



UNIVERSITÀ DI PARMA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA INDUSTRIALE

CICLO XXXV

L'industria alimentare tra sostenibilità e 4.0: ricerche, indagini e Life Cycle Assessment di materiali e macchine per il confezionamento

Coordinatore:

Chiar.mo Prof. Gianni Royer Carfagni

Tutor:

Chiar.mo Prof. Giuseppe Vignali

Dottoranda: Roberta Stefanini

Anni Accademici 2019/2020 – 2021/2022

Abstract

La Tesi descrive sei ricerche che mirano a delineare e favorire le trasformazioni dell'Industria alimentare odierna, tra il bisogno di una maggiore sostenibilità ambientale e l'implementazione di tecnologie intelligenti. Dopo aver descritto il contesto di riferimento tramite un'analisi bibliografica, l'elaborato presenta un'indagine condotta con *INAIL* che dimostra che in Italia vi è ancora molto spazio per l'implementazione dell'Industria 4.0, evidenziandone sfide, opportunità, e proponendo soluzioni per aumentarne la diffusione. Poi, considerando gli aspetti ambientali connessi ai sistemi e materiali di confezionamento, la Tesi include due analisi Life Cycle Assessment: la prima, svolta per *GEA Group*, dimostra quale è la fase più impattante nel ciclo di vita delle macchine per il confezionamento e fornisce spunti per la sua riduzione. La seconda, condotta per *Parmalat S.p.A.*, confronta quattro materiali di confezionamento per prodotti liquidi e dimostra qual è la soluzione migliore per l'ambiente. Successivamente, tramite la somministrazione di un questionario ai consumatori, si evidenzia l'esistenza di un divario tra la loro percezione di packaging eco-sostenibile e i reali dati di impatto ambientale; i sistemi di identificazione evoluti in ottica 4.0 risultano essere una possibile soluzione per colmarlo, tuttavia, l'ultima indagine inserita nella Tesi, condotta con l'ente *GS1 Italy*, dimostra che tali tecnologie sono ancora poco diffuse per scopi educativi ed ambientali nel settore alimentare, in quanto si ripone l'attenzione sugli altri vantaggi: economici, logistici e produttivi.

Keywords: Life Cycle Assessment, Industry 4.0, packaging materials and technologies, environmental sustainability, food industry

Indice della Tesi di Dottorato

Prefazione: sintesi del percorso di Dottorato	6
1 Introduzione alla Tesi	12
2 Analisi di letteratura: i sistemi alimentari oggi e nel prossimo futuro	14
2.1 Il compromesso fra sostenibilità e digitalizzazione	16
2.2 L'impatto ambientale, economico e sociale dell'Industria 4.0	20
3 Il 4.0 nel manifatturiero italiano tra sfide e opportunità	23
3.1 Indagine aziendale: il progetto con INAIL	24
3.2 La diffusione della digitalizzazione in Italia nel 2021	24
3.3 I benefici: l'aumento della qualità e della produttività	26
3.4 I possibili miglioramenti delle performance ambientali	27
3.5 Gli ostacoli per l'implementazione	27
3.6 Considerazioni conclusive	28
4 Come ridurre l'impatto ambientale di un impianto di confezionamento alimentare?	29
4.1 Obiettivo e campo di applicazione: LCA di una sterilizzatrice aseptica	30
4.2 Analisi di inventario	31
4.2.1 Materiali e componenti costituenti la macchina	31
4.2.2 Consumi durante la fase d'uso	34
4.2.3 Analisi del fine vita dei materiali	37
4.3 Valutazione degli impatti ambientali	41
4.3.1 Impatto delle materie prime	41
4.3.2 Impatto della fase d'uso	42
4.3.3 Impatto dello smaltimento finale	44
4.3.4 Le fasi del ciclo di vita a confronto	45
4.4 Discussione dei risultati	46
4.4.1 Analisi di sensitività per l'energia elettrica	46

4.4.2	Confronto con una sterilizzatrice per bottiglie con acido peracetico	47
4.5	Considerazioni finali	48
5	La scelta sostenibile dei materiali di confezionamento	49
5.1	Obiettivo e campo di applicazione: LCA di 4 soluzioni di confezionamento per bevande ...	50
5.2	Analisi di inventario	51
5.3	Risultati di impatto ambientale.....	57
5.4	Discussione sul numero di riutilizzi del vetro a rendere	62
5.5	La risposta finale al dibattito “plastica o vetro?”	64
6	La percezione dei consumatori: il packaging ritenuto sostenibile	65
6.1	Impostazione dello studio: la ricerca di nuove soluzioni di confezionamento	66
6.2	Analisi e discussione dei risultati: il gap tra la percezione e la realtà	67
6.3	Una possibile soluzione: educare tramite la digitalizzazione.....	70
7	Il sistema RFID per la supply chain 4.0	72
7.1	L’identificazione tramite radiofrequenza	73
7.2	Questionario agli stakeholders: indagine per GS1 Italy	74
7.2.1	Il profilo degli intervistati: settore di appartenenza ed ambito operativo.....	75
7.2.2	RFID & largo consumo: ancora molto spazio per l’adozione	77
7.2.3	I drivers per l’adozione: ROI favorevole e superamento dei competitors	78
7.2.4	Casi d’uso: visibilità dei flussi e automazione dei processi	79
7.2.5	I benefici raggiunti: storie di successo.....	79
7.2.6	Le criticità: poche e sormontabili	80
7.2.7	Le paure dei pochi non fruitori disinteressati	80
7.3	Uno sguardo al futuro della tracciabilità alimentare	81
8	Conclusioni	82
9	Bibliografia.....	86
10	Ringraziamenti.....	96

*“Se non io, chi?
Se non ora, quando?”*

*(Emma Watson,
discorso alle Nazioni Unite)*

Prefazione: sintesi del percorso di Dottorato

Il mio percorso di Dottorato in Ingegneria Industriale presso l'Università di Parma, co-finanziato con risorse del Fondo Sociale Europeo (Rif. P.A. 2019-11305/RER) ed intitolato "*Packaging Alimentare Sostenibile: Life-Cycle Assessment di macchine e impianti di confezionamento evoluti in ottica Industria 4.0*", volge ormai al termine e si concretizza con la presente Tesi. In questa prefazione, vorrei ritagliare qualche pagina per sintetizzare le numerose attività, ricerche e studi che ho seguito in prima persona, permettendomi di ampliare le mie conoscenze del settore industriale, specialmente alimentare, in relazione alle tematiche di sostenibilità, così attuali ed indispensabili oggi. Volutamente, nella prefazione non dettaglierò i risultati degli studi, in quanto saranno oggetto dei capitoli successivi. Inoltre, per motivi di riservatezza, qui non ho potuto esplicitare alcuni nomi delle aziende coinvolte in progetti non oggetto di Tesi, ma li ho inseriti nella relazione finale inviata ai Coordinatori del corso.

Durante il primo anno di Dottorato (2019-2020) ho approfondito i concetti di sostenibilità e l'analisi Life Cycle Assessment (LCA) partecipando a fiere, corsi universitari o di formazione, ed ho collaborato alla ricerca di soluzioni di packaging più sostenibili ambientalmente in progetti di cui è stato partner il *Centro Interdipartimentale per il PACKaging (CIPACK)* della mia Università. In particolare, ho effettuato per *Parmalat S.p.A.* un'analisi bibliografica circa lo stato attuale della ricerca sul dibattito "plastica o vetro?" ed ho collaborato ad analizzare tramite LCA i packaging polimerici dell'azienda confrontandoli con contenitori in vetro a rendere e perdere. Ho così dimostrato non solo qual è la soluzione di confezionamento più impattante, ma ho anche ideato un *Marine Litter Indicator* per valutare il contributo dei packaging alimentari ai problemi di inquinamento del mar Mediterraneo.

Intanto, per il progetto "*Piano d'innovazione OltreBio, Filiera etica del Parmigiano Reggiano biologico*" (misura 16.2.1 del Programma di Sviluppo Rurale), ho creato un questionario per indagare la percezione di packaging eco-sostenibile tra i consumatori, evidenziando l'esistenza di un divario tra le loro conoscenze ed i reali dati di impatto ambientale. L'analisi ha inoltre fornito una possibile soluzione per sensibilizzare i consumatori, consentendo loro di fare scelte più consapevoli al punto vendita.

Nel secondo anno di ricerca (2020-2021), ho approfondito tematiche connesse alla Quarta Rivoluzione Industriale. Tramite un'analisi di letteratura sul database Scopus, ho inizialmente dimostrato che i temi della sostenibilità e dell'Industria 4.0 sono diffusi nel settore alimentare, rivelandosi spesso legati: alcune tecnologie posso infatti portare alla riduzione degli sprechi e delle emissioni in acqua, aria e suolo come ho poi appurato, in un'altra ricerca, con l'analisi di un caso studio sugli Automated Guided Vehicles (AGVs) che danno infatti più benefici ambientali rispetto a uno scenario non automatizzato.

Inoltre, in un progetto nato con l’Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL), ho indagato la diffusione delle tecnologie 4.0 nelle aziende manifatturiere italiane, dimostrando non solo i vantaggi ottenuti da chi le ha implementate, ma anche gli ostacoli riscontrati dalle aziende in difficoltà, cercando di identificare i drivers che potranno permetterne una maggiore diffusione futura. Infine, seguendo il titolo del mio percorso “Packaging Alimentare Sostenibile”, ho partecipato ad un progetto consistente in uno scouting tecnologico per un’azienda alimentare intenzionata a provare nuove alternative di confezionamento per i propri salumi. Dopo aver caratterizzato otto packaging di prodotti selezionati dall’azienda, ho valutato diversi materiali alternativi di potenziali fornitori: selezionando soluzioni monomateriali o a minor grammatura, sono stati ottenuti packaging a minor impatto ambientale rispetto ai precedenti multistrato.

Nel terzo ed ultimo anno (2021-2022), in collaborazione con GEA Group, ho analizzato e confrontato tramite LCA il profilo ambientale di due sistemi aseptici per la sterilizzazione e il riempimento di preforme e bottiglie per bevande lisce o gassate. Le conclusioni della ricerca hanno permesso di delineare quale fase del ciclo di vita delle macchine alimentari è la più impattante tra la creazione dei componenti, l’utilizzo delle macchine, la loro pulizia e lo smaltimento finale.

Poi, sono stata coinvolta da RFID Lab dell’Università di Parma e dall’ente GS1 Italy in un programma di ricerca per analizzare lo stato di adozione della tecnologia Radio Frequency Identification (RFID), creando un questionario che ha consentito di delineare lo stato dell’arte dell’implementazione o sperimentazione della tecnologia nel largo consumo, fashion ed healthcare, comprendendone i punti di forza e di debolezza per favorire la diffusione futura tra gli affiliati GS1.

Infine, negli ultimi mesi ho interagito con tre aziende per aiutarle nell’implementare una strategia verso la sostenibilità ambientale, ed ho collaborato in due progetti aziendali riguardanti il confronto di impatti ambientali di packaging tramite analisi LCA. Tali attività saranno da completare entro dicembre 2022: ne vedrò i risultati durante il percorso di post-Dottorato che ho deciso di intraprendere.

La figura A schematizza i titoli dei progetti in cui ho collaborato con aziende ed enti del territorio.



Figura A: Principali progetti di ricerca svolti per aziende del territorio (2019-2020/2020-2021/2021-2022)

Nel corso dei tre anni, sulla base delle ricerche svolte non solo per aziende, ma anche autonomamente, ho pubblicato 9 articoli su riviste scientifiche (Tabella A) ed ho contribuito alla stesura di un capitolo inerente alla tracciabilità degli alimenti nel libro *“Metafisica, filosofia e scienza del cibo* di R. Rizzo, G. Ferretti, F. Pavesi, G. Vignali, con apporti scientifici e contributi specialistici di E. Bottani, R. Montanari, A. Petroni, F. Vitale, G. Borghesi, M. Catalano, R. Stefanini”, pubblicato da Chiriotti Editori.

Tabella A: Pubblicazioni su riviste scientifiche nel corso dei 3 anni

TITOLO	AUTORI	RIVISTA	ANNO	DOI
Industry 4.0 and Intelligent Predictive Maintenance: a survey about the advantages and constraints in the Italian context	Stefanini R. Tancredi G.P. Vignali G. Monica L.	Journal of Quality in Maintenance Engineering	2022	https://doi.org/10.1108/JQME-12-2021-0096
Manufacturing, use phase or final disposal: where to focus the efforts to reduce the environmental impact of a food machine?	Stefanini R. Barbara B. Vignali G.	Production & Manufacturing Research	2022	https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2110170
Non-conventional Stabilization for Fruit and Vegetable Juices: Overview, Technological Constraints, and Energy Cost Comparison	Vignali G. Gozzi M. Pelacci M. Stefanini R.	Food Bioprocess Technology	2022	https://doi.org/10.1007/s11947-022-02772-w
Environmental and economic sustainability assessment of an industry 4.0 application: the AGV implementation in a food industry	Stefanini R. Vignali G.	International Journal Advanced Manufacturing Technology	2022	https://doi.org/10.1007/s00170-022-08950-6
Life cycle assessment of packaged organic dairy product: A comparison of different methods for the environmental assessment of alternative scenarios	Borghesi G. Stefanini R. Vignali G.	Journal of Food Engineering	2022	https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110902
Benefits and effectiveness of High Pressure Processing on cheese: a ricotta case study	Stefanini R. Ronzano A. Borghesi G. Vignali G.	International Journal of Food Engineering	2021	https://doi.org/10.1515/ijfe-2021-0023
Are consumers aware of products' environmental impacts? Different results between life cycle assessment data and consumers' opinions: the case study of organic Parmigiano Reggiano and its packaging	Borghesi G. Stefanini R. Vignali G.	International Journal of Food Engineering	2021	https://doi.org/10.1515/ijfe-2021-0025
Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles	Stefanini R. Borghesi G. Ronzano A. Vignali G.	International Journal of Life Cycle Assessment	2021	https://doi.org/10.1007/s11367-020-01804-x
Shelf life analysis of a ricotta packaged using Modified Atmosphere Packaging or High Pressure Processing	Stefanini R. Vignali G.	International Journal of Food Engineering	2020	https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0108

Ho inoltre contribuito alla stesura di 11 ricerche scientifiche (Figura B) che ho presentato a convegni internazionali, tra cui *l'International Food Operations & Processing Simulation Workshop* (2020, 2021, 2022), la *Summer School Francesco Turco* (2020, 2021, 2022) ed il *Sardinia Symposium* (2020). Alcuni di questi si sono tenuti in presenza, ed altri online, causa pandemia. Inoltre, ho partecipato come proponente della sessione *“Industry 4.0 and sustainability: applications and research about environmental, social and economic benefits from the fourth Industrial revolution”* insieme ai professori Eleonora Bottani e Giuseppe Vignali, nella conferenza *10th IFAC Conference on manufacturing, modelling, management and control*, tenuta a Nantes dai docenti citati.



Figura B: Ricerche presentate a conferenze internazionali

Ho anche avuto occasione di partecipare come relatrice a seminari rivolti alle imprese e ai loro stakeholders. Tra questi, cito l'intervento *"Sostenibilità ed economia circolare. Da scelta etica a volano di sviluppo per le PMI"* svoltosi il 5/10/2021 presso il Campus in collaborazione tra il Tecnopolo di Parma e *GIA gruppo imprese*; il webinar del ciclo Green Talks *"Il vantaggio della sostenibilità e l'analisi del ciclo di vita"* organizzato da *SMA Srl & LabAnalysis Group* il 25/11/2021; ed infine l'intervento presso FICO Eataly World (Bologna) il 21/02/2020 al convegno *"Filiera etica del Parmigiano Reggiano biologico, nuovo standard per il benessere animale e la sostenibilità ambientale"*.

Nel corso soprattutto dei primi due anni, ho dedicato diverse ore alla formazione, sia specifica su tematiche di Life Cycle Assessment e sostenibilità, sia generale seguendo dei corsi propedeutici offerti dall'Università di Parma per la scrittura di articoli scientifici, il potenziamento della lingua inglese, ed altri utili per arricchire le basi per le mie ricerche (Figura C).

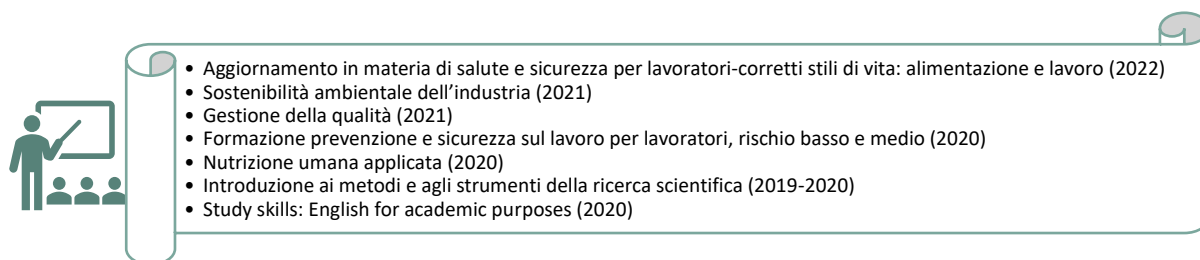


Figura C: Corsi seguiti presso l'Università di Parma

Oltre a questi, ho deciso di iscrivermi presso l'Università di Parma al Percorso Formativo PF24, seguendo gli esami di *Psicologia sociale, Psicologia dei processi di sviluppo, Metodologie e tecnologie didattiche, Elementi di pedagogia, pedagogia speciale e didattica dell'inclusione*, ed ottenendo la certificazione di superamento (19/04/2022). Nonostante questi esami non fossero indispensabili ai fini della ricerca, mi sono stati utili per comprendere le eventuali difficoltà degli studenti, per imparare a relazionarmi ulteriormente con la classe e migliorare le attività didattiche previste dal Dottorato.

Inoltre, ho seguito anche alcuni corsi, webinar, scuole e seminari tenutisi online in periodo pandemico (Figura D), i cui attestati sono stati consegnati ai Coordinatori del Dottorato.

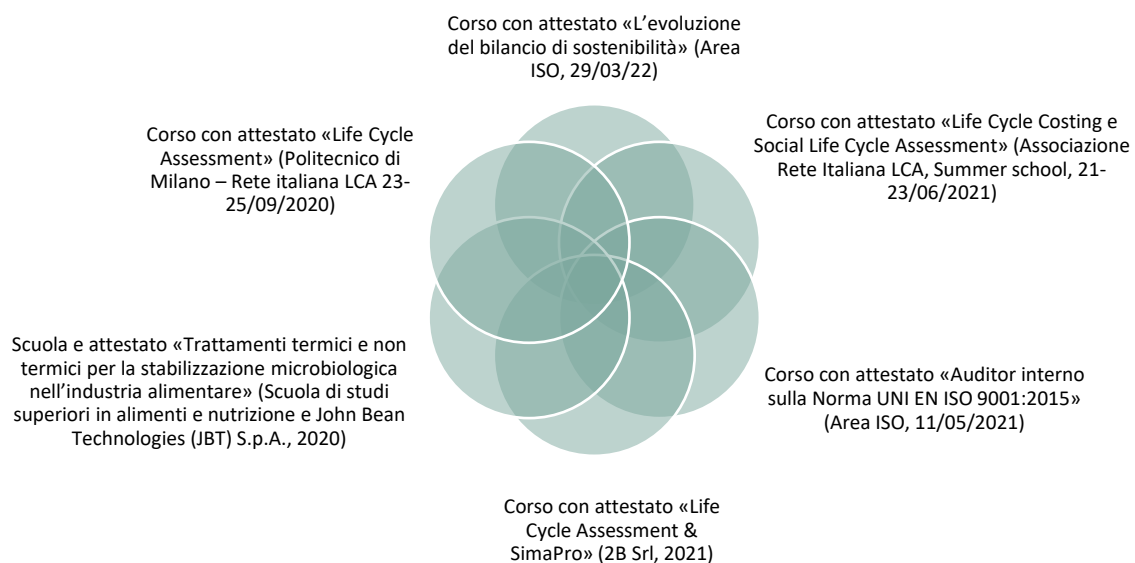


Figura D: Corsi esterni seguiti

Per i tre anni accademici del percorso ho avuto la possibilità di essere Tutor degli studenti dei corsi di Laurea in *Ingegneria Meccanica* e in *Engineering for the Food Industry*, seguendoli da vicino nelle attività di orientamento e supportandoli durante gli esami. Sono stata correlatrice di circa 15 studenti, fornendo loro sostegno e aiuto durante lo svolgimento del tirocinio interno all'Università e durante la stesura della Tesi di Laurea. Tali attività, mi hanno consentito di approfondire ulteriormente le tematiche di ricerca, ampliando anche i confini verso temi nuovi.

Infine, tutte le informazioni imparate tramite la ricerca, la formazione e l'esperienza mi hanno permesso di tenere alcuni corsi come docente. Con l'approvazione del collegio di Dottorato ho svolto alcune lezioni per corsi erogati da enti di formazione e, nel prepararle, ho acquisito più competenze e dati per i miei studi. Presso l'Università di Parma, nei corsi di Laurea in *Ingegneria Gestionale* ed *Engineering for the Food Industry*, ho tenuto diverse ore di docenza su indicazione del mio tutor, su

tematiche inerenti al mio percorso di Dottorato (Figura E), parte dei corsi di *Food Packaging Technology*, *Gestione della Qualità e Sicurezza*, *Sostenibilità ambientale dell'Industria*.

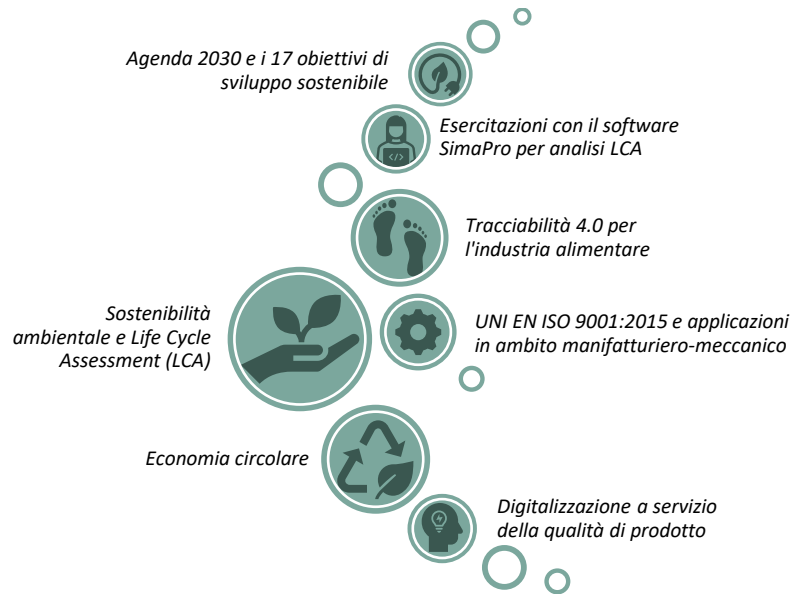


Figura E: Macro-argomenti delle docenze effettuate nel corso dei tre anni

Conclusa quindi la presentazione delle principali attività svolte nel corso del Dottorato, lascio ora spazio alla Tesi, introdotta dal prossimo capitolo.

1 Introduzione alla Tesi

La presente Tesi di Dottorato in Ingegneria Industriale comprende le ricerche, condotte nell'arco dei tre anni del percorso, legate da un unico filo conduttore: l'analisi dell'industria alimentare tra sostenibilità e 4.0. Infatti, se da un lato oggi le linee guida internazionali invitano le aziende a calcolare e ridurre gli impatti ambientali di processi, prodotti e packaging lungo il ciclo di vita, dall'altro, l'avvento di nuove tecnologie parte della cosiddetta Quarta Rivoluzione Industriale sta trasformando i modi di produrre, creando sia sfide che opportunità. Le prossime pagine presenteranno sei casi specifici, tra cui studi ed indagini sull'Industria 4.0 e due Life Cycle Assessment di materiali e macchine per il confezionamento con l'obiettivo, prima, di comprendere e, poi, di favorire l'evoluzione dei sistemi alimentari tramite studi scientifici.

Inizialmente, per presentare il panorama di ricerca, l'elaborato illustra nel Capitolo 2 un'analisi bibliografica sulle principali ricerche disponibili in letteratura scientifica e dimostra non solo che le due tematiche sono sempre più studiate, ma anche che esiste una correlazione tra di esse: le nuove tecnologie, talvolta, possono apportare benefici ambientali ai macchinari a cui sono applicate.

Passando poi dalla teoria alla pratica, la Tesi prosegue presentando le ricerche condotte in collaborazione con aziende ed enti del territorio italiano: a ciascuna di esse è dedicato un capitolo, preceduto da alcune righe introduttive per contestualizzare i progetti svolti.

Per comprendere la diffusione delle tecnologie 4.0 in Italia, il Capitolo 3 illustra un progetto realizzato con l'Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL): i risultati consentono di delineare, oltre al profilo delle aziende implementatrici, anche i benefici potenzialmente raggiungibili grazie all'introduzione del 4.0, nonché gli ostacoli riscontrati ed il loro possibile superamento.

Poi, iniziando ad approfondire casi studio sulla sostenibilità ambientale dei sistemi di confezionamento, il Capitolo 4 analizza tramite Life Cycle Assessment un macchinario alimentare automatizzato di *GEA Group*, mostrando quali fasi del ciclo di vita delle macchine alimentari impattano di più sul Pianeta, proponendo soluzioni per ridurre i consumi.

Oltre agli impianti per il packaging, la Tesi studia anche l'impatto dei materiali stessi: il Capitolo 5 confronta quattro soluzioni utilizzate da *Parmalat S.p.A.* per il latte pastorizzato, illustrando in modo scientifico come fare a identificare il materiale di confezionamento più sostenibile per l'ambiente.

Sulla base di tali risultati scientifici, il capitolo 6 indaga le conoscenze dei consumatori: sono in grado di riconoscere un packaging eco-sostenibile o esiste un divario tra le loro percezioni ed i dati reali di impatto? In caso affermativo, quali strumenti potrebbero aiutare a colmarlo?

Il capitolo 7 approfondisce una tecnologia 4.0, il sistema Radio Frequency Identification (RFID), studiandone l'applicazione nel largo consumo e presentando le opportunità che sta offrendo al settore alimentare. Infine, l'ultimo capitolo che chiude la Tesi ha l'obiettivo di trarre le conclusioni delle ricerche presentate, consentendo di rispondere alle domande illustrate (Figura F).

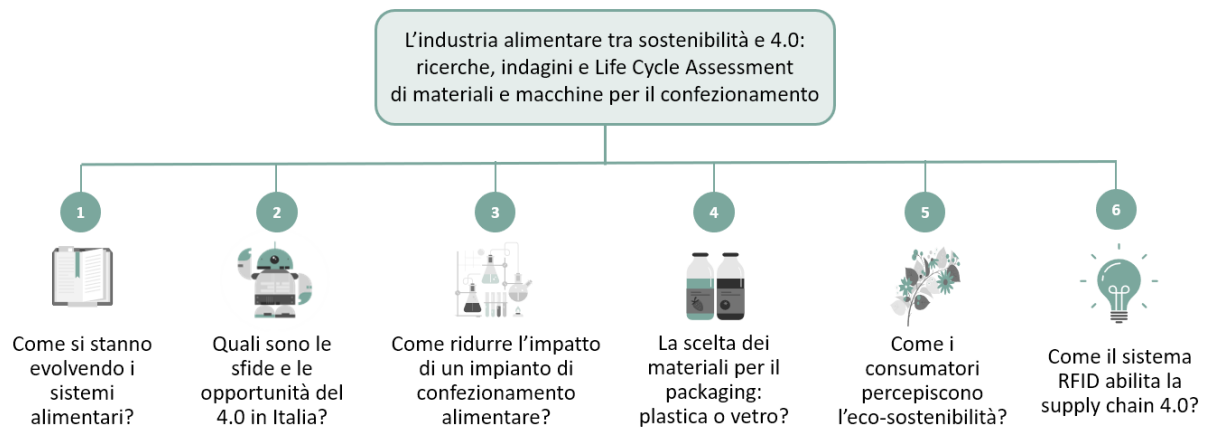


Figura F: I quesiti a cui la Tesi ambisce a rispondere

2 Analisi di letteratura: i sistemi alimentari oggi e nel prossimo futuro

L'importanza dell'industria agroalimentare oggi è indiscussa: in Italia è il secondo settore manifatturiero e copre il 13% della produzione industriale nazionale, con 132 miliardi di euro di fatturato (Ministero dello Sviluppo Economico, 2021). Il settore Food & Beverage è però in continua evoluzione e dovrà essere in grado di adattarsi non solo alle preferenze dei consumatori, che oggi danno importanza ad alimenti biologici, nutrienti e poco trasformati (ANSA, 2018) (Eurostat, 2019), ma anche ai grandi cambiamenti in atto che sono la sfida attuale e del prossimo futuro, ovvero:

- a) il bisogno di una maggiore sostenibilità dei prodotti e dei processi
- b) l'avvento della Quarta Rivoluzione Industriale con l'introduzione di nuove tecnologie

In riferimento al primo punto, *sostenibilità*, dal latino “*sustinere*”, significa “*prendersi cura, sostenere, difendere, conservare o favorire*” ed è da intendersi non come uno stato o una visione immutabile, ma piuttosto come un processo continuo. Infatti, lo sviluppo sostenibile è stato definito nel 1987 nel *Rapporto Bruntland* come una «*condizione in grado di assicurare il soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di realizzare i propri*», ed oggi il concetto consiste nell'equilibrio virtuoso di tre dimensioni inscindibili:

- **Sostenibilità sociale:** la capacità di garantire una condizione di benessere umano (inteso come sicurezza, salute, istruzione, giustizia, democrazia, ecc.) equamente distribuita in un sistema.
- **Sostenibilità economica:** produzione e mantenimento, all'interno del territorio, di condizioni favorevoli per la crescita economica attraverso un corretto ed efficace sfruttamento delle risorse.
- **Sostenibilità ambientale:** legata a un utilizzo consapevole delle risorse naturali, preservando le funzioni dell'ambiente quale fornitore di risorse e recettore di rifiuti.

Negli ultimi 50 anni sono state molteplici le conferenze, gli incontri e gli accordi presi per un cammino verso uno sviluppo sostenibile (Ministero della Transizione Ecologica, 2017): questi hanno condotto al 25 settembre 2015, data in cui è stata approvata dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite l'*Agenda 2030*, sottoscritta dai governi di 193 Paesi membri dell'ONU ed entrata in vigore nel gennaio 2016. Con l'Agenda 2030 è stato espresso un chiaro giudizio sull'insostenibilità dell'attuale modello di sviluppo mondiale ed è stata stilata una lista di 17 obiettivi detti *Sustainable Development Goals* (SDGs) e 169 sotto-obiettivi, riguardanti tutte le dimensioni della vita umana e del pianeta, che dovranno essere raggiunti da tutti i paesi entro il 2030 (United Nations, 2015). Le persone e le imprese sono chiamate a dare un valido contributo al loro raggiungimento. Considerando questo contesto, il settore alimentare è proprio uno dei maggiori responsabili di impatto, soprattutto ambientale (Jagtap, Garcia-

Garcia, & Rahimifard, 2021), a causa delle elevate emissioni di gas serra dovute agli allevamenti (Baldini, Bava, Zucali, & Guarino, 2018), al grande uso del suolo con conseguente deforestazione ed inquinamento (Takacs & Borrion, 2020), nonché all'enorme spreco del cibo stesso: l'organizzazione per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO) stima che un terzo di tutto il cibo prodotto a livello globale venga buttato, soprattutto nei paesi in via di sviluppo (Food and Agriculture Organization, 2021). Per prevenire il deperimento e lo spreco di alcuni alimenti, il confezionamento è oggi diventato essenziale. Grazie alle caratteristiche di resistenza, versatilità, igiene, durata e flessibilità, la maggior parte degli imballaggi alimentari è oggi realizzata in plastica (Plastic Europe, 2021). Tuttavia, il suo scorretto smaltimento nell'ambiente sta inquinando i suoli ed i mari con danni irreparabili alla fauna e alla flora (National Geographic, 2019) (Our world in data, 2018), sottolineando l'insostenibilità ambientale dei modelli di produzione e smaltimento attuali anche nel settore del confezionamento. In questo breve scenario di impatti connessi all'industria alimentare è dunque evidente quanto oggi, e nel futuro, sia necessario l'impegno delle aziende nell'adozione di materiali, processi e tecnologie più sostenibili.

Nel frattempo, come anticipato all'inizio del presente capitolo, le industrie stanno affrontando anche un'altra evoluzione epocale, denominata *Quarta Rivoluzione Industriale*. Dopo la macchina a vapore della prima Rivoluzione Industriale, la catena di montaggio e la produzione in serie della seconda, l'avvento di Internet e delle telecomunicazioni della terza, con l'Industria 4.0 sta aumentando l'utilizzo di sistemi digitalizzati che permettono di automatizzare i processi e richiedono nuove competenze professionali (Dantas, et al., 2020). Nel settore alimentare l'utilizzo di realtà aumentata (Bottani, et al., 2021), Internet of Things (IoT) (Kodan, Parmar, & Pathania, 2020), tecnologie di Identificazione a Radiofrequenza (RFID) (Bottani, Manfredi, Vignali, & Volpi, 2014), stampanti 3D e robot collaborativi (Jambrak, Nutrizio, Djekić, Pleslić, & Chemat, 2021) sono solo alcuni esempi di evoluzioni che sono state recentemente implementate per produrre in modo più automatizzato ed interconnesso. Di conseguenza, nell'immediato futuro, le aziende alimentari che vorranno rimanere competitive sul mercato dovranno reinventarsi, implementando nuovi metodi e strumenti per rendere i propri impianti più efficienti e produttivi.

Sulla base di queste premesse, come introduzione alla presente ricerca di Dottorato, sono state condotte due analisi bibliografiche per delineare come l'industria alimentare sta affrontando oggi, ed affronterà nell'imminente futuro, non solo la necessità di uno sviluppo più sostenibile, ma anche l'introduzione di soluzioni 4.0. Inoltre, collegando le due tematiche, è stato indagato se l'Industria 4.0 applicata al settore alimentare possa contribuire al raggiungimento di una maggiore sostenibilità ambientale, sociale ed economica. Tali ricerche sono state concretizzate in due articoli (Stefanini & Vignali, 2021) (Stefanini & Vignali, 2022) presentati rispettivamente alla *Summer School Francesco*

Turco e all'IFAC Conference: i capitoli successivi ne sono una rielaborazione e presentano la metodologia di ricerca e gli interessanti risultati raggiunti.

2.1 Il compromesso fra sostenibilità e digitalizzazione

All'inizio del secondo anno di Dottorato, al fine di comprendere lo stato dell'arte nell'industria alimentare verso i cambiamenti più recenti conseguenti l'industria 4.0 e la necessità di una maggiore sostenibilità ambientale, è stata svolta un'analisi sistematica della letteratura delle pubblicazioni nel 2020 e 2021. Attraverso il database Scopus è stata effettuata una ricerca in "title, abstract, keywords" utilizzando parole chiave che descrivessero al meglio le due tematiche nell'industria alimentare: *food engineering, food systems, food manufacturing e food industry* sono state dunque combinate con *Industry 4.0* ed *environmental sustainability*. Successivamente, dal campione ottenuto sono stati esclusi i duplicati e i lavori non rientranti nelle categorie "papers" o "review". Inoltre, gli articoli sono stati esaminati singolarmente controllando il titolo, abstract e contenuti principali: sono stati esclusi dall'analisi quelli non aventi come target i sistemi dell'industria alimentare, ma riferiti piuttosto all'ambito medico, agricolo, nutrizionale, edile. Il numero di articoli è stato così ridotto a 81. Le parole chiave e la metodologia utilizzata sono schematizzate in Figura 1: Struttura dell'analisi di letteratura; riadattato da Figura 1.

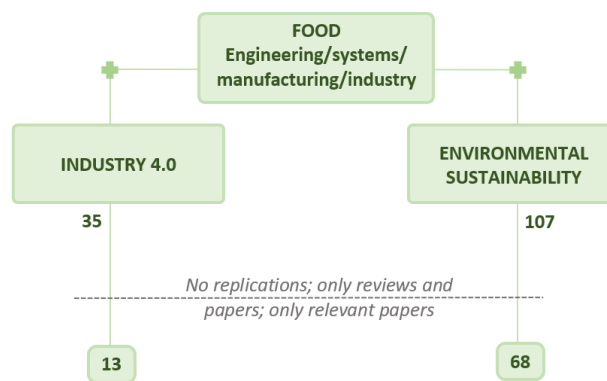


Figura 1: Struttura dell'analisi di letteratura; riadattato da (Stefanini & Vignali, 2021)

Analizzando i risultati, si è evinto che il tema della sostenibilità è più studiato nel settore alimentare (68 articoli), rispetto alle tematiche dell'Industria 4.0 (13 articoli). Partendo da quest'ultimo, comunque, la letteratura scientifica prova che il settore si sta evolvendo in fabbriche intelligenti (Kodan, Parmar, & Pathania, 2020) che utilizzano tecnologie avanzate in grado di creare processi altamente flessibili, personalizzati e interconnessi (Clairand, Briceno-Leon, Escriva-Escriva, & Pantaleo, 2020). In particolare, il concetto di Internet of Things (IoT) sta guadagnando popolarità, anche in combinazione con altre tecnologie (Cotrim, Minim, Felix, & Minim, 2020) (Bhatia & Ahanger, 2021).. Ad esempio, in un'azienda alimentare di prodotti secchi come biscotti e cracker, l'implementazione di

IoT, big data analytics, machine learning e sistemi cyber-fisici ha migliorato la consistenza del prodotto, nonché la produttività e l'efficienza del processo, con un risparmio nel consumo di energia (Konur, et al., 2021). Anche l'applicazione dei robot industriali ha molti vantaggi come il risparmio economico, il miglioramento della produttività e la sostituzione di operatori in condizioni non sicure (Bader & Rahimifard, 2020). Inoltre, lo smart warehousing nell'industria alimentare, caratterizzato dall'uso di Automated Guided Vehicles (AGV), Radio Frequency Identification (RFID) e IoT, ha aumentato la qualità complessiva, la produttività e l'efficienza dei processi, riducendo al minimo i costi e i guasti (van Geest, Tekinerdogan, & Catal, 2021). Implementazioni di tecnologie 4.0 in caseifici (Matsumoto, Chen, Nakatsuka, & Wang, 2020) e nei sistemi di refrigerazione (Cirera, Carino, Zurita, & Ortega, 2020) ha permesso, rispettivamente, un risparmio del 30-50% dei costi e una riduzione dei consumi elettrici, dei guasti e dei tempi di fermo impianto. Inoltre, sta assumendo sempre più importanza la tracciabilità degli alimenti, che ne permette l'identificazione e localizzazione lungo la filiera, prevenendo le perdite e garantendo la qualità dei prodotti ai consumatori. Le tecnologie di acquisizione dei dati includono ad esempio gli RFID, Near Field Communication (NFC) e Quick Response (QR) (Cruz Introini, Boza, & Alemany Díaz, 2020), che rendono la filiera trasparente e aiutano i rivenditori a monitorare informazioni come i tempi di consegna, le dimensioni del lotto, le condizioni di conservazione e di trasporto (Kayikci, Subramanian, Dora, & Bhatia, 2020).

Per riassumere gli articoli trovati sull'Industria Alimentare 4.0, la Tabella 1 presenta le principali tecnologie testate in ciascuno di essi, specificando il prodotto o processo alimentare in cui sono stati applicati ed il Paese in cui sono state svolte le ricerche.

Tabella 1: Articoli relativi all'industria 4.0 nel settore alimentare (2020 - 2021), riadattato da (Stefanini & Vignali, 2021)

RIFERIMENTO	NAZIONE	OGGETTO DI STUDIO	TECNOLOGIE
(Konur, et al., 2021)	Regno Unito	Biscotti, crackers	IoT, big data, cyber security, artificial intelligence
(Bader & Rahimifard, 2020)	Regno Unito	Qualsiasi alimento	Industrial robots
(Matsumoto, Chen, Nakatsuka, & Wang, 2020)	Giappone	Prodotti caseari	Horizontal systems
(Bhatia & Ahanger, 2021)	India	Ristoranti	IoT
(van Geest, Tekinerdogan, & Catal, 2021)	Olanda	Non specificato	Smart warehouses (AGV, RFID, IoT)
(Cirera, Carino, Zurita, & Ortega, 2020)	Spagna	Sistemi di refrigerazione	New data-driven methodology
(Kodan, Parmar, & Pathania, 2020)	Irlanda	Non specificato	IoT
(Cotrim, Minim, Felix, & Minim, 2020)	Brasile	Pane	Computational Vision System (CVS)
(Khan, Byun, & Park, 2020)	Corea	Carne	IoT, Blockchain
(Akyazi, Goti, Oyarbide, Alberdi, & Bayon, 2020)	Spagna	Aziende alimentari	Skills requirement database - Food I4.0
(Kayikci, Subramanian, Dora, & Bhatia, 2020)	Turchia + India	Non specificato	Blockchain (RFID, QR-code)
(Clairand, Briceno-Leon, Escriva-Escriva, & Pantaleo, 2020)	Ecuador/Italia	Efficienza energetica	Industry 4.0 technologies review
(Cruz Introini, Boza, & Alemany Díaz, 2020)	Spagna	Frutta, verdura, carne, pesce	RFID, QR-code, NFC

Sulla base di queste premesse, si è evinto che sono molteplici le tecnologie 4.0 che le aziende alimentari stanno iniziando ad implementare: nel prossimo futuro, sempre più imprese dovranno affrontare tali cambiamenti per rimanere competitive sul mercato e necessiteranno di una forza lavoro

qualificata per vincere la grande sfida della nuova rivoluzione industriale (Akyazi, Goti, Oyarbide, Alberdi, & Bayon, 2020).

Per quanto riguarda il tema della sostenibilità, molti articoli identificati dimostrano che il settore alimentare deve accelerare la transizione verso sistemi più sostenibili risolvendo alcuni “punti caldi”, detti *hotspots* (Fanzo, Bellows, Spiker, Thorne-Lyman, & Bloem, 2021). Tra questi vi sono i processi connessi all’agricoltura e agli allevamenti che risultano estremamente impattanti: sostanziali benefici si possono ottenere riducendo l'acquisto di carne e passando da un’agricoltura tradizionale a una biologica (Takacs & Borrion, 2020), gestendo meglio le attività di pesca (Hänsel, et al., 2020), migliorando i processi lattiero-caseari (Delaby, Finn, Grange, & Horan, 2020). Anche le scelte alimentari dei consumatori possono influenzare l'impatto ambientale: è stato dimostrato come le diete ricche di alimenti trasformati, oli, carne, latticini e prodotti di origine animale sono associate ad elevati impatti ambientali, oltre che all'obesità e malattie croniche (Grosso, Fresán, Bes-rastrollo, Marventano, & Galvano, 2020). Numerosi studi investigano anche le fasi di trasporto, incentivando il passaggio a veicoli a gas naturale o elettrici, migliorando la distribuzione, riducendo i chilometri percorsi, aumentando la tracciabilità e la qualità della filiera (Gallo, Accorsi, Goh, Hsiao, & Manzini, 2021) (Gimenez-Escalante, Garcia-Garcia, & Rahimifard, 2020) (Siddh, Soni, Jain, Sharma, & Yadav, 2020). Grande attenzione è volta alle energie rinnovabili (Fabiani, Vanino, Napoli, & Nino, 2020) e a tecnologie più ecologiche (Verde, et al., 2020), nonché alla pianificazione della produzione per ridurre la sovrapproduzione e lo spreco alimentare (Takacs & Borrion, 2020). Per quanto riguarda il packaging, dalla letteratura risulta necessario aumentare la transizione verso l'adozione di imballaggi riutilizzabili al fine di favorire l’economia circolare (Accorsi, Baruffaldi, & Manzini, 2020).

Inoltre, alcune ricerche hanno inoltre valutato la percezione dei consumatori riguardo la sostenibilità di prodotti e processi industriali. Alcuni documenti hanno dimostrato che non tutti i consumatori sono consapevoli della definizione di “prodotto sostenibile”, né sono disposti a pagare di più per il loro acquisto (De Daverio, Mancuso, Peri, & Bladi, 2021). Tuttavia, coloro che hanno precedentemente ricevuto informazioni su tematiche di benessere animale e sostenibilità ambientale, mostrano una preferenza per i prodotti biologici a prescindere dal loro prezzo (Scozzafava, et al., 2020). Le evidenze della letteratura mostrano la necessità di sensibilizzare maggiormente la popolazione verso tali tematiche, al fine di migliorare la comprensione della natura estesa della sostenibilità, aiutando le persone nella scelta degli alimenti che portano sulle tavole (Blodgett & Feld, 2021).

Ma come si può raggiungere una maggiore sostenibilità ambientale, se ogni attività per produrre un alimento richiede risorse, materie prime ed energia, genera emissioni e rifiuti (Koumparou, 2018)? Poiché eliminare completamente tali impatti è impossibile, l’unica strada percorribile è la loro

riduzione: il primo passo è misurare l'impatto del processo o del prodotto per mettere in evidenza le maggiori criticità e implementare, nella seconda fase, tecnologie o soluzioni alternative che possano diminuirle. Dalla letteratura si evince che lo strumento più utilizzato per quantificare la sostenibilità ambientale, anche dei sistemi alimentari, è il *Life Cycle Assessment* (LCA) (Gunnarsson, Segerkvist, Göransson, Hansson, & Sonesson, 2020). Questo è riconosciuto dalla Commissione Europea come miglior supporto in grado di valutare in modo oggettivo le prestazioni ambientali del ciclo di vita di un prodotto, quali ad esempio il potenziale contributo al cambiamento climatico, alla riduzione dell'ozono stratosferico, all'eutrofizzazione e all'acidificazione, all'esaurimento di risorse rinnovabili (European Commission, 2022). Dal 1990 un forte sviluppo e armonizzazione di linee guida per condurre tali analisi ha portato alla creazione dello standard internazionale: la serie ISO 14040 (Larsen, Tollin, Sattrup, & Birkved, 2022), che ha aumentato l'affidabilità e la solidità metodologica dell'LCA. Oggi uno studio LCA, coerente con gli standard ISO, si articola in 4 fasi (Pré, 2022):

1. definizione dell'obiettivo e unità funzionale dello studio
2. analisi di inventario
3. valutazione di impatto
4. interpretazione finale dei risultati.

Con quest'analisi preliminare di letteratura, l'LCA si conferma una metodologia nota ed affermata, già applicata a molte fasi della filiera alimentare (Takacs & Borrion, 2020). Essa ha permesso, ad esempio, il confronto degli impatti connessi a coltivazioni tradizionali e biologiche (Coppola, Costantini, Fusi, Ruiz-Garcia, & Bacenetti, 2022), la valutazione ambientale della produzione di alimenti nel mondo (Rezaei, Soheilifard, & Keshvari, 2021) (Câmara-Salim, et al., 2020), nonché la comparazione di diverse tecnologie per la cottura (Favi, Germani, Land, Mengarelli, & Rossi, 2018) ed il confezionamento (Wohner, Gabriel, Krenn, & Krauter, 2020) (Salwa, Sapuan, Mastura, & Zuhri, 2020).

È dunque per questi motivi che, durante il mio percorso di Dottorato, come si avrà modo di approfondire nei Capitoli 4, 5 e 6, il Life Cycle Assessment è stato scelto come strumento per la valutazione di impatto ambientale di prodotti e processi di casi studio aziendali.

Concludendo, in questo capitolo si è mostrato come le tematiche di sostenibilità e Industria 4.0 siano oggi rilevanti per il settore alimentare: è lecito allora domandarsi se i due temi potrebbero anche essere collegati tra loro. In altre parole, l'introduzione di tecnologie 4.0 efficienti ed automatizzate potrebbe contribuire a ridurre gli impatti ambientali dei processi stessi (come le emissioni, gli sprechi di energia e materiali), e/o dare vantaggi in termini di sostenibilità economica e sociale?

2.2 L'impatto ambientale, economico e sociale dell'Industria 4.0

Per rispondere a tale interrogativo, come sviluppo del lavoro precedente, all'inizio dell'ultimo anno di Dottorato è stata svolta una seconda analisi di letteratura, poi presentata ad una conferenza di settore (Stefanini & Vignali, 2022): di seguito ne si presenta una rielaborazione.

La metodologia utilizzata consiste in un'analisi di letteratura sul database scientifico Scopus, raccogliendo i lavori pubblicati in inglese (documenti di conferenze, articoli, capitoli di libri, brevi sondaggi), senza limiti temporali o geografici. Per l'identificazione del campione, considerando i tre pilastri della definizione odierna di sostenibilità, sono state individuate tre categorie di parole chiave ricercate in "title, abstract, keywords", ovvero: *Economic Impact, Life Cycle Costing, LCC, Economic Sustainability* (per il pilastro economico); *Social Impact, Social Life Cycle Assessment, S-LCA, Social Sustainability* (per il pilastro sociale); *Environmental Impact, Environmental Sustainability, Life Cycle Assessment, LCA* (per quello ambientale). Tali termini sono stati combinati con le due principali parole chiave dell'analisi: *Food* ed *Industry 4.0*. Ottenuto il campione di articoli, i duplicati ed i lavori non attinenti al settore considerato sono stati eliminati. La procedura è illustrata in Figura 2.

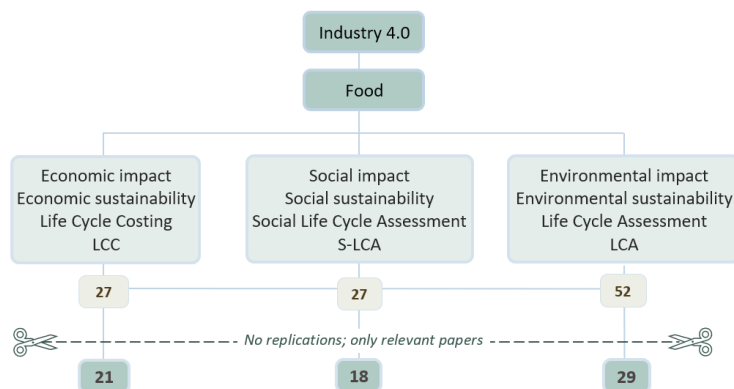


Figura 2: Parole chiave e campione individuato. Riadattato da (Stefanini & Vignali, 2022)

Nonostante le opere che valutano gli aspetti ambientali, economici e sociali legati all'Industria 4.0 nel settore alimentare siano poche, il numero di articoli è comunque aumentato nel corso degli ultimi 10 anni (Figura 3), ed è proprio l'aspetto della sostenibilità ambientale ad essere il più studiato.

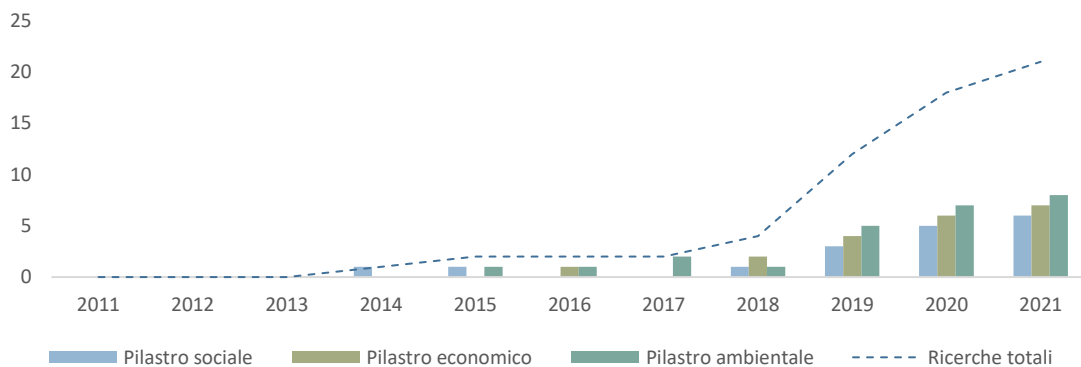


Figura 3: Numero di ricerche sul collegamento tra Industria 4.0 nell'alimentare ed il pilastro sociale, economico ed ambientale della sostenibilità; riadattato da (Stefanini & Vignali, 2022)

Sulla base dell'analisi degli articoli, si può affermare che l'Industria 4.0 applicata al settore alimentare sembra avere la potenzialità di accrescerne la sostenibilità ambientale, economica e sociale. La letteratura dimostra infatti che le tecnologie 4.0 sono in grado di promuovere un'agricoltura sostenibile, utilizzando ad esempio una irrigazione intelligente che controlla con precisione i sistemi di dosaggio (Giannoccaro, Persico, Strazzella, Lay-Ekuakille, & Visconti, 2020), di garantire consumi e produzioni più responsabili, nonché di combattere i cambiamenti climatici (Sahal, Alsamhi, Breslin, & Ali, 2021). Inoltre, l'implementazione del 4.0 ha contribuito a ridurre la povertà e la fame, grazie a maggiori risorse e servizi per le persone (Kunkel & Matthes, 2020) e a rispettare la vita sulla terraferma e sott'acqua (Sadiq, et al., 2021) (Yong, Chew, Khoo, Show, & Chang, 2021). Pertanto, tra i 17 SDGs firmati dalle Nazioni Unite nel 2015, la Food Industry 4.0 può contribuire a raggiungerne otto (Jambrak, Nutrizio, Djekić, Pleslić, & Chemat, 2021) (Oláh, et al., 2020).

Tra le tecnologie 4.0, diverse ricerche nel settore alimentare sono focalizzate sull'uso dell'additive manufacturing, sempre più utilizzato grazie alla sua capacità di stampare ingredienti edibili. Non solo esso presenta vantaggi come la produzione rapida e semplice di geometrie personalizzate, ma ha anche vantaggi ambientali, riducendo la quantità di sfridi, nonché di emissioni in aria grazie a un peso ridotto dei prodotti trasportati (Jambrak, Nutrizio, Djekić, Pleslić, & Chemat, 2021). Inoltre, è stato dimostrato che l'implementazione di strumenti basati sull'IoT per il monitoraggio e la riduzione degli sprechi di cibo, energia e acqua, ha permesso l'ottenimento di una produzione più efficiente (Corallo, Latino, Menegoli, & Pontrandolfo, 2020). A livello geografico, l'Italia ed il Regno Unito sono risultati i paesi in cui i ricercatori hanno pubblicato più studi su tali tematiche (Figura 4).

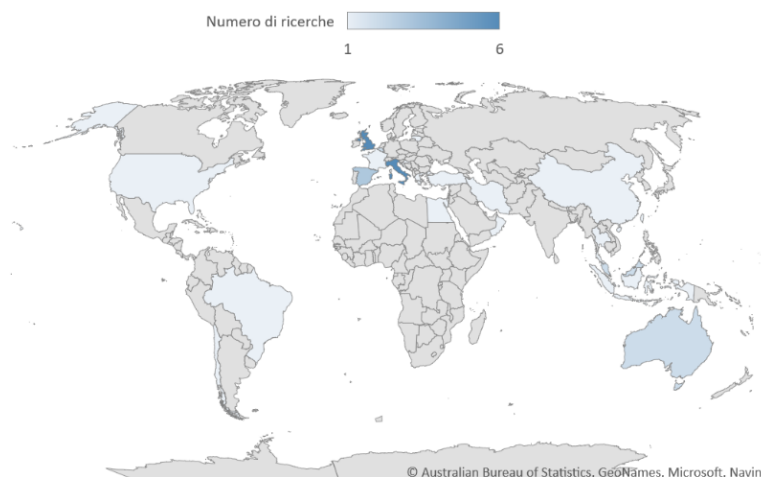


Figura 4: Distribuzione geografica delle ricerche sulla sostenibilità ambientale/economica/sociale della Food Industry 4.0; riadattato da (Stefanini & Vignali, 2022)

Tuttavia, in alcuni contesti, l'applicazione della Food Industry 4.0 rappresenta ancora una sfida a causa dell'elevato investimento iniziale per l'implementazione delle tecnologie e la formazione dei lavoratori: di conseguenza, è spesso limitata a grandi aziende in grado di investire in tali miglioramenti. Inoltre, si

è dimostrato che molte imprese, indipendentemente dalle dimensioni, dal livello di fatturato e dall'attuale livello digitale, non sono ancora pienamente consapevoli dei vantaggi apportati dalle tecnologie 4.0 in termini di sostenibilità (Chiarini, Belvedere, & Grando, 2020), perché ci si concentra maggiormente su altri benefici quali la riduzione degli errori, il risparmio di tempo, l'organizzazione flessibile del lavoro e la riduzione dei costi (Brozzi, Forti, Rauch, & Matt, 2020).

Ma qual è la situazione nelle industrie italiane? Per comprenderlo, concluso il delineamento dello stato dell'arte a livello "macroscopico" e mondiale delle ricerche sull'4.0 e/o della sostenibilità ambientale dell'industria alimentare, i prossimi capitoli passeranno ad una visione più microscopica e tecnica, approfondendo gli specifici casi studio affrontati su tali tematiche.

3 Il 4.0 nel manifatturiero italiano tra sfide e opportunità

Tra il secondo ed il terzo anno di Dottorato, ho avuto l'opportunità di collaborare con l'Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL) per indagare, nel manifatturiero italiano, qual è lo stato attuale dell'implementazione dell'Industria 4.0 e della manutenzione predittiva intelligente. Il lavoro completo è stato concretizzato in una pubblicazione scientifica sulla rivista Journal of Quality in Maintenance Engineering (Stefanini, Tancredi, Vignali, & Monica, 2022).

A partire dai risultati mostrati precedentemente nelle analisi di letteratura che hanno descritto a livello mondiale il panorama del 4.0, questo capitolo focalizza l'attenzione sul territorio italiano, in particolare nel settore manifatturiero scelto da INAIL, con lo scopo di delineare lo stato dell'arte di diffusione delle tecnologie innovative appartenenti alla Quarta Rivoluzione Industriale.

Nei paragrafi successivi si illustreranno brevemente la modalità di creazione del questionario utilizzato ai fini d'indagine e la costruzione del campione di riferimento al quale è stato inviato (paragrafo 3.1). L'analisi delle risposte illustrerà il profilo delle aziende implementatrici, come dimensione e localizzazione geografica (paragrafo 3.2), evidenziando i benefici che esse hanno ottenuto grazie all'adozione delle nuove tecnologie (paragrafo 3.3). Si indagherà inoltre un possibile collegamento tra le tecnologie 4.0 implementate e il raggiungimento di benefici ambientali (paragrafo 3.4). Al contempo, si delinea anche il profilo delle imprese che hanno avuto difficoltà nell'adozione, indagando i principali ostacoli riscontrati (paragrafo 3.5). Questo permetterà di comprendere su quali drivers fare leva per favorire l'implementazione futura in altre aziende e contribuire alla diffusione dell'Industria 4.0 nel panorama italiano.

3.1 Indagine aziendale: il progetto con INAIL

In collaborazione con l'Istituto Nazionale Assicurazione Infortuni sul Lavoro (INAIL), si è deciso di investigare lo stato di adozione delle tecnologie 4.0 e della manutenzione predittiva intelligente nelle aziende manifatturiere italiane. Lo scopo della ricerca era evidenziare non solo i vantaggi che queste hanno apportato alle aziende, ad esempio in termini economici, produttivi e qualitativi, ma anche i principali ostacoli economici, organizzativi, sociali, culturali, che riscontrati nell'implementazione, al fine di trovarne una soluzione.

Lo strumento d'indagine scelto consisteva in un questionario, creato con Google Moduli, composto da 31 domande: in base alla risposta fornita, il quiz rinviava ad altre sezioni di approfondimento, oppure direttamente al termine nel caso in cui il rispondente affermava di non avere abbastanza informazioni per compilarlo (Figura 5). La durata massima di compilazione era prevista pari a 4 minuti.



Figura 5: Struttura del questionario

Il campione di aziende a cui rivolgere il questionario è stato definito utilizzando il database Kompass, una piattaforma business to business globale (Kompass, 2022). Utilizzando i filtri di ricerca sono stati individuati 1000 contatti casuali di aziende italiane manifatturiere, ovvero caratterizzate da un codice ATECO appartenente alla categoria C (Codice ATECO, 2022), a cui è stata inviata una e-mail di presentazione della ricerca e il link del questionario.

Dopo due settimane, questo è stato chiuso, registrando 70 risposte: un numero piccolo rispetto al totale delle aziende contattate, ma probabilmente in parte giustificabile dal periodo di pandemia. Utilizzando Excel, i dati sono stati elaborati e descritti tramite analisi statistiche.

3.2 La diffusione della digitalizzazione in Italia nel 2021

Sulla base dei risultati, si può affermare che vi è ancora spazio per l'implementazione dell'Industria 4.0 nelle aziende: solo la metà degli intervistati afferma di aver introdotto almeno una tecnologia oggi. Nonostante il campione di 1000 aziende manifatturiere raccolto sia stato casuale, nelle risposte si

registra un alto numero di aziende appartenenti al settore alimentare, che sembra ben prestarsi all'implementazione, in quanto analizzando i dati in base al settore di appartenenza, ben il 78% delle aziende alimentari intervistate afferma di fare uso del 4.0 (Figura 6). Per gli altri settori si possono fare poche considerazioni in quanto i campioni raccolti sono piccoli per poter trarre conclusioni certe.

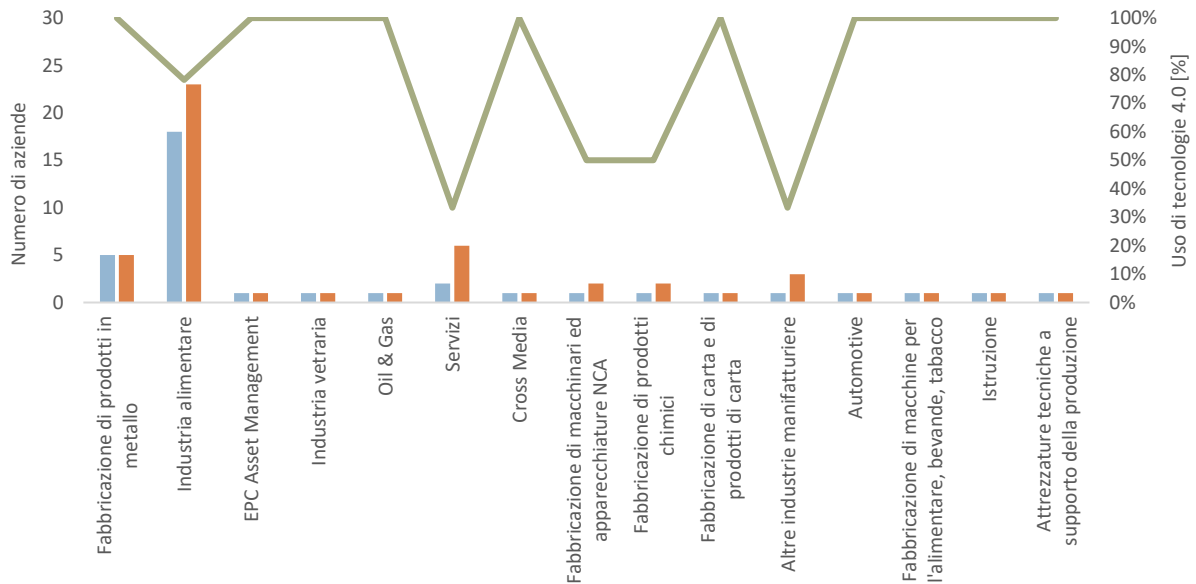


Figura 6: Utilizzo di tecnologie 4.0 nei settori manifatturieri dichiarati [%];
riadattato da (Stefanini, Tancredi, Vignali, & Monica, 2022)

La digitalizzazione sembra essere implementata sia dalle aziende grandi (37%) che piccole (34%), meno dalle medie (21%) e pochissimo dalle micro (8%). Le tecnologie 4.0 più utilizzate oggi, in base ai risultati del campione, risultano essere cyber security, cloud computing, big data collection, a cui si aggiungono, nel settore alimentare, anche i robot collaborativi, l'Internet of Things e il Machine Learning (Figura 7).

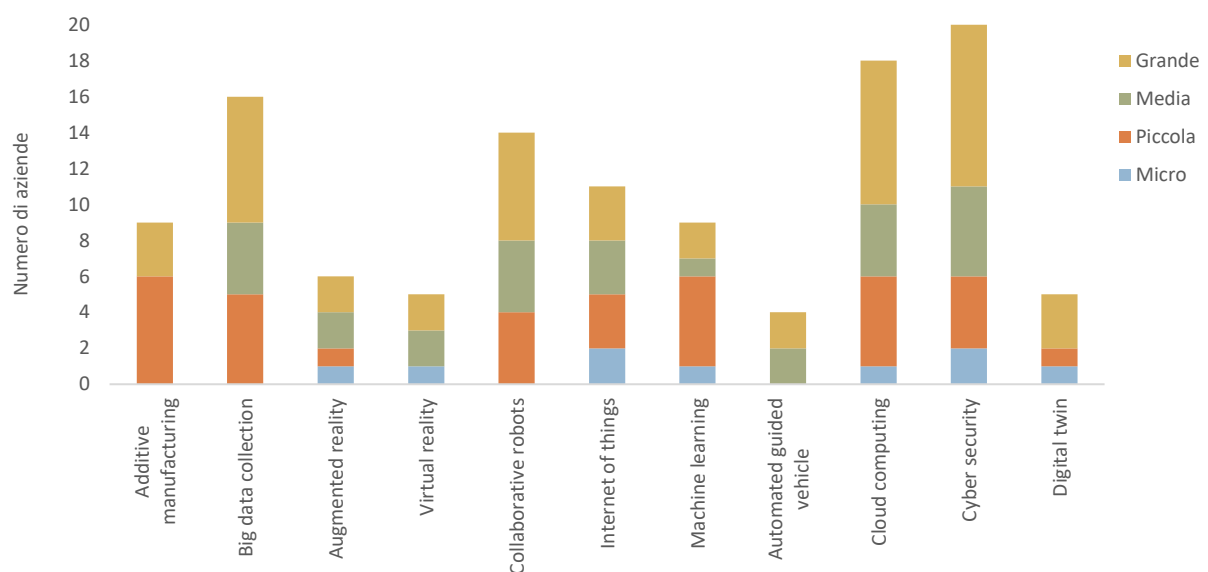


Figura 7: Implementazione delle tecnologie 4.0 in relazione alle dimensioni aziendali;
riadattato da (Stefanini, Tancredi, Vignali, & Monica, 2022)

Un altro aspetto interessante è che il principale strumento utilizzato dalle aziende per l'introduzione delle tecnologie intelligenti sono stati gli incentivi fiscali e finanziari stanziati dal Governo, come super e iper ammortamento e il credito di imposta. Inoltre, anche la spinta data dalla funzione Marketing e Ricerca & Sviluppo ha avuto un ruolo importante, così come la partecipazione a progetti in collaborazione con Università ed Enti di ricerca. Senz'altro, bisognerebbe allora puntare sugli stessi drivers economici e sul trasferimento di conoscenze per poter sostenere anche la grande parte delle aziende che, ad oggi, non hanno ancora implementato il 4.0.

3.3 I benefici: l'aumento della qualità e della produttività

Complessivamente, si può sottolineare l'utilità della Quarta Rivoluzione Industriale: la quasi totalità delle aziende che l'hanno implementata si dichiara soddisfatta (53%) o estremamente soddisfatta (40%). I principali vantaggi riscontrati sono un aumento della qualità dei prodotti e della produttività, ma anche una riduzione dei costi operativi e di produzione (Figura 8). In riferimento alle specifiche tecnologie, i robot collaborativi hanno consentito un aumento della disponibilità delle attrezzature, e l'Internet of Things ha anche rafforzato lo scambio di informazioni tra l'azienda ed i fornitori e/o clienti. Inoltre, il Machine Learning ha aumentato la qualità dei prodotti e servizi offerti, ridotto i costi di manutenzione e produzione ed anche i tempi di pianificazione della manutenzione.

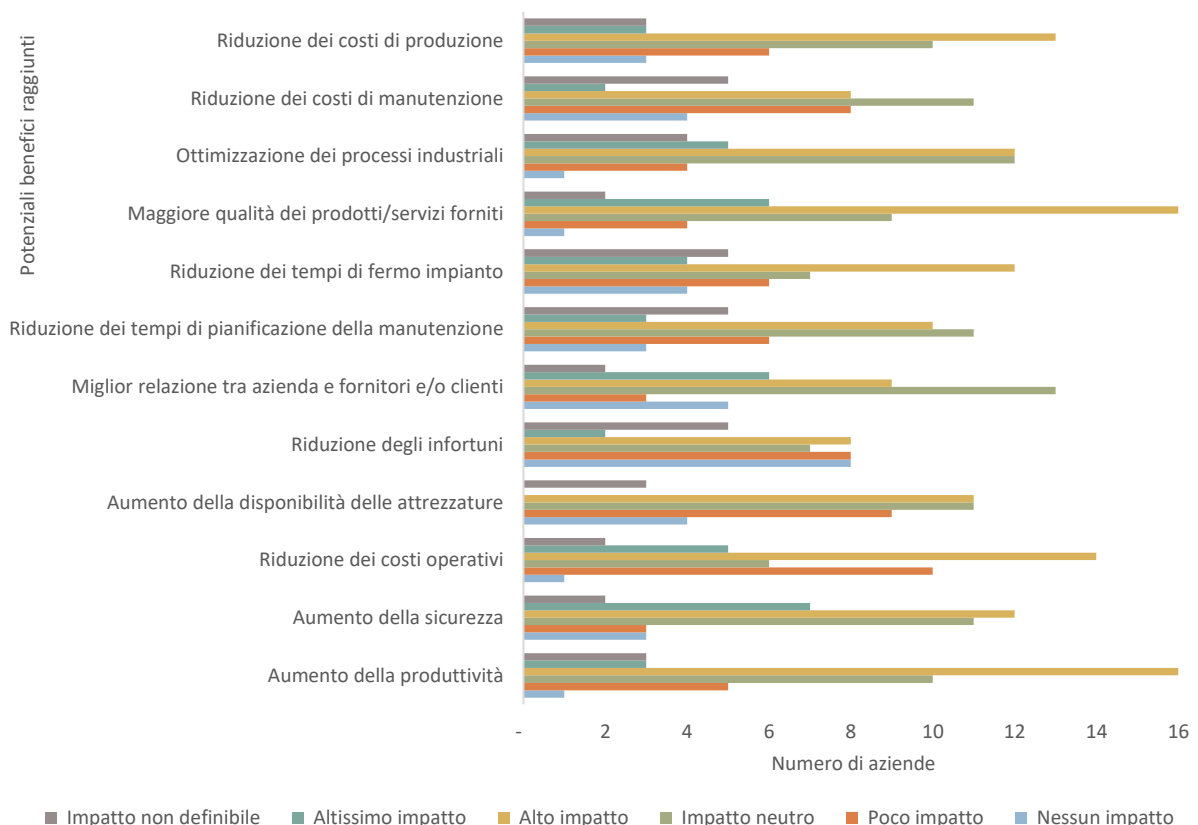


Figura 8: Impatto dell'introduzione di tecnologie 4.0 su potenziali benefici raggiungibili; riadattato da (Stefanini, Tancredi, Vignali, & Monica, 2022)

3.4 I possibili miglioramenti delle performance ambientali

Collegando a tale ricerca le tematiche del Capitolo 2.2, che investigava negli studi di letteratura un collegamento tra Industria 4.0 e l'aumento della sostenibilità ambientale, una parte del questionario ha indagato tale relazione all'interno del campione di intervistati. Le opinioni differiscono: secondo il 45% degli intervistati non è stato ottenuto alcun miglioramento rilevante delle prestazioni ambientali dei processi industriali, mentre il 34% afferma di aver ottenuto una riduzione del consumo energetico, nonché delle emissioni in suolo e/o aria e/o acqua (Figura 9). Le tecnologie 4.0 più responsabili di miglioramenti sono i robot collaborativi, l'Internet of Things e il Machine Learning: queste hanno permesso la riduzione del consumo di energia, degli scarti, del consumo di acqua e materie prime, nonché di emissioni di CO₂. Tuttavia, solo un'azienda afferma di aver condotto un LCA per dimostrare i miglioramenti ottenuti: questo limite va sottolineato, perché non è possibile conoscere se le altre risposte siano solo opinioni e percezioni personali degli intervistati, oppure siano state verificate numericamente con altri metodi. Sicuramente, in futuro questo aspetto andrebbe studiato in modo più approfondito per poter dare una evidenza più chiara della sostenibilità o insostenibilità delle tecnologie dell'Industria 4.0.

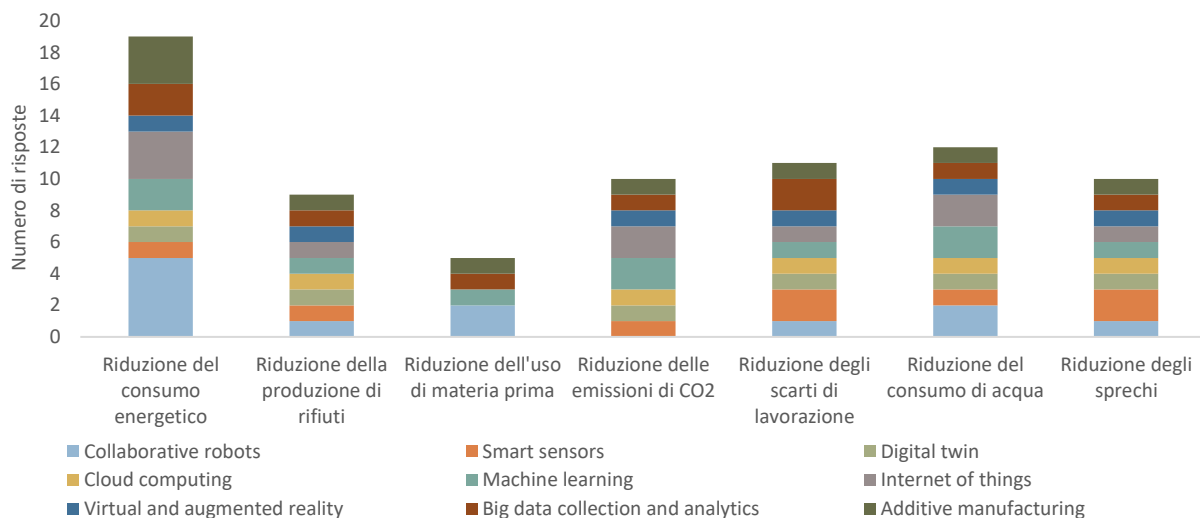


Figura 9: Benefici ambientali ottenuti grazie all'implementazione di tecnologie 4.0; riadattato da (Stefanini, Tancredi, Vignali, & Monica, 2022)

3.5 Gli ostacoli per l'implementazione

Si è cercato di delineare il profilo delle aziende non implementatrici: sulla base del campione individuato, esse fanno parte dell'industria alimentare, sono fornitrici di servizi, sono coinvolte nella manutenzione o installazione di macchinari e attrezzature, o nell'industria metallurgica. Molte di sono piccole o medie imprese. Analizzando la percentuale di implementazione nelle aziende situate nelle diverse aree geografiche (Figura 10), si evince l'adozione è alta per le aziende del Nord (62%), media

per il centro Italia (44%) e molto inferiore per il Sud (33%). Gli ostacoli più spesso riscontrati sono la mancanza di conoscenze sulle tecnologie 4.0, l'assenza di personale esperto nel campo, e l'ingente investimento iniziale necessario per l'implementazione.

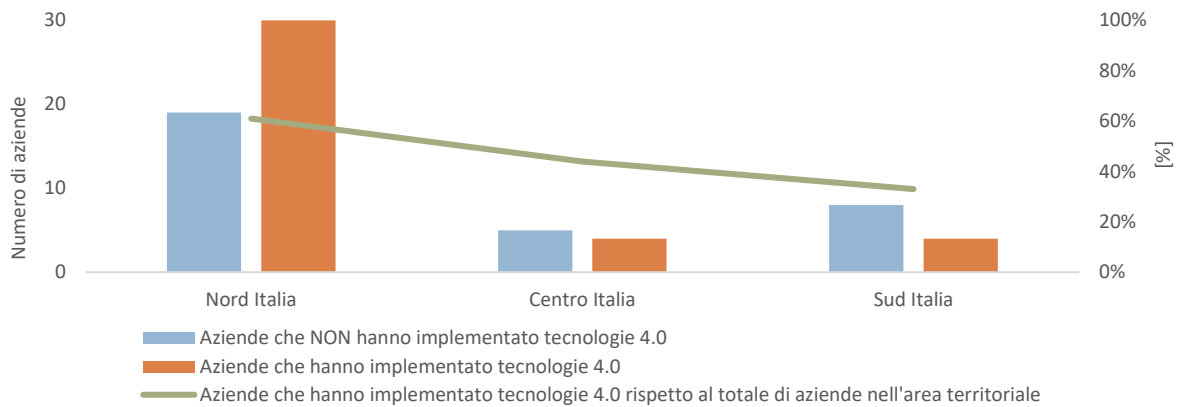


Figura 10: Implementazione o NON implementazione delle tecnologie 4.0 per area geografica; riadattato da (Stefanini, Tancredi, Vignali, & Monica, 2022)

3.6 Considerazioni conclusive

L'avvento della Quarta Rivoluzione Industriale sta consentendo a molte aziende nel mondo di trasformarsi grazie all'utilizzo di tecnologie innovative da utilizzare nella produzione e nelle attività di manutenzione. La ricerca presentata ha analizzato, tramite un questionario, quanto tali innovazioni sono già introdotte nel panorama dell'industria manifatturiera italiana. Nell'attuale stato dell'arte, le tecnologie 4.0 come big data analytics, collaborative robots, cloud computing e cyber security sono implementate da poche aziende nel territorio, soprattutto nel nord Italia e da parte di aziende di grandi dimensioni, ma hanno consentito l'aumento della qualità dei prodotti e della sicurezza in azienda, una riduzione dei costi operativi e di produzione e dei tempi di fermo, nonché una miglior relazione tra l'azienda ed i propri fornitori/clienti. Le moltissime aziende che non hanno implementato il 4.0 a causa dell'investimento iniziale troppo grande, la mancanza di esperienza nel personale e la difficoltà di integrare le nuove tecnologie con l'infrastruttura esistente, potrebbero essere aiutate in futuro da fondi europei, regionali o nazionali, e dall'identificazione di partner esterni come Università o Centri di ricerca per il trasferimento tecnologico. I futuri sviluppi di questa ricerca potrebbero vertere su un'intervista ad un selezionato numero di aziende implementatrici, investigando nel dettaglio i vantaggi ottenuti, per superare i limiti della ricerca attuale in particolare in termini ambientali. Infatti, i pochi che nel campione hanno dichiarato di aver ottenuto miglioramenti ambientali come la riduzione del consumo energetico, dei rifiuti e scarti, nonché delle emissioni di gas climalteranti grazie all'implementazione delle tecnologie 4.0, non hanno ancora verificato il dato scientificamente. Le tecnologie 4.0 sono sostenibili? Il questionario non è riuscito a stabilirlo con certezza: per poter rispondere a questa domanda dovranno essere sviluppate più ricerche e studi Life Cycle Assessment.

4 Come ridurre l'impatto ambientale di un impianto di confezionamento alimentare?

In ottica di aumento della sostenibilità ambientale sempre più aziende oggi investono risorse per riprogettare i propri prodotti in modo che siano riutilizzabili, riciclabili o recuperabili al termine della vita utile: in letteratura è provato che tale ottica, detta di economia circolare, consente di ottenere vantaggi sia da un punto di vista economico che ambientale (Rogkas, et al., 2021). Prendendo però in considerazione un impianto industriale è lecito domandarsi se, anche in questo caso, il fine vita del macchinario è una fase a cui è bene prestare attenzione, oppure se il suo impatto ambientale è trascurabile rispetto agli altri step del ciclo di vita. Ad oggi, non è stato trovato in letteratura alcun articolo scientifico che indaghi tale aspetto, pertanto, per trovare una risposta a tale interrogativo, è stato condotto uno studio Life Cycle Assessment in collaborazione con l'azienda GEA Filling & Packaging. La ricerca completa ha previsto l'analisi e il confronto di due macchine alimentari prese come casi studio: l'ABF e l'ECOSPIN prodotte dalla stessa azienda, che possiedono alcune caratteristiche appartenente al panorama di digitalizzazione ed automatizzazione dei processi illustrato nei capitoli precedenti. Entrambe, seppur differenti in alcuni aspetti, sono sterilizzatrici, riempitrici e tappatrici a settiche per bevande confezionate in bottiglia. La ricerca è stata concretizzata in un articolo scientifico open access pubblicato su rivista (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022) e in un articolo presentato ad una conferenza di settore (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022). Nel presente elaborato di Tesi, si è scelto di approfondire il caso studio dell'ABF, i cui risultati sono comunque molto simili a quelli dell'ECOSPIN. I dati primari, quali i materiali costituenti ed i consumi durante la fase d'uso, sono stati forniti dall'azienda, mentre il fine vita è stato modellato considerando dati Europei del settore Building & Construction. I risultati dimostreranno quali fasi del ciclo di vita, e quali consumi specifici sono responsabili di un impatto ambientale maggiore. Le conclusioni dello studio suggeriranno ai produttori di macchine alimentari dove concentrare i propri sforzi per migliorare le performance ambientali dei propri processi e macchinari.

4.1 Obiettivo e campo di applicazione: LCA di una sterilizzatrice aseptica

Seguendo le fasi di un'analisi Life Cycle Assessment (LCA) suggerite dalla serie ISO 14040, anticipata nell'introduzione dell'elaborato, il primo passo è identificare l'obiettivo ed il campo di applicazione dello studio, nonché l'unità funzionale ed i confini del sistema. Successivamente si proseguirà con l'analisi di inventario (Capitolo 4.2), che consiste nel raccogliere tutti i dati necessari ai fini dell'analisi e nel loro inserimento in un software LCA che permetterà di calcolare, come terza fase (Capitolo 4.3), gli impatti ambientali associati all'unità funzionale, dandone infine un'interpretazione (Capitolo 4.4.). Sulla base di questa procedura, si illustra di seguito la prima fase.

L'obiettivo dello studio era valutare da un punto di vista ambientale le fasi del ciclo di vita di una macchina alimentare automatizzata, l'ABF 2.0, prodotta dall'azienda GEA Filling & Packaging, che consiste in una soffiatrice rotativa aseptica con riempitrice e capsulatrice integrate, utilizzata per bevande piatte/gasate a bassa/alta acidità con/senza fibre e pezzi. L'analisi LCA è stata condotta seguendo le UNI EN ISO 14040 e 14044 di riferimento ed alcuni suggerimenti della Product Category Rule (PCR) "Machines for filling and packaging of liquid food" (EPD International, 2020). L'unità funzionale, ovvero l'unità di riferimento rispetto alla quale tutti i dati di input e output dell'inventario sono riferiti, è definita come 1000 bottiglie riempite. I confini del sistema (Figura 11) includono: le materie prime (estrazione e produzione); la fase d'uso, comprendente i consumi di produzione, del Cleaning In/Out of Place (CIP/COP) e del Sterilizing In/Out of Place (SIP/SOP); il fine vita della macchina.

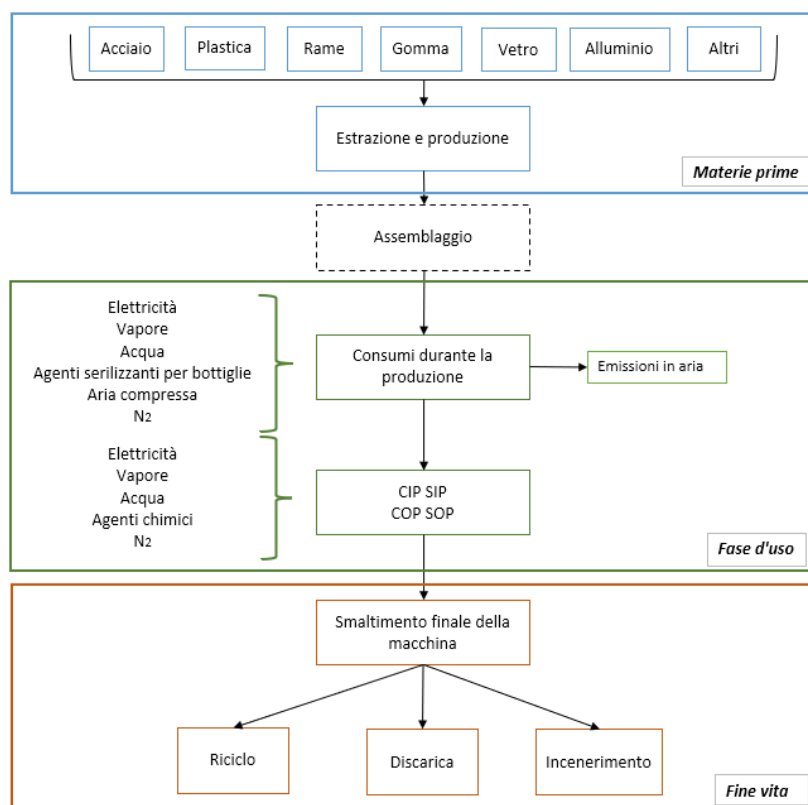


Figura 11: Confini di sistema (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

4.2 Analisi di inventario

L'analisi di inventario ha coinvolto attivamente gli esperti di GEA Filling & Packaging che hanno fornito dati primari per condurre lo studio. Il funzionamento della macchina oggetto di analisi è schematizzato in Figura 12: nei paragrafi successivi se ne presentano i macro-componenti ed i materiali costituenti (paragrafo 4.2.1), nonché il funzionamento ed i consumi coinvolti durante la fase di produzione e pulizia dell'impianto (4.2.2). Infine, per la fase del fine vita si mostreranno i dati secondari, reperiti dalla letteratura, utilizzati per modellarne lo smaltimento (4.2.3).

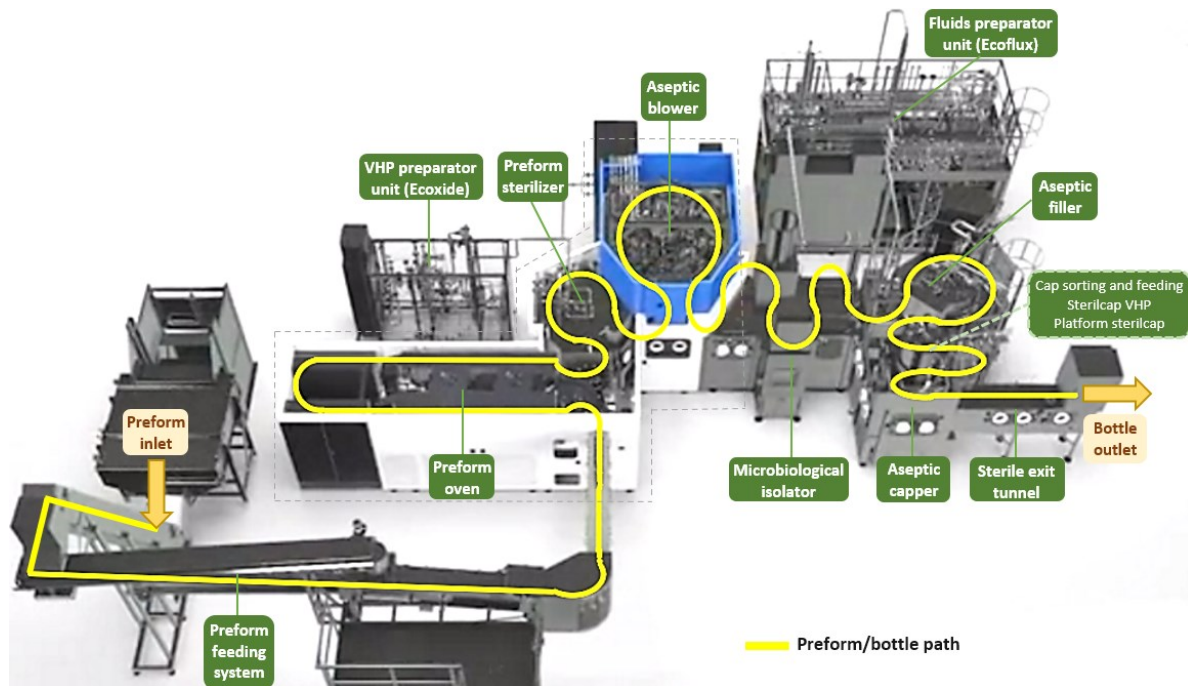


Figura 12: Funzionamento dell'ABF 2.0 oggetto dello studio LCA (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

L'impianto oggetto di studio rientra nella categoria Smart Filling (Gea Smart Filling, 2022), essendo tra i più digitalizzati creati da GEA. La sterilizzazione è completamente automatizzata e consente di avere un processo efficace, ripetibile, che non richiede l'intervento dell'operatore. L'azienda ha creato una piattaforma completamente integrata che aiuta a migliorare l'efficienza e la qualità della produzione, nonché a ridurre i costi a lungo termine: il cliente può accedere costantemente ai dati dell'impianto ed effettuare una manutenzione preventiva riducendo i costi di riparazione. Tramite la raccolta e la continua analisi dei dati, infatti, si è in grado di identificare eventuali punti deboli e prevenire problemi, aumentando l'efficienza operativa. L'impianto è anche predisposto per il controllo da remoto tramite un supporto digitale e interconnesso (Gea remote support filling, 2022).

4.2.1 Materiali e componenti costituenti la macchina

Sono stati individuati 20 macro-componenti di cui sono stati stimati il peso totale, i materiali costituenti classificati in diverse categorie in linea con EPD di simili macchinari di riempimento (Ecolean, 2016), e

la loro composizione percentuale (Tabella 2). Il peso complessivo dell'ABF, pari a 73.858 kg, è risultato composto dal 89,31% da acciaio, 4,25% da alluminio, 2,77% da plastiche ed infine in percentuali tra 1,50% e 0,39% da rame, gomme, vetro e materiali presenti in piccole quantità, classificati come "altri".

DESCRIZIONE COMPONENTE	PESO TOTALE [KG]	MATERIALI PRESENTI	COMPOSIZIONE [%]	PESO MATERIALI TOTALE [KG]
Fillstar fx	11000	acciaio	95%	10450
		plastiche	3,5%	385
		rame	0,75%	82,5
		gomme	0,25%	27,5
		vetro	0,5%	55
Torretta capsula + basamento filler	3000	acciaio	99%	2970
		plastiche	1%	30
Tunnel uscita sterile	1000	acciaio	96%	960
		plastiche	2%	20
		gomme	1%	10
		vetro	1%	10
Cap sorting and feeding	1000	acciaio	79%	790
		plastiche	7%	70
		gomme	4%	40
		alluminio	10%	100
Sterilcap VHP	2200	acciaio	95%	2090
		plastiche	3,5%	77
		rame	0,75%	16,5
		gomme	0,25%	5,5
		vetro	0,5%	11
Pedana sterilcap	2250	acciaio	100%	2250
		acciaio	96,95%	6447
Ecoflux	6650	plastiche	2,21%	147
		rame	0,69%	46
		gomme	0,08%	5
		vetro	0,08%	5
Ecoxide	1000	acciaio	88,05%	880,5
		plastiche	8,70%	87
		rame	3,10%	31
		gomme	0,10%	1
		vetro	0,05%	0,5
Piping	650	acciaio	100%	650
		acciaio	97,5%	1950
Isolatore microbiologico	2000	plastiche	0,5%	10
		rame	1,15%	23
		gomme	0,5%	10
		vetro	0,35%	7
		acciaio	85%	850
Impianto alimentazione preforme	1000	plastiche	6,5%	65
		gomme	0,5%	5
		alluminio	8%	80
		acciaio	76,5%	765
Airstar AS - chiller	1000	plastiche	1%	10
		rame	20%	200
		gomme	0,5%	5
		alluminio	2%	20
		acciaio	81%	4212
Airstar AS - forno preforme	5200	plastiche	5%	260
		rame	2%	104
		gomme	1%	52
		vetro	1%	52
		alluminio	10%	520
Airstar AS - sterilizzatrice	3400	acciaio	95%	3230
		plastiche	3,5%	119
		rame	0,75%	25,5
		gomme	0,25%	8,5
		vetro	0,5%	17
Airstar AS - ruota di soffiaggio	19750	acciaio	83%	16392,5
		plastiche	2,5%	493,75

			rame	1%	197,5
			gomme	1%	197,5
			vetro	0,5%	98,75
			alluminio	12%	2370
Airstar AS - gruppo di uscita	3800		acciaio	95%	3610
			plastiche	3,5%	133
			rame	0,5%	19
			gomme	0,25%	9,5
			vetro	0,75%	28,5
Compressore	6100		acciaio	99%	6039
			plastiche	0,75%	45,75
			gomme	0,25%	15,25
Quadro automazione	1000		acciaio	75%	750
			plastiche	5%	50
			rame	10%	100
			gomme	5%	50
			alluminio	5%	50
Uninterruptible power supply (ups) - 40 batterie	1108		plastiche	7%	77,56
			materia attiva-ossido di Pb	32%	354,56
			elettrolita-H2SO4 al 30%	29%	321,32
			piombo	32%	354,56
Ups - armadio	750		acciaio	90%	675
			plastiche	6%	45
			rame	2%	15
			gomme	2%	15

Tabella 2: Dati di inventario per ABF: materiali e pesi costituenti la macchina

I materiali individuati sono poi stati ricreati nel software SimaPro 9.1.1 con il database Ecoinvent 3.6, come schematizzato nella Tabella 3. Per chiarire la modellazione di plastiche e batterie al piombo, si spiegano di seguito le considerazioni fatte. Le plastiche sono state ricreate considerando un mix di quelle presenti nella macchina, ovvero nylon, poliuretano, polietilene ad alta densità e polivinilcloruro. Invece, le batterie al piombo presenti nell'Uninterruptible Power Supply (UPS) dell'ABF sono state modellate tenendo in considerazione i dati forniti da GEA e studi simili di letteratura (Spanosa, Turney, & Fthenakis, 2015) (Unterreiner, Julch, & Reith, 2016); inoltre, non essendo disponibile l'ossido di piombo su Ecoinvent, la sua percentuale (32%) è stata considerata come piombo e sommata alla percentuale di piombo già presente (32%) (Spanosa, Turney, & Fthenakis, 2015); infine, la plastica è stata considerata come polipropilene sulla base degli studi citati.

MATERIALE	SIMAPRO	[%]	TIPO RIFIUTO
Acciaio	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for	100%	Steel
Gomme	Synthetic rubber {GLO} market for	100%	Rubber
Alluminio	Aluminium, cast alloy {GLO} market for	100%	Aluminium
Vetro	Flat glass, uncoated {RER} market for flat glass, uncoated	100%	Glass
Rame	Copper {GLO} market for	100%	Copper
	Nylon 6 {RER} market for nylon 6	25%	
Plastiche	Polyurethane, flexible foam {RER} market for polyurethane, flexible foam	25%	Plastics
	Polyethylene, high density, granulate {GLO} market for	25%	
	Polyvinylidenechloride, granulate {RER} market for polyvinylidenechloride, granulate	25%	
Batterie al piombo	Lead concentrate {GLO} market for	64%	Others
	Sulfuric acid {GLO} primary lead production from concentrate	29%	
	Polypropylene, granulate {GLO} market for	7%	

Tabella 3: Ricostruzione su SimaPro dei materiali costituenti l'ABF (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

Successivamente, sul software sono stati ricreati i 20 macrocomponenti dell'ABF illustrati in Tabella 2, richiamando i materiali creati come in Tabella 3, ed attribuendo loro il peso in kg calcolato sulla base dei dati forniti da GEA.

4.2.2 Consumi durante la fase d'uso

Per la fase d'uso del macchinario, composta dalla fase di produzione (sterilizzazione preforme, riempimento e tappatura delle bottiglie) e dalla fase di pulizia e sterilizzazione dell'ABF stesso, sono stati raccolti dati primari che si riferiscono alla produzione di bottiglie da 500 ml con un protocollo di validazione di sterilizzazione per prodotti acidi (bottiglia interna 6 Log ed esterna 5 Log).

Il funzionamento della macchina, già illustrato in Figura 12, viene ora dettagliatamente spiegato nelle righe che seguono. Durante la fase di produzione, le preforme, allineate dall'apposita zona di carico, sono preriscaldate nel forno fino a raggiungere il profilo termico ottimale che consente di minimizzare il consumo di energia e l'uso di agente sterilizzante; successivamente, entrano nella sterilizzatrice aseptica. Qui le superfici interne ed esterne vengono trattate con perossido di idrogeno vaporizzato (VHP, dall'inglese *Vapourized Hydrogen Peroxide*) per minimizzare i residui e raggiungere un livello di sterilizzazione di 6 Log. Il vapore culinario, utilizzato per vaporizzare il perossido di idrogeno, e il vapore di processo, utilizzato per produrre acqua sterile, sono considerati nella raccolta dati. Quest'ultimo è composto dal recupero di vapore dal condensato (5%) e dal nuovo vapore necessario per compensare le perdite, considerando anche l'energia richiesta dalla pompa per rinviare il condensato alla caldaia. Dopo il trattamento, le preforme entrano in un isolatore microbiologico pre-sterilizzato e poi nella soffiatrice aseptica, dove vengono soffiate con aria sterile fornita da un circuito con doppia filtrazione ed un sistema dedicato che sterilizza il circuito dell'aria con VHP. In questa fase viene considerata l'aria compressa e l'acqua raffreddata per evitare il surriscaldamento degli stampi, utilizzata in circuito chiuso per evitare sprechi, nonché le acque utilizzate per preparare le soluzioni sterilizzanti, nella caldaia e negli stampi. Successivamente, le bottiglie sterili vengono trasferite con sistema di presa per il collo dalla soffiatrice aseptica al modulo di riempimento aseptico. La riempitrice aseptica si trova all'interno dello stesso isolatore microbiologico, la cui sterilità viene mantenuta durante la produzione con una sovrappressione di aria sterile in classe 100. È stato considerato nello studio anche l'acido peracetico che pulisce le barriere e il basamento durante la produzione, nonché l'azoto utilizzato per lo spazio di testa tra il prodotto e il tappo. Lo sterilizzatore dei tappi si trova in posizione verticale rispetto alla zona di tappatura ed utilizza perossido di idrogeno vaporizzato alla giusta concentrazione e temperatura per raggiungere una sterilizzazione di 6 Log. Una volta tappate, le bottiglie sono avviate al tunnel di uscita. Anche se non sono rappresentate in figura, il sistema include anche il pannello di automazione, l'*Uninterruptible Power Supply* (UPS) che contiene 40 batterie al piombo, e i compressori

che sono solitamente situati in una stanza separata a causa del loro rumore. È stata inoltre considerata l'energia elettrica utilizzata dal blocco di riempimento, dalla soffiatrice e dai compressori.

Il sistema è in grado di offrire fino a 162 ore di produzione continua senza interruzioni o cicli di sanificazione intermedi. In base a tali considerazioni, la Tabella 4 riporta i dati dei consumi forniti da GEA, da intendersi orari, stimando una produzione di 22.000 bottiglie/ora. Una volta ricreati tutti i consumi riferiti alla produzione oraria, per riportarli all'unità funzionale di 1000 bottiglie, come richiesto dalle norme ISO di riferimento per l'LCA, è stata poi eseguita la seguente proporzione per ciascuno di essi:

$$\text{Consumo riportato all'UF} = \frac{\text{Consumo orario}}{22000 \frac{\text{bottiglie}}{h}} * 1000 \text{ bottiglie}$$

CONSUMO	UNITÀ DI MISURA	VALORE	MODELLAZIONE CON ECOINVENT 3.6
Compressed air	Nm ³ /h	257	Compressed air, 800 kPa gauge {RER} compressed air production, 800 kPa gauge, >30kW, average generation
Treated water	l/h	899	Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, conventional treatment
City water	l/h	331	Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, conventional treatment
Chilled water	kWh	10,3	Electricity, medium voltage {RER} market for
Filtered culinary steam	kg/h	5	Steam, in chemical industry {RER} production
Gas nitrogen	Nm ³ /h	18	Nitrogen, liquid {RER} air separation, cryogenic
Sterilizing agent (PAA) 15%	l/h	3	Acetic acid, without water, in 98% solution state {GLO} market for + Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER} market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state + Peracetic acid + Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average
Hydrogen peroxide (H ₂ O ₂) 35% food grade for spray application	kg/h	15	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER} hydrogen peroxide production, product in 50% solution state + Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, ultrafiltration treatment
Electrical power Bloc + Blower + Compressor – absorbed	kWh	274	Electricity, medium voltage {RER} market for
New Steam + Steam from condensate	kg/h	200	Steam, in chemical industry {RER} production Cut-off, S
Pump energy for steam recovery	kWh	0.3	Electricity, medium voltage {RER} market for Cut-off, S

Tabella 4: Consumi orari dell'ABF durante la produzione di 22.000 bottiglie; riadattato da (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

Come spesso accade, è stato necessario ricreare interamente alcuni consumi sul software, in quanto non presenti "tali e quali" da database. È il caso, ad esempio, dell'acqua ossigenata al 35% e dell'acido peracetico al 15% che sono stati miscelati in opportune quantità con altri componenti presenti da database per ottenere il corretto quantitativo. Anche per l'azoto gassoso sono state fatte alcune considerazioni: su SimaPro è presente solo quello liquido, pertanto, considerando che la densità dell'azoto liquido è 809 kg/m³ a 98 kPa e il volume di gas ottenuto da 1 dm³ di liquido è 0,705 m³ (Siad, 2021) (Siad, Azoto Gassoso e Liquido, 2021), è stata instaurata una proporzione tra azoto liquido e gassoso, calcolando il volume di azoto gassoso, pari a 0,0024 m³ di quello liquido.

Considerando ora la fase di pulizia e sterilizzazione dell'impianto, i cicli sono effettuati circa ogni 162h, per circa 3 ore. Il *Cleaning in Place* (CIP) è effettuato utilizzando soda caustica, seguita da un risciacquo con acqua. Il ciclo con acido nitrico, seguito da risciacquo, avviene ogni 4 settimane e consiste in una schiumatura per le superfici interne della soffiatrice. Il *Cleaning out of Place* è effettuato con soda caustica e risciacquo. Invece, la *Sterilization in Place* (SIP) della riempitrice e dei tubi è performata con vapore e acqua raffreddata. La *Sterilization out of Place* (SOP) utilizza acido peracetico seguito da un ciclo di risciacquo. Infine sono stati considerati, per il SIP e COP della soffiatrice, anche il calore e vapori di perossido di idrogeno. Infine, l'energia elettrica per i cicli, così come l'aria compressa e l'azoto utilizzati per raffreddare la riempitrice, e le emissioni in aria di H₂O₂ (0,12 kg/UF), sono stati ricreati nel Database Ecoinvent 3.6.

La Tabella 5 riporta i consumi del ciclo eseguito ogni 162h della durata stimata di 3h. Poiché queste operazioni avvengono ogni 162 h, per trovare il consumo riferito all'unità funzionale, sono poi stati eseguiti i seguenti calcoli sul software SimaPro:

$$\text{Bottiglie prodotte in 162h} = 22000 \frac{\text{bottiglie}}{\text{h}} * 162\text{h} = 3.564.000 \text{ bottiglie}$$

$$\text{Consumo sterilizzazione ambientale riportato ad UF} = \frac{\text{Consumo}}{3.564.000 \text{ bottiglie}} * 1000 \text{ bottiglie}$$

CONSUMO	UNITÀ DI MISURA	VALORE	MODELLAZIONE CON ECOINVENT 3.6
City water	l	20	Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, conventional treatment
Treated water	l	14900	Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, ultrafiltration treatment
Chilled water	kW	160	Electricity, medium voltage {RER} market for
Tower water	kWh	140	Electricity, medium voltage {RER} market for
Compressed air	Nm ³	240	Compressed air, 800 kPa gauge {RER} compressed air production, 800 kPa gauge, >30kW, average generation
Gas nitrogen	Nm ³	20	Nitrogen, liquid {RER} market for
Process steam	kg	1170	Steam, in chemical industry {RER} production
Filtered culinary steam	kg	550	Steam, in chemical industry {RER} production
Caustic soda (NaOH) 33%	l	45	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER} chlor-alkali electrolysis, membrane cell + Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, ultrafiltration treatment
Nitric acid (HNO ₃) 33%	l	23	Nitric acid, without water, in 50% solution state {RER} nitric acid production, product in 50% solution state + Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, ultrafiltration treatment
Sterilizing agent (PAA) 15%	l	28	Acetic acid, without water, in 98% solution state {GLO} market for + Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER} market for hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state + Peracetic acid Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average
Hydrogen peroxide (H ₂ O ₂) 35% food grade for spray application	kg	7	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {RER} hydrogen peroxide production, product in 50% solution state + Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, ultrafiltration treatment
Electrical power bloc-absorbed	kWh	180	Electricity, medium voltage {RER} market for

Tabella 5: Consumi durante la fase di pulizia e sterilizzazione dell'ABF; riadattato da (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

Inoltre, nella soffiatrice viene effettuata una schiumatura manuale dopo la manutenzione e gli interventi non-standard, stimata circa ogni 4 settimane (Tabella 6). Il tempo di schiumatura è 10 minuti mentre il risciacquo con acqua trattata è 20 minuti. I consumi sono stati riportati all'unità funzionale:

$$\text{Bottiglie prodotte in 4 settimane} = 22000 \frac{\text{bottiglie}}{h} * 24h * 28 \text{ giorni} = 14.784.000 \text{ bottiglie}$$

$$\text{Consumo schiumatura riportato ad UF} = \frac{\text{Consumo}}{14.784.000 \text{ bottiglie}} * 1000 \text{ bottiglie}$$

CONSUMI SCHIUMATURA MANUALE	UNITÀ DI MISURA	VALORE	MODELLAZIONE CON ECOINVENT 3.6
Water	m ³	1,25	Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, conventional treatment
Compressed Air	m ³	6	Compressed air, 800 kPa gauge {RER} compressed air production, 800 kPa gauge, >30kW, average generation
Foaming agent	l	8,33	Foaming agent {GLO} production Cut-off, S+ Tap water {Europe without Switzerland} tap water production, conventional treatment
Electrical power	kJ	4500	Electricity, medium voltage {IT} market for

Tabella 6: Consumi durante la schiumatura manuale della soffiatrice; riadattato da (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

4.2.3 Analisi del fine vita dei materiali

Per ricreare lo scenario di smaltimento dell'ABF è stata condotta un'analisi del possibile fine vita dei materiali costituenti, ovvero acciaio, plastiche, rame, gomme, vetro, alluminio, batterie al piombo.

Una possibile strada poteva essere considerare la macchina come un rifiuto speciale, prendendo come riferimento dei dati italiani che attestano che le sostanze inorganiche e i metalli sono riciclati al 69,7%, inceneriti all'1,7%, depositati in discarica al 6,9% oppure messi in riserva al 21,7% (ISPRA, 2021).

Tuttavia, i dati non sono specifici per categoria di materiale e non permettono di raggiungere un alto livello di dettaglio. Inoltre, l'ABF non è venduto solo in Italia, ma anche in un contesto geografico più ampio. Per questi motivi, si è scelto dunque di considerare come contesto di smaltimento quello europeo (Tabella 7), descritto in dettaglio nei paragrafi successivi.

MATERIALE	RICICLO %	INCENERIMENTO %	DISCARICA %	FONTE
Plastiche	26%	47,5%	26,5%	(Plastic Europe, 2018)
Gomme				(Eionet Portal, 2019)
Acciaio	90%	0%	10%	(Schindler, 2019)
Rame				(BCSA Group of Companies, 2022)
Alluminio	0%	0%	100%	(Schindler, 2019)
Vetro				(EUR-Lex, 2020)
Batteria al Pb	100%	0%	0%	(Eionet Portal, 2019) (European Commission, 2018) (Gestione-Rifiuti.it & Sicurezza Operativa Ambientale, 2022)

Tabella 7: Analisi del fine vita dei materiali costituenti l'ABF (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

Plastiche e gomme

Si stima che il settore *Building & Construction* utilizzi in Europa circa 10 milioni di tonnellate di plastica ogni anno (20% del totale), posizionandosi al secondo posto in classifica tra i settori che ne fanno più

uso, dopo quello degli imballaggi (Plastic Europe, 2018). L'industria delle costruzioni comprende non solo l'edilizia e le infrastrutture, ma anche i macchinari industriali (Technofunc, 2022), in cui rientra dunque anche l'ABF di GEA. Pertanto, sono stati presi come riferimento dati di smaltimento di plastiche e gomme, ipotizzati uguali, relativi a tale settore, individuati all'interno di un report di Plastic Europe, secondo il quale il 26% della produzione totale di rifiuti di plastica è sottoposto a riciclo meccanico, il 47,5% a recupero energetico e il 26,5% è destinato alla discarica (Plastic Europe, 2018). Da un punto di vista ambientale, sicuramente la strada da preferire tra le citate alternative di smaltimento delle plastiche è quella del riciclo, che permette di ottenere nuovi prodotti, diminuisce l'utilizzo di risorse naturali vergini e riduce le emissioni di gas serra. Secondo i dati europei, la tecnologia più utilizzata a tale scopo è il riciclo meccanico che è diviso nelle fasi di raccolta, selezione, triturazione, separazione, lavaggio e granulazione (EuRIC AISBL, 2018). In alternativa, anche se oggi ancora poco diffuso rispetto alla prima opzione, esiste anche il riciclaggio chimico che prevede il ritorno alla materia prima di base attraverso la trasformazione delle plastiche in monomeri di pari qualità di quelli vergini, da utilizzare nuovamente nella produzione. Come seconda via, la plastica non riciclata può essere destinata al recupero energetico mediante il processo di termovalorizzazione: dopo uno specifico trattamento di selezione e triturazione è possibile ricavare combustibili alternativi utilizzati nei processi industriali e per la produzione di energia termoelettrica. Il recupero energetico prevede di riutilizzare l'energia contenuta nei rifiuti plastici che è interamente sfruttabile: la plastica infatti ha un potere calorifico paragonabile a quello del carbone (Gestione-rifiuti.it, 2022). Infine, lo smaltimento in discarica resta la peggiore opzione tra le tre alternative da un punto di vista ambientale.

Materiali ferrosi e non ferrosi (acciaio, alluminio, rame)

Per quanto riguarda il trattamento dei rottami ferrosi e non ferrosi, per stimarne il fine vita delle macchine industriali è stato inizialmente contattato Federacciai (la Federazione che rappresenta le Imprese Siderurgiche Italiane; nell'anno 2020 ha contato 125 aziende associate che realizzano e trasformano oltre il 95% della produzione italiana di acciaio) ed Assofermet (Associazione Nazionale Commercianti in Ferro Acciai, Metalli e Ferramenta). Tuttavia, entrambe le associazioni hanno dichiarato che non sono disponibili dati in merito. Simile risultato è stato ottenuto dopo un confronto con un rottamatore in occasione della fiera Ecomondo 2021 di Rimini: è stato confermato che non risulta possibile distinguere se il rottame proviene da un macchinario utilizzato nell'industria alimentare o di altra origine e pertanto non sono presenti report con percentuali di questo tipo. Note queste premesse, si è analizzato un contesto più ampio, relativo all'acciaio del settore delle costruzioni in generale, come fatto per le plastiche. In particolare, considerando la macrocategoria di prodotto *Machinery and Equipment* è stata presa come riferimento un'EPD pubblicata da *Schindler* che prevede che i materiali ferrosi e non ferrosi siano smaltiti con una percentuale del 90% a riciclo e 10% in

discarica (Schindler, 2019). Il documento si riferisce al 2017 come anno di riferimento ed il contesto è quello europeo. Inoltre, un simile valore è riportato anche da altre fonti del settore (BCSA Group of Companies, 2022). Una percentuale così alta di riciclo è giustificabile dal fatto che l'acciaio è in effetti un materiale 100% riciclabile che, a differenza di altri materiali riciclabili, può essere rifuso più volte senza perdere alcuna proprietà intrinseca come ad esempio resistenza, duttilità e formabilità. L'Italia in particolare è il primo paese europeo per il riciclo di rottame ferroso. Nel rapporto di sostenibilità del 2021, Federacciai riporta che i rottami ferrosi sono la materia prima principale utilizzata per la produzione di acciaio con forno elettrico ed essi derivano da scarti di produzione e prodotti in acciaio che hanno terminato il ciclo di vita, proprio come potrebbero essere i macchinari GEA (Federacciai, 2021). Il riciclo dell'acciaio attraverso la rifusione dei rottami ferrosi consente di ottenere benefici in termini ambientali. Ad esempio, è stato calcolato che per ogni tonnellata di rottame di acciaio al carbonio riciclato si ottiene un risparmio di anidride carbonica pari a 1.4 t CO₂ (Federacciai, 2021). Il riciclo dell'alluminio, invece, oltre a evitare l'estrazione di bauxite, consente di risparmiare il 95% dell'energia richiesta per produrlo partendo dalla materia prima: per ricavare dalla bauxite 1 kg di alluminio sono necessari 14 kWh, mentre per ricavare 1 kg di alluminio nuovo da quello usato servono solo 0,7 kWh di energia (Gestione-rifiuti.it, 2022).

Vetro

Nonostante la letteratura scientifica e la documentazione italiana siano ricche di dati e report sullo smaltimento dei packaging in vetro, destinati principalmente al riciclo in altissime percentuali, non si trovano invece molte informazioni riguardo lo smaltimento del vetro proveniente dal settore impianti e costruzioni. Si è deciso quindi di prendere come riferimento i dati presenti nell'EPD di *Schlinder*, già utilizzati per rottami ferrosi e non ferrosi, assumendo che il vetro rientri nella categoria *inorganic materials*, per la quale è prevista la discarica in una percentuale del 100% (Schindler, 2019).

Batterie al piombo

Ogni anno centinaia di migliaia di tonnellate di pile industriali e portatili sono immesse sul mercato dell'Unione Europea. I rifiuti derivanti sono fonte di inquinamento atmosferico, se inceneriti, e di contaminazione dei terreni e delle acque, se smaltiti in discarica. La migliore soluzione per lo smaltimento è il riciclaggio, che permette di recuperare migliaia di tonnellate di metalli come il nichel, il cobalto e l'argento (EUR-Lex, 2020). Il piombo in particolare è un metallo pesante tossico e una delle tre sostanze pericolose affrontate nella Direttiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 6 settembre 2006, relativa a pile e accumulatori e ai rifiuti di pile e accumulatori, che abroga la direttiva 91/157/CEE, poi modificata con la direttiva 2013/56/UE. Inoltre, la Commissione Europea ha proposto un nuovo regolamento sulle batterie il 10 dicembre 2020, che mira a garantire che le batterie

immesse nel mercato dell'UE siano sostenibili e sicure durante l'intero ciclo di vita (Eur-LEX, 2020). In particolare, la Direttiva definisce un tasso di contenuto di piombo riciclato e ne richiede un riciclo il più alto possibile: oggi gli Stati membri dichiarano un tasso di riciclo spesso maggiore del 97% e fino al 100% in diversi stati (Eionet Portal, 2019) (European Commission, 2018). Questo è indispensabile in quanto le batterie al piombo sono considerate pericolose a causa delle sostanze che contengono: secondo il regolamento CLP (ECHA, 2020), il piombo può causare danni ai bambini allattati al seno e può nuocere al feto; inoltre l'ossido di piombo è sospettato come tossico per gli organismi acquatici, e nocivo se ingerito o inalato. L'acido solforico utilizzato nelle batterie al piombo può causare severe ustioni della pelle e lesioni oculari. In base a queste classificazioni, e alla normativa vigente, si può dunque immaginare come l'impatto ambientale di tali batterie sia elevato e quanto il loro riciclo sia strettamente necessario, motivo per cui in questa ricerca è stato inserito pari al 100%, come dichiarato da diversi Stati membri dell'Unione Europea.

Il processo di riciclo delle batterie al piombo è composto dalle fasi di frantumazione, fusione e raffinazione (Gestione-Rifiuti.it & Sicurezza Operativa Ambientale, 2022). Per produrre un kg di piombo lavorando quello delle batterie esauste, occorre poco più di un terzo dell'energia necessaria per lavorare il minerale estratto dalla terra. I materiali di piombo e plastici ottenuti da questo processo di riciclo vengono riutilizzati per la maggior parte per nuove batterie (60%), per l'industria della ceramica e della chimica (15%), nella produzione di rivestimenti di cavi elettrici (8%) e in pallini, pesi, elementi per l'edilizia e per apparecchi radiologici (17%). Ad esempio, il polipropilene, spesso presente come plastica in tali batterie, viene riutilizzato per produrre isolanti elettrici, articoli sanitari e casalinghi, imballaggi e tubature (Gestione-Rifiuti.it & Sicurezza Operativa Ambientale, 2022).

Noti i dati trovati nella ricerca di letteratura circa lo smaltimento dei materiali a fine vita appena illustrati, sono poi stati ricreati gli scenari di smaltimento su SimaPro sulla base della disponibilità dei processi in Ecoinvent (Tabella 8, Tabella 9, Tabella 10, Tabella 11). Dove non è stato possibile inserire un processo preciso per lo scenario di smaltimento di un tipo di rifiuto, è stato inserito un processo che si avvicinasse il più possibile.

SCENARIO DI SMALTIMENTO	[%]	TIPO DI RIFIUTO	PROCESSO DI ECOINVENT 3.6
Riciclo	90	Acciaio	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron
		Alluminio	Aluminium (waste treatment) {GLO} recycling of aluminium
		Rame	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron
Discarica	10	Acciaio	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill
		Alluminio	Waste aluminium {CH} treatment of, sanitary landfill
		Rame	Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill
Incenerimento	-	-	-

Tabella 8: Scenario di smaltimento di materiali ferrosi e non ferrosi

Per lo scenario di smaltimento delle componenti plastiche è stato considerato un plastic mix, in quanto sono presenti contestualmente diverse tipologie di polimeri (PVC, HDPE, Rilsan, PU):

SCENARIO DI SMALTIMENTO	[%]	TIPO DI RIFIUTO	PROCESSO DI ECOINVENT 3.6
Riciclo	26	Plastiche	Mixed plastics (waste treatment) {GLO} recycling of mixed plastics
		Gomme	Mixed plastics (waste treatment) {GLO} recycling of mixed plastics
Discarica	26,5	Plastiche	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill
		Gomme	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill
Incenerimento	47,5	Plastiche	Waste plastic, mixture {CH} treatment of, municipal incineration
		Gomme	Waste plastic, mixture {CH} treatment of, municipal incineration

Tabella 9: Scenario di smaltimento per plastiche e gomme

SCENARIO DI SMALTIMENTO	[%]	TIPO DI RIFIUTO	PROCESSO DI ECOINVENT 3.6
Riciclo	-	-	-
Discarica	100	Glass	Waste glass {CH} treatment of, inert material landfill
Incenerimento	-	-	-

Tabella 10: Scenario di smaltimento per il vetro

SCENARIO DI SMALTIMENTO	PERCENTUALI [%]	TIPO DI RIFIUTO	PROCESSO DI ECOINVENT 3.6
Riciclo	100	Others	Scrap lead acid battery {GLO} market for
Discarica	-	-	-
Incenerimento	-	-	-

Tabella 11: Scenario di smaltimento per le batterie al piombo

4.3 Valutazione degli impatti ambientali

Tutti i dati precedentemente raccolti e ricreati sul software sono stati infine elaborati per calcolare l'impatto dell'ABF durante il suo ciclo di vita, stimato pari a 15 anni.

Il metodo utilizzato per l'analisi è l'EPD (2018), come suggerito dalla PCR di riferimento. I risultati mostrati di seguito si riferiscono all'impatto dei materiali della macchina riportati all'unità funzionale di 1000 bottiglie.

4.3.1 Impatto delle materie prime

La soffiatrice rotativa asettica, essendo anche il componente più grande e pesante, risulta il più impattante su tutte le categorie di impatto (fino al 30%), fatta eccezione per l'abiotic depletion elements, dove le batterie dell'UPS causano l'impatto maggiore (60%), in linea con quanto trovato in altri studi che ne testimoniano la poca sostenibilità ambientale (Eionet Portal, 2019) (EUR-Lex, 2020). L'impatto della riempitrice (filler) è circa il 10% in quasi tutte le categorie, seguita dall'unità di preparazione dei fluidi, i compressori ed il forno di riscaldamento per le preforme. Gli altri componenti hanno un impatto inferiore al 5% (Figura 13).

Per quanto riguarda i materiali costituenti, l'acciaio risulta altamente impattante (70-88%) in tutte le categorie, eccetto per l'abiotic depletion elements (20%), dove le batterie al piombo causano il 60% dell'impatto, nonostante il basso peso, e il 17% è causato dall'alluminio (Figura 14). Il rame, d'altra parte, dimostra il più grande contributo ai potenziali di eutrofizzazione (25%) e acidificazione (20%).

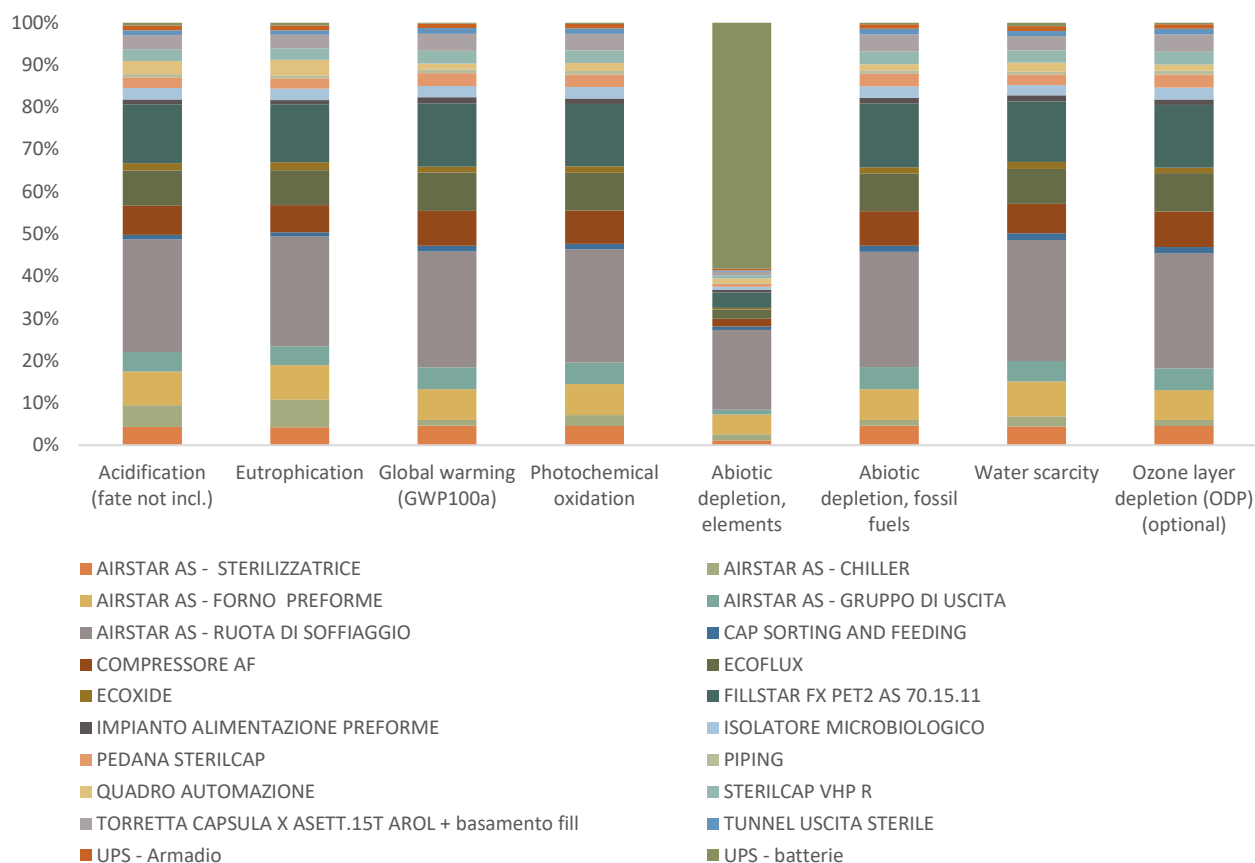


Figura 13: Impatto dei componenti dell'ABF in funzione di 1000 bottiglie

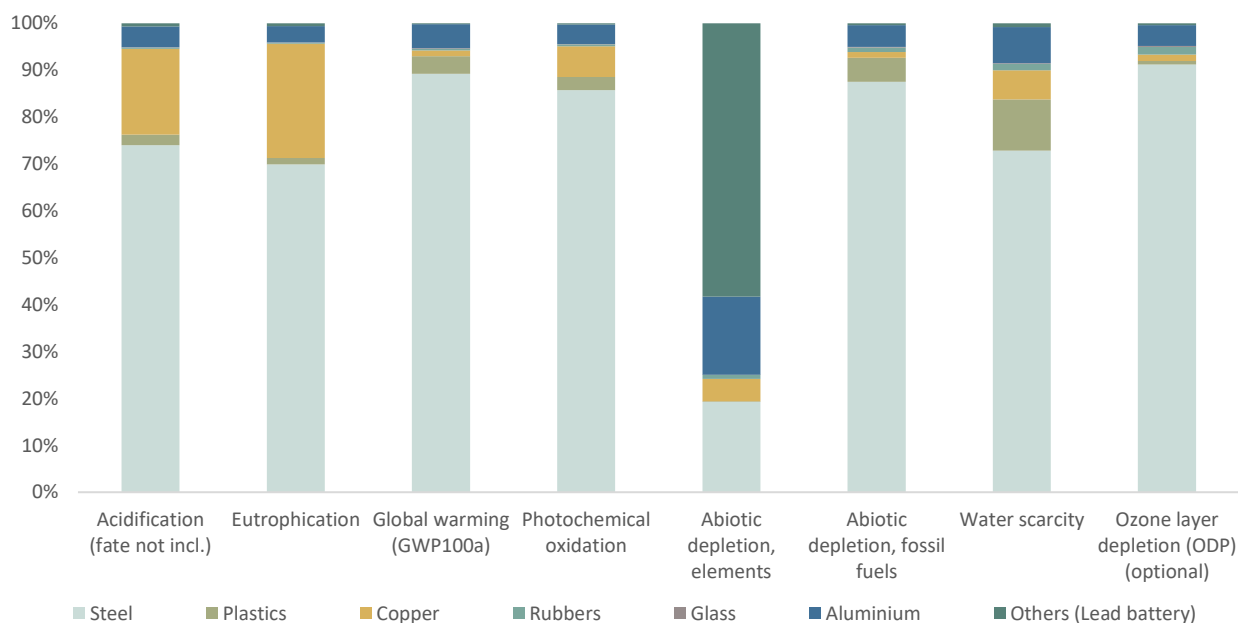


Figura 14: Impatto dei materiali dell'ABF riferiti all'unità funzionale

4.3.2 Impatto della fase d'uso

L'energia elettrica risulta responsabile del 40-70% dell'impatto potenziale sull'eutrofizzazione, acidificazione, ossidazione fotochimica e surriscaldamento globale. Questo risultato è in linea con altri

studi disponibili in letteratura (Roibása, Rodríguez-García, Valdramidis, & Hosp, 2018). Anche il vapore di processo ha un impatto importante, fino al 30% sull'assottigliamento dello strato di ozono, abiotic depletion of fossil fuels e global warming (Figura 15). L'uso di H₂O₂ per sterilizzare le preforme impatta fino al 25% sulla water scarcity e abiotic depletion elements, ma ha un impatto basso (5-10%) sulle altre categorie.

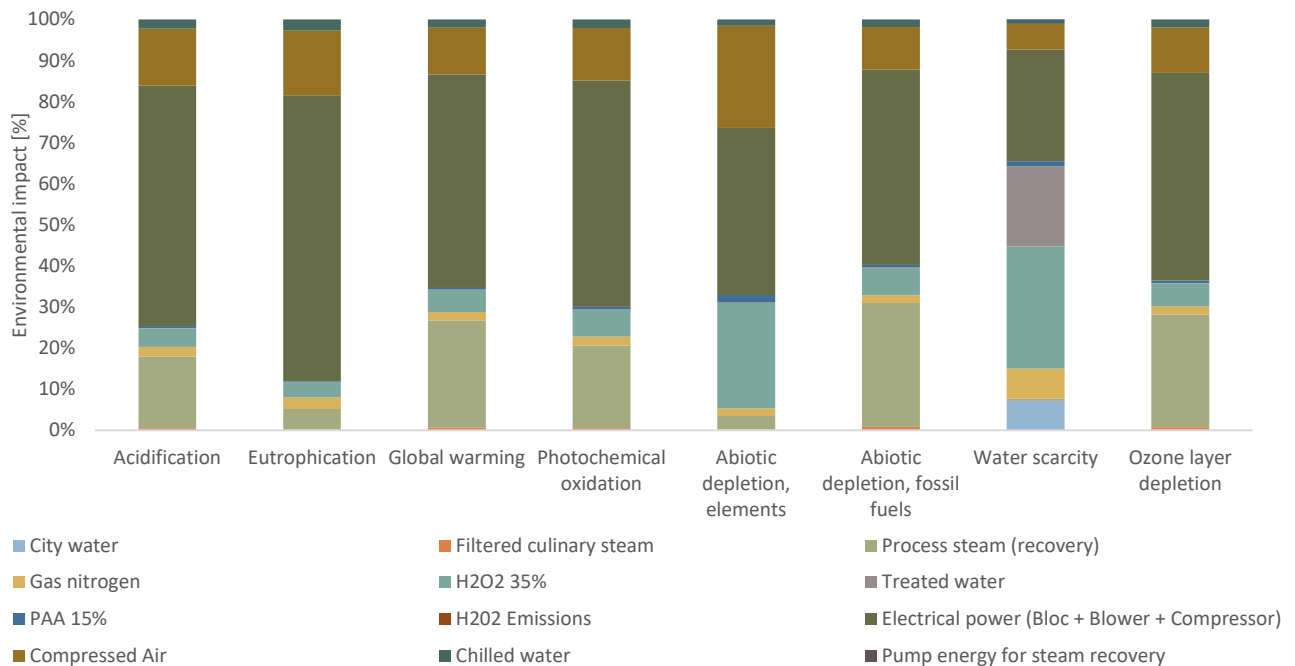


Figura 15: Impatto ambientale [%] dei consumi della macchina durante la produzione (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

IMPACT CATEGORY	TOTAL	CITY WATER	FILTERED CULINARY STEAM	PROCESS STEAM	GAS NITROGEN	H ₂ O ₂ 35%	TREATED WATER	PAA 15%	ELECTRICAL POWER (BLOC + BLOWER + COMPRESSOR)	COMPRESSED AIR	CHILLED WATER	PUMP ENERGY FOR STEAM RECOVERY
Acidification [kg SO ₂ eq]	4,11E-02	2,19E-05	1,80E-04	7,18E-03	9,62E-04	1,85E-03	5,96E-05	1,63E-04	2,41E-02	5,70E-03	9,05E-04	2,64E-05
Eutrophication [kg PO ₄ ⁻⁻⁻ eq]	2,52E-02	1,24E-05	3,19E-05	1,27E-03	7,02E-04	8,81E-04	3,37E-05	5,74E-05	1,76E-02	3,98E-03	6,61E-04	1,92E-05
Global warming [kg CO ₂ eq]	9,92E+00	4,01E-03	6,45E-02	2,58E+00	2,06E-01	5,34E-01	1,09E-02	3,63E-02	5,15E+00	1,13E+00	1,94E-01	5,64E-03
Photochemical oxidation [kg NMVOC]	2,12E-02	1,08E-05	1,06E-04	4,26E-03	4,67E-04	1,38E-03	2,92E-05	1,40E-04	1,17E-02	2,71E-03	4,39E-04	1,28E-05
Abiotic depletion, elements [kg Sb eq]	3,95E-05	4,25E-08	3,25E-08	1,30E-06	7,32E-07	1,01E-05	1,15E-07	6,74E-07	1,61E-05	9,80E-06	6,04E-07	1,76E-08
Abiotic depletion, fossil fuels [MJ]	1,21E+02	4,55E-02	9,16E-01	3,66E+01	2,30E+00	8,05E+00	1,24E-01	8,39E-01	5,77E+01	1,26E+01	2,17E+00	6,31E-02
Water scarcity [m ³ eq]	4,29E+00	3,08E-01	5,31E-04	2,12E-02	3,14E-01	1,27E+00	8,36E-01	5,44E-02	1,17E+00	2,68E-01	4,38E-02	1,28E-03
Ozone layer depletion [kg CFC-11 eq]	1,15E-06	4,60E-10	7,88E-09	3,15E-07	2,32E-08	6,36E-08	1,25E-09	6,94E-09	5,81E-07	1,27E-07	2,18E-08	6,36E-10

Tabella 12: Impatti numerici dei consumi dell'ABF durante la fase di produzione (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

Infine, la Figura 16 illustra che i contributi più importanti all'impatto dei cicli di sterilizzazione e pulizia della macchina è dato dal vapore di processo per 6 categorie di impatto su 8, fatta eccezione per l'abiotic depletion elements (dove la soda caustica ha un contributo del 49%, mentre varia dal 4 al 26%

nelle altre categorie) e water scarcity (dove l'acqua trattata contribuisce logicamente al 60% dell'impatto). Il contributo del vapore filtrato è 20% in media, mentre è 10% per l'energia elettrica.

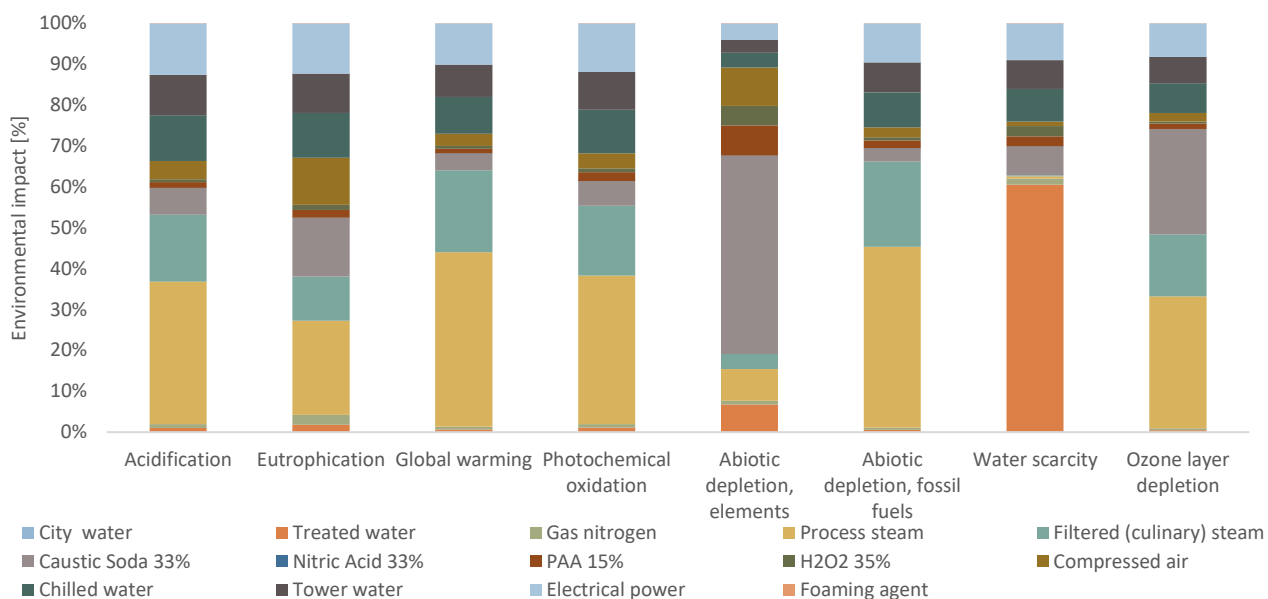


Figura 16: Impatto ambientale [%] dei cicli di sterilizzazione e pulizia (CIP SIP COP SOP) (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

4.3.3 Impatto dello smaltimento finale

Dopo 15 anni, la macchina viene smaltita. La Tabella 13 riporta gli impatti ambientali dei materiali, riferiti all'unità funzionale, considerando i dati europei di incenerimento, discarica e riciclo selezionati.

CATEGORIA DI IMPATTO	TOTALE	ACCIAIO E RAME	PLASTICHE E GOMME	ALLUMINIO	VETRO
Acidification [kg SO ₂ eq]	7,23E-07	1,80E-07	5,07E-07	2,99E-08	6,52E-09
Eutrophication [kg PO ₄ --- eq]	2,33E-06	3,24E-08	2,29E-06	3,96E-09	1,16E-09
Global warming [kg CO ₂ eq]	1,75E-03	2,08E-05	1,73E-03	2,45E-06	7,19E-07
Photochemical oxidation [kg NMVOC]	8,07E-07	2,23E-07	5,52E-07	2,42E-08	8,56E-09
Abiotic depletion, elements [kg Sb eq]	7,27E-10	1,00E-10	5,96E-10	2,76E-11	2,95E-12
Abiotic depletion, fossil fuels [MJ]	1,05E-03	5,89E-04	3,87E-04	5,07E-05	2,34E-05
Water scarcity [m ³ eq]	5,19E-05	2,71E-05	2,44E-05	2,96E-07	6,75E-08
Ozone layer depletion [kg CFC-11 eq]	2,05E-11	7,03E-12	1,26E-11	5,81E-13	2,95E-13

Tabella 13: Impatto ambientale dello smaltimento dei materiali (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

Si ricorda che, come possibile alternativa, si sarebbe potuto considerare il contesto italiano illustrato dal report di ISPRA per modellare gli smaltimenti dei materiali. Tuttavia, a fronte dei risultati appena mostrati, risulta inutile provare a modellare lo smaltimento anche in un contesto più localizzato a livello geografico ed inoltre meno specifico a livello di materiali: l'impatto dello smaltimento risulta estremamente piccolo.

4.3.4 Le fasi del ciclo di vita a confronto

Si confrontano ora le quattro fasi da un punto di vista ambientale. Come si può notare dalla Tabella 14 e dalla Figura 17, l'impatto principale (95%) su tutte le categorie di impatto è dovuto ai consumi durante la fase d'uso, in linea con quanto riportato in una Environmental Product Declaration di una macchina simile (EPD Ecolean, 2016). Per l'abiotic depletion, a causa delle batterie al piombo, il 46% dell'impatto è dovuto all'estrazione e produzione delle materie prime. Nelle altre categorie, nonostante il grande peso di acciaio costituente la macchina, i materiali hanno in media un impatto minore dell'1% del totale. Lo stesso risultato vale per le fasi di pulizia e sterilizzazione.

Categoria di impatto	Unità di misura	Impatto totale	Estrazione e produzione delle materie prime	Consumi durante la fase d'uso	CIP SIP COP SOP	Fine vita dei materiali
Acidification	kg SO ₂ eq	4,32E-02	1,34E-03	4,11E-02	7,55E-04	7,23E-07
Eutrophication	kg PO ₄ --- eq	2,60E-02	4,52E-04	2,52E-02	3,25E-04	2,33E-06
Global warming	kg CO ₂ eq	1,03E+01	1,96E-01	9,92E+00	2,15E-01	1,75E-03
Photochemical oxidation	kg NMVOC	2,24E-02	8,25E-04	2,12E-02	4,15E-04	8,07E-07
Abiotic depletion, elements	kg Sb eq	7,45E-05	3,43E-05	3,95E-05	7,13E-07	7,27E-10
Abiotic depletion, fossil fuels	MJ	1,26E+02	2,04E+00	1,21E+02	2,85E+00	1,05E-03
Water scarcity	m ³ eq	4,45E+00	3,31E-02	4,29E+00	1,25E-01	5,19E-05
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	1,19E-06	9,22E-09	1,15E-06	3,38E-08	2,05E-11

Tabella 14: Impatto ambientale complessivo della macchina diviso per fasi (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

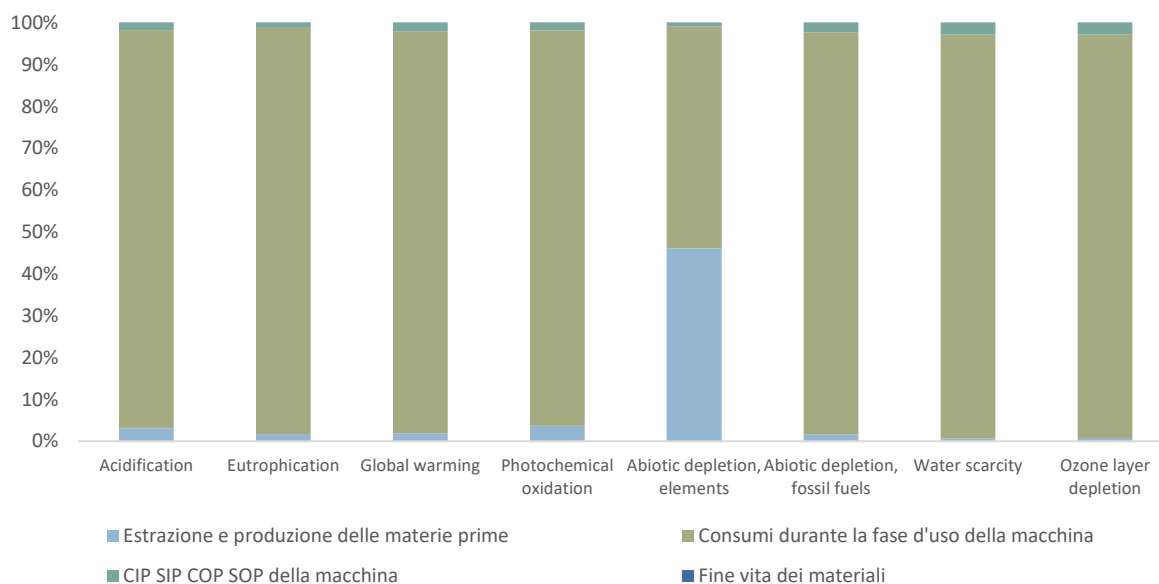


Figura 17: Impatto ambientale [%] della macchina durante il suo ciclo di vita (Stefanini, Bricoli, & Vignali, 2022)

4.4 Discussione dei risultati

4.4.1 Analisi di sensitività per l'energia elettrica

A fronte dei risultati mostrati è chiaro che i consumi durante la produzione devono essere il primo hotspot da risolvere. Una soluzione, ad esempio, può essere il recupero dei flussi (acqua, chimici, vapore, o altro) laddove possibile: nel presente caso studio, ad esempio, è già stato considerato un recupero del vapore di processo che ha consentito la riduzione delle emissioni di gas serra del 6% e un risultato simile è stato ottenuto secondo abiotic depletion, photochemical oxidation, ozone layer depletion e acidifications potentials.

Tuttavia, si è dimostrato che l'impatto più alto sui diversi problemi ambientali considerati, è dato dall'energia elettrica. Nello studio è stato considerato il mix energetico europeo, in quanto la macchina è venduta principalmente in tale area geografica, ma ci si è chiesti come potrebbero cambiare i risultati se questa fosse utilizzata in paesi specifici, sia europei che extra-europei. Per rispondere a tale domanda, è stata effettuata un'analisi di sensitività con il software SimaPro 9.1.1: sono stati considerati i mix energetici di Francia, Italia, Germania, Cina, India, Stati Uniti ed è stato ricalcolato l'impatto ambientale del macchinario, in particolare nella sua fase d'uso, con lo stesso metodo EPD 2018. Dalla Figura 18, che riassume i risultati, si evince che l'impatto della produzione cambia completamente in base al luogo in cui la macchina viene utilizzata.

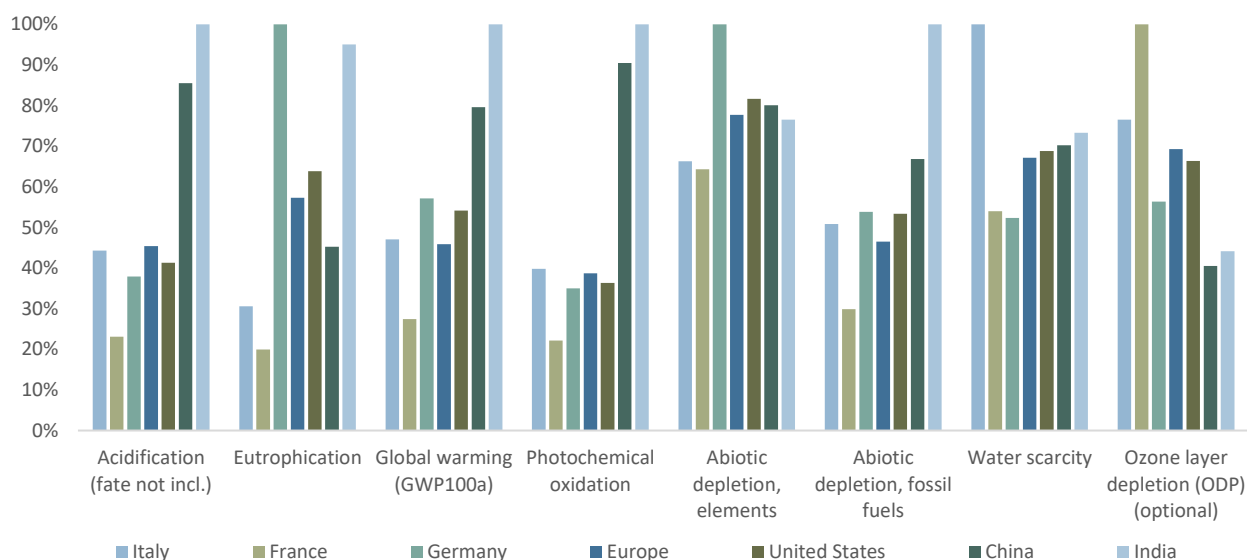


Figura 18: risultato dell'analisi di sensitività durante la produzione

In particolare, la Francia risulta il paese dove la produzione avrebbe l'impatto minore secondo tutte le categorie di impatto, fatta eccezione per l'ozone layer depletion dove risulta il peggiore, seguita dall'Italia e dalla Germania. Invece, l'India risulta la peggiore opzione per 5 categorie di impatto, spesso seguita dalla Cina. Per spiegare questi risultati, è necessario comprendere quali sono i mix energetici

nazionali, considerando come fonte l'International Energy Agency (IEA) ed i dati del 2020 (International Energy Agency, 2022). L'India utilizza al 73% il carbone come fonte di energia elettrica e per questo è la peggiore secondo l'abiotic depletion fossil fuels, nonché per la global warming, photochemical oxidation e acidification a causa degli inquinanti liberati in atmosfera. Segue la Cina, che ne fa uso al 64%. Gli Stati Uniti fanno uso principalmente di gas naturale, carbone e nucleare in percentuali simili, pertanto si collocano in una posizione intermedia tra gli stati considerati. Le posizioni migliori, se si volesse stilare una classifica, sarebbero mediamente occupate dalle nazioni che seguono: la Germania fa uso di carbone, ma l'eolico è già diffuso ed in fortissimo aumento, seguito dal nucleare e dal gas naturale; l'Italia fa uso spinto di gas naturale ed idroelettrico come fonti principali; la Francia fa uso al quasi 70% di energia nucleare, seguita da idroelettrico.

Si può allora facilmente comprendere dai risultati che la risposta al problema dell'alto impatto del consumo di energia elettrica è solo una: utilizzare mix energetici che facciano uso delle fonti rinnovabili, in grado di impattare meno sui problemi ambientali quali l'effetto serra, l'acidificazione, l'eutrofizzazione e naturalmente il consumo di fonti fossili.

4.4.2 Confronto con una sterilizzatrice per bottiglie con acido peracetico

Come anticipato nell'introduzione del Capitolo 4, il progetto di ricerca completo con GEA ha previsto la valutazione dell'impatto ambientale non solo dell'ABF, ma anche dell'ECOSPIN, un blocco di sterilizzazione bottiglie con acido peracetico e riempimento in asettico. Siccome il procedimento di calcolo ed i due LCA è molto simile, nella presente Tesi si è scelto di approfondire solo il caso studio sull'ABF. Tuttavia, a conferma dei risultati, in questo paragrafo si vuole mostrare che sono state ottenute conclusioni similari anche per la seconda macchina: anche per l'ECOSPIN gli impatti dell'estrazione e produzione dei materiali, il fine vita e i cicli di pulizia/sterilizzazione sono quasi trascurabili rispetto alla fase d'uso, secondo quasi tutte le categorie d'impatto. Confrontando gli impianti, questi differiscono di 14405 kg, ed in particolare l'ECOSPIN contiene molto più acciaio: l'impatto dei materiali è infatti leggermente più alto, anche se in modo non così significativo.

Durante il ciclo di vita complessivo la differenza tra le due a livello numerico non è così marcata, in quanto l'ordine di grandezza è sempre lo stesso, tuttavia, l'ABF rispetto all'ECOSPIN risulta migliore del 26-18% secondo global warming, photochemical oxidation, abiotic depletion fossil fuels, water scarcity, acidification. Mentre per l'abiotic depletion elements l'ABF risulta di circa un 10% peggiore (Figura 19). Il risultato varia, dunque, in base alla categoria considerata, e per stabilire quale delle due macchine sia completamente migliore dell'altra, bisognerebbe valutare quale problema ambientale sia da considerare più importante, ma non sempre è possibile stabilirlo con certezza.

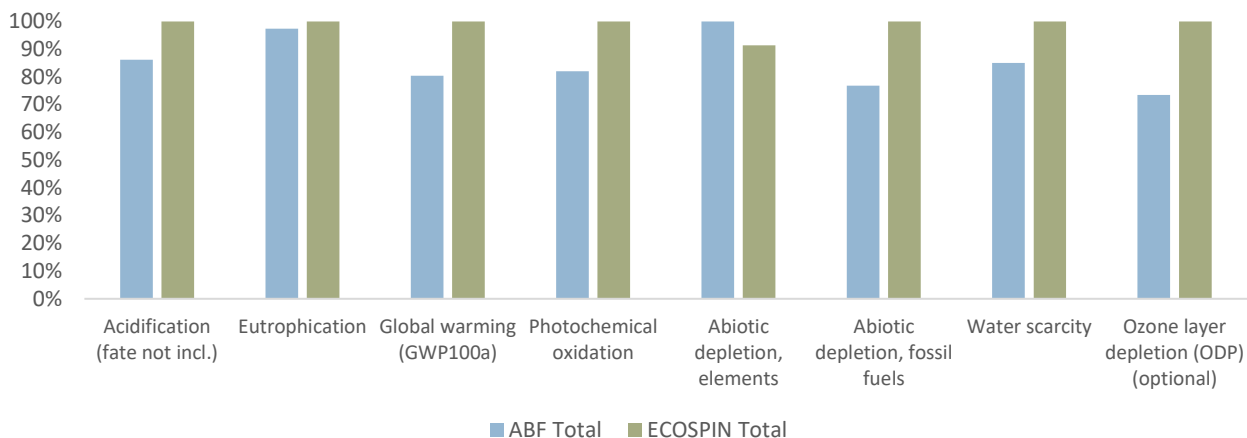


Figura 19: Confronto dei risultati di impatto di ABF ed ECOSPIN [%]

4.5 Considerazioni finali

Quali sono dunque gli apporti scientifici e le conclusioni di tale studio? Innanzitutto, è il primo pubblicato in letteratura scientifica che ha analizzato, da una prospettiva ambientale, l'intero ciclo di vita di una macchina alimentare con un alto livello di automazione ed ha evidenziato quali fasi sono più impattanti. Nonostante l'azienda avesse chiesto di effettuare l'analisi per valutare lo smaltimento finale delle macchine e comprendere come questo potesse essere modificato per migliorare l'impatto sul Pianeta, i risultati hanno provato che il primo hotspot da risolvere concerne invece la fase di utilizzo delle macchine stesse, a causa soprattutto degli elevati consumi di energia elettrica e vapore. Avendo ottenuto risultati simili pur analizzando due macchine leggermente diverse e con consumi diversi, la conclusione è stata ulteriormente validata; non si può ovviamente avere la certezza che essa valga per tutte le tipologie di macchine di confezionamento alimentare esistenti, in quanto l'LCA dovrebbe essere applicato ad ogni caso specifico per verificare tale risultato, ma è verosimile che l'energia elettrica resti, comunque, tra i maggiori responsabili di impatto. In conclusione, lo studio sottolinea che le pratiche di economia circolare, come il recupero ed il ricircolo dei flussi (in questo caso di vapore, estendibile anche all'acqua o altre sostanze), ma soprattutto l'utilizzo di fonti di energia elettrica rinnovabili, sono la soluzione per aumentare le prestazioni ambientali di macchinari alimentari simili.

5 La scelta sostenibile dei materiali di confezionamento

Il progetto di ricerca si colloca temporalmente in un periodo in cui le parole chiave nell'ambito del settore del confezionamento alimentare riguardano negativamente la plastica, come "plastic free", "plastic tax", "plastic litter" per citarne alcune. Questo materiale, infatti, molto apprezzato per la sua leggerezza, versatilità e praticità (Plastic Europe, 2019), è diventato oggi oggetto di critiche a livello ambientale: a causa dello smaltimento inadeguato, tonnellate di plastica si riversano ogni anno nei mari e negli oceani, fino alla formazione di vere e proprie isole galleggianti, creando gravi danni al nostro ecosistema (Min, Cuiffi, & Mathers, 2020). Per risolvere tali problematiche, alcuni sostengono che è necessario utilizzare materiali alternativi per gli imballaggi alimentari. In particolare, da alcune ricerche è emerso che le bottiglie polimeriche sono fra i rifiuti più presenti sulle spiagge italiane (WWF, 2019) ed il "pensare comune" crede che la loro sostituzione con bottiglie di vetro sarebbe la migliore soluzione per il nostro ecosistema. Ma è davvero questa la migliore strada da seguire? È per rispondere a questa complessa domanda che è nato un progetto di ricerca con Parmalat S.p.A.. Nella prima parte della ricerca, è stata condotta un'indagine bibliografica degli studi in letteratura scientifica per comprendere lo stato dell'arte riguardo al dibattito plastica-vetro, da cui si è evinto che la metodologia Life Cycle Assessment (LCA) è risultata lo strumento più utilizzato anche per tale valutazione, restituendo risultati spesso a favore dei materiali polimerici. Nella seconda parte del progetto, è stata condotta un'analisi LCA su un caso studio proposto dall'azienda. L'obiettivo della ricerca era confrontare, in modo scientifico, l'impatto di quattro packaging per il latte pastorizzato nelle diverse fasi di produzione, distribuzione e smaltimento: si è confrontato l'impatto di bottiglie in PET e in R-PET con l'impatto di bottiglie in vetro, a perdere e a rendere, che avrebbero potuto potenzialmente sostituire tali packaging nel caso fossero risultate opzioni convenienti dal punto di vista ambientale. Inoltre, nello studio è stato proposto un Marine Littering Indicator, ovvero una formula per calcolare l'impatto potenziale delle bottiglie sul problema dell'inquinamento delle acque dovute allo scorretto smaltimento dei packaging: oggi nessun software LCA comprende ancora un indicatore di questo tipo. Complessivamente, le conclusioni dello studio hanno dato un notevole contributo alla ricerca scientifica su tali tematiche ed hanno consentito di fare chiarezza nel complesso dibattito "Plastica o vetro?". Nelle pagine seguenti si è scelto di illustrare per esteso il caso studio di analisi LCA svolto con Parmalat, tralasciando l'analisi di letteratura iniziale ed il Marine Littering Indicator. Si lascia tuttavia ai lettori interessati la possibilità di approfondire tali tematiche nell'articolo open access che è stato pubblicato per divulgare tale ricerca (Stefanini, Borghesi, Ronzano, & Vignali, 2021).

5.1 Obiettivo e campo di applicazione: LCA di 4 soluzioni di confezionamento per bevande

L'obiettivo dello studio è confrontare l'impatto ambientale di quattro soluzioni di confezionamento per latte fresco, identificando per ciascuna i punti critici ambientali. I packaging considerati sono quattro diverse bottiglie costituite dai seguenti materiali:

- Polietilene Tereftalato (PET) vergine,
- 50% PET vergine e 50% PET riciclato (R-PET),
- vetro a perdere
- vetro a rendere (8 utilizzi)

L'unità funzionale, in questo caso, è definita come il packaging per contenere 1 litro di latte fresco, considerando dunque la bottiglia, il tappo, l'etichetta, tutti i materiali ausiliari e le attività connesse alla produzione e distribuzione del prodotto finito.

L'ambito geografico dello studio è l'Italia in quanto il prodotto è venduto solo in tale territorio.

I confini di sistema seguono un approccio "dalla culla alla tomba", considerano cioè tutto il ciclo di vita: l'estrazione delle materie prime, i processi di lavorazione e smaltimento finale, includendo i trasporti.

Il diagramma di flusso in Figura 20 illustra i processi coinvolti nella produzione delle bottiglie contenenti 1 litro di latte, dei quali sono poi stati raccolti i dati necessari all'analisi LCA.

Per svolgere lo studio è stato utilizzato il software SimaPro 9.0.

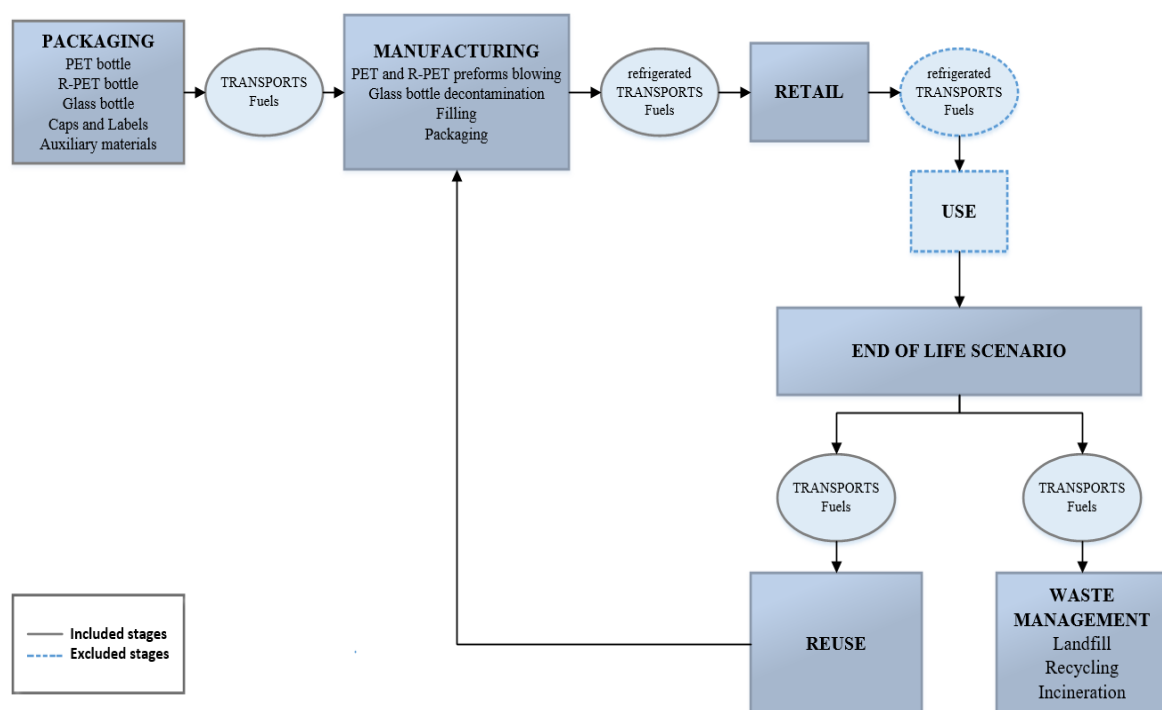


Figura 20: Confini del sistema (Stefanini, Borghesi, Ronzano, & Vignali, 2021)

Il latte considerato è confezionato negli stabilimenti Parmalat di Albano e Roma. In tali sedi arrivano le preforme di PET e di 50%PET-50% R-PET fornite da *Plasco S.p.a.* e, ipoteticamente, le bottiglie in vetro da *Verallia*, che le spedisce già formate. *Plasco*, a sua volta, si rifornisce dal produttore *Indorama* per quanto riguarda il granulo di PET vergine, più precisamente prodotto in due stabilimenti in Indonesia, e dall'azienda austriaca *PET Recycling Team* per il granulo di PET riciclato.

All'interno del packaging primario rientrano anche i processi produttivi dei tappi (in HDPE per le bottiglie polimeriche e in acciaio per le bottiglie in vetro) e le etichette in Polipropilene (PP). Per il packaging secondario e terziario, invece, è stata presa in considerazione la produzione di *octabins*, di scatole e interfalde di cartone, di sacchi e film in Polietilene a bassa densità (LDPE), di interfalde in PP e pallets in legno.

Il processo di *manufacturing* include, per le bottiglie polimeriche, la fase di soffiaggio delle preforme, sterilizzazione, decontaminazione, riempimento e confezionamento; mentre per quelle in vetro si riferisce ai processi di lavaggio, decontaminazione, riempimento e confezionamento.

Per quanto riguarda la logistica primaria, sono state utilizzate le distanze medie dai due stabilimenti di produzione del latte Parmalat di Albano e Roma verso i centri di distribuzione, mentre per la logistica secondaria è stata utilizzata la distanza media percorsa al giorno da un litro di latte; entrambi i dati sono stati forniti direttamente dall'azienda.

La fase d'uso della bottiglia è stata omessa dai confini del sistema, in accordo con la Product Category Rule del packaging (PCR, 2019), in quanto non è possibile risalire all'utilizzo che ne fa il consumatore.

Lo scenario di smaltimento dei materiali nella fase di fine vita è stato ricreato in accordo con i diversi consorzi (COREPLA, 2018), (COREVE, 2019), (COMIECO, 2019), (RILEGNO, 2019), (RICREA, 2020) e (CONAI, 2019), considerando il riciclo, l'incenerimento con recupero energetico e lo smaltimento in discarica. La bottiglia di vetro a rendere, oltre allo scenario di fine vita, presenta anche la fase di riuso (trasporto verso il centro di raccolta, trasporto per il rientro delle bottiglie di vetro negli stabilimenti produttivi di Parmalat e la fase di lavaggio e decontaminazione) e le ulteriori fasi di *manufacturing* e distribuzione, subendo un numero di cicli pari al numero di volte che si intende riutilizzare la bottiglia. In questo studio si considera una bottiglia di vetro a rendere all'ottavo utilizzo, ovvero al settimo ciclo di riuso: questo significa che si considererà l'impatto ad ogni ciclo di utilizzo, ma la produzione iniziale della bottiglia di vetro e del suo smaltimento finale saranno divise per gli otto usi.

5.2 Analisi di inventario

Parmalat ha fornito i dati concernenti il materiale, il peso e le caratteristiche tecniche del packaging primario, secondario e terziario. Partendo dal primario, la Tabella 15 riporta sia le caratteristiche tecniche per ogni soluzione, sia il dataset utilizzato per la modellazione sul software SimaPro, eseguita

tramite il database Ecoinvent 3.5. Per riprodurre il mix energetico utilizzato dal fornitore di PET vergine, *Indorama* (Indonesia), è stato selezionato dal database il processo di produzione del granulo di PET prodotto extra Europa (Rest of the World (RoW)), in cui è stata inserita unicamente l'energia elettrica dell'Indonesia (*Electricity, medium voltage {ID} market for*). Non è stato possibile ottenere informazioni dal riciclatore austriaco circa i consumi energetici di ritiro e riciclo del materiale, pertanto è stato considerato il PET come riciclato in Svizzera, dove avviene un processo simile, inserendo l'energia elettrica austriaca derivante sia da fonti fossili che rinnovabili (*Electricity, low voltage {AT} market for*).

L'azienda *Plasco* ha fornito il consumo necessario a stampare sia le preforme in PET che al 50% di R-PET: il processo di "*injection moulding*" è stato modificato nel database con il consumo fornito dall'azienda, inserendo il mix energetico italiano, visto che l'azienda produce le preforme ad Anagni. Lo scarto di lavorazione per la produzione delle preforme, fornita da *Plasco* per entrambi i materiali, è mediamente 1,7%: questo è riciclato all'interno del processo di formazione delle preforme stesse. Per il vetro, prodotto dall'azienda *Verallia* (Italia), è stato selezionato dal database il processo di produzione "*packaging glass, white*" prodotto in Europa, inserendo unicamente il mix energetico italiano (*Electricity, medium voltage {IT} market for*), e che contiene il 62,5% di vetro riciclato.

PACKAGING PRIMARIO	MATERIALE	ALTEZZA [MM]	DIAMETRO [MM]	PESO [G]	PROCESSO ECOINVENT 3.5 (CUT-OFF S)
Bottiglia	PET R-PET (50% riciclato)	249,7	84,5	22	- Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade {ID} production - Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade, recycled {AT} polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade, recycled - Injection moulding {RER} processing
	Vetro (62.5% vetro bianco riciclato)	263	86	400	- Packaging glass, white {IT} production
Tappo	HDPE	18	44,75	2,68	- Polyethylene, high density, granulate {RER} production - Injection moulding {RER} processing
	Acciaio	8,65	44,75	3,43	- Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {RER} production
Etichetta	PP	60	86	0,80	- Polypropylene, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production

Tabella 15: Caratteristiche tecniche dei packaging primari

Gli stabilimenti di Albano e Roma coprono rispettivamente il 43% e il 57% della produzione: tali percentuali sono state utilizzate anche per calcolare la quantità di materie prime in entrata negli stabilimenti, oltre che per la fase di distribuzione descritta in seguito.

Per quanto riguarda i trasporti in entrata e uscita, sono state fatte delle assunzioni riguardo il peso: in entrata i materiali sono trasportati considerando il chilogrammo unitario per i km percorsi e quindi rapportato al peso effettivo del singolo materiale utilizzato, mentre per la fase di distribuzione si considera direttamente il peso trasportato della singola bottiglia e i rispettivi materiali ausiliari, escludendo il peso del latte contenuto.

Parmalat, ricevute le preforme da *Plasco*, ne effettua il soffiaggio, sterilizzazione/decontaminazione, riempimento e confezionamento. Soffiaggio e riempimento sono effettuati per mezzo di una *Combi Sidel* presente in entrambi gli stabilimenti: i dati del consumo energetico sono stati rilevati direttamente dai macchinari; i consumi per la fase di sterilizzazione e decontaminazione sono stati forniti dall'azienda *Parmalat* basandosi sul macchinario *Sidel FMm 60 12k*.

Le bottiglie di vetro, invece, arrivate in *Parmalat* subiscono una prima fase di lavaggio, poi di sterilizzazione, decontaminazione e successivamente sono riempite e confezionate. I dati relativi ai consumi energetici della fase di lavaggio e di riempimento sono stati calcolati considerando una riempitrice *Sidel RMA*, mentre i consumi per la fase di sterilizzazione e decontaminazione sono gli stessi utilizzati per le bottiglie polimeriche con il macchinario *Sidel FMm 60 12k*. I dati in tabella fanno riferimento ai consumi energetici per bottiglia.

PACKAGING	FASI DI PRODUZIONE PARMALAT	QUANTITÀ	UNITÀ DI MISURA	MACCHINARIO
Preforme	Produzione PET – Indorama	4,2E-03		
	Produzione R-PET – Pet Recycling Team	7,6E-03	kWh/pz	-
	Produzione - Plasco	6,6E-03		
Bottiglie plastica - Albano	Soffiaggio, riempimento e confezionamento	3,3E-03	kWh/pz	Combi Sidel
Bottiglie plastica - Roma	Soffiaggio, riempimento e confezionamento	3,9E-03	kWh/pz	
Bottiglie plastica	Sterilizzazione “food steam”	1,98E-03	kg/pz	FMm 60 12k Sidel
	Decontaminazione H ₂ O ₂	8,73E-05	l/pz	
	Lavaggio	2,98E-01	l/pz	
Bottiglie di vetro	Decontaminazione H ₂ O ₂	8,73E-05	l/pz	FMm 60 12k Sidel
	Sterilizzazione “food steam”	1,98E-03	kg/pz	
	Riempimento e confezionamento	5,95E-04	kWh/pz	RMA Sidel

Tabella 16: Consumi energetici riferiti alle singole unità funzionali

Per quanto riguarda il packaging primario e secondario dei materiali in entrata e del prodotto finito pronto per la distribuzione, è possibile fare le seguenti considerazioni:

- Le preforme in PET vergine e con il 50% R-PET arrivano agli stabilimenti all'interno di octabins di cartone dalla capacità di 9570 pezzi;
- Le bottiglie di vetro sono trasportate in 704 pezzi per pallet in legno (1000x1200), mediante 4 interfalde in PP, un foglio di cartone ondulato e un film avvolgibile in LDPE;
- I tappi in HDPE sono trasportati per un totale di 3000 pezzi su un pallet di legno Epal, in 20 scatole di cartone, 20 sacchi in LDPE e mediante un film avvolgibile in LDPE;
- I tappi in acciaio sono trasportati per un totale di 3000 pezzi su un pallet di legno, con 30 scatole di cartone ondulato, 30 sacchi il LDPE e un film avvolgibile dello stesso materiale;
- Le etichette in PP sono trasportate per un totale di 20000 pezzi su un pallet di legno (1200x1200), contenute in 48 buste in LDPE e mediante 4 interfalde di cartoncino;
- Il latte confezionato nelle due tipologie di bottiglie polimeriche è trasportato in 480 pezzi per pallet, mediante 40 fardelli in LDPE, 4 interfalde di cartone e un film avvolgibile in LDPE;

- Il latte confezionato nelle bottiglie di vetro è trasportato per un numero pari a 456 pezzi per pallet, mediante 76 scatole di cartone, 4 interfalde di cartone e un film avvolgibile in LDPE.

Di seguito si riportano i dati dei materiali ausiliari considerati nell'analisi per le bottiglie polimeriche (Tabella 17) e per le bottiglie di vetro (Tabella 18).

PACKAGING	MATERIALE	PESO [g/UF]	DATI ECOINVENT
Octabin	Cartone	0,883	- Core board {RER} production
Pack III Tappo – Film avvolgibile	LDPE	0,1	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Tappo – Sacco	LDPE	0,253	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Tappo - Scatola	Cartone	7,8	- Corrugated board box {RER} market for corrugated board box
Pack III Tappo - Pallet	Legno	4	- EUR-flat pallet {GLO} market for
Pack III Etichetta - Busta	LDPE	0,0743	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Etichetta - Interfalda	Cartoncino	0,06	- Linerboard {RER} production, kraftliner
Pack III Etichetta - Pallet	Legno	1,25	- EUR-flat pallet {GLO} market for
Pack III Prodotto finito – Film termoretraibile	LDPE	2,5	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Prodotto finito – Film avvolgibile	LDPE	0,33	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Prodotto finito – Interfalde	Cartone	2,83	- Corrugated board box {RER} production
Pack III Prodotto finito – Pallet	Legno	52,1	- EUR-flat pallet {GLO} market for

Tabella 17: Materiali ausiliari per le bottiglie in PET ed R-PET

PACKAGING	MATERIALE	PESO [g/UF]	DATI ECOINVENT
Pack III Bottiglia - Interfalda	PP	8,18	- Polypropylene, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Bottiglia – Foglio superiore	Cartone	0,142	- Corrugated board box {RER} productio
Pack III Bottiglia – Film avvolgibile	LDPE	1,12	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Bottiglia – Pallet	Legno	34,1	- EUR-flat pallet {GLO} market for
Pack III Tappo – Film avvolgibile	LDPE	0,1	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Tappo – Sacco	LDPE	0,31	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Tappo - Scatola	Cartone	3,19	- Corrugated board box {RER} production
Pack III Tappo - Pallet	Legno	8,33	- EUR-flat pallet {GLO} market for
Pack III Etichetta - Busta	LDPE	0,0743	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Etichetta - Interfalda	Cartoncino	0,06	- Linerboard {RER} production, kraftliner
Pack III Etichetta - Pallet	Legno	1,25	- EUR-flat pallet {GLO} market for
Pack III Prodotto finito – Scatola + interfalda	Cartone	29	- Corrugated board box {RER} market for corrugated board box
Pack III Prodotto finito – Film avvolgibile	LDPE	1,1	- Polyethylene, linear low density, granulate {RER} production - Extrusion, plastic film {RER} production
Pack III Prodotto finito – Pallet	Legno	54,8	- EUR-flat pallet {GLO} market for

Tabella 18: Materiali ausiliari per le bottiglie in vetro

Per i trasporti, la Tabella 19 riporta i fornitori dei materiali di packaging e le distanze tra gli stessi e i due stabilimenti Parmalat. Le distanze sono dati primari ad eccezione del pallet, per il quale il dato è stato stimato; i trasporti dei packaging secondari e terziari per tappi ed etichette seguono le stesse distanze percorse.

PACKAGING	MATERIALE	FORNITORE	TIPOLOGIA DI TRASPORTO	PERCORSO	DISTANZA [Km]
Packaging primario	Granulo PET vergine	Indorama (Asia)	Nave transoceanica Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto via nave fino al porto di Napoli Trasporto su strada dal porto all'azienda Plasco	11820 165
	Granulo PET riciclato	PET Recycling Team (Austria)	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada all'azienda Plasco	1116
	Preforma	Plasco (Italia)	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada allo stabilimento di Albano Trasporto su strada allo stabilimento di Roma	633 62.4
	Bottiglia di vetro	Verallia (Italia)	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada allo stabilimento di Albano Trasporto su strada allo stabilimento di Roma	151 520
	Tappo HDPE	Affaba & Ferrari (Italia)	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada allo stabilimento di Albano Trasporto su strada allo stabilimento di Roma	539 78
	Tappo acciaio	Silgan (Germania)	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada allo stabilimento di Albano Trasporto su strada allo stabilimento di Roma	1087 1555
	Etichetta PP	Sidac (Italia)	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada allo stabilimento di Albano Trasporto su strada allo stabilimento di Roma	307 382
	Octabin	Cartonificio Fiorentino	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada Cartonificio – Plasco - Albano Trasporto su strada Cartonificio – Plasco - Roma	396.4 967
	Interfaldina cartone per bottiglie PET	Adda Ondulati	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada allo stabilimento di Albano Trasporto su strada allo stabilimento di Roma	55 611
	Packaging secondario e terziario	Scatola e interfaldina cartone bottiglie di vetro	Scatolificio Sandra	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada allo stabilimento di Albano Trasporto su strada allo stabilimento di Roma
	Film avvolgibile LDPE	Plastotecnica	Truck (32 ton, Euro 5)	Trasporto su strada allo stabilimento di Albano Trasporto su strada allo stabilimento di Roma	230 469
	Pallet prodotti finiti	-	Truck (32 ton, Euro 5)	Media ritorno da flusso logistico clienti/vettori	50

Tabella 19: Fornitori dei materiali di packaging e distanze percorse

Per la fase di distribuzione, sono stati considerati del camion refrigerati (0 - 4°C), in quanto il prodotto trasportato è pastorizzato. La distribuzione del prodotto confezionato si suddivide in trasporto primario, ovvero quello del prodotto fino ai magazzini/centri di distribuzione, e in trasporto secondario dai magazzini/centri di distribuzione ai punti vendita. Nel trasporto primario sono stati indicati 198 km percorsi in media per lo stabilimento di Albano e 346 km per lo stabilimento di Roma. Per il trasporto secondario sono stati considerati 45 km di media tra i centri di distribuzione e i punti vendita.

La Tabella 20 riporta le unità di processo dei trasporti. Nel database sono presenti solo due tipologie di mezzi refrigerati, quindi è stato utilizzato il mezzo più grande per la distribuzione primaria e quello più piccolo per il trasporto secondario.

TRASPORTO	PROCESSO ECOINVENT 3.5
In Entrata (distanza dai fornitori)	<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}</i> / <i>transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5</i> <i>Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}</i> / <i>market for</i>
Primario (distanza tra stabilimenti e magazzini di distribuzione)	<i>Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO5, carbon dioxide, liquid refrigerant, cooling {GLO}</i> / <i>transport, freight, lorry with refrigeration machine, 7.5-16 ton, EURO5, carbon dioxide, liquid refrigerant, cooling</i>
Secondario (distanza media tra magazzini di distribuzione e punti vendita)	<i>Transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO5, carbon dioxide, liquid refrigerant, cooling {GLO}</i> / <i>transport, freight, lorry with refrigeration machine, 3.5-7.5 ton, EURO5, carbon dioxide, liquid refrigerant, cooling</i>

Tabella 20: Tipologie di trasporti

Infine, si riportano le assunzioni fatte per lo scenario di smaltimento. Questo è stato considerato solo italiano, suddiviso in riciclo, recupero energetico, discarica e riutilizzo. Con l'approccio cut-off non sono considerati i co-prodotti, come ad esempio l'energia derivante dalla termovalorizzazione e nemmeno i benefici che derivano dalla sua produzione.

I trasporti medi considerati per lo smaltimento sono 100 km per il trasporto al centro di riciclo, 100 km per l'incenerimento e 100 km per la discarica, tutti con un mezzo di trasporto da 16-32 ton (*Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}*) *transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5*). Per ricavare le percentuali in Italia sono stati utilizzati i dati 2018 dei consorzi che promuovono e prediligono il riciclaggio dei diversi materiali (Tabella 21).

MATERIALI	RICICLO [%]	INCENERIMENTO [%]	DISCARICA [%]	FONTE
Plastica	44,5	43	12,5	(COREPLA, 2018)
Vetro	76,2	0	23,8	(COREVE, 2019)
Carta e cartone	81,1	7,6	11,3	(COMIECO, 2019)
Acciaio	78,6	0	21,4	(CIAL, 2018)
Legno	63,8	2,4	33,8	(RILEGNO, 2019)

Tabella 21: Scenario di smaltimento dei materiali

La Tabella 22 riporta le unità di processo utilizzate per ricreare gli scenari di smaltimento.

SMALTIMENTO	PROCESSO ECOINVENT 3.5
Riciclo	<ul style="list-style-type: none"> - PET (waste treatment) {GLO} recycling of PET - PE (waste treatment) {GLO} recycling of PE - PP (waste treatment) {GLO} recycling of PP - Core board (waste treatment) {GLO} recycling of core board - Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron - Packaging glass, white (waste treatment) {GLO} recycling of packaging glass, white
Incenerimento	<ul style="list-style-type: none"> - Waste polyethylene {CH} treatment of, municipal incineration - Waste polyethylene terephthalate {CH} treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration - Waste polypropylene {CH} treatment of, municipal incineration - Waste paperboard {CH} treatment of, municipal incineration - Waste wood, untreated {RoW} treatment of waste wood, untreated, municipal incineration - Waste glass {CH} treatment of, municipal incineration - Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration
Discarica	<ul style="list-style-type: none"> - Waste polyethylene terephthalate {CH} treatment of waste polyethylene terephthalate, sanitary landfill - Waste polyethylene {CH} treatment of, sanitary landfill - Waste polypropylene {CH} treatment of, sanitary landfill - Waste paperboard {CH} treatment of, sanitary landfill - Waste wood, untreated {CH} treatment of, sanitary landfill - Waste glass {CH} treatment of, inert material landfill - Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill

Tabella 22: Processi per lo scenario di smaltimento dei materiali

Lo scenario di riutilizzo della bottiglia di vetro a rendere è stato ricreato considerando il trasporto verso il centro di raccolta per una distanza stimata di 50 km con un mezzo trasporto da 16-32 ton e il trasporto di ritorno agli stabilimenti di Albano e Roma per una distanza pari alla distribuzione primaria (198 km per Albano e 346 km per Roma), con lo stesso mezzo di trasporto, ma non refrigerato. Per questo scenario si è considerata, inoltre, la fase di lavaggio delle bottiglie, in cui si utilizza elettricità acqua, vapore industriale e soda (Tabella 23).

PACKAGING	FASI DI RIUTILIZZO PARMALAT	QUANTITÀ	UNITÀ DI MISURA	MACCHINARIO
Bottiglie di vetro a rendere	Elettricità	2,94E-03	kWh/pz	Washer Sidel
	Acqua	2,78E-01	l/pz	
	Vapore industriale	19,8E-03	kg/pz	
	Soda	1,26E-03	l/pz	

Tabella 23: Scenario di riuso per le bottiglie di vetro a rendere

Una bottiglia di vetro a rendere all’ottavo utilizzo ha subito sette cicli di lavaggio: per questa soluzione si considera un ottavo dell’impatto della produzione della bottiglia di vetro e di tutti i processi ad essa connessi: trasporto in entrata della bottiglia, materiali ausiliari per il trasporto e lo smaltimento finale della bottiglia. Tutti gli altri processi sono considerati come “interi”, in quanto l’obiettivo dello studio è confrontare le quattro tipologie di bottiglie da un utilizzo.

5.3 Risultati di impatto ambientale

Il metodo utilizzato per il calcolo dell’impatto ambientale è il *ReCiPe 2016 Midpoint (H)*, dal quale sono state estratte le categorie maggiormente rilevanti per lo studio (Baldo, Marino, & Rossi, 2008), ovvero:

- *Global warming (kg CO₂ eq)*: considera l’aumento nell’atmosfera di gas climalteranti che generano l’effetto serra (quali l’anidride carbonica, l’ozono, il metano, ecc.), con conseguente aumento delle temperature. Il fenomeno coinvolge l’intero pianeta ed è quindi da considerarsi un problema di scala globale. L’unità di misura è kg di CO₂ equivalente: i gas serra sono convertiti in equivalenti CO₂ con fattori GWP, considerando un intervallo di 100 anni (GWP100).
- *Stratospheric ozone depletion (kg CFC-11 eq)*: considera la diminuzione della fascia di ozono presente nella stratosfera. L’ozono (O₃) è necessario per assorbire la radiazione ultravioletta del Sole, pericolosa per l’uomo in quanto capace di danneggiare il DNA determinando l’aumento di tumori della pelle. È l’inquinamento prodotto da composti come clorofluorocarburi (CFC), radicali liberi o cloruri, che induce un assottigliamento dello schermo ozonosferico.
- *Terrestrial acidification (kg SO₂ eq)*: rappresenta l’effetto causato sia da ossidi di zolfo (SOx) e sia da ossidi di azoto (NOx), presenti in atmosfera per cause naturali e per effetto delle attività umane: quando tali gas entrano in contatto con l’acqua atmosferica, danno luogo alla formazione di acidi prima della deposizione, con conseguente acidificazione delle precipitazioni.
- *Fossil resource scarcity (kg oil eq)*: rappresenta il consumo delle risorse fossili necessarie allo svolgimento dei processi.
- *Water consumption (m³)*: rappresenta il consumo delle risorse idriche connesse all’unità funzionale considerata.

I risultati mostrano che, da un punto di vista ambientale, la migliore soluzione di packaging per contenere 1 litro di latte è la bottiglia con il 50% di R-PET, mentre la più impattante è la bottiglia di vetro a perdere (Tabella 24).

CATEGORIA D'IMPATTO	UNITÀ	PET	R-PET	VETRO A PERDERE	VETRO A RENDERE (8 utilizzi)
Global warming	kg CO ₂ eq	1,86E-01	1,52E-01	4,30E-01	2,07E-01
Stratospheric ozone depletion	kg CFC ₁₁ eq	6,17E-08	5,72E-08	1,98E-07	1,32E-07
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	5,63E-04	4,28E-04	1,59E-03	6,54E-04
Fossil resource scarcity	kg oil eq	7,12E-02	5,33E-02	1,41E-01	6,76E-02
Water consumption	m ³	1,59E-03	1,24E-03	3,28E-03	1,57E-03

Tabella 24: Impatti ambientali delle quattro soluzioni di confezionamento divisi per categoria

Di seguito si analizzano singolarmente gli indicatori, evidenziando quali sono le fasi maggiormente impattanti: queste ultime sono state divise in *bottiglia* (la produzione della stessa), *tappo*, *etichetta*, *materiali ausiliari*, *trasporto in entrata* (delle materie prime e dei materiali di packaging), *fase di packaging* (produzione all'interno degli stabilimenti Parmalat, operazioni di soffiaggio, decontaminazione, sterilizzazione, riempimento e confezionamento), *distribuzione* (trasporto in uscita del prodotto, considerando la logistica primaria e secondaria), *fase di riutilizzo* (trasporto al centro di raccolta del vetro a rendere, trasporto di ritorno verso gli stabilimenti produttivi Parmalat e consumi energetici e materiali relativi alla fase di riutilizzo) e *scenario di smaltimento finale* (End of Life (EoL)).

Secondo la *Global Warming Potential*, le fasi più impattanti risultano essere (Figura 21):

- Bottiglia: la fase di produzione della bottiglia di vetro risulta significativamente impattante a causa delle alte temperature delle fornaci nelle vetrerie (circa 1500°C); la produzione della bottiglia di vetro a perdere impatta 2,5 volte in più rispetto al PET e circa 4 volte in più della bottiglia in R-PET.
- Materiali ausiliari e trasporto delle materie prime: maggiori per le soluzioni in vetro, nonostante si riferiscono ad un numero inferiore (704 pz/pallet) rispetto al numero di preforme trasportate (9570 pz/pallet), a parità di numero di tappi ed etichette trasportate, eccetto una piccola differenza numerica tra le scatole e i sacchi per il trasporto di tappi polimerici e i tappi di acciaio.
- Tappo: quello in acciaio della bottiglia di vetro ha impatto doppio rispetto a quello in HDPE delle bottiglie polimeriche.
- Distribuzione: a parità di distanza percorsa per la logistica primaria e secondaria, i camion per il vetro trasportano un carico nettamente più pesante (400 g rispetto 22 g).

Per la bottiglia di vetro a rendere all'ottavo utilizzo, si nota un miglioramento nella fase di produzione della bottiglia e del suo smaltimento, in quanto sono un ottavo dell'impatto della bottiglia di vetro a rendere; la fase di riutilizzo, però, risulta avere un impatto pari a 0,0382 kg CO₂eq.

La bottiglia di PET vergine e la bottiglia con il 50% di PET riciclato risultano simili in termini di impatto totale, ma l'impatto della produzione della bottiglia con il materiale riciclato risulta quasi dimezzato grazie all'utilizzo di quest'ultimo. Di seguito si mostrano graficamente i risultati.

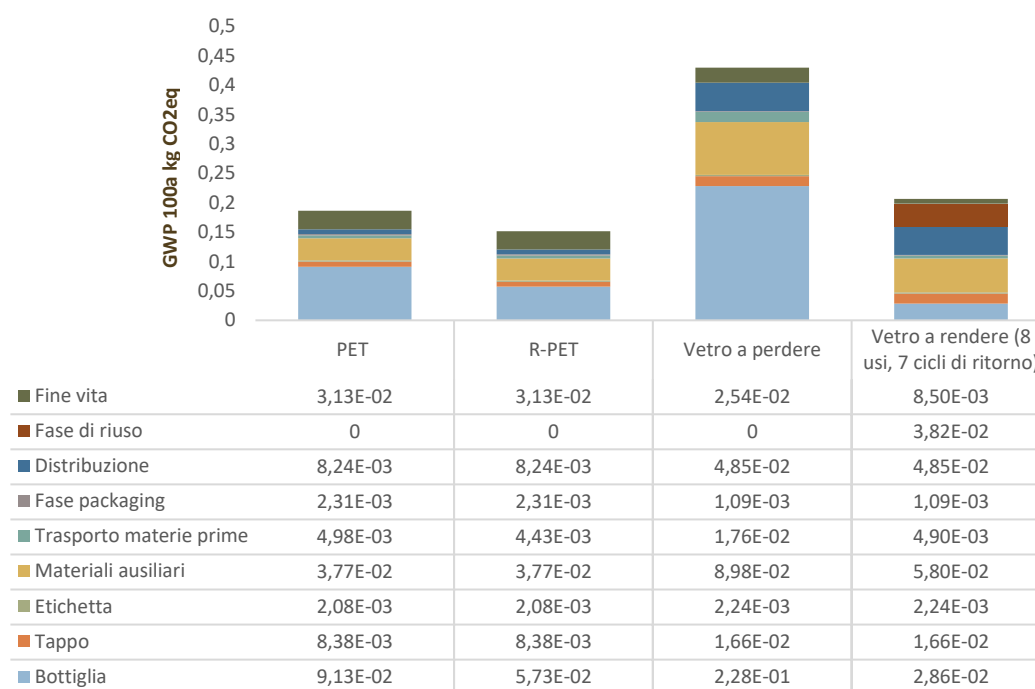


Figura 21: Impatto global warming per fasi; riadattato da (Stefanini, Borghesi, Ronzano, & Vignali, 2021)

Secondo la *stratospheric ozone depletion* (Figura 22), le bottiglie polimeriche risultano le soluzioni con l'impatto minore; esse hanno circa lo stesso contributo ambientale, ma nel caso della bottiglia con R-PET, si ottiene un impatto minore nella produzione. Le fasi maggiormente impattanti sono:

- Bottiglia di vetro (produzione);
- Materiali ausiliari;
- Distribuzione (logistica primaria e secondaria);

La riduzione dell'ozono stratosferico è dovuta principalmente ai composti chimici appartenenti al gruppo dei clorofluorocarburi: nelle fasi sopracitate avviene l'emissione di CFC, HCFC e altri composti contenenti cloro e bromo che quindi contribuiscono a ridurre lo strato di ozono.

Le fasi maggiormente impattanti secondo la categoria *Terrestrial Acidification* (Figura 23) sono:

- Bottiglia di vetro;
- Materiali ausiliari;
- Tappo in acciaio;

in quanto maggiori responsabili della produzione di NO_x, NH₃ e SO₂ che aumentano l'acidità del suolo.

Le bottiglie in PET e R-PET risultano ancora una volta le soluzioni con l'impatto minore.

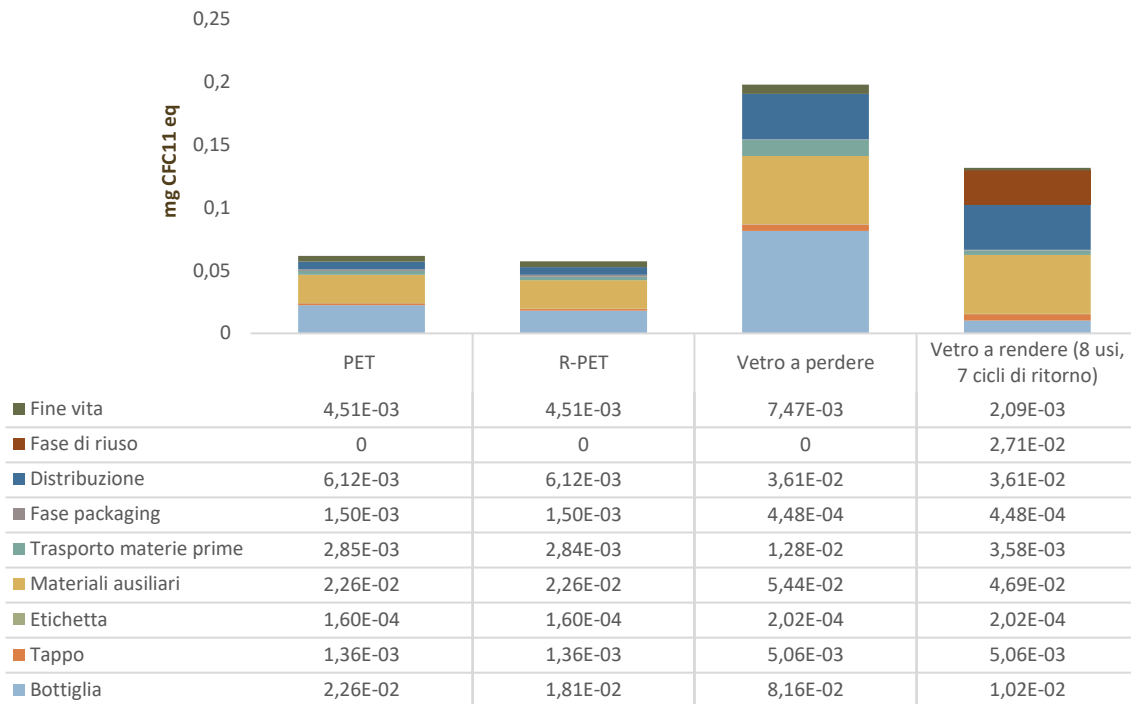


Figura 22: Impatto stratospheric ozone depletion per fasi

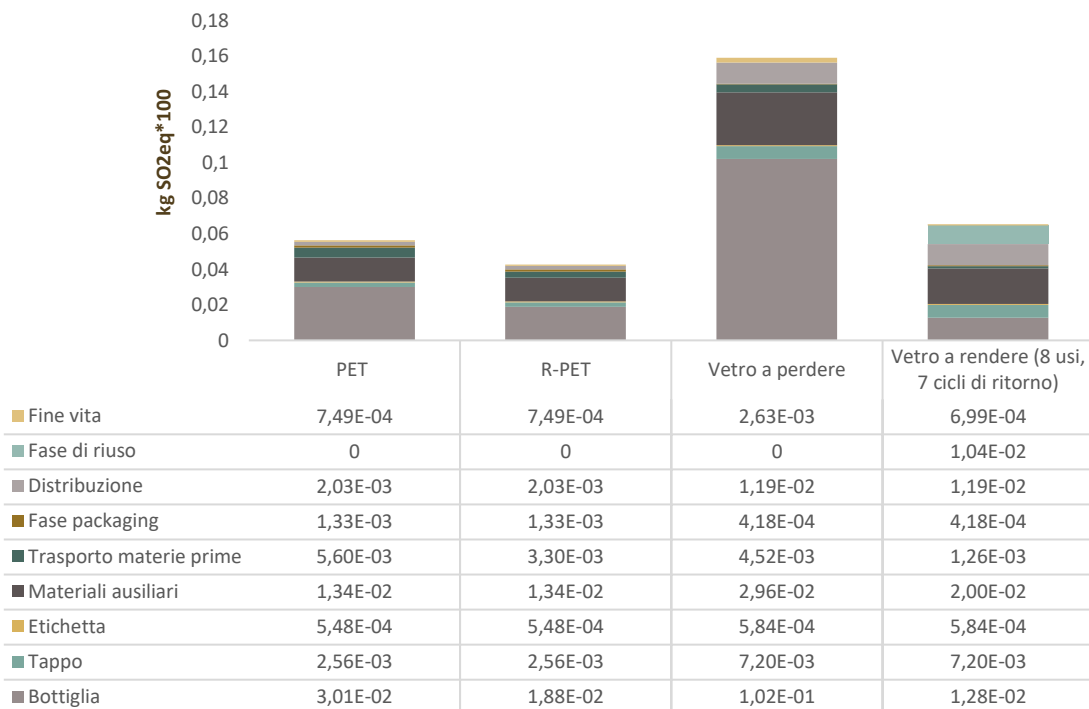


Figura 23: Impatto terrestrial acidification per fasi

Secondo la Fossi Resource Scarcity (Figura 24), la produzione della bottiglia di vetro ha un elevato impatto a causa dell'utilizzo di combustibili fossili per raggiungere le alte temperature richieste dai processi; i materiali ausiliari delle soluzioni in vetro contribuiscono maggiormente, perché ad ogni viaggio trasportano meno bottiglie rispetto al numero delle preforme in PET e R-PET.

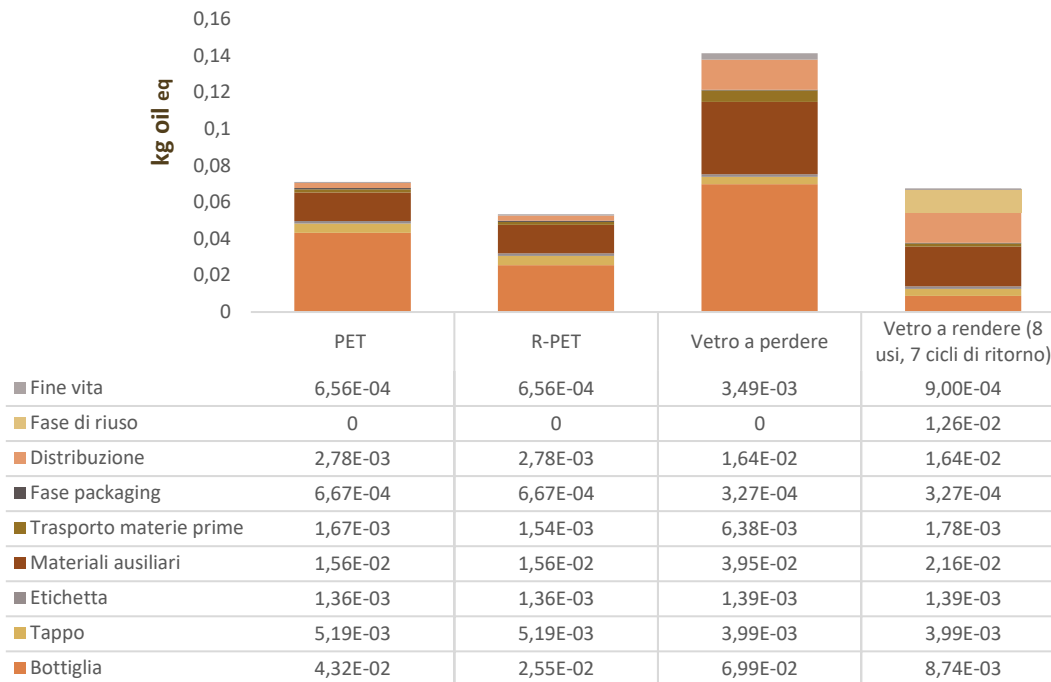


Figura 24: Impatto fossil resource scarcity per fasi

Anche un elevato consumo idrico si registra durante la produzione della bottiglia di vetro, in cui l'acqua è utilizzata soprattutto per i processi di raffreddamento; seguono i materiali ausiliari e la produzione del tappo in acciaio. La fase di riutilizzo ha un consumo idrico pari a 0,367 litri di acqua utilizzata per il lavaggio di una bottiglia. Le bottiglie polimeriche, invece, necessitano di meno acqua durante la produzione, essa utilizzata solamente per la fase di raffreddamento durante lo stampaggio a iniezione.

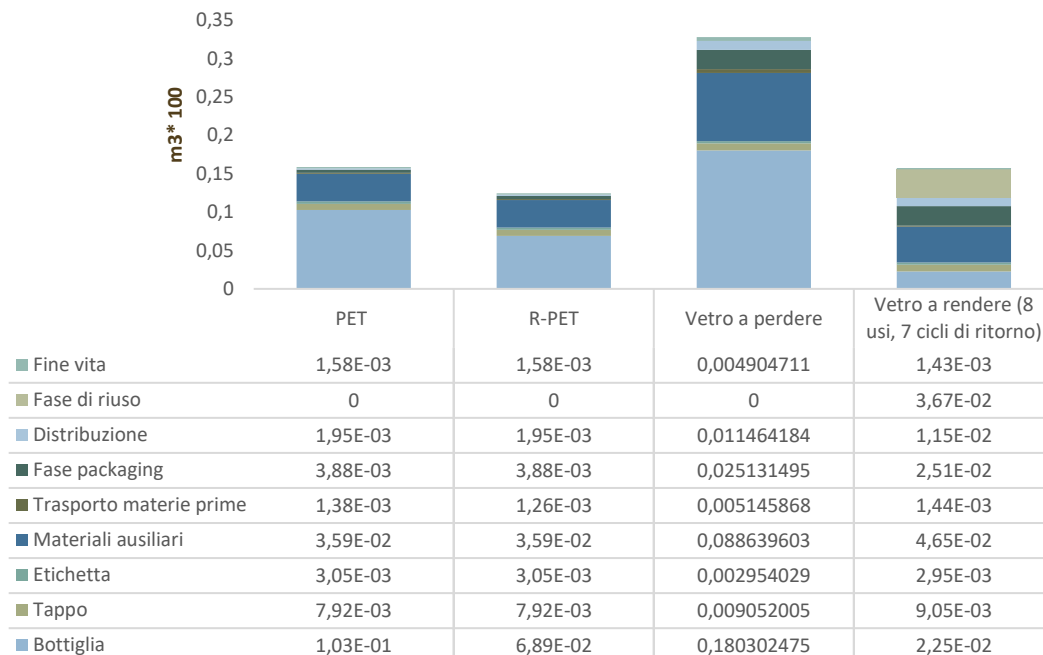


Figura 25: Impatti water consumption per fasi

5.4 Discussione sul numero di riutilizzi del vetro a rendere

Come ultima analisi, ci si è interrogati sulla convenienza dell'utilizzo di una bottiglia di vetro a rendere. Nello studio sono stati considerati 8 cicli di riutilizzo, ma i risultati sarebbero cambiati se fosse stata presa in considerazione una bottiglia con 20 riutilizzi (anche se praticamente infattibile nella realtà a causa di danneggiamenti o rotture della stessa)? Per rispondere a tale domanda, sono stati elaborati i seguenti grafici che mostrano, per ogni categoria, gli impatti ad ogni utilizzo, all'aumentare del numero di riutilizzi. Come si nota, gli impatti della bottiglia riutilizzata tendono asintoticamente al contributo delle fasi connesse al riuso (materiali ausiliari con il loro smaltimento, trasporto, lavaggio, produzione in Parmalat e distribuzione del prodotto finito); ovvero le fasi che all'interno dei confini del sistema si ripetono per un numero di cicli pari al numero di riutilizzi.

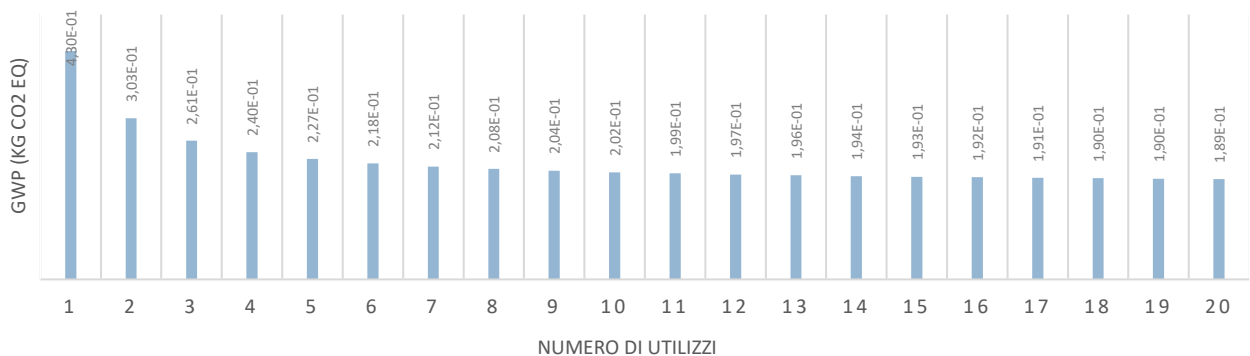


Figura 26: Global warming potential; riadattato da (Stefanini, Borghesi, Ronzano, & Vignali, 2021)

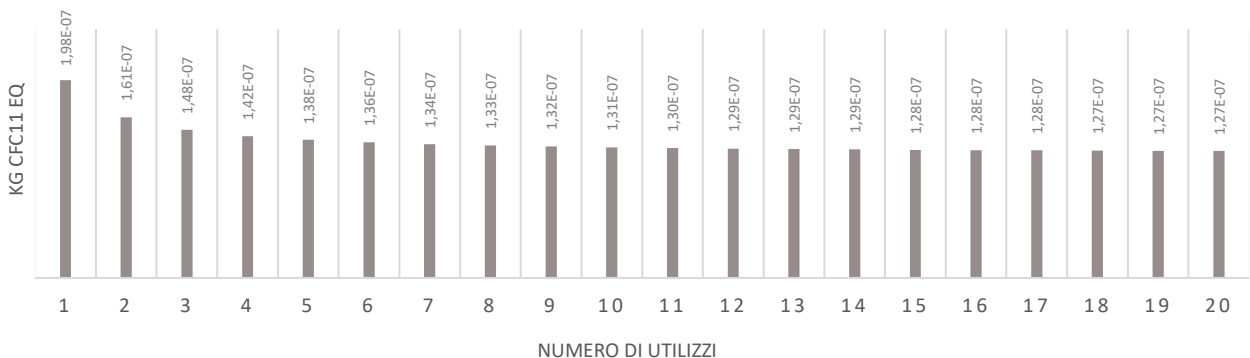


Figura 27: Stratospheric ozone depletion

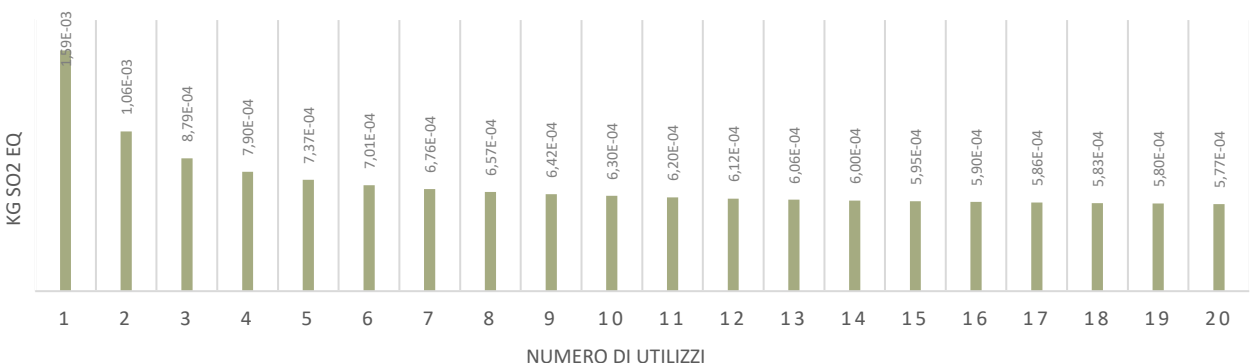


Figura 28: Terrestrial acidification

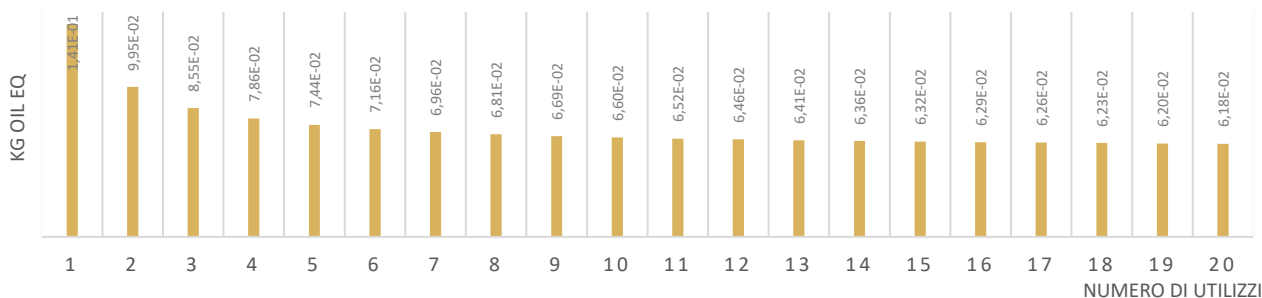


Figura 29: Fossil resource depletion

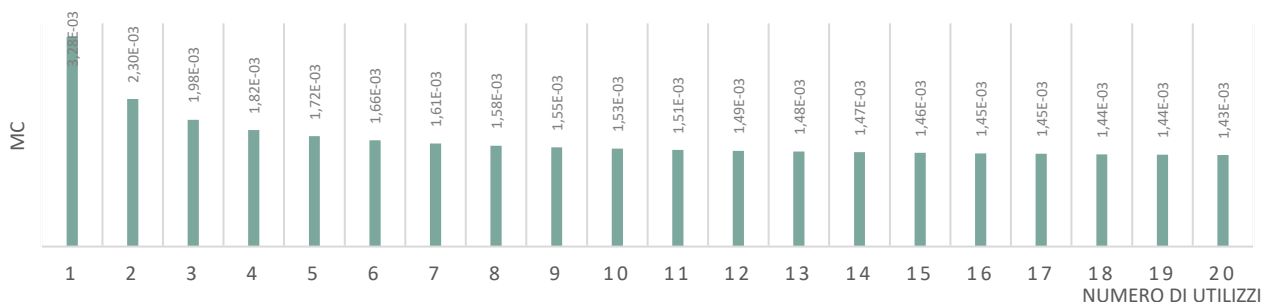


Figura 30: Water consumption

Confrontando i risultati per la soluzione in PET, R-PET e vetro a perdere di Tabella 24, con il valore della bottiglia di vetro a rendere al ventesimo ciclo (ultimo istogramma da Figura 26 a 30), si evince che, secondo *global warming potential*, *stratospheric ozone depletion* e *terrestrial acidification*, l'impatto di una bottiglia di PET monouso risulta minore rispetto all'impatto di un ciclo di una bottiglia utilizzata 20 volte. Per la *fossil resource scarcity* e la *water consumption* bisognerebbe riutilizzare la bottiglia di vetro 7 volte per avere un impatto minore o uguale alla bottiglia di PET.

Considerando un numero ancora più alto di cicli, quasi "infinito", numero puramente ipotetico in quanto non realizzabile fisicamente, è stato calcolato il valore asintotico del riutilizzo di vetro, connesso alle sole fasi di riuso. Il confronto con le altre soluzioni di confezionamento monouso (Tabella 25), prova che anche in questo caso la bottiglia in R-PET risulterebbe meno impattante; secondo la *stratospheric ozone depletion* la bottiglia di vetro riutilizzata ha un impatto superiore anche rispetto alla bottiglia in PET vergine, mentre per gli altri indicatori gli impatti risultano di poco inferiori.

CATEGORIA D'IMPATTO	UNITÀ	PET	R-PET	VALORE ASINTOTICO DI RIUTILIZZO DEL VETRO
Global warming	kg CO ₂ eq	1,86E-01	1,52E-01	1,76E-01
Stratospheric ozone depletion	kg CFC ₁₁ eq	6,17E-08	5,72E-08	1,23E-07
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	5,63E-04	4,28E-04	5,23E-04
Fossil resource scarcity	kg oil eq	7,12E-02	5,33E-02	5,76E-02
Water consumption	m ³	1,59E-03	1,24E-03	1,33E-03

Tabella 25: Confronto delle soluzioni polimeriche con una bottiglia di vetro a rendere ipoteticamente riutilizzata infinite volte

5.5 La risposta finale al dibattito “plastica o vetro?”

Concludendo, la sostituzione della plastica con il vetro come materiale di confezionamento per il latte non è la risposta per ridurre gli impatti potenziali su effetto serra, assottigliamento dello strato di ozono, acidificazione, utilizzo di acqua ed esaurimento di fonti fossili. È invece importante smaltire correttamente i materiali di imballaggio, investendo in tecnologie di riciclo e riutilizzo, a prescindere dalla tipologia di materiale. Infatti, la ricerca ha dimostrato che si possono ottenere grandi risparmi ambientali utilizzando bottiglie realizzate con materiali di riciclo. Si precisa inoltre che lo studio prevedeva solo un 50% di R-PET nella bottiglia, ma oggi i regolamenti consentono di arrivare fino al 100% di R-PET con conseguente ulteriore abbassamento dell’impatto ambientale rispetto alle soluzioni concorrenti. In futuro, sarà necessario limitare la dispersione dei rifiuti, incentivando gli imballaggi a rendere e sensibilizzando le persone verso problematiche ambientali. Tematiche verso le quali, infatti, stanno puntando sempre di più i Comuni, le Regioni e le Nazioni.

6 La percezione dei consumatori: il packaging ritenuto sostenibile

Come visto, oggi molte aziende si impegnano nel ridurre l'impatto dei propri packaging sull'ambiente, spinti dalle attuali tendenze del mercato, cercando di soddisfare le richieste dei propri clienti ormai attenti al rispetto del Pianeta. Ma la percezione di "packaging ambientalmente sostenibile" dei consumatori è corretta? In altre parole, ciò che loro ritengono eco-sostenibile, si conferma tale con risultati scientifici e con le analisi Life Cycle Assessment? Questo capitolo risponderà a tale quesito.

La ricerca presentata è una piccola parte di un progetto regionale di cui ho fatto parte nei primi mesi del mio Dottorato. In collaborazione con un caseificio dell'Emilia-Romagna, ho condotto un'indagine per comprendere la percezione dei consumatori circa le tematiche di "prodotto biologico" e "packaging eco-sostenibile". Lo studio si è focalizzato su un loro prodotto, il Parmigiano Reggiano biologico grattugiato o in scaglie, attualmente venduto in packaging polimerico multistrato. Vista l'apparente demonizzazione della plastica da parte dei consumatori, l'azienda era interessata nel trovare una soluzione di confezionamento alternativa, in vetro, da sottoporre a loro valutazione. Tramite il CIPACK, è stato proposto un vasetto di vetro con capsula di alluminio, contenente un assorbitore di ossigeno per evitare la veloce ossidazione ed il conseguente deterioramento del Parmigiano Reggiano biologico grattugiato. È stata condotta un'indagine per comprendere l'opinione dei consumatori su tale soluzione e sul consumo di Parmigiano Reggiano biologico, eseguendo poi un'analisi LCA per confrontare il packaging attuale e quello proposto. Il presente capitolo approfondirà tali aspetti, correlandoli alle altre ricerche svolte durante il Dottorato, evidenziando l'esistenza di un divario tra la percezione dei consumatori e i reali dati di impatto dei materiali di confezionamento, proponendo infine soluzioni per rendere i cittadini più informati e per fare scelte più consapevoli ai punti vendita.

I risultati complessivo del lavoro sono stati presentati a Fico Eataty World in un seminario aperto al pubblico (Bio Sant'Anna, 2020). La creazione del questionario è stata presentata ad una conferenza del settore di Ingegneria Industriale (Stefanini & Vignali, 2020), ed è stata estesa dando vita ad una pubblicazione su rivista scientifica (Borghesi, Stefanini, & Vignali, 2021).

6.1 Impostazione dello studio: la ricerca di nuove soluzioni di confezionamento

Nel pieno territorio della Food Valley, un'azienda da 70 anni produttrice di Parmigiano Reggiano biologico, è diventata nel corso del tempo sempre più attenta al rispetto dell'ambiente, degli animali e delle persone, fino a collaborare con il Centro Interdipartimentale per il Packaging dell'Università di Parma ed il Centro Ricerche Produzioni Animali (CRPA) di Reggio Emilia nel progetto Oltrebio, con l'obiettivo di creare una filiera che vada oltre al biologico, e che sia sostenibile ambientalmente a partire dal campo, passando dall'allevamento, per arrivare allo stabilimento in cui assicurare elevati standard di benessere delle bovine da latte (Bio Sant'Anna, 2022). In tale progetto, il centro CIPACK è stato responsabile non solo della valutazione delle emissioni di gas serra e del consumo idrico connessi alle fasi sopra citate, ma anche dell'identificazione di un packaging alternativo per confezionare il Parmigiano Reggiano Biologico prodotto dall'azienda, oggetto di tale capitolo. La soluzione di confezionamento inizialmente utilizzata dall'azienda consisteva in un packaging polimerico multistrato (PET-EVOH-PE), capace di conservare il Parmigiano Reggiano biologico grattugiato fino a 3 mesi, grazie all'atmosfera modificata al suo interno. Tuttavia, la casearia era interessata alla valutazione di un packaging alternativo, in vetro. Come soluzione è stata dunque proposta una confezione composta da un vasetto di vetro ed un tappo di alluminio contenente un assorbitore di ossigeno che ha consentito di ottenere una shelf life simile al packaging polimerico. Successivamente, si è deciso di sottoporre a valutazione dei consumatori il packaging proposto, cogliendo l'occasione per indagare la loro conoscenza relativa alle caratteristiche di prodotti biologici e alla percezione che essi hanno riguardo l'eco-sostenibilità delle confezioni. A tale scopo, è stato creato un questionario composto da 21 domande:

- la prima parte ha raccolto le caratteristiche dei rispondenti, come l'età, la regione italiana di provenienza ed il livello di istruzione;
- la seconda parte indagava la loro percezione di prodotto biologico e di packaging eco-sostenibile;
- la terza ed ultima parte, invece, investigava quale tipologia di confezionamento i consumatori percepiscono come più sostenibile.

Poiché questo capitolo non mira a descrivere il progetto nella sua interezza, ma vuole focalizzarsi sulla parte relativa alla percezione dei consumatori, per una completa lettura delle domande del questionario si rimanda direttamente alla pubblicazione su rivista (Borghesi, Stefanini, & Vignali, 2021). Il quiz è stato creato su Google Moduli per ottenere un link facilmente condivisibile ed inviabile via e-mail o tramite social media ai consumatori; dopo circa 2 settimane la raccolta delle risposte è stata interrotta. Parallelamente a tale indagine tra i consumatori, è stata svolta tramite analisi Life Cycle Assessment una comparazione del packaging polimerico e del vaso in vetro richiesto, al fine di verificare scientificamente quale opzione fosse la più eco-sostenibile.

6.2 Analisi e discussione dei risultati: il gap tra la percezione e la realtà

Complessivamente sono state raccolte 333 risposte. Il campione è risultato piuttosto variegato: il 51% dei consumatori ha dichiarato di avere un'età compresa tra i 26 e 40 anni, il 19% più di 50 e il 30% sotto i 26. La maggioranza è localizzata in Emilia-Romagna (51%), seguita da Lombardia (27%).

Un primo commento desumibile a partire dai risultati è che l'aspetto che guida un consumatore nella scelta di un prodotto alimentare al supermercato è la qualità del prodotto stesso, ritenuta anche più importante del suo prezzo. Al contrario, il rispetto del benessere animale ed il basso impatto ambientale risultano complessivamente per nulla o poco rilevanti nella scelta (Figura 31).

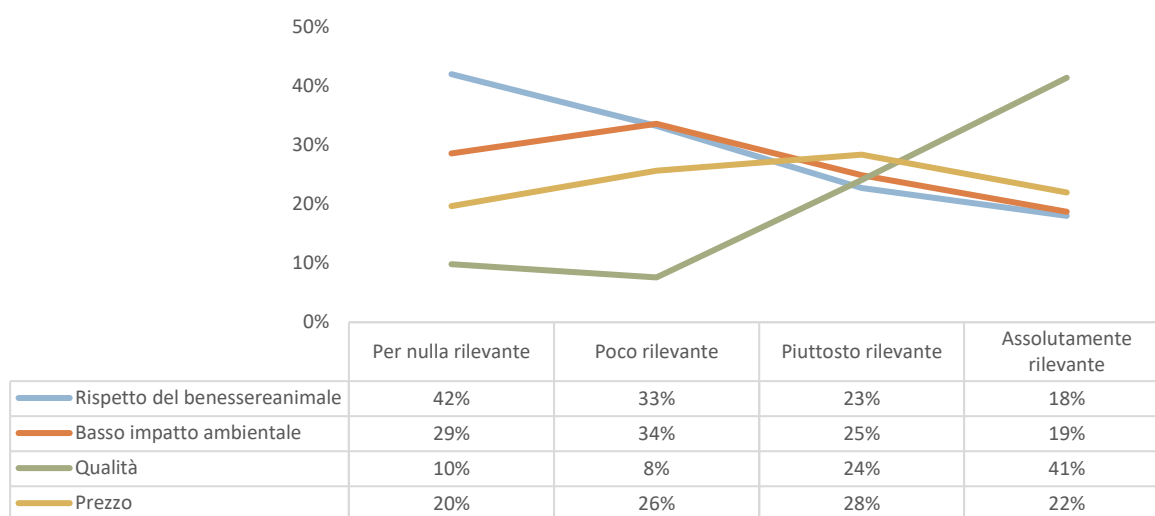


Figura 31: I drivers di scelta di un prodotto al supermercato tra benessere animale, impatto ambientale, qualità e prezzo

Approfondendo il tema del biologico, nonostante il 67% si sia dimostrato informato sulla “teoria”, risultando consapevole della corretta definizione di “prodotto bio”, nella “pratica” afferma però di avere difficoltà nel distinguere, in foto e sullo scaffale di vendita, un Parmigiano Reggiano biologico da uno tradizionale. Questo dato è indice di un problema per le aziende, che dunque investono molteplici risorse per differenziare un prodotto che poi non viene riconosciuto dai destinatari. Per favorire la distinzione, i risultati suggeriscono di utilizzare packaging verdi o trasparenti, poiché più collegati al concetto di biologico secondo la percezione degli intervistati.

I temi di biologico e di eco-sostenibilità risultano inoltre collegati per più della metà degli intervistati che infatti afferma di preferire che un prodotto bio sia confezionato in un packaging più sostenibile. Ma in che modo essi tengono conto l'impatto ambientale dei packaging nella scelta dei prodotti sugli scaffali? Secondo il 51% la soluzione migliore consiste nel limitare l'acquisto di imballaggi di plastica. La restante parte si divide tra il cercare di comprare prodotti sfusi quando possibile, oppure sceglie prodotti in packaging riciclabile, biodegradabile o compostabile (Figura 32). Commentando il risultato, si potrebbe sottolineare che tuttavia non sempre un packaging biodegradabile o compostabile è la soluzione migliore: il risultato varia molto in base alla categoria di impatto considerata. Inoltre, non

sempre l'assenza di packaging è la soluzione migliore, poiché aumenta quello che è lo spreco alimentare non riuscendo a conservare a lungo il prodotto.

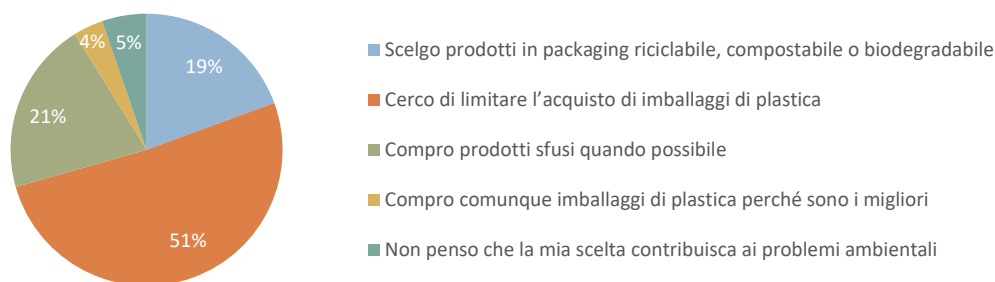


Figura 32: Il parere degli intervistati – risposte alla domanda "Nella scelta di un prodotto al supermercato, come tieni conto dell'impatto ambientale del packaging?"

In riferimento alle confezioni polimeriche (Figura 33), il 53% degli intervistati sostiene che i packaging riciclabili al 100% siano più rispettosi dell'ambiente rispetto alle confezioni in plastica riciclata, o plastica standard (che non ha ottenuto alcun voto); mentre il 32% sostiene che per rispettare l'ambiente bisognerebbe comprare packaging non plastici. Volendo commentare il risultato, senz'altro andrebbe sottolineato che in questa risposta si nota una discrepanza tra la percezione delle persone, e la realtà. Infatti, non sempre un prodotto riciclabile è davvero riciclato al suo fine vita: dipende da diverse variabili, ad esempio da come il consumatore lo gestisce, ovvero se lo smaltisce correttamente nella raccolta differenziata oppure se viene disperso nell'ambiente; inoltre anche se raccolto correttamente, il Comune di residenza potrebbe non possedere gli impianti necessari per la lavorazione di quel prodotto o quel materiale, interrompendo quindi la catena del riciclo e smaltendolo ad incenerimento, o peggio, in discarica. Invece, un prodotto che contiene una percentuale di materiale riciclato, ha già consentito di ridurre l'impatto ambientale rispetto ad una confezione vergine (Stefanini, Borghesi, Ronzano, & Vignali, 2021), e potrebbe dunque essere considerato migliore rispetto all'alternativa precedente.

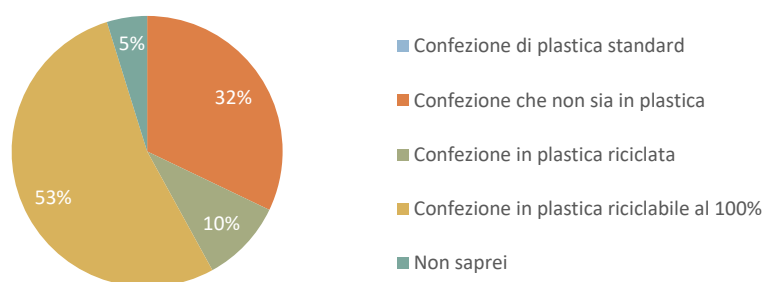


Figura 33: Il parere degli intervistati – risposte alla domanda "Quale fra queste alternative di packaging polimerico preferisci al fine di rispettare di più l'ambiente?"

Continuando l'analisi delle risposte, un altro dato fa riflettere: tra tre alternative mostrate (Figura 34), il 17% degli intervistati attesta di individuare nella vaschetta di plastica mono-materiale la soluzione più sostenibile per il Parmigiano Reggiano grattugiato o in scaglie, mentre il 29% preferirebbe una

busta di plastica multimateriale. Ancora una volta, questo risultato potrebbe essere discutibile da un punto di vista scientifico: un materiale multistrato è difficilmente riciclabile oggi, a causa della complicata separazione dei materiali, e risulterebbe dunque più impattante nello smaltimento finale rispetto ad un monomateriale, oggi più facilmente riciclabile.

Comunque, tra le tre alternative proposte la vittoria è schiacciante: ben il 54% dei rispondenti sceglie il vasetto di vetro con tappo di alluminio come migliore soluzione da un punto di vista ambientale, ritenendola altamente ecologica ed esteticamente accattivante, seppur non molto pratica da un punto di vista del trasporto e dell'utilizzo, a causa del suo peso e volume (Figura 35).



Figura 34: Il parere degli intervistati – risposte alla domanda “Quale fra queste possibili soluzioni ti sembra più “bio” per il confezionamento del Parmigiano Reggiano Biologico grattugiato o in scaglie?”

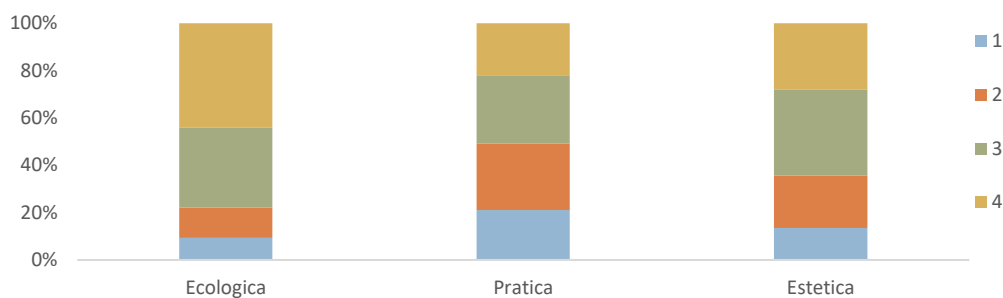


Figura 35: Il parere degli intervistati – risposte alla domanda “Al posto del tradizionale packaging di plastica per il Parmigiano Reggiano biologico grattugiato o in scaglie potrebbe essere utilizzato un vasetto di vetro (foto). Da 1 a 4, tale scelta quanto la ritieni ecologica, pratica ed estetica da 1 a 4?”

Questo risultato è estremamente in accordo con la letteratura: ad esempio, in una simile indagine la metà degli intervistati afferma di comprare oggi molti più packaging in vetro rispetto al 2016, e ben 9 consumatori su 10 percepiscono tale materiale come la migliore soluzione di confezionamento per rispettare l'ambiente (Boucher, 2020). Tuttavia, è davvero così da un punto di vista scientifico? Già nel capitolo precedente, l'LCA ha dimostrato che nel caso delle bottiglie per prodotti liquidi, è la plastica, soprattutto riciclata, ad essere meno impattante secondo molte categorie di impatto. Anche diversi studi in letteratura comparano vetro e plastica e dimostrano che quest'ultima è la migliore soluzione da un punto di vista ambientale (Kouloumpis, Pell, Correa-Cano, & Yan, 2020) (Dhaliwal, Browne, Flanagan, Laurin, & Hamilton, 2014). Tuttavia, poiché ogni valutazione di impatto deve essere svolta per i casi specifici, per ulteriore verifica è stato calcolato l'impatto del richiesto contenitore in vetro e della soluzione polimerica per 100g di formaggio grattugiato: la prima soluzione è composta da un mix

di PET (17%) e PE (83%) estrusi per formare il packaging multimateriale dal peso di 8 g, mentre la seconda è composta dal vasetto in vetro (196g) e dal tappo in alluminio (6g). Lo smaltimento è stato modellato considerando i consorzi nazionali del packaging: la plastica è riciclata al 44,5%, incenerita al 43% e smaltita in discarica al 12,5%. Invece, il vetro è riciclato al 76,3% e smaltito in discarica al 23,7%, mentre l'alluminio è riciclato all'80,2%, al 6,3% incenerito e 13,5% smaltito in discarica. I trasporti alle fasi di smaltimento sono stati stimati pari a 100 km. L'LCA è stato condotto con i database Ecoinvent 3.6 e Agrifootprint, mentre i metodi utilizzati per calcolare l'impatto ambientale, sul consumo di acqua e l'emissione di gas serra sono rispettivamente l'AWARE e l'IPCC. Anche se questo studio LCA è molto semplice, evidenzia già delle importanti differenze. In particolare, l'impatto sulla Global Warming Potential del vasetto di vetro risulta ben 5 volte maggiore del packaging polimerico, a causa dell'impatto dei materiali: il vasetto in vetro e il tappo in alluminio comportano l'emissione di 0,182 kg CO₂ eq, mentre il loro smaltimento impatta esclusivamente 0,0036 kg CO₂ eq. Al contrario, il packaging polimerico comporta 0,0377 kg CO₂ eq, in cui l'impatto del materiale è 0,021 kg CO₂ eq e lo smaltimento 0,0167 kg CO₂ eq. La differenza è principalmente dovuta al peso, molto maggiore per il vetro, nonché al suo processo produttivo, che comporta l'utilizzo di altissime temperature per le fornaci. Per quanto riguarda l'impronta idrica, il barattolo di vetro consuma quasi il doppio di acqua rispetto agli imballaggi polimerici (0,024 vs. 0,042 m³), a causa del suo ammontare utilizzato nel raffreddamento degli stampi (Borghesi, Stefanini, & Vignali, 2021).

6.3 Una possibile soluzione: educare tramite la digitalizzazione

I risultati del questionario hanno dunque evidenziato un grande divario tra la percezione dei consumatori riguardo la sostenibilità ambientale dei packaging ed i reali dati di impatto calcolati scientificamente. Come potrebbe essere risolta tale problematica? Per raggiungere ed informare più consumatori si potrebbe pensare di puntare di più sull'utilizzo dei siti web, o delle piattaforme social molto utilizzate oggi ma, a giudicare dalle risposte (Figura 36), la maggior parte non seguirebbe le pagine, soprattutto perché sceglie sul momento cosa comprare al supermercato.

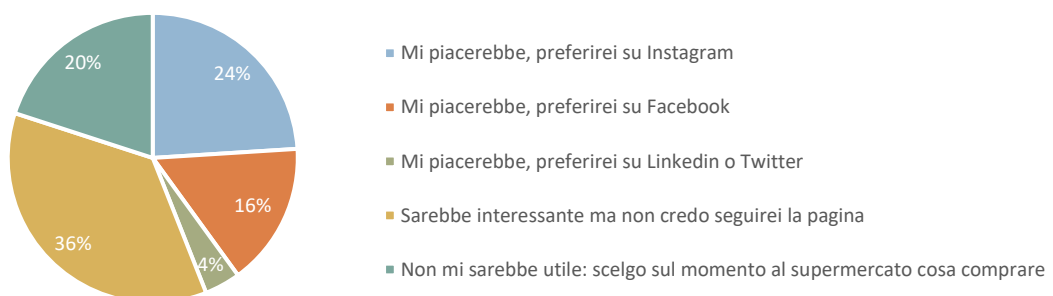


Figura 36: Il parere degli intervistati – risposte alla domanda “Se un brand di Parmigiano Reggiano biologico creasse un profilo internet pubblicando le proprie attività, i prodotti e gli eventi...”

In alternativa, una possibile soluzione potrebbe arrivare dalla digitalizzazione, grazie all'uso di tecnologie di identificazione dei prodotti che possono essere lette dal consumatore finale direttamente al punto vendita, con il fine di acquisire più informazioni sul prodotto che sta per acquistare. Un esempio di tali tecnologie sono i *Quick Response Code* (QR-Code), ma anche i tag con funzionamento RFID, ovvero a identificazione tramite radiofrequenza, una modalità che oggi la maggior parte degli smartphone ha in modalità di comunicazione ravvicinata, detta NFC dall'inglese *Near Field Communication*. Entrambe le tecnologie consentirebbero al consumatore che ha sul telefono un'applicazione di lettura dei QR code o dei tag RFID di scansionare l'etichetta/tag sul packaging e di accedere immediatamente a più informazioni sulla filiera produttiva, sulle misure biologiche adottate, sulla tracciabilità ed originalità del prodotto stesso ed in generale a tutti i dati che l'azienda produttrice può voler comunicare per aumentare la trasparenza dei propri processi e sottolinearne il valore aggiunto. Nonostante i consumatori, secondo i risultati del questionario, si dividono tra chi conosce bene tali tecnologie e chi invece non le conosce affatto, spiegando loro il semplice funzionamento ed i benefici che potrebbero ottenere tramite tali strumenti, il 70% ha espresso un parere positivo per il loro utilizzo e si sentirebbero più sicuri delle caratteristiche del prodotto acquistato (Figura 37).

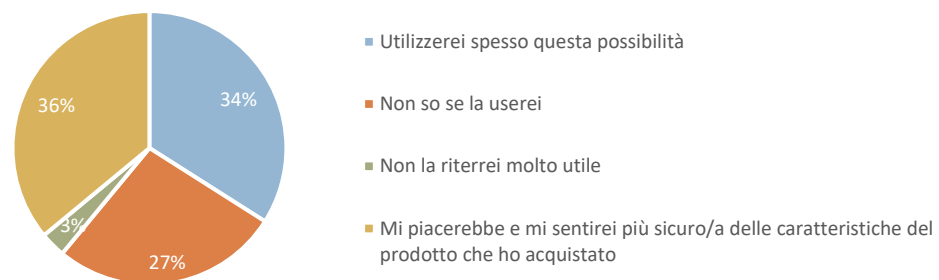


Figura 37: Il parere degli intervistati – risposte alla domanda “Se accostando il tuo smartphone all’etichetta del Parmigiano Reggiano biologico potessi accedere ad informazioni in più su filiera produttiva, misure biologiche adottate, tracciabilità e originalità del prodotto acquistato...”

La digitalizzazione sembra allora essere la possibile risposta al bisogno di aumentare la sensibilizzazione dei consumatori verso le caratteristiche dei prodotti alimentari, con il fine di dare loro gli strumenti per fare scelte più consapevoli. Oggi, già diversi packaging riportano in etichetta dei QR-Code, che consistono in semplici stampe ed hanno un costo piuttosto contenuto ma, dando un'occhiata nei centri della grande distribuzione, sembrano invece ancora poche le applicazioni di tag RFID nel settore alimentare, soprattutto sui packaging primari. Ma cosa sono gli RFID e quanto sono davvero diffusi oggi? Il prossimo capitolo risponderà a tali domande.

7 Il sistema RFID per la supply chain 4.0

Nell'ultimo anno del Dottorato sono stata coinvolta da RFID Lab in un progetto con GS1 Italy con l'obiettivo di indagare l'utilizzo del sistema Radio Frequency IDentification (RFID), pienamente rientrante tra le tecnologie dell'Industria 4.0, nelle supply chain del largo consumo, healthcare e fashion, per comprenderne lo stato dell'arte di diffusione ed aumentarne la conoscenza. Lo strumento di indagine consisteva in un questionario condiviso con diversi stakeholders di filiera, come distributori, produttori, operatori unici, fornitori di servizi logistici e solution providers. Lo scopo era monitorare il livello di sperimentazione ed uso della tecnologia, analizzando gli scenari di applicazione (come packaging primario, secondario o terziario), i benefici raggiunti dai processi automatizzati, ma anche l'individuazione degli ostacoli che ne hanno resa difficoltosa l'implementazione.

Lo studio ha un filo conduttore con quanto mostrato nel Capitolo 6.3, indagando l'uso degli RFID non più tra i consumatori, ma a monte, nelle aziende, cercando di comprendere se questi sono utilizzati anche con lo scopo di aumentare il livello di informazioni fornite ai propri clienti finali.

I paragrafi successivi introducono brevemente le caratteristiche generali della tecnologia di identificazione a radiofrequenza (Paragrafo 7.1) e poi descrivono la creazione dello strumento d'indagine (7.2) per analizzarne la diffusione oggi (Paragrafi 7.2.1 e 7.2.2). Con lo scopo di mantenere il focus sul settore alimentare, ci si focalizzerà principalmente sul campione raccolto del largo consumo, composto principalmente da aziende del settore food & beverage. Si presenteranno inoltre i principali motivi di adozione (7.2.3), i casi d'uso (7.2.4), nonché i benefici raggiunti (7.2.5) e le criticità riscontrate (7.2.6 e 7.2.8). A partire da tale ricerca è stato creato un Executive Summary che GS1 Italy condiviso sulle proprie pagine web (Bottani & Stefanini, 2022), con l'intenzione di diffonderne i risultati ed aumentare la conoscenza della tecnologia RFID tra i propri stakeholders in futuro (7.3).

7.1 L'identificazione tramite radiofrequenza

Tra le tecnologie dell'Industria 4.0 rientrano anche i sistemi di identificazione automatica a radiofrequenza, detti RFID dall'inglese *Radio Frequency Identification*, che permettono di assegnare a un prodotto un'identità univoca e informazioni utili per operazioni di ricerca, identificazione, selezione, localizzazione spaziale e tracciamento. La tecnologia, che ha come antenato il sistema *Identification Friend or Foe* utilizzato nella Seconda Guerra Mondiale per distinguere gli aerei alleati da quelli nemici, dagli anni '90 è diventata sempre più diffusa, fino ad arrivare alla Quarta Rivoluzione Industriale dei giorni nostri che ne fa uso su una larga scala di prodotti e processi. In particolare, nell'industria alimentare (RFID.it, 2021) gli RFID sono utilizzati per l'identificazione e la tracciabilità delle merci, la gestione dei processi logistici e del punto vendita, per il monitoraggio della catena del freddo, per l'anticontraffazione, e per fornire maggiori informazioni al consumatore finale (ItFood, 2022).

Il sistema, a prescindere dalla sua applicazione, è formato da tre componenti fondamentali: il trasponder a radiofrequenza, costituito da un'antenna e un circuito integrato dotato di memoria, un lettore fisso o mobile che consente di assumere informazioni contenute nel tag, ed infine un sistema di gestione dei dati che li raccoglie e struttura.

I numerosi vantaggi degli RFID, quali il funzionamento senza visibilità ottica, la possibilità di identificazione dell'oggetto singolo e di più letture contemporanee, nonché il funzionamento completamente automatizzato e la durabilità dei tag, rendono il sistema sempre più competitivo ed interessante sul mercato. In particolare, la tecnologia RFID con funzionamento ad altissima frequenza, detta UHF dall'inglese *Ultra High Frequency*, permette grandi distanze di lettura e si è dimostrata un potente strumento per ridurre costi e inefficienze delle supply chain, aumentandone del 10% la trasparenza e le vendite. Alcuni settori come l'abbigliamento e la vendita al dettaglio sono tra i pionieri dell'adozione, ma anche il Fast Moving Consumer Goods (FMCG), l'alimentare, il farmaceutico e l'aerospaziale, stanno implementando alcuni casi d'uso (RFID Lab, 2022).

È dunque comprensibile che tale tecnologia si presenti oggi come una valida alternativa, o in certi casi anche un alleato, del sistema di identificazione ottico tramite codici a barre, nonostante quest'ultimo sia estremamente più economico e di facile implementazione. Anche GS1 Italy che offre soluzioni e servizi per migliorare la visibilità dei prodotti, i processi aziendali e la filiera del largo consumo, offrendo il codice a barre GS1 (EAN, *European Article Numbering*), ha sviluppato da qualche tempo lo standard EPC (*Electronic Product Code*) per la codifica delle merci con RFID (GS1 Italy, 2022). Ed è proprio sulle basi di tali premesse che l'ente ha avviato il progetto "Agenda RFID 21-23 GS1 Italy & RFID Lab", realizzato in collaborazione con l'Università di Parma, per comprendere lo stato dell'arte di diffusione della tecnologia Radio Frequency Identification ed aumentarne la conoscenza. In particolare, il secondo Work package del progetto ha avuto per oggetto la realizzazione di una survey, somministrata

a numerose aziende associate a GS1 Italy, e avente come obiettivo la valutazione del livello di sperimentazione, applicazione, adozione e utilizzo della tecnologia RFID nei processi interni e di filiera, principalmente da parte di aziende del largo consumo, indagandone gli scenari di applicazione, la tipologia di tag utilizzati, i benefici raggiunti e gli ostacoli riscontrati.

7.2 Questionario agli stakeholders: indagine per GS1 Italy

Le prime domande del questionario consistevano in una mappatura delle aziende intervistate, raccogliendo informazioni di profilo quali la localizzazione geografica, l'ambito di attività, il ruolo del rispondente, il livello di conoscenza di tecnologie di identificazione automatica, tra cui l'RFID. Successivamente la struttura si differenziava, domandando quesiti specifici sia in relazione al ruolo degli stakeholder nella supply chain (divisi tra produttori, distributori, operatori unici, fornitori di servizi logistici e solution providers), sia in base al livello di adozione della tecnologia. In relazione a quest'ultimo aspetto, i rispondenti potevano classificarsi in:

- non fruitori: tra coloro che non hanno mai testato né implementato la tecnologia RFID sono stati indagati i motivi del mancato utilizzo e l'intenzione di sperimentazioni future;
- sperimentatori: a chi ha testato in passato o sta attualmente testando la tecnologia RFID, sono state poste domande sulle caratteristiche dei test, sulle motivazioni e sui principali casi d'uso;
- implementatori: a coloro che già utilizzano la tecnologia RFID per gestire uno o più processi sono stati somministrati quesiti simili alla categoria precedente ma relativi all'implementazione, indagando i benefici raggiunti e gli eventuali problemi riscontrati.

Lo strumento d'indagine è stato creato su Google Moduli, con un tempo di compilazione previsto tra 1 e 5 minuti a seconda delle risposte degli intervistati. Per i lettori che abbiano interesse nel conoscere tutte le domande del questionario, si riporta in bibliografia il link per la compilazione, ancora attivo nel momento di scrittura di tale Tesi (Questionario GS1 e RFID Lab, 2022). Questo è stato condiviso da GS1 Italy mediante propri canali, nonché dai partecipanti alla ricerca mediante invio per e-mail e social media. Complessivamente sono state raccolte 80 risposte, poi selezionate poiché è emersa la presenza di:

- 3 intervistati che si dichiaravano inesperti della tecnologia RFID, ritenendo di non poter rispondere al questionario: le loro risposte sono state eliminate e non sottoposte a successiva analisi;
- 10 duplicati, ossia aziende per le quali più di un rispondente ha compilato il questionario. Le risposte sono state confrontate e si è mantenuta la compilazione ritenuta più completa e accurata;
- 9 rispondenti classificati come "non idonei", vale a dire o mancanti dell'indicazione precisa dell'azienda dando informazioni dunque non verificabili, oppure appartenenti a settori molto

specifici, non sempre adeguati in relazione all’oggetto di indagine (ad esempio, un laboratorio di analisi tossicologiche). Anche tali risposte non sono dunque state considerate.

Il campione così raccolto è risultato costituito da 58 risposte, sulle quali sono state svolte delle analisi statistiche per delineare il profilo dei rispondenti, la diffusione della tecnologia e le sue caratteristiche.

7.2.1 Il profilo degli intervistati: settore di appartenenza ed ambito operativo

Partendo dal delineare un profilo dei rispondenti, si evince dai risultati che la maggioranza è localizzata nel Nord Italia (79%), seguita dal Centro (12%), Sud e Isole (7%) ed estero (2%). La zona operativa delle aziende è principalmente nazionale (50%), piuttosto che mondiale (33%) o europea (17%), ed hanno dimensioni grandi (41%), medie (31%), piccole (19%) e micro (9%). Riguardo il settore di appartenenza, che poteva essere indicato con risposta multipla tra 9 opzioni, si nota che il maggior numero di aziende opera in nell’abbigliamento, ma una larga parte ha a che fare con il settore alimentare (Figura 38).

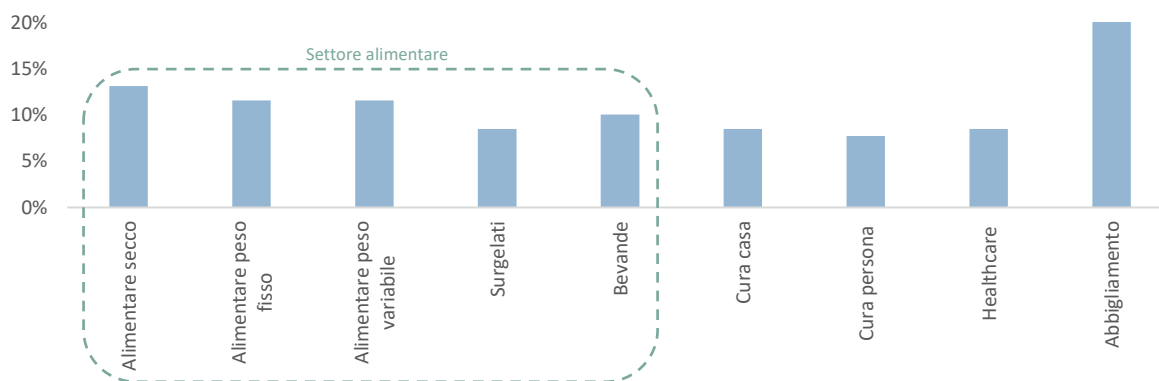


Figura 38: Settori di appartenenza indicati dalle aziende intervistate

In accordo con GS1, le 9 aree sono state riclassificate secondo il settore di appartenenza, ovvero:

- Largo consumo: alimentare secco, a peso fisso, a peso variabile, surgelati, bevande, cura casa e cura persona. Osservando i nomi dei rispondenti (che per motivi di riservatezza non sono stati inseriti nella presente tesi), si evince come siano o aziende alimentari, oppure super/ipermercati.
- Healthcare
- Abbigliamento/Fashion

Inoltre, una seconda divisione dei rispondenti è stata fatta in base all’ambito operativo, distinguendo tra produttori, distributori, operatori unici, solution providers e fornitori di servizi logistici. Il confronto tra l’ambito operativo e il settore di appartenenza dell’azienda è illustrato in Figura 39. Il settore di appartenenza non è stato determinato per i solution providers e per i fornitori di servizi logistici, in quanto sono aziende non “specifiche” di settore, e quindi sono state indicate nel grafico come classificazione “non applicabile”. Il settore del largo consumo è risultato il più numeroso ed è rappresentato da soggetti che operano come produttori o distributori di beni di largo consumo

(principalmente alimenti e bevande), mentre il settore fashion è per larga parte rappresentato da operatori unici.

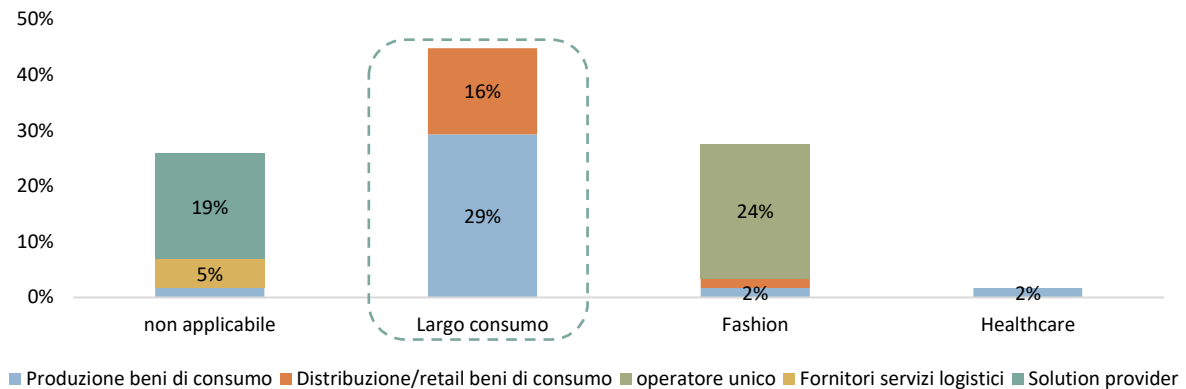


Figura 39: Classificazione dei rispondenti per ambito operativo e settore di appartenenza

Riguardo le tecnologie di identificazione automatica per la gestione della supply chain, dai risultati si evince che sono utilizzate dalla stragrande maggioranza delle aziende (84%), specialmente di grandi dimensioni. In particolare, il codice a barre monodimensionale è il più utilizzato (43%) e diffuso soprattutto tra i produttori di generi di largo consumo e gli operatori unici. Invece, le soluzioni RFID con tag passivi HF (17%), UHF (16%), e attivi (4%) risultano usate da operatori unici, principalmente nel settore fashion, così come i codici a barre bidimensionali, usati dal 14% dei rispondenti.

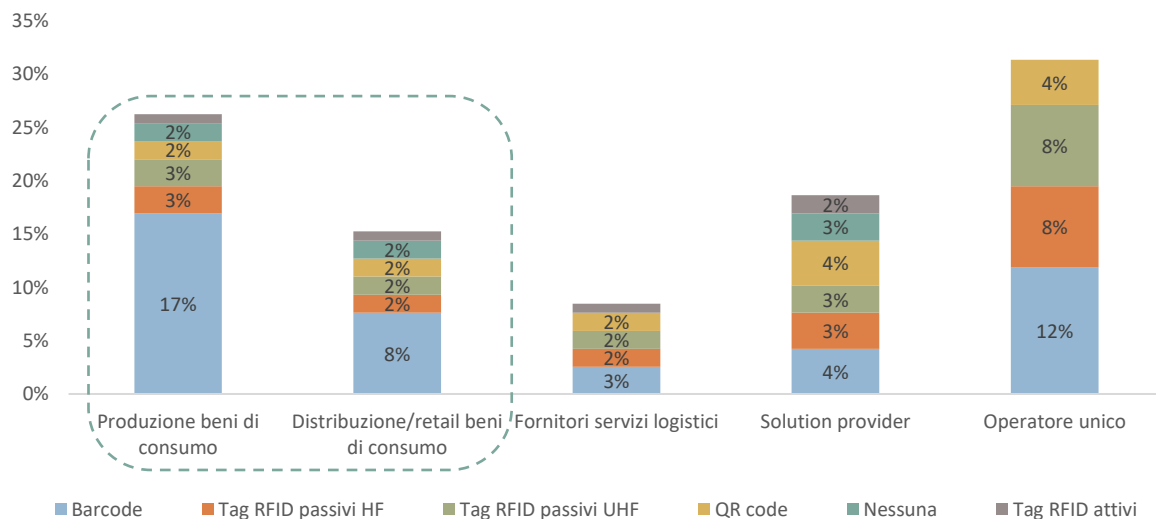


Figura 40: Cross-analysis: tecnologie utilizzate vs. ambito operativo

Dai risultati si nota inoltre che gli standard GS1 per l'identificazione di imballaggi primari/secondari/terziari e lo scambio di informazioni con i partner della supply chain sono ben noti alla stragrande maggioranza delle aziende intervistate, e tutti i fornitori di servizi logistici e la quasi totalità dei produttori e distributori ne fa uso. I non utilizzatori sono invece principalmente conoscitori della tecnologia RFID, in particolare solution providers ed operatori unici nel settore fashion.

7.2.2 RFID & largo consumo: ancora molto spazio per l'adozione

I risultati relativi allo stato di adozione dei sistemi RFID evidenziano che, ad oggi, solo una piccola parte degli intervistati ha già implementato la tecnologia: la maggior parte dei non fruitori sono proprio produttori di beni di largo consumo (Figura 41). Nonostante ciò, dimostrano interesse verso il tema, indicando l'intenzione di implementare la tecnologia in un futuro più o meno prossimo. Invece, gli utilizzatori e gli sperimentatori risultano essere prevalentemente grandi aziende e consistono in operatori unici del settore fashion. Alcuni di questi ne fanno uso da più di 5 anni, affermando dunque un duraturo ed affermato uso della tecnologia.

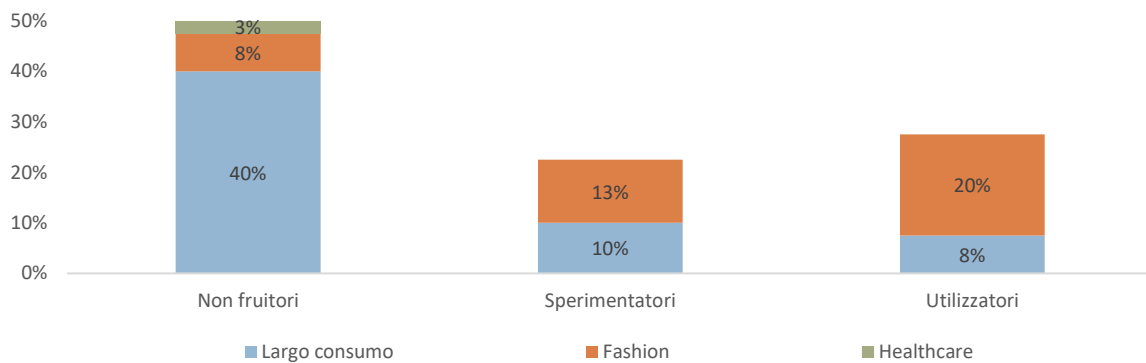


Figura 41: Livello di utilizzo dei sistemi RFID vs. settore di produttori e distributori

I tag passivi UHF sono risultati i più sperimentati ed utilizzati. Invece, i tag semi-passivi con sensori di temperatura, i tag passivi a ricircolo UHF e i varchi RFID non risultano essere oggetto di sperimentazione, forse prestandosi ad un utilizzo diretto (Figura 42).

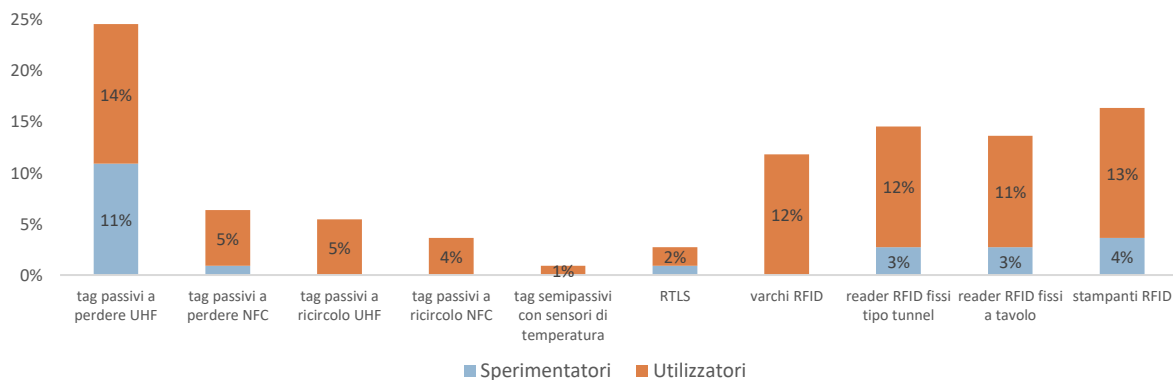


Figura 42: Tecnologie RFID utilizzate da sperimentatori e utilizzatori

La tecnologia RFID è risultata applicata o testata oggi principalmente a livello di imballaggio primario (54%), e meno per imballaggi secondari (17%), terziari (11%) e per asset tracking (13%). Dai risultati si evince che i fornitori di servizi logistici e i solution provider hanno eseguito sperimentazioni di più lunga durata (oltre 6 anni), mentre per produttori, distributori e operatori unici le sperimentazioni sono state decisamente più brevi (inferiori a 2,5 anni).

7.2.3 I drivers per l'adozione: ROI favorevole e superamento dei competitors

Considerando sperimentatori e utilizzatori, si può affermare che entrambi i profili hanno identificato tra i principali drivers per l'introduzione della tecnologia RFID il ROI favorevole e la possibilità di ottenere un vantaggio competitivo rispetto ai competitors (Figura 43). Pochi hanno agito per colmare un gap competitivo, anche perché, come visto in precedenza, non sono molte le aziende che oggi utilizzano la tecnologia RFID e dunque la concorrenza non è così alta.

I bandi pubblici e gli incentivi dell'Industria 4.0 possono dare un boost all'implementazione, ma non appaiono come la ragione principale per avviare un progetto RFID in azienda (a differenza di quanto evidenziato nel questionario dell'introduzione delle tecnologie abilitanti l'Industria 4.0, nel Capitolo 3.2). Infine, considerando che in Italia non vi sono ancora casi significativi di mandati rilasciati da attori della distribuzione che richiedano ai propri fornitori colli e item dotati di tag RFID, è comprensibile che il fattore "influenza dei partner di filiera" è ancora poco sentito come driver per l'implementazione.

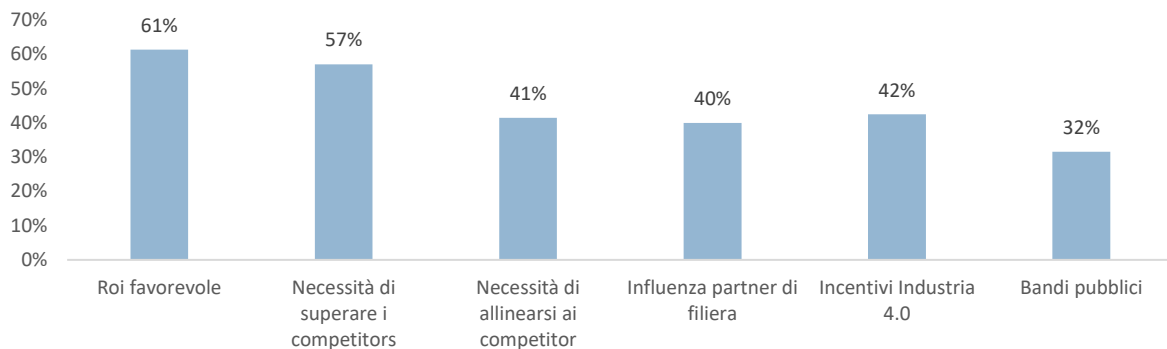


Figura 43: Utilizzatori e sperimentatori di tecnologia RFID – motivazioni di utilizzo. Scala graduata: Non applicabile = 0; Assolutamente non influente = 25%; Poco influente = 50%; Abbastanza influente = 75%; Assolutamente influente = 100%

Infine, collegando tale ricerca al Capitolo 6.2, dai risultati del questionario si evince che poche aziende hanno implementato gli RFID per ottenere degli "smart product", ovvero dei prodotti in grado di interagire con il consumatore, facilmente utilizzabili anche per l'anticontraffazione. Inoltre, la facilitazione dell'economia circolare fornendo informazioni al cliente circa lo smaltimento del prodotto, non è stata una motivazione determinante nella scelta dell'implementazione, sottolineando, purtroppo, come ancora una volta le tecnologie 4.0 non sempre siano percepite come uno strumento per aumentare la sostenibilità ambientale di prodotti e processi.

Infine, è interessante osservare che la percezione degli utilizzatori è risultata sempre superiore a quella dei soli sperimentatori: probabilmente l'utilizzo della tecnologia ha consentito di cogliere vantaggi ulteriori rispetto alla sola sperimentazione.

7.2.4 Casi d'uso: visibilità dei flussi e automazione dei processi

L'analisi delle risposte permette di comprendere i principali obiettivi o opportunità che le aziende si prefiggono di cogliere grazie agli RFID e all'internet of Things. In particolare, le principali motivazioni che spingono produttori e distributori a intraprendere un percorso di digitalizzazione sono l'automazione dei processi logistici, la visibilità delle giacenze e dell'avanzamento della produzione (per i soli produttori), nonché la possibilità di riduzione dello stock out (Figura 44).

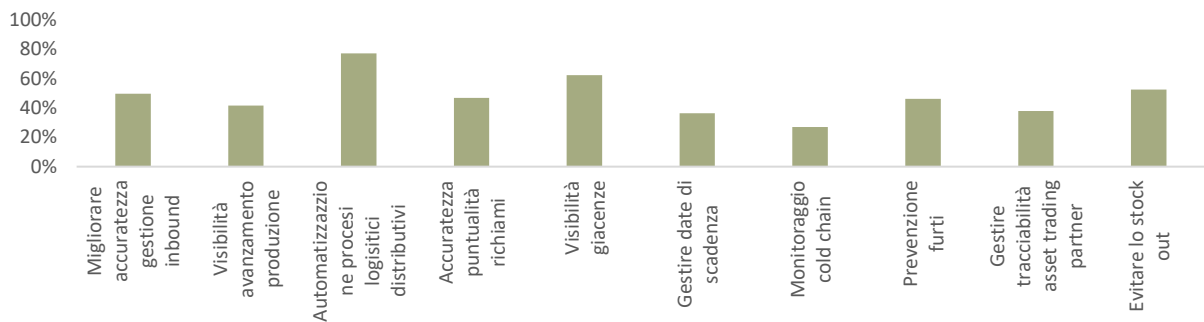


Figura 44: Utilizzatori e sperimentatori di tecnologia RFID – caratteristiche: casi d'uso. Scala graduata: Non applicabile = 0; Assolutamente non influente = 25%; Poco influente = 50%; Abbastanza influente = 75%; Assolutamente influente = 100%

7.2.5 I benefici raggiunti: storie di successo

Infine, sono stati misurati i principali benefici raggiunti dalle aziende implementatrici (Figura 45). Chi ha implementato la tecnologia ha ottenuto risultati in linea o al di sopra delle aspettative soprattutto per quanto riguarda la riduzione degli errori di allestimento ordini, l'incremento dell'efficienza operativa e l'incremento dell'accuratezza inventariale. Un risultato particolarmente rilevante è che chi ha implementato la tecnologia per ridurre l'out of stock e incrementare le vendite vi sia riuscito, nella maggior parte dei casi, ben più di quanto inizialmente ipotizzato. Questo rappresenta sicuramente un fattore di stimolo all'adozione per coloro che si accingono ad implementare con questo caso d'uso.

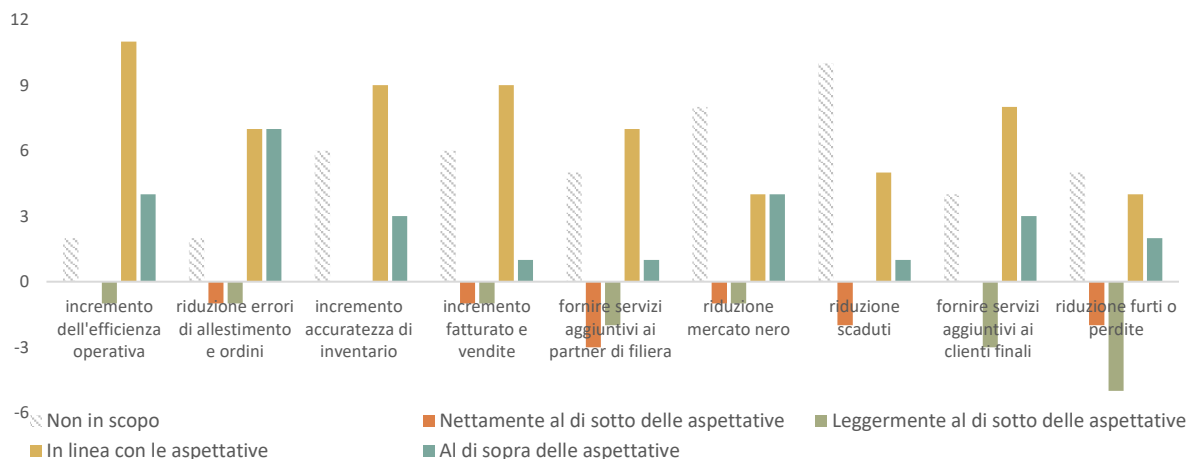


Figura 45: Utilizzatori di tecnologia RFID – caratteristiche – benefici dall'utilizzo

7.2.6 Le criticità: poche e sormontabili

Se da un lato l'RFID può comportare delle mancate letture, soprattutto in presenza di liquidi e metalli, dall'altro, si può riscontrare un eccesso di prestazioni che richiede l'utilizzo di schermature, entrambe superabili tramite la sperimentazione e l'ingegnerizzazione di tag e punti di lettura. Dai risultati si evince comunque che nessuna criticità è stata assolutamente rilevante per gli implementatori.



Figura 46: Utilizzatori di tecnologia RFID – criticità riscontrate. Scala graduata: Non applicabile = 0; Assolutamente non rilevante = 0.25; Poco rilevante = 0.5; Abbastanza rilevante = 0.75; Assolutamente rilevante = 1

7.2.7 Le paure dei pochi non fruitori disinteressati

Considerando infine i “non fruitori”, solo il 18% non immagina l'adozione del sistema RFID nemmeno in un futuro non specificato. I principali motivi sono la paura di un non ritorno economico, delle risorse insufficienti, dei limiti nel contesto di filiera e dei problemi di sicurezza/privacy (Figura 47).

In realtà, le risposte degli utilizzatori testimoniano che non tutte queste paure sono fondate: senz'altro, come in ogni percorso, anche nell'adozione del sistema RFID si possono riscontrare ostacoli, tuttavia i risultati di successo raggiunti da chi ha già implementato la tecnologia confermano che questi sono stati tutti superabili.

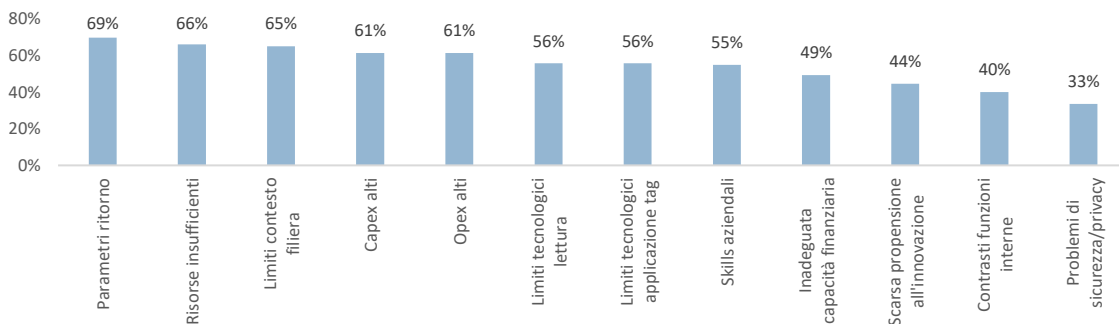


Figura 47: Non fruitori di tecnologia RFID – motivazioni di non interesse. Scala graduata: Non applicabile = 0; Assolutamente non influente = 25%; Poco influente = 50%; Abbastanza influente = 75%; Assolutamente influente = 100%

7.3 Uno sguardo al futuro della tracciabilità alimentare

A conclusione di questa parte del progetto “*Agenda RFID 21-23 GS1 Italy & RFID Lab*”, in base ai risultati della survey sono state delineate alcune azioni di trasferimento tecnologico volte a rilanciare l’utilizzo della tecnologia RFID e degli standard GS1 presso le aziende aderenti a GS1 Italy. Come si è osservato, la maggior parte degli attuali non fruitori di tecnologia RFID sono principalmente produttori o distributori nell’ambito del largo consumo: si rivolgerà l’attenzione prioritariamente a questi gruppi di aziende per strutturare azioni volte a promuovere l’adozione della tecnologia RFID nei prossimi anni. Anche se in questo capitolo non è stato il focus principale, nell’ambito fashion, viceversa, la tecnologia sembra più matura: l’esperienza di questo settore potrebbe essere indagata maggiormente attraverso testimonianze dirette, per far emergere i punti di forza della tecnologia stessa ed estenderli, se possibile, anche ad altri ambiti industriali, tra cui il citato largo consumo. Per quanto riguarda il settore farmaceutico, i rispondenti sono troppo limitati per poter trarre delle conclusioni dall’analisi del questionario. Per impostare l’Agenda RFID per gli anni 2023-2025, GS1 potrà costituire dei gruppi omogenei per settore industriale: ciascun gruppo deciderà le attività di sperimentazione da intraprendere, realizzando ad esempio survey, ricerche di mercato, attività di sperimentazione sul campo, progetti pilota, definizione di standard e/o best practices di settore o sviluppo protocolli di collaborazione in tema di RFID. Grazie a tali attività, si punta a diffondere la conoscenza di tale tecnologia 4.0 nel prossimo futuro, per consentire a più aziende alimentari, ma non solo, di coglierne i vantaggi e puntare ad una gestione della supply chain sempre più automatizzata ed efficiente fino al consumatore finale, che potrà usufruire del sistema RFID per aumentare la propria conoscenza e consapevolezza dei processi a monte.

8 Conclusioni

La presente Tesi di Dottorato si proponeva di indagare l'industria alimentare tra il bisogno di sostenibilità ambientale e l'implementazione di tecnologie appartenenti alla Quarta Rivoluzione Industriale. A tale scopo, sono stati presentati sei casi studio svolti per aziende del territorio italiano che hanno consentito non solo di comprendere l'attuale stato dell'arte dei cambiamenti, ma anche di dare un supporto nella transizione, rispondendo con risultati scientifici ad alcune richieste del settore. Riprendendo le domande poste nell'introduzione all'elaborato, si è ora in grado di dare loro una risposta, sintetizzando così le conclusioni del lavoro.

Come stanno evolvendo i sistemi alimentari?

L'analisi bibliografica condotta nel database scientifico Scopus, ha provato che le sfide di oggi e del prossimo futuro nel settore alimentare si giocheranno principalmente sulla riduzione degli impatti ambientali causati da processi e materiali, in linea con quanto richiesto dalle normative nazionali ed internazionali. Inoltre, alcune aziende europee stanno iniziando ad implementare nuove tecnologie automatizzate e intelligenti, ma la diffusione è ancora lenta. I due temi sembrano talvolta legati, in quanto l'introduzione di tecnologie efficienti e produttive può aiutare a ridurre le emissioni nel suolo, nell'acqua e nell'aria, nonché gli sprechi di energia e materiali lungo la filiera alimentare. Chi vorrà rimanere competitivo sul mercato futuro dovrà dunque fare proprie tali trasformazioni, necessitando di personale sempre più esperto e specializzato.

In Italia, ad esempio, il 4.0 si dimostra vantaggioso per le aziende implementatrici: in particolare cyber security, cloud computing, big data collection and analytics, robot collaborativi e Internet of Things consentono di aumentare la qualità dei prodotti creati e la produttività in generale, riducono i costi operativi e rafforzano lo scambio di informazioni tra l'azienda ed i propri stakeholders. Tali vantaggi lasciano ben sperare in una futura diffusione del 4.0, perché ad oggi resta ancora molto spazio per l'implementazione nel nostro Paese. Molte aziende, soprattutto al sud e di piccole e medie dimensioni, non hanno ancora avviato il processo di trasformazione a causa della mancanza di conoscenze di tali tecnologie, l'assenza di personale esperto e l'ingente investimento iniziale richiesto. Non è possibile elencare con certezza i benefici ambientali dell'implementazione perché questi risultano ancora poco indagati. Per vincere le sfide connesse a tale rivoluzione, saranno necessari più supporti economici, come i già stanziati finanziamenti europei o nazionali, e l'identificazione di partner esterni come Università o centri di ricerca per favorire il trasferimento tecnologico.

Quali sono le sfide e le opportunità del 4.0 in Italia?

Come ridurre l'impatto di un impianto di confezionamento alimentare?

A prescindere dall'evoluzione o meno degli impianti di confezionamento alimentare verso l'ottica 4.0, i produttori di bevande e alimenti dovranno tenere presente che la fase di utilizzo delle macchine è la più impattante del ciclo di vita contribuendo potenzialmente all'effetto serra, all'acidificazione, all'uso di fonti non rinnovabili e all'assottigliamento dello strato di ozono. Infatti, la produzione delle materie prime necessaria alla costituzione della macchina, così come lo smaltimento finale, risultano avere contributi ambientali quasi trascurabili rispetto al grande impatto causato dai consumi di produzione durante la fase d'uso, come dimostrato dallo studio Life Cycle Assessment svolto. La soluzione consiste nell'utilizzare fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica ed il recupero ed il riciclo dei flussi, che consentono di diminuire gli impatti.

Oltre all'impatto delle macchine di confezionamento, si deve porre ulteriore attenzione ai materiali utilizzati. In particolare, la sostituzione della plastica con il vetro non è la risposta per ridurre gli impatti potenziali delle bottiglie utilizzate per il confezionamento delle bevande: l'LCA dimostra che il vetro è infatti più impattante a causa degli elevati consumi necessari per la produzione, i trasporti, ed il lavaggio per i sistemi a rendere. A prescindere dalla tipologia di materiale, l'economia circolare si conferma come soluzione dei problemi di inquinamento causati dai packaging. In futuro bisognerà puntare a ridurre la quantità di materiali utilizzati, diminuendo gli spessori ed il peso, utilizzando dove possibile formati più grandi. Inoltre, bisognerà puntare alla creazione di confezioni a partire da materiale riciclato (come R-PET), produrle in modo che siano riciclabili o recuperarle energeticamente. Per tale scopo, il punto di partenza è evitare di disperdere i materiali nell'ambiente: sarà indispensabile sensibilizzare i consumatori diffondendo le informazioni per migliorare il conferimento a fine vita dei packaging che ad oggi, essendo fatto in modo scorretto riversandoli spesso nell'ambiente, è il vero responsabile dell'inquinamento di mari e suoli.

La scelta dei materiali per il packaging: plastica o vetro?

Come i consumatori percepiscono l'eco-sostenibilità dei packaging?

La sensibilizzazione e l'educazione dei consumatori sarà la soluzione anche per colmare il divario esistente tra le loro percezioni ed i reali dati di impatto ambientale dei packaging. La stragrande maggioranza non conosce infatti i potenziali impatti associati a un prodotto riciclabile o riciclato, non è consapevole di come avviene lo smaltimento a livello italiano, né sa identificare i materiali migliori per l'ambiente. Un potenziale strumento per veicolare le informazioni e renderli più consapevoli delle scelte al punto vendita è la digitalizzazione, tramite l'utilizzo del sistema RFID o di QR-Code che consentono al consumatore, semplicemente accostando il proprio smartphone all'etichetta degli alimenti, di acquisire più informazioni sul prodotto che sta per acquistare.

Tuttavia, soprattutto nel largo consumo, l'uso degli RFID risulta ancora marginale, e la possibilità di aumentare la *customer experience* non pare essere una delle principali motivazioni per cui le aziende decidono di implementare tale sistema di identificazione, dando priorità al miglioramento dei processi logistici, alla visibilità delle giacenze, all'avanzamento della produzione, alla riduzione dello stock out e degli errori di allestimento ordini. Le aziende alimentari utilizzano soprattutto codici a barre per l'identificazione dei propri prodotti, e pochi fanno uso anche di QR-code. Nonostante l'interesse mostrato verso l'implementazione futura della tecnologia di identificazione a radiofrequenza, la paura del non ritorno economico, delle risorse insufficienti e di limiti del contesto di filiera restano un freno per diverse realtà aziendali. Dunque, dovranno essere compiuti ancora molti sforzi per permettere a più organizzazioni, e a più consumatori, di trarre i potenziali benefici di questa tecnologia così potenzialmente vantaggiosa.

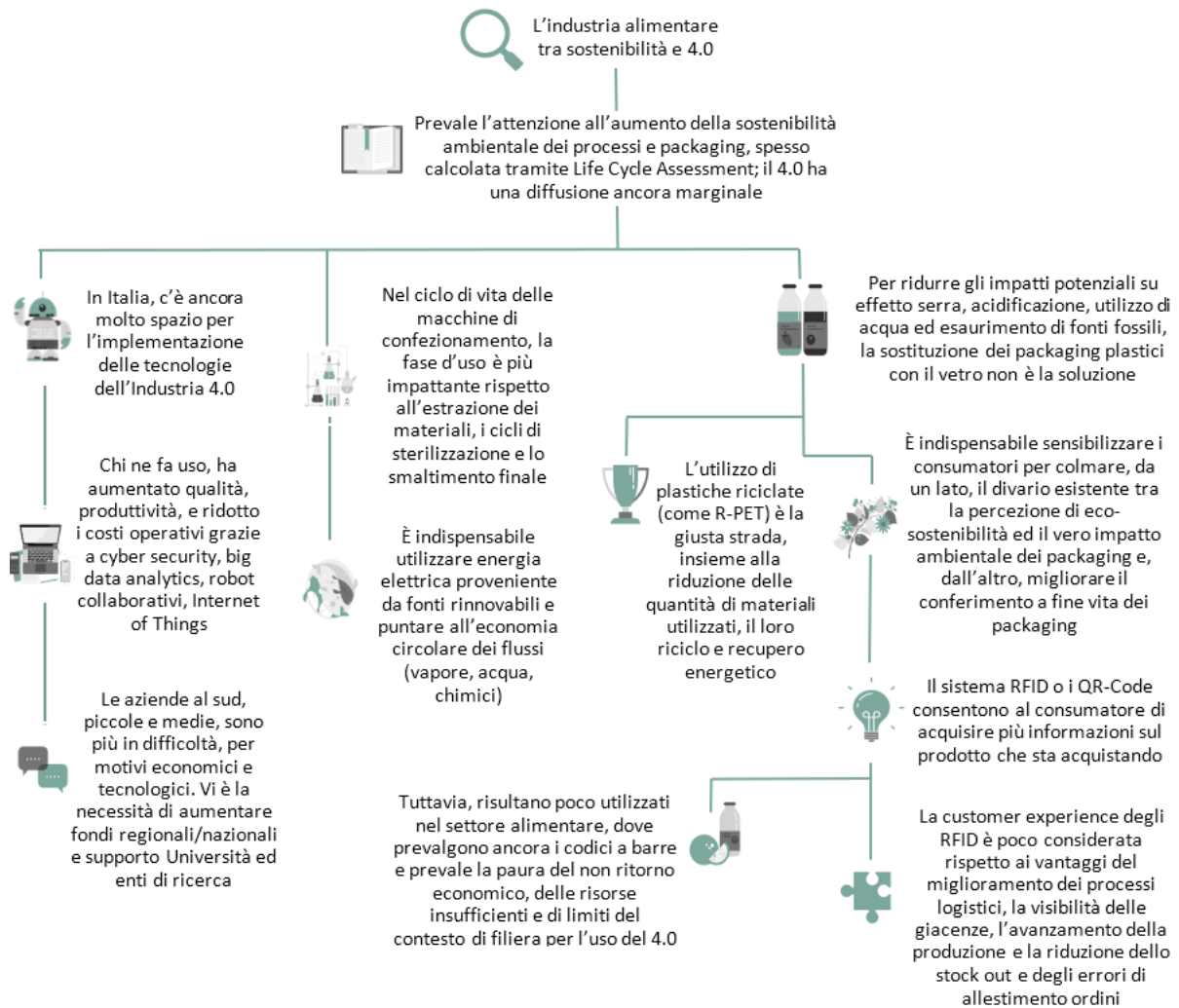


Figura 48: Mappa concettuale delle conclusioni della ricerca

Il settore alimentare ha infinite tecnologie e tematiche che potrebbero essere ulteriormente indagate. Una sola Tesi non può senz'altro includerne tutte le sfaccettature, ma le conclusioni qui presentate hanno dato un valido contributo ad aziende ed enti di ricerca interessate a specifiche tematiche. Per ampliare ulteriormente i confini di applicazione, le metodologie utilizzate ed i risultati raggiunti potranno essere un punto di partenza per avviare ulteriori ricerche ed indagini e Life Cycle Assessment, continuando a favorire, da un lato, l'implementazione di tecnologie sempre più automatizzate e, dall'altro, l'aumento di sostenibilità ambientale dei processi, prodotti e packaging dell'industria alimentare.

9 Bibliografia

- [1] Accorsi, R., Baruffaldi, G., & Manzini, R. (2020). A closed-loop packaging network design model to foster infinitely reusable and recyclable containers in food industry. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 48-61. doi:10.1016/j.spc.2020.06.014
- [2] Akyazi, T., Goti, A., Oyarbide, A., Alberdi, E., & Bayon, F. (2020). A guide for the food industry to meet the future skills requirements emerging with industry 4.0. *Foods*, 9(492). doi:10.3390/foods9040492
- [3] ANSA. (2018). *Bio, un'avanzata da 400mila ettari l'anno in Europa*. Tratto il giorno maggio 2020 da https://www.ansa.it/europa/notizie/agri_ue/biologico/2018/01/23/bio-unavanzata-da-400mila-ettari-lanno_2d3b6212-1865-40e9-b7fa-0c8950c6030f.html
- [4] Bader, F., & Rahimifard, S. (2020). A methodology for the selection of industrial robots in food handling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 64(102379). doi:10.1016/j.ifset.2020.102379
- [5] Baldini, C., Bava, L., Zucali, M., & Guarino, M. (2018). Milk production Life Cycle Assessment: A comparison between estimated and measured emission inventory for manure handling. *Science of the Total Environment*, 625, 209-219.
- [6] Baldo, G., Marino, M., & Rossi, S. (2008). *Analisi del ciclo di vita LCA, gli strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi* (Edizioni Ambiente ed.).
- [7] BCSA Group of Companies. (2022). *Steel construction - sustainability*. Tratto da <https://www.steelconstruction.info/Sustainability>
- [8] Bhatia, M., & Ahanger, T. (2021). Intelligent decision-making in Smart Food Industry: Quality perspective. *Pervasive and Mobile Computing*, 72(101304). doi:10.1016/j.pmcj.2020.101304
- [9] Bio Sant'Anna. (2020). *Filiera etica del Parmigiano Reggiano biologico*. Tratto da <https://biosantanna.com/oltrebio-e-fico/>
- [10] Bio Sant'Anna. (2022). *Oltrebio*. Tratto da <https://biosantanna.com/oltrebio/>
- [11] Blodgett, D., & Feld, M. (2021). Teaching an interdisciplinary course in sustainable food systems: science and history meet in “a world that works”. *International Journal of Sustainability in Higher Education*. doi:10.1108/IJSHE-02-2020-0044
- [12] Borghesi, G., Stefanini, R., & Vignali, G. (2021). Are consumers aware of products' environmental impacts? Different results between life cycle assessment data and consumers' opinions: the case study of organic Parmigiano Reggiano and its packaging. *International Journal of Food Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1515/ijfe-2021-0025>

- [13] Bottani, E., & Stefanini, R. (2022). *Come la tecnologia RFID abilita la supply chain e il retail 4.0*. Tratto da https://gs1it.org/content/public/24/08/2408debb-55bf-4c1a-87da-13ec64e6e46a/gs1_italy_come_tecnologiarfid__abilita_supply_chain_retail_4_0.pdf
- [14] Bottani, E., Longo, F., Nicoletti, L., Padovano, A., Tancredi, G., Tebaldi, L., . . . Vignali, G. (2021). Wearable and interactive mixed reality solutions for fault diagnosis and assistance in manufacturing systems: Implementation and testing in an aseptic bottling line. *Computers in Industry*, 128(103429). doi:<https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103429>
- [15] Bottani, E., Manfredi, M., Vignali, G., & Volpi, A. (2014). Life cycle assessment of RFID implementation in the fresh food supply chain. *International Journal of RF Technologies*, 6, 51-71.
- [16] Boucher, J. (2020, aprile 23). *Industry survey on glass packaging and consumers*. Tratto da <https://www.foodpackagingforum.org/news/industry-survey-on-glass-packaging-and-consumers>
- [17] Brozzi, R., Forti, D., Rauch, E., & Matt, D. (2020). The advantages of industry 4.0 applications for sustainability: Results from a sample of manufacturing companies. *Sustainability (Switzerland)*, 12(3647). doi:10.3390/su12093647
- [18] Câmara-Salim, I., Almeida-García, F., González-García, S., Romero-Rodríguez, A., Ruíz-Nogueiras, B., Pereira-Lorenzo, S., . . . Moreira, M. (2020). Life cycle assessment of autochthonous varieties of wheat and artisanal bread production in Galicia, Spain. *Science of the Total Environment*, 713(136720). doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136720
- [19] Chiarini, A., Belvedere, V., & Grando, A. (2020). Industry 4.0 strategies and technological developments. An exploratory research from Italian manufacturing companies. *Production Planning and Control*, 31(16), 1385-1398. doi:10.1080/09537287.2019.1710304
- [20] CIAL. (2018). *Cial.it*. Tratto da https://www.clal.it/?section=consegne_reg_it&year=2018
- [21] Cirera, J., Carino, J., Zurita, D., & Ortega, J. (2020). Improving the energy efficiency of industrial refrigeration systems by means of data-driven load management. *Processes*, 8(1106). doi:10.3390/pr8091106
- [22] Clairand, J., Briceno-Leon, M., Escriva-Escriva, G., & Pantaleo, A. (2020). Review of energy efficiency technologies in the food industry: Trends, barriers, and opportunities. *IEEE Access*, 8(9026886). doi:10.1109/ACCESS.2020.2979077
- [23] Codice ATECO. (2022). *C - Attività Manifatturiere*. Tratto da <https://codiceateco.it/sezione?q=C>
- [24] COMIECO. (2019). *Rapporto raccolta, riciclo e recupero di carta e cartone 2018*. Tratto da https://www.comieco.org/allegati/2019/8/24mo-rapporto-comieco_dati-anno-2018_179877.pdf

- [25] CONAI. (2019). *Programma generale di prevenzione e di gestione degli imballaggi e dei rifiuti di imballaggio. Relazione generale consuntiva 2018*. Tratto da <http://www.conai.org/comunicazione/rapporto-di-sostenibilita-page/>
- [26] Coppola, g., Costantini, M., Fusi, A., Ruiz-Garcia, L., & Bacenetti, J. (2022). Comparative life cycle assessment of conventional and organic hazelnuts production systems in Central Italy. *Science of the Total Environment*, 826(154107).
- [27] Corallo, A., Latino, M., Menegoli, M., & Pontrandolfo, P. (2020). A systematic literature review to explore traceability and lifecycle relationship. *International Journal of Production Research*, 58, 4789-4807. doi:10.1080/00207543.2020.1771455
- [28] COREPLA. (2018). Tratto da <http://www.corepla.it/documenti/7ebe111b-2082-46d5-8da6-7567154632ca/Rapporto+di+Sostenibilita%CC%80+2018.pdf>
- [29] COREVE. (2019). Tratto da <https://coreve.it/wp-content/uploads/2019/06/PspCorevemaggio2019-dati2018-31maggio2019.pdf>
- [30] Cotrim, W. , Minim, V., Felix, L., & Minim, L. (2020). Short convolutional neural networks applied to the recognition of the browning stages of bread crust. *Journal of Food Engineering*, 277(109916). doi:10.1016/j.jfoodeng.2020.109916
- [31] Cruz Introiini, S., Boza, A., & Alemany Díaz, M. (2020). Traceability in the Food Supply Chain: Review of the literature from a technological perspective. *Direccion y Organizacion*, 50-55. doi:10.37610/DYO.V0I64.522
- [32] Dantas, T., De- Souza, E., Destro, I., Hammes, G., Rodriguez, C., & Soares, S. (2020). How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213-227. doi:10.1016/j.spc.2020.10.005
- [33] De Daverio, M., Mancuso, T., Peri, M., & Bladi, L. (2021). How does consumers' care for origin shape their behavioural gap for environmentally friendly products? *Sustainability (Switzerland)*, 13(190), 1-19. doi:10.3390/su13010190
- [34] Delaby, L., Finn, J., Grange, G., & Horan, B. (2020). Pasture-Based Dairy Systems in Temperate Lowlands: Challenges and Opportunities for the Future. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4(543587). doi:10.3389/fsufs.2020.543587
- [35] Dhaliwal, H., Browne, M., Flanagan, W., Laurin, L., & Hamilton, M. (2014). A life cycle assessment of packaging options for contrast media delivery: comparing polymer bottle vs. glass bottle. *The International Journal of Life Cycle Assessment* , 1965–1973. doi:<https://doi.org/10.1007/s11367-014-0795-1>
- [36] ECHA. (2020). *CLP*. Tratto da <https://echa.europa.eu/it/regulations/clp/legislation>
- [37] Ecolan, E. (2016). *Ecolan filling machines EL3+ and EL4+*.

- [38] Eionet Portal. (2019). *ETC/WMGE Report 3/2019: Are we losing resources when managing Europe's waste?* Tratto da <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/are-we-losing-resources-when-managing-europes-waste-1>
- [39] EPD Ecolean. (2016). *Ecolean filling machines EL3+ and EL4+*. Tratto da <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/d985334b-d8df-4d16-181d-08d972a96257/Data>
- [40] EPD International. (2020). *Machines for filling and packaging of liquid food*. Tratto da Product Category Rules (PCR): <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/62d1392b-cf22-42fa-932d-374cb4028781/Data>
- [41] EuRIC AISBL. (2018). *Plastic Recycling Factsheet*. Tratto il giorno 2022 da https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/euric_-_plastic_recycling_fact_sheet.pdf
- [42] EUR-Lex. (2020). *Direttiva 2006/66/CE relativa a pile e accumulatori e ai rifiuti di pile e accumulatori*. Tratto da <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/LSU/?uri=celex:32006L0066>
- [43] Eur-LEX. (2020). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020*. Tratto da <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0798>
- [44] European Commission. (2018). *Study in support of evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators*. Tratto il giorno 2022 da <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/Published%20Supporting%20Study%20Evaluation.pdf>
- [45] European Commission. (2022). *European Platform on Life Cycle Assessment (LCA)*. Tratto da <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm>
- [46] Eurostat. (2019). *Agriculture, forestry and fishery statistics*. Luxembourg: Edward Cook. Tratto il giorno 2020
- [47] Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., & Nino, P. (2020). Water energy food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy. *Environmental Science and Policy*, 104, 1-12. doi:10.1016/j.envsci.2019.10.008
- [48] Fanzo, J., Bellows, A., Spiker, M., Thorne-Lyman, A., & Bloem, M. (2021). The importance of food systems and the environment for nutrition. *American Journal of Clinical Nutrition*, 113, 7-16. doi:10.1093/ajcn/nqaa313
- [49] Favi, C., Germani, M., Land, D., Mengarelli, M., & Rossi, M. (2018). Comparative life cycle assessment of cooking appliances in Italian kitchens. *Journal of Cleaner Production*, 186, 430-449.

- [50] Federacciai. (2021). *Rapporto di sostenibilità 2021*. Tratto da <http://federacciai.it/rapporto-di-sostenibilita-2021/>
- [51] Food and Agriculture Organization. (2021). *Food Loss and Food Waste*. Tratto il giorno February 26, 2021 da <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/flw-data>
- [52] Gallo, A., Accorsi, R., Goh, A., Hsiao, H., & Manzini, R. (2021). A traceability-support system to control safety and sustainability indicators in food distribution. *Food Control*, 124(107866). doi:10.1016/j.foodcont.2021.107866
- [53] *Gea remote support filling*. (2022). Tratto da <https://www.gea.com/en/products/filling-packaging/aseptic-fillers/remote-support-filling.jsp>
- [54] *Gea Smart Filling*. (2022). Tratto da <https://www.gea.com/en/products/filling-packaging/aseptic-fillers/gea-smart-filling.jsp>
- [55] Gestione-rifiuti.it. (2022). *Smaltimento Alluminio*. Tratto da <http://gestione-rifiuti.it/smaltimento-alluminio>
- [56] Gestione-Rifiuti.it, & Sicurezza Operativa Ambientale. (2022). *Smaltimento e riciclo Accumulatori al Piombo*. Tratto da <http://gestione-rifiuti.it/smaltimento-accumulatori-piombo>
- [57] Giannoccaro, N., Persico, G., Strazzella, S., Lay-Ekuakille, A., & Visconti, P. (2020). A System for Optimizing Fertilizer Dosing in Innovative Smart Fertigation Pipelines: Modeling, Construction, Testing and Control. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 1581-1596. doi:10.1007/s12541-020-00349-1
- [58] Gimenez-Escalante, P., Garcia-Garcia, G., & Rahimifard, S. (2020). A method to assess the feasibility of implementing distributed Localised Manufacturing strategies in the food sector. *Journal of Cleaner Production*, 266(121934). doi:10.1016/j.jclepro.2020.121934
- [59] Grosso, G., Fresán, U., Bes-rastrollo, M., Marventano, M., & Galvano, F. (2020). Environmental impact of dietary choices: Role of the mediterranean and other dietary patterns in an Italian cohort. *Environmental impact of dietary choices: Role of the mediterranean and other dietary patterns in an Italian cohort*, 17(1468). doi:10.3390/ijerph17051468
- [60] GS1 Italy. (2022). Tratto da <https://gs1it.org/migliorare-processi/automatizza-la-codifica-con-epc-rfid/>
- [61] Gunnarsson, S., Segerkvist, K., Göransson, L., Hansson, H., & Sonesson, U. (2020). Systematic mapping of research on farm-level sustainability in egg and chicken meat production. *Sustainability (Switzerland)*, 12(3033). doi:10.3390/su12073033
- [62] Hänsel, M., Schmidt, J., Stiasny, M., Stöven, M., Voss, R., & Quaas, M. (2020). Ocean warming and acidification may drag down the commercial Arctic cod fishery by 2100. *PLoS ONE*, 15(e0231589). doi:10.1371/journal.pone.0231589
- [63] Industry-4. (2022). Tratto da <https://www.industry-4.it/cos-%C3%A8-industria-4-0/>

- [64] International Energy Agency. (2022). *Energy Statistics Data Browser*. doi:<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>
- [65] ISPRA. (2021). *Rapporto rifiuti speciali*. Tratto da https://www.isprambiente.gov.it/files2021/pubblicazioni/rapporti/rapportorifiutispeciali_ed-2021_n-344_versioneintegrale.pdf
- [66] ItFood. (2022). *I sistemi rfid nel settore Agro-alimentare*. Tratto da <https://www.itfoodonline.com/blog/i-sistemi-rfid-nel-settore-agro-alimentare/>
- [67] Jagtap, S., Garcia-Garcia, G., & Rahimifard, S. (2021). Optimisation of the resource efficiency of food manufacturing via the Internet of Things. *Computers in Industry*, 127(103397). doi:10.1016/j.compind.2021.103397
- [68] Jambrak, A., Nutrizio, M., Djekić, I., Pleslić, S., & Chemat, F. (2021). Internet of nonthermal food processing technologies (Iontp): Food industry 4.0 and sustainability. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11, 1-20. doi:10.3390/app11020686
- [69] Kayikci, Y., Subramanian, N., Dora, M., & Bhatia, M. (2020). Food supply chain in the era of Industry 4.0: blockchain technology implementation opportunities and impediments from the perspective of people, process, performance, and technology. *Production Planning and Control*. doi:10.1080/09537287.2020.1810757
- [70] Khan, P., Byun, Y., & Park, N. (2020). IoT-blockchain enabled optimized provenance system for food industry 4.0 using advanced deep learning. *Sensors (Switzerland)*, 20(2990). doi:10.3390/s20102990
- [71] Kodan, R., Parmar, P., & Pathania, S. (2020). Internet of Things for Food Sector: Status Quo and Projected Potential. *Food Reviews International*, 584-600. doi:10.1080/87559129.2019.1657442
- [72] Kompass. (2022). Tratto da <https://it.kompass.com/>
- [73] Konur, S., Lan, Y., Thakker, D., Morkyani, G., Polovina, N., & Sharp, J. (2021). Towards design and implementation of Industry 4.0 for food manufacturing. *Neural Computing and Applications*. doi:10.1007/s00521-021-05726-z
- [74] Kouloumpis, V., Pell, R., Correa-Cano, M., & Yan, X. (2020). Potential trade-offs between eliminating plastics and mitigating climate change: An LCA perspective on Polyethylene Terephthalate (PET) bottles in Cornwall. (138681). doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138681>
- [75] Koumparou, D. (2018). The Governance of the Sociogenic Climate Change: Perspectives and Challenges. *Review of Social Studies*, 5(1). doi:10.21586/ross0000055

- [76] Kunkel, S., & Matthes, M. (2020). Digital transformation and environmental sustainability in industry: Putting expectations in Asian and African policies into perspective. *Environmental Science and Policy*, 112, 318-329. doi:10.1016/j.envsci.2020.06.022
- [77] Larsen, V., Tollin, N., Sattrup, P., & Birkved, M. (2022). What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, LCSA. *Journal of Building Engineering*, 50(104203).
- [78] Matsumoto, T., Chen, Y., Nakatsuka, A., & Wang, Q. (2020). Research on horizontal system model for food factories: A case study of process cheese manufacturer. *International Journal of Production Economics*, 226(107616). doi:10.1016/j.ijpe.2020.107616
- [79] Min, K., Cuiffi, J., & Mathers, R. (2020). Ranking environmental degradation trends of plastic marine debris based on physical properties and molecular structure. *Nat Commun*, 11(1), art. no. 727.
- [80] Ministero della Transizione Ecologica. (2017). *Le tappe fondamentali dello Sviluppo Sostenibile*. Tratto da <https://www.mite.gov.it/pagina/le-tappe-fondamentali-dello-sviluppo-sostenibile>
- [81] Ministero dello Sviluppo Economico. (2021). *Industria alimentare*. Tratto il giorno 03 02, 2021 da <https://www.mise.gov.it/index.php/it/impresa/competitivita-e-nuove-imprese/industria-alimentare>
- [82] National Geographic. (2019). *The world's plastic pollution crisis explained*. Tratto il giorno 03 02, 2021 da <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/plastic-pollution>
- [83] Nindhia, T., McDonald, M., & Styles, D. (2021). Greenhouse gas mitigation and rural electricity generation by a novel two-stroke biogas engine. *Journal of Cleaner Production*, 280(124473). doi:10.1016/j.jclepro.2020.124473
- [84] Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., . . . Kitukutha, N. (2020). Impact of industry 4.0 on environmental sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 12(4674). doi:10.3390/su12114674
- [85] Our world in data. (2018). *Plastic Pollution*. Tratto il giorno 03 02, 2021 da <https://ourworldindata.org/plastic-pollution#:~:text=Over%20the%20next%2065%20years,thirds%20of%20the%20world%20population.>
- [86] PCR. (2019). *Packaging. Product Category Classification: Multiple CPC: Version 1.0. Valid until: 2023-11-08*.
- [87] Plastic Europe. (2018). *Overview of Plastic Waste from Building and Construction by Polymer and by Recycling, Energy Recovery and Disposal*. Tratto il giorno 2022 da <https://plasticseurope.org/plastics-explained/plastics-in-use/building-and-construction/>
- [88] Plastic Europe. (2019). *Plastic The fact*.

- [89] Plastic Europe. (2021). *Plastics in packaging*. Tratto il giorno 03 02, 2021 da <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/packaging>
- [90] Pré. (2022). *Life Cycle Assessment (LCA) explained*. Tratto da <https://pre-sustainability.com/articles/life-cycle-assessment-lca-basics/>
- [91] Questionario GS1 e RFID Lab. (2022, novembre 11). *Come la tecnologia RFID abilita la supply chain e il retail 4.0*. Tratto da <https://forms.gle/tkFdXKNHinRDA5hf6>
- [92] Rezaei, M., Soheilifard, F., & Keshvari, A. (2021). Impact of agrochemical emission models on the environmental assessment of paddy rice production using life cycle assessment approach. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. doi:10.1080/15567036.2020.1864066
- [93] RFID Lab. (2022). Tratto da <https://www.rfidlab.unipr.it/#>
- [94] RFID.it. (2021). *Etichette RFID sempre più diffuse nel settore alimentare*. Tratto da <https://rfid.it/etichette-rfid-sempre-piu-diffuse-nel-settore-alimentare/>
- [95] RICREA. (2020, Giugno 10). *Dichiarazione Ambientale*. Tratto il giorno 2020 da <https://www.consorzioricrea.org/wp-content/uploads/2020/01/Dichiarazione-Ambientale-RICREA-2019.pdf>
- [96] RILEGNO. (2019). *Rapporto 2019 Progetti, innovazione, prospettive*. Tratto da http://www.rilegno.org/wp-content/uploads/2019/05/Rilegno.Rapporto.2019.sito_.pdf
- [97] Rogkas, N., Tsolakis, E., Kalligeros, C., Vasileiou, G., Vakouftsis, C., Kaisarlis, G., . . . Spitas, V. (2021). Upcycling obsolete mechanical equipment into innovative laboratory test rigs: A low-cost solution or a sustainable design approach? *Proceedings of the Design Society*, 3309 - 3318. doi:<https://www.doi.org/10.1017/pds.2021.592>
- [98] Roibása, L., Rodríguez-García, S., Valdramidis, V., & Hosp, A. (2018). The relevance of supply chain characteristics in GHG emissions: The carbon footprint of Maltese juices. *Food Research International*, 107, 747 - 754. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.02.067>
- [99] Sadiq, S., Amjad, M., Rafique, M., Hussain, S., Yasmeen, U., & Khan, M. (2021). An integrated framework for lean manufacturing in relation with blue ocean manufacturing - A case study. *Journal of Cleaner Production*, 279(123790). doi:10.1016/j.jclepro.2020.123790
- [100] Sahal, R., Alsamhi, S., Breslin, J., & Ali, M. (2021). Industry 4.0 towards forestry 4.0: Fire detection use case. *Sensors (Switzerland)*, 21. doi:10.3390/s21030694
- [101] Salwa, H., Sapuan, S., Mastura, M., & Zuhri, M. (2020). Life cycle assessment of sugar palm fiber reinforced-sago biopolymer composite takeout food container. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(7951). doi:10.3390/app10227951
- [102] Schindler. (2019). EPD - Environmental Product Declaration Schindler 3300 EU. Low impact, high performance. Ecological facts and figures. *EPD International AB(S-P-01460 (UN CPC 4354))*.

- [103] Scozzafava, G., Gerini, F., Boncinelli, F., Marone, C., Marone, E., & Casini, L. (2020). Organic milk preference: is it a matter of information? *Appetite*, 144(104477). doi:10.1016/j.appet.2019.104477
- [104] Siad. (2021). Tratto da <https://www.siad.com/it/azoto-gassoso>
- [105] Siad. (2021). *Azoto Gassoso e Liquido*. Tratto da <https://www.siad.com/documents/30774/82464/propriet%C3%A0+.pdf/8bc6fa10-876f-726d-9330-e280ca24170c>
- [106] Siddh, M., Soni, G., Jain, R., Sharma, M., & Yadav, V. (2020). A framework for managing the agri-fresh food supply chain quality in Indian industry. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. doi:10.1108/MEQ-05-2020-0085
- [107] Spanosa, C., Turney, D., & Fthenakis, V. (2015). Life-cycle analysis of flow-assisted nickel zinc-, manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction. *Energy Reviews*, 43, 478-494. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.072>
- [108] Stefanini, R., & Vignali, G. (2020). Organic and eco-sustainable packaged food products: a possible solution to close the gap between consumer perception and real data. XXV Summer School Francesco Turco.
- [109] Stefanini, R., & Vignali, G. (2021). Food engineering systems in the next future: a compromise between sustainability and Industry 4.0. *XXVI Summer School Francesco Turco, Industrial Systems Engineering*.
- [110] Stefanini, R., & Vignali, G. (2022). The Environmental, Economic and Social Impact of Industry 4.0 in the Food Sector: a Descriptive Literature Review. Nantes: 10th IFAC conference.
- [111] Stefanini, R., Borghesi, G., Ronzano, A., & Vignali, G. (2021). Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles. *The international Journal of Life Cycle Assessment*. doi:<https://doi.org/10.1007/s11367-020-01804-x>
- [112] Stefanini, R., Bricoli, B., & Vignali, G. (2022). Manufacturing, use phase or final disposal: where to focus the efforts to reduce the environmental impact of a food machine. *Production & Manufacturing Research*, 10(1), p. 624-640. doi:<https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2110170>
- [113] Stefanini, R., Bricoli, G., & Vignali, G. (2022). How is possible to reduce the environmental impact of the use phase of food systems. *XXVII Summer School Francesco Turco - Unconventional Plants*.
- [114] Stefanini, R., Tancredi, G., Vignali, G., & Monica, L. (2022). Industry 4.0 and Intelligent Predictive Maintenance: a survey about the advantages and constraints in the Italian context. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. doi:<https://doi.org/10.1108/JQME-12-2021-0096>

- [115] Takacs, B., & Borrion, A. (2020). The use of life cycle-based approaches in the food service sector to improve sustainability: A systematic review. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1573). doi:10.3390/SU12093504
- [116] Technofunc. (2022). Tratto da <https://www.technofunc.com/index.php/domain-knowledge/engineering-construction/item/construction-industry-sectors>
- [117] United Nations. (2015, 10 21). *Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015*. Tratto il giorno 03 02, 2021 da <https://unric.org/it/wp-content/uploads/sites/3/2019/11/Agenda-2030-Onu-italia.pdf>
- [118] Unterreiner, L., Julch, V., & Reith, S. (2016). Recycling of Battery Technologies – Ecological Impact Analysis Using Life Cycle Assessment (LCA). *Energy Procedia*, 99, 229-234. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.113>
- [119] van Geest, M., Tekinerdogan, B., & Catal, C. (2021). Design of a reference architecture for developing smart warehouses in industry 4.0. *Computers in Industry*, 124(103343). doi:10.1016/j.compind.2020.103343
- [120] Verde, S., Ferreira, I., Madureira, J., Barros, L., Magarca, F., & Santos-Buelga, C. (2020). Ionizing radiation technologies to increase the extraction of bioactive compounds from agro-industrial residues: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68, 11054-11067. doi:10.1021/acs.jafc.0c04984
- [121] Wohner, B., Gabriel, V., Krenn, B., & Krauter, V. (2020). Environmental and economic assessment of food-packaging systems with a focus on food waste. Case study on tomato ketchup. *Science of the Total Environment*, 738(139846). doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139846
- [122] WWF. (2019). *Più di 33mila bottigliette di plastica finiscono ogni minuto nel Mediterraneo*. Tratto da <https://www.wwf.it/pandanews/ambiente/piu-di-33mila-bottigliette-di-plastica-finiscono-ogni-minuto-nel-mediterraneo/>
- [123] Yong, J., Chew, K., Khoo, K., Show, P., & Chang, J.-S. (2021). Prospects and development of algal-bacterial biotechnology in environmental management and protection. *Biotechnology Advances*, 47(107684). doi:10.1016/j.biotechadv.2020.107684

10 Ringraziamenti

Giunta al termine della Tesi, desidero ringraziare Parmalat, GEA Group, GS1 Italy, Bio Sant'Anna e INAIL che hanno permesso la realizzazione dei progetti citati, nonché i loro referenti che mi hanno supportata nella raccolta dati. Ringrazio inoltre i professori che mi hanno invitata a collaborare in tali ricerche: in primis il mio tutor Prof. Giuseppe Vignali, che in tre anni mi ha dato l'opportunità di svolgere infinite attività che mi hanno sempre appassionata e mi hanno permesso di crescere a livello professionale e personale; il Prof. Antonio Rizzi che mi ha coinvolta nel progetto con GS1 Italy, e la Prof.ssa Eleonora Bottani che mi ha seguita fornendomi sempre preziosi consigli.

Un grazie di cuore va ai miei colleghi: la mia LCA Analyst Giulia, vera amica oltre che collega indimenticabile; Arianna, la migliore tesista a cui mi sono affezionata e che ho la fortuna di avere ora al mio fianco nel lavoro e non solo; Giovanni, sempre pronto a dare il suo supporto; Luca e Stefano, i nuovi membri del nostro gruppo di ricerca. Grazie anche agli altri dottorandi, come Veronica, Giorgia e Letizia, che mi hanno accompagnata. Infine, un pensiero va anche agli studenti che ho seguito e che mi hanno dato feedback positivi sull'operato, spronandomi a continuare con il lavoro che più amo: insegnare, sempre imparando a mia volta.

Infine, ci tengo a ritagliare queste ultime righe per le persone speciali che mi circondano. Grazie a Silvia, Stefano e Marco, la mia famiglia, per avermi sostenuta ed aver rispettato ogni mia scelta. So che la carriera accademica vi spaventava, ma è stato bello vedervi felici ad ogni mio risultato. Grazie a Salvatore, compagno di avventure e di vita da sette anni, per aver sempre creduto in me e per essersi sorbita le mie "prove" di lezioni nei viaggi lunghi in macchina, nonché al mio Baloo, per avermi accolta scodinzolando ad ogni rientro dall'ufficio. Ringrazio i miei parenti, i miei padrini Roberto e Betta, la famiglia di Salvo (ormai anche mia), ed in particolare Rosalia, per il costante interesse nel mio percorso. Ho la fortuna di avere un'altra grande famiglia: i miei amici. In particolare, ci tengo a menzionare Grazia, l'inseparabile amica di sempre, Francesca, costantemente presente, Paolo, di cui ho impresso il suo "Robbe tu il Dottorato lo devi fare", Giulia, Giovanni, Simona, Chiara, Cecilia, Alessia, Carla, Daria, Fabiana, Sara, per aver sempre creduto in me. Sono davvero felice e soddisfatta del coraggio che ho avuto tre anni fa, nonostante molte cose remassero contro, nell'inseguire il mio sogno che ora sembra molto più vicino, ma se sono riuscita a concludere questo percorso è anche grazie alle persone meravigliose che mi hanno accompagnata.

"Il segreto, cara Alice, è circondarsi di persone che ti facciano sorridere il cuore. È allora, solo allora, che troverai il Paese delle Meraviglie" (Lewis Carroll – Alice in Wonderland).

Grazie di cuore a tutti.

Roby

