) la produzione di succhi di frutta e ortaggi e per (b) il trattamento del latte<sup>22</sup>.

Dall'analisi delle diagnosi energetiche (Tabella 8) emerge che la tecnologia PEF consente un significativo risparmio energetico rispetto alla pastorizzazione tradizionale, con un impatto maggiore nel trattamento degli alimenti liquidi senza recupero termico<sup>23</sup>. L'integrazione del WHR riduce ulteriormente i consumi complessivi, pur mantenendo il vantaggio del PEF. Complessivamente, il risparmio varia dal 53% nel latte senza WHR (498,7 TEP) al 22% nel succo d'arancia con WHR al 35% (166,3 TEP), con una riduzione significativa dell'energia specifica e del consumo di energia primaria.

<sup>21</sup> Questo paragrafo presenta un'analisi dettagliata delle diagnosi energetiche condotte ai sensi del D.Lgs. 102/2014 per le grandi imprese e le imprese energivore nei settori della produzione di succhi di frutta e della lavorazione del latte. Per il settore dei succhi, il consumo energetico è suddiviso in 55% gas naturale e 45% energia elettrica, mentre nel settore lattiero-caseario si registra un 49% di gas naturale e un 51% di energia elettrica.

<sup>22</sup> In Italia, 14 grandi imprese o aziende energivore producono succhi di frutta e ortaggi, mentre 22 operano nel trattamento igienico del latte. Pertanto, sono tenute a effettuare una diagnosi energetica ai sensi dell'art. 8 del D.Lgs. 102/2014.

<sup>23</sup> Sebbene la tecnologia PEF offra significativi vantaggi energetici, è importante sottolineare che nel settore lattiero-caseario persiste una problematica legata all'uso dei PEF, principalmente dovuta al fatto che gli elettrodi si sporcano facilmente durante il trattamento del latte. Questo fenomeno può ridurre l'efficienza del processo e richiedere frequenti operazioni di pulizia, rappresentando un ostacolo tecnico che va affrontato per garantire una maggiore applicabilità e sostenibilità della tecnologia nel settore.

Tabella 8 - Confronto tra pastorizzazione tradizionale e tecnologia PEF nel trattamento del latte e del succo d'arancia, basato sulle diagnosi energetiche<sup>24</sup>.

Prodotto	TEP medio diagnosi tutto il processo (TEP)	Valore medio kg prodotti	Energia specifica processo tradizionale (kJ/kg)	Energia specifica PEF + pre-heating (kJ/kg)	Contributo della pastorizzazione dalle diagnosi	Risparmio percentuale (%)	TEP risparmiati pastorizzazione (TEP)
Latte (WHR 0%)	2691.45	51627600	346.8	163.2	0.35	53%	498.7
Latte (WHR 35%)	2691.45	51627600	225.42	172.6	0.35	23%	220.7
Succo (WHR 0%)	2599	41340660	334.5	149.8	0,29	55%	416.2
Succo (WHR 35%)	2599	41340660	217.5	169.5	0.29	22%	166.3

## 7.5 Considerazioni finali e ricadute pratiche

Nella presente LA è stata ampliata la raccolta di buone pratiche per i principali processi termici nell'industria alimentare e le loro alternative sostenibili, basata su dati di letteratura e informazioni industriali. La raccolta fornisce dettagli su condizioni operative, configurazioni impiantistiche, costi e strategie di controllo per migliorare l'efficienza. Sono state sviluppate linee guida aziendali sui benefici energetici e non energetici derivanti da tecnologie non termiche e innovative, supportando le aziende nella valutazione di TTI e TNNT, il cui impiego nel settore alimentare è limitato da barriere non tecnologiche. L'integrazione di tabelle e grafici comparativi facilita l'analisi costi-benefici e l'adozione di strategie di efficientamento energetico nei nuovi casi di studio, grazie alla metodologia MVEE sviluppata. L'approccio consente di individuare le condizioni di processo ottimali in termini di sostenibilità, riduzione dell'impronta energetica e ottimizzazione delle prestazioni, contribuendo alla transizione verso soluzioni più efficienti.

<sup>24</sup> L'analisi dei dati evidenzia le differenze tra il consumo energetico tradizionale e quello ottenuto con la tecnologia PEF + pre-heating. Nel trattamento del latte senza recupero di calore (WHR 0%), il consumo energetico tradizionale è di 346,8 kJ/kg, mentre con PEF si riduce a 163,2 kJ/kg, con un risparmio del 53% (183,6 kJ/kg). Con WHR al 35%, il consumo tradizionale scende a 225,42 kJ/kg, mentre con PEF si riduce ulteriormente a 172,6 kJ/kg, con un risparmio del 23% (52,82 kJ/kg). Per il succo d'arancia senza WHR, il consumo energetico tradizionale è di 334,5 kJ/kg, riducendosi a 149,8 kJ/kg con PEF, con un risparmio del 55% (184,7 kJ/kg). Con WHR al 35%, il consumo tradizionale si attesta a 217,5 kJ/kg, mentre con PEF si riduce a 169,5 kJ/kg, con un risparmio del 22% (48 kJ/kg). La pastorizzazione incide per il 35% del consumo energetico complessivo nel trattamento del latte, mentre nel caso del succo d'arancia l'incidenza è del 29%. L'energia specifica risparmiata è maggiore nel latte senza WHR (183,6 kJ/kg), seguito dal succo d'arancia senza WHR (184,7 kJ/kg), dal latte con WHR al 35% (52,82 kJ/kg) e infine dal succo d'arancia con WHR al 35% (48 kJ/kg). Il risparmio in TEP per la pastorizzazione è pari a 498,7 TEP per il latte senza WHR, 220,7 TEP per il latte con WHR al 35%, 416,2 TEP per il succo d'arancia senza WHR e 166,3 TEP per il succo d'arancia con WHR al 35%. I valori di energia specifica utilizzati per la pastorizzazione mediante tecnologia termica tradizionale e i PEF sono riportati:

- Guerrero-Beltrán, J.Á.; Sepulveda, D.R.; Góngora-Nieto, M.M.; Swanson, B.; Barbosa-Cánovas, G. V. Milk Thermization by Pulsed Electric Fields (PEF) and Electrically Induced Heat. *J Food Eng* 2010, 100, 56–60, doi:10.1016/j.jfoodeng.2010.03.027.
- G. Landi, M. Benedetti, M. Sforzini, E. Eslami, and G. Pataro, "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", *Foods* (mdpi), Gennaio 2025, Under review. Manuscript ID: foods-3517270.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA 2.5 il capitolato di progetto non prevede consulenze, né sono state utilizzate nel corso dello svolgimento della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta nella LA 2.5:

1. G. Landi, M. Benedetti, E. Eslami, G. Ferrari, and G. Pataro, "Cost, Energy Efficiency, and Environmental Impact Analysis of Orange Juice Pasteurization: Comparing Pulsed Electric Fields with Traditional Thermal Treatment," in *2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, IEEE, Jun. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope61470.2024.10751382.
2. G. Landi, M. Benedetti, M. Sforzini, E. Eslami, and G. Pataro, "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", *Foods* (mdpi), Gennaio 2025, Under review. Manuscript ID: foods-3517270.

Conference proceedings con peer review risultanti dall'attività svolta nella 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 EEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering" EEEIC2024, 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.

Elenco delle pubblicazioni scientifiche in collaborazione con le attività svolte con il cobeneficiario LA 2.6:

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 EEEIC International Conference on Environment and Electrical Engineering" EEEIC2024, 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.

## 10 Eventi di disseminazione

Lista degli eventi di disseminazione scaturiti dall'attività svolta nella LA 2.5

1. Presentazione orale al 24<sup>th</sup> International Conference on Environment and Electrical Engineering (IEEE-EEEIC), 17- 20 Giugno 2024, Roma Italia. Cost, energy efficiency, and environmental impact analysis of orange juice pasteurization: comparing pulsed electric fields with traditional thermal treatment  
Relatore: G. Landi.  
Co-autori: M. Benedetti, E. Eslami, G. Ferrari, G. Pataro.
2. Presentazione orale al 5<sup>th</sup> World Congress on Electroporation and pulsed electric fields in biology, Medicine, Foods and Environmental Technologies, 15- 19 Settembre 2024, Roma Italia. Comprehensive analysis of heat-assisted pulsed electric fields and conventional thermal treatment for orange juice pasteurization: cost, energy, efficiency, and sustainability assessment.  
Relatore: G. Landi.  
Co-autori: M. Benedetti, M. Sforzini, E. Eslami, and G. Pataro.
3. Notte Europea delle Ricercatrici e dei Ricercatori presso CR ENEA Portici - 27 settembre 2024, "Tecnologie e soluzioni innovative per migliorare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici e nei processi industriali".  
Relatore: G. Landi.
4. Il responsabile del coordinamento generale delle attività (Giovanni Landi), referente anche delle attività con il cobeneficiario, è stato periodicamente coinvolto (su base circa bimensile) in riunioni di confronto con il coordinamento di WP e di progetto.
5. Incontro presso l'Università degli Studi di Salerno avvenuto il 15 Febbraio 2024 con i referenti di WP, di progetto ed il responsabile del coordinamento generale delle attività.

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