



Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Valutazione ambientale e variabilità temporale di
parametri significativi di prodotto. Il caso studio
Electrolux.

Environmental assessment and temporal
variability of significant product parameters. The
Electrolux case study.

Tesi di Laurea:
Giulia Biancucci

Relatore:
Prof. Ing. Michele Germani

Co-Relatore:
Ing. Federica Cappelletti

A.A.-2021/2022

INDICE

1. Introduzione.....	1
2. La sostenibilità di prodotto nel tempo	2
2.1 Sostenibilità di un prodotto	2
2.2 Attributional LCA	6
2.3 Consequential LCA	12
2.3.1 Ecoinvent consequential database	25
2.4 Durabilità e sostenibilità.....	26
2.4.1 Durability index.....	29
3. Metodo.....	34
4. Caso di studio: Electrolux fridge	37
4.1 Valutazione sostenibilità ambientale mediante LCA attributiva.....	37
4.1.1 Food waste.....	42
4.2 Durabilità del prodotto	43
4.2.1 Foam aging	44
4.2.2 Energy mix	50
4.2.3 Durability Index.....	52
4.3 Consequential LCA vs “New approach”	77
5. Discussione risultati.....	80
6. Conclusione	82
Bibliografia.....	83

1. Introduzione

Era il 1972 quando i leaders globali si riunirono in Svezia per la prima conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente. Erano presenti 113 governi per discutere dell'impatto dell'uomo sul mondo della natura.

“È chiaro che la crisi ambientale che sta affrontando il mondo cambierà profondamente il destino futuro del nostro pianeta. Nessuno tra noi, qualunque sia la nostra condizione, forza o circostanza, può rimanere inalterato.” (Indira Gandhi, Primo Ministro dell'India 1972)

“L'ambiente umano cambierà sempre, lo sviluppo continuerà. Ci sarà crescita. Questo non può e non deve essere evitato. La questione decisiva è in quale direzione ci svilupperemo, con quali mezzi cresceremo, quali qualità vogliamo raggiungere e con quali valori noi vogliamo guidare il nostro futuro.” (Olof Palme, Primo Ministro della Svezia 1972)

Con il passare degli anni è in continua crescita l'impronta che l'uomo lascia sulla natura che lo circonda. Allo stesso tempo però si fanno passi avanti nella ricerca di tecnologie, stili di vita e pensieri che possano in qualche modo salvare l'ambiente.

L'obiettivo di questa tesi sarà quello di approfondire metodologie attuali che sono in via di sviluppo per una valutazione più dettagliata, ma anche facilmente generalizzabile, dell'impatto che l'uomo e tutto ciò che lo riguarda ha nei confronti del sistema ambiente.

Inizialmente verrà valutato il concetto di sostenibilità prodotto nel tempo dal punto di vista teorico e degli strumenti ad esso associati. Successivamente, dopo aver introdotto il metodo attraverso il quale si è basata l'analisi, si passerà all'applicazione pratica al caso studio dell'Electrolux fridge.

2. La sostenibilità di prodotto nel tempo

2.1 Sostenibilità di un prodotto

Nel 2015 l'ONU ha pubblicato i cosiddetti 17 obiettivi dello sviluppo sostenibile, dimostrando quanto siano diverse le sfide che si possono affrontare nel campo della sostenibilità. Infatti, i prodotti hanno differenti impatti, che possono essere classificati nell'ambito ecologico, sociale ed economico, ognuno dei quali è caratterizzato da diverse categorie d'impatto. Oggi, si hanno maggiori attenzioni su ciò che riguarda i gas serra, quindi alcuni prodotti o servizi vengono dichiarati a impatto climatico zero perché in grado di compensare le emissioni.

Pertanto, sono stati introdotti dei metodi sostenibili per lo sviluppo del prodotto classificati in: metodi o strumenti per la valutazione sostenibile, che vanno ad analizzare prodotti già esistenti e i loro impatti ambientali, sociali ed economici ("metodi di analisi") e metodologie di design sostenibile che supportano gli ingegneri nella valutazione di prodotti più sostenibili ("metodi di sintesi"). All'interno dei metodi di analisi fa parte la valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA) o il product environmental footprint (PEF). Tali metodologie tendono però ad essere applicate retrospettivamente, ma, nonostante ciò, conoscere il ciclo di vita del prodotto e i suoi impatti può aiutare a ridurli nelle successive generazioni di prodotti (Simon Mörsdorf, 2022).

Allo stesso tempo è anche importante l'interconnessione tra i vari pilastri della sostenibilità (sociale, economico ed ambientale); infatti, una misura per ridurre le emissioni locali può portare all'insorgere di ingiustizie sociali da un'altra parte del mondo.

Tra i tanti metodi, strumenti e approcci che sono stati progettati per supportare la transizione del settore industriale verso il design sostenibile e sviluppo del prodotto, solo alcuni sono stati implementati. Allo stesso tempo, le considerazioni sulla sostenibilità continuano ad essere sostituite a favore di requisiti di prodotto più tradizionali riguardanti, ad esempio, costi, prestazioni e producibilità. Infatti, la semplice implementazione di metodi e strumenti di

progettazione sostenibili nel processo di sviluppo del prodotto non garantirebbe un aumento delle prestazioni di sostenibilità del prodotto, se tale sviluppo non riuscisse a soddisfare altre tipologie di requisiti. Per tale motivo, è suggerita la presenza di un esperto di ecodesign nella fase iniziale in cui i bisogni vengono confrontati e migliorati in requisiti iniziali, così da evitare di andare incontro a caratteristiche del prodotto che non siano in grado di soddisfare tutte le necessità.

Con l'obiettivo di supportare l'attuazione di strategie di miglioramento ambientale nei prodotti, ad esempio l'efficienza delle risorse e dell'energia, è stata registrata un'evoluzione verso l'aumento dei flussi di risorse circolari e nell'aiutare le aziende a progettare prodotti senza causare impatti ambientali e sociali negativi nell'intero ciclo di vita del prodotto. Quando tale implementazione viene integrata nelle prime fasi del processo di innovazione del prodotto, può essere definita come "Sviluppo di prodotto sostenibile" (Matilda Watz, 2022).

L'integrazione della sostenibilità nella fase decisionale del progetto è quindi anche un prerequisito per gestire l'integrazione dei criteri di sostenibilità nello sviluppo iniziale del concetto, che è fondamentale per massimizzare l'influenza sulle prestazioni di sostenibilità del ciclo di vita di un prodotto. Infatti, operare in queste condizioni può essere definito come il raggiungimento della "maturità della sostenibilità" (Matilda Watz, 2022).

Pertanto, gli interessi verso la sostenibilità non possono essere affrontati in attività separate, ma devono essere parte della strategia aziendale, venendo coinvolti in operazioni sostenibili come la progettazione e lo sviluppo del prodotto.

È bene da parte delle aziende sviluppare ed implementare degli strumenti di progettazione adatti alla sostenibilità per facilitare l'integrazione dei rispettivi criteri nel tradizionale supporto alle decisioni.

Secondo Hallstedt e Isaksson, infatti, sviluppare un prodotto sostenibile significa che “una prospettiva strategica sostenibile è integrata e implementata nelle prime fasi del processo innovazione prodotto, includendo il pensiero del ciclo-vita”.

In pratica in un contesto di sviluppo prodotto, i principi di sostenibilità sono stati applicati per la Strategic Life-Cycle Assessment (SLCA) dove una visione della soluzione sostenibile è sviluppata, ovvero gli impatti che sono essenziali da un punto di vista sostenibile, vengono identificati per guidare le analisi e il miglioramento (Jesko Schulte, 2022).

I tentativi di miglioramento e ulteriore sviluppo si basano sull’approccio di “previsione”, a differenza dell’approccio di “backcasting” che, tramite l’idealizzazione dello stato target desiderato in futuro, designa i passaggi da realizzare guardandosi indietro per poi arrivare alla condizione presente. L’obiettivo principale è avere un impatto positivo sul nostro ambiente, sulla nostra società ed economia. Inoltre, i prodotti sviluppati dovrebbero raggiungere un’elevata soddisfazione del cliente e allo stesso tempo avere un impatto positivo garantito in tutti i pilastri e le categorie: PIP – Positive Impact Product (Simon Mörsdorf, 2022).

La Positive Impact Product Engineering (PIPE) è una metodologia che cerca di incorporare ed utilizzare approcci precedenti con l’obiettivo di ottenere un impatto positivo in tutti i pilastri della sostenibilità.

Tutti i potenziali impatti sono divisi in tre tipologie:

- Impatti negativi, non compensabili e quindi irreversibili, che devono essere completamente evitati (rosso);
- Impatti negativi, attualmente non evitabili, che non possono essere ulteriormente ridotti e che quindi devono essere sovracompensati (giallo);
- Impatti positivi, che dovrebbero essere potenziati (verde) (Simon Mörsdorf, 2022).

Sustainability pillar		Ecological	Social	Economic
Type of impact	Red	Radioactive waste	Forced labor	Exploitation
	Yellow	CO ₂ emissions → Plant trees	Educational deficits among workers → Educational projects	Unfair profit distribution → Donation to disadvantaged
	Green	Binding of toxins	Well being	Durability

Tabella 1 Le tipologie di impatto per i 3 pilastri della sostenibilità (Simon Mörsdorf, 2022)

Dall'altra parte si parla anche di rischio sostenibile; infatti, nella ISO 31000:2018 il rischio è definito come "l'effetto dell'incertezza sugli obiettivi". Prima, invece, questo concetto era stato definito come rischio causato da questioni ambientali o di giustizia sociale e come una ricca varietà di modi differenti attraverso cui le imprese possono essere influenzate.

Nel frattempo, ci sono anche aziende che sfruttano le opportunità legate alla sostenibilità e anticipano cambiamenti di mercato, con conseguente sostanziale vantaggio competitivo e guadagni finanziari, classificando i rischi sostenibili in sei categorie: fisici, normativi, contenziosi, competitivi, reputazionali e legati alla supply chain. Durante lo sviluppo del prodotto la valutazione del rischio sostenibile propone di fare una valutazione del ciclo vita (LCA) del prodotto, poi una valutazione del rischio sostenibile e infine studiare gli effetti di questi rischi utilizzando i costi del ciclo vita basati sulle attività. È stato evidenziato che i rischi ambientali con i quali si interfaccia un'azienda (parte sinistra della Figura 1) dipendono direttamente dalle azioni dell'azienda quando si tratta di sostenibilità (parte destra della Figura 1) (Jesko Schulte, 2022).

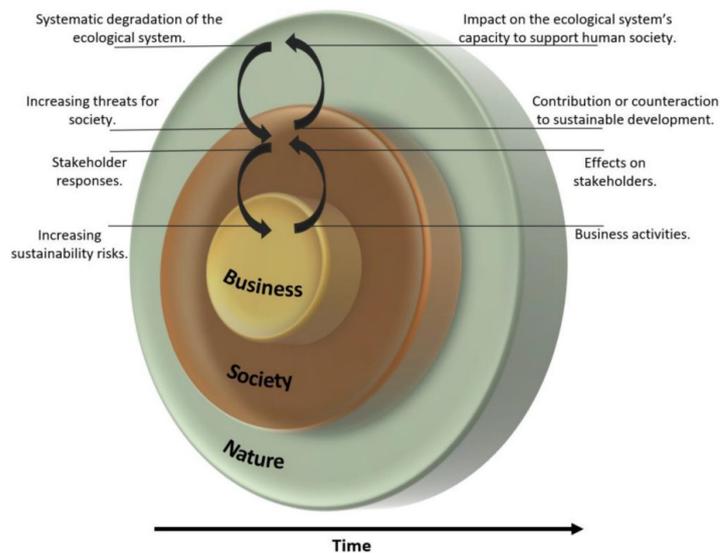


Figura 1 La sostenibilità e le sue implicazioni per la gestione del rischio aziendale

Tuttavia, gli approcci esistenti per la gestione del rischio di sostenibilità presentano limitazioni in termini di:

- Richiesta di informazioni dettagliate, che di solito non sono disponibili nella fase iniziale;
- Concentrazione sulla sostenibilità ambientale anziché su una prospettiva di sostenibilità socio-ecologica completa;
- Concentrazione sulla connessione tra gli aspetti della sostenibilità e il costo del prodotto invece della prospettiva del valore ai portatori di interesse;
- Mancanza di una prospettiva strategica a lungo termine (Jesko Schulte, 2022).

2.2 Attributional LCA

Oggi le attività umane stanno aumentando e vanno sempre di più ad influenzare tutto ciò che le circonda. Le Nazioni Unite hanno stimato nel 2020 che il 20% della superficie totale della Terra è stata degradata tra il 2000 e il 2015. Nel frattempo, circa il 59% dei nostri oceani stanno

subendo impatti cumulativi da una varietà di fattori di stress come: il cambiamento climatico, lo sfruttamento eccessivo delle risorse, l'inquinamento e il trasporto marittimo.

Per valutare quello che è il relativo impatto che un prodotto o un servizio ha nei confronti dell'ecosistema durante il suo intero ciclo di vita si adotta il metodo di valutazione LCA, ovvero Life Cycle Assessment.

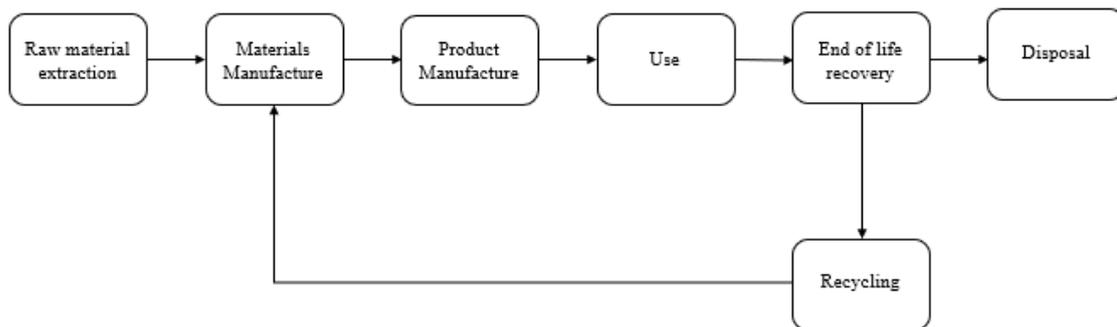


Figura 2 Fasi LCA

Il Life Cycle Assessment è una metodologia che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto o servizio, prendendo in considerazione l'intero ciclo di vita di un prodotto. Per questo motivo si parla di una trattazione del tipo “from cradle to grave” e del potenziale impatto ambientale legato all'uso e al consumo delle risorse naturali (estrazione, trattamento e lavorazione delle materie prime) e delle conseguenze ambientali dei rilasci dovuti alla produzione, al trasporto, all'uso, riuso e manutenzione fino al riciclo e alla sua collocazione finale dopo l'uso.

Quest'analisi può essere effettuata in qualunque fase del ciclo di vita, ma la sua utilità è predominante nella fase iniziale di progettazione; infatti, tale metodologia funge da supporto all'Ecodesign, ma utilizzarla nelle prime fasi risulta essere complicato per via della scarsità di dati che si hanno a disposizione.

Gli obiettivi, inoltre, sono quelli di identificare opportunità per migliorare le prestazioni ambientali dei prodotti in vari punti del loro ciclo di vita, informare i decision-makers presenti

nell'industria, selezionare rilevanti indicatori delle prestazioni ambientali, includendo tecniche di misurazione e marketing (ad es. fare una campagna ambientale).

Prima di passare all'impostazione delle fasi che caratterizzano l'analisi, sarebbe bene decidere la tipologia di sistema su cui incentrare lo studio. Infatti, si potrebbe pensare ad un intero sistema di prodotto oppure all'utilizzo di sistemi unitari. Quest'ultimi in genere tendono a rendere più facile l'identificazione degli elementi in ingresso e in uscita del sistema di prodotto stesso.

Secondo la UNI EN ISO 14040 e UNI EN ISO 14044 lo studio dell'LCA prevede quattro fasi:

- a) Definizione dell'obiettivo, dell'unità funzionale e del campo di applicazione;
- b) Analisi dell'inventario;
- c) Valutazione degli impatti;
- d) Interpretazione.

La prima fase è influenzata dal soggetto che effettua l'analisi e dall'utilizzo previsto dallo studio. In particolare, si vanno a definire le motivazioni dello studio, il tipo di pubblico a cui è destinata l'analisi, l'oggetto di studio sul quale sarà effettuata l'analisi (es. prodotto, servizio o processo produttivo) e l'unità di misura ad esso associato sulla base della quale sarà possibile effettuare confronti in futuro. Inoltre, è bene anche definire il campo di applicazione che determinerà l'affidabilità dei risultati che si ottengono dall'analisi, includendo aspetti come:

- Il confine del sistema di analisi;
- Le categorie di impatto da valutare;
- Le metodologie di valutazione (EI99, EDIP96, etc.);
- La qualità dei dati;
- Le limitazioni del metodo;
- Le ipotesi iniziali.

La seconda fase detta LCI (Life Cycle Inventory) contiene le informazioni legate ai dati in ingresso e in uscita relativi al sistema da studiare. I dati per ogni processo sono classificabili in:

- Elementi in ingresso (energia, materie prime, etc.);
- Prodotti, coprodotti e rifiuti del processo;
- Emissioni in aria, scarichi nell'acqua e nel suolo;
- Altri aspetti ambientali.

Tali informazioni sono raccolte all'interno di appositi database quali Ecoinvent.

Nelle valutazioni effettuate all'interno di questa trattazione sono stati utilizzati nel dettaglio i seguenti modelli di sistema:

- “Allocation, cut-off by classification”, che si basa sull'approccio del contenuto riciclato;
- “Substitution, consequential, long-term”, che utilizza diverse ipotesi di base per valutare le conseguenze di un cambiamento in un sistema esistente.

La terza fase detta LCIA (Life Cycle Impact Assessment) fornisce informazioni aggiuntive per contribuire a valutare i risultati LCI del sistema di prodotto. La valutazione è assistita da un software di calcolo (GaBi, SimaPro, etc.) che raccoglie i risultati dell'analisi LCA, visti come flussi in ingresso e in uscita e li “normalizza” in grandezze o parametri comprensibili ed utilizzabili.

Tra i tanti metodi presenti in SimaPro per la valutazione dell'impatto ambientale nel caso di studio in esame è stato utilizzato il ReCiPe 2016.

Quest'ultimo include sia le categorie d'impatto “midpoint” (orientate al problema) che “endpoint” (orientate al danno), che sono disponibili per tre diverse prospettive:

- Individualista (I);
- Gerarchico (H);
- Egualitario(E).

Midpoint	
<i>Categorie d'impatto</i>	<i>Fattori di caratterizzazione</i>
Climate change	Global Warming Potential $[\frac{yr}{kg\ CO_2\ eq}]$
Stratospheric ozone depletion	Ozone Depleting Substances (ODS) $[\frac{yr}{kg\ CFC-11\ eq}]$
Ionizing radiation	Level of exposure for the global population $[\frac{yr}{kBq\ Cobalt-60\ eq}]$
Ozone formation, human health	Change in intake rate of ozone due to change in emission of precursors $[\frac{yr}{kg\ NOx\ eq}]$
Fine particulate matter formation	Intake fraction of PM _{2.5} $[\frac{yr}{kg\ PM_{2.5}\ eq}]$
Ozone formation, terrestrial ecosystems	Change in intake rate of ozone due to change in emission of precursors $[\frac{yr}{kg\ NOx\ eq}]$
Terrestrial acidification	Acidification Potential (AP) $[\frac{yr}{kg\ SO_2\ eq}]$
Freshwater eutrophication	Environmental persistence (fate) of the emission of P containing nutrients $[\frac{yr}{kg\ P}]$
Marine eutrophication	Environmental persistence (fate) of the emission of N containing nutrients $[\frac{yr}{kg\ N}]$
Human carcinogenic toxicity	Environmental persistence (fate) and accumulation in the human food chain (exposure) and toxicity (effect) of a chemical $[\frac{yr}{kg\ 1,4-dichlorobenzene\ (1,4-DCB)}]$
Land use	Amount of land transformed or occupied for a certain time $[m^2*yr]$
Mineral resource scarcity	Surplus ore potential $[kg\ Cu\ eq]$
Fossil resource scarcity	Fossil fuel potential $[kg\ oil\ eq]$
Water use	The amount of fresh water consumption $[m^3]$

Tabella 2 Indicatori di impatto a livello midpoint

Endpoint	
<i>Categorie d'impatto</i>	<i>Fattori di caratterizzazione</i>
Human Health	[DALY], Disability Adjusted Life Years cioè anni vissuti al netto della disabilità, nonché la somma degli anni di vita persi per mortalità prematura e degli anni di vita vissuti in

	condizioni di salute non ottimale o di disabilità
Ecosystem Quality	[PDF*m ² *Year], indica l'incremento della percentuale di specie di piante vascolari che hanno alta probabilità di estinguersi
Resources	[MJ surplus], si intende la tendenza al depauperamento della qualità delle risorse.

Tabella 3 Indicatori di impatto a livello endpoint

I danni espressi nelle precedenti tipologie vengono normalizzati per ricavare un parametro univoco del danno ambientale.

Infatti,

$$W = N * P$$

(Eq. 1)

Dove:

- W, valore pesato del danno;
- N, valore del danno normalizzato;
- P (P1, P2, P3), fattore peso proprio di ogni categoria di danno.

Quanto più elevato è P tanto maggiore è il danno causato dal processo in esame.

La quarta fase consiste nel riepilogare e discutere dei risultati ottenuti dall'analisi secondo la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione, come base per conclusioni e decisioni.

L'interpretazione del ciclo di vita si prefigge di presentare i risultati dello studio dell'LCA in modo facilmente comprensibile, completo e coerente attraverso dati numerici o grafici.

2.3 Consequential LCA

L'analisi dei sistemi ambientali è diversa dalla scienza tradizionale in quanto lo scopo non è solo quello di raccogliere sistematicamente le conoscenze, bensì anche quello di comunicare tali conoscenze che poi porteranno ad azioni che andranno a ridurre gli impatti ambientali negativi nella totalità o almeno per unità funzionale, cioè per unità di utilità che il sistema studiato genera.

Il Consequential Life Cycle Assessment, infatti, tiene conto di eventuali espansioni dei confini del sistema, valutando le conseguenze del cambiamento, considerando gli impatti in maniera diretta ed indiretta come una conseguenza di una scelta, di solito rappresentata da un cambiamento della domanda per un prodotto (Isadora Correa Hackenhaar, 2022).

L'inventario nel CLCA richiede dei datasets specifici, specialmente per valutare gli effetti indiretti. Attualmente EcoInvent dispone di dataset di tipo "consequential", ma non tengono conto di possibili modifiche dei dati nel tempo; sono infatti dataset statici, basati su previsioni fisse.

Questa metodologia vede all'ingresso dei dati che non hanno soltanto a che fare con il sistema di prodotto studiato, ma anche con i processi marginali, ovvero quelle tecnologie interessate alla variazione della domanda, che includono lo stato di avanzamento delle tecnologie così come le interazioni di mercato. Un prodotto, infatti, può comprendere un insieme di elementi sociali ed economici (es: cambiamenti della popolazione, produttività economica ed interventi tecnologici o politici) in evoluzione nel tempo o nello spazio (Isadora Correa Hackenhaar, 2022).

Sebbene i modelli consequenziali utilizzino le informazioni di mercato per identificare quali attività siano interessate a un cambiamento, il CLCA non risulta essere un modello di equilibrio economico. Quest'ultimo, infatti, si concentra sugli effetti a breve termine, dove ci sono molti vincoli sulla modifica dell'offerta, e si presume quindi che parte dei cambiamenti siano

variazioni della domanda (consumo), come determinato dall'elasticità dei prezzi. Per questo motivo la trattazione consequenziale si concentra sull'effetto a lungo termine dei cambiamenti, cioè nel superamento dei vincoli di breve termine, in un'adeguata capacità di produzione e nel ritorno dei prezzi al livello precedente (come determinato dai costi marginali di produzione). Questo significa che la variazione della domanda si riflette pienamente in un'analogia variazione dell'offerta, e quindi non porta a riduzioni dei consumi.

La modellazione consequenziale può essere utilizzata sia come parte di un modello di scenario futuro sia per studiare attività che si svolgono nel presente.

Attualmente la banca dati presente all'interno dei software per LCA è ancora limitata ai fini della modellazione consequenziale. Pertanto, il comportamento a breve termine del sistema, comprese le interazioni tra i diversi mercati e altri modelli di cambiamento socioeconomico sono trascurati nella valutazione dell'impatto.

La valutazione consequenziale, infatti, adotta un metodo di modellazione matematica basato sulla simulazione del comportamento di sistemi non lineari con un gran numero di elementi interagenti nel tempo. Quest'ultimo viene chiamato System Dynamics ed ha il potenziale per prevedere l'impatto di futuri scenari considerando come i cambiamenti nelle variabili chiave influiscono su componenti specifici e il sistema complessivo del prodotto.

In letteratura stanno iniziando ad emergere studi che combinano modelli LCA e SD. I modelli proposti riguardano due dell'LCA (LCI e LCIA) e si concentrano essenzialmente sull'introduzione della nozione di "previsione" nella metodologia.

Per quanto riguarda la fase LCI, lavori recenti propongono di incorporare (Isadora Correa Hackenhaar, 2022):

- Il tasso di cambiamento causato dai comportamenti degli attori e dai costi economici;
- La dinamica interna del sistema, inclusa la presenza di feedback;

- Cambiamenti nella dinamica del sistema dovuti a cambiamenti di mercato in un altro settore del sistema.

Mentre per la fase LCIA, i modelli LCA basati su SD possono consentire la previsione del valore totale dell'impatto dovuto ai cambiamenti e possono anche anticipare i cambiamenti degli impatti ambientali nel tempo. Studi recenti utilizzano modelli spazialmente espliciti per LCA e SD, migliorando la definizione dei confini del sistema e la caratterizzazione ambientale locale. Inoltre, si raccomanda l'uso di dati geospaziali supportati dai Geographic Information Systems (GIS) per integrare la modellazione LCI specifica del sito e sviluppare inventari spazialmente espliciti (Isadora Correa Hackenhaar, 2022). Il GIS, infatti, è un sistema informativo computerizzato che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi, la visualizzazione, la restituzione, la condivisione e la presentazione di informazioni derivanti da dati geografici.

Unendo il System Dynamics e il Geographic Information Systems si potrebbe migliorare la modellazione LCA fornendo parametri socioeconomici specifici del contesto per gli studi consequenziali e anche aiutare a generare valutazioni di impatto ambientale spazialmente esplicite di scenari prospettivi che considerano i cambiamenti nel mercato dovuti alle politiche e alle tecnologie emergenti.

Un tipo di sistema prodotto che mette in relazione il System Dynamics e il Consequential Life Cycle Assessment è riportato nella Figura 3.

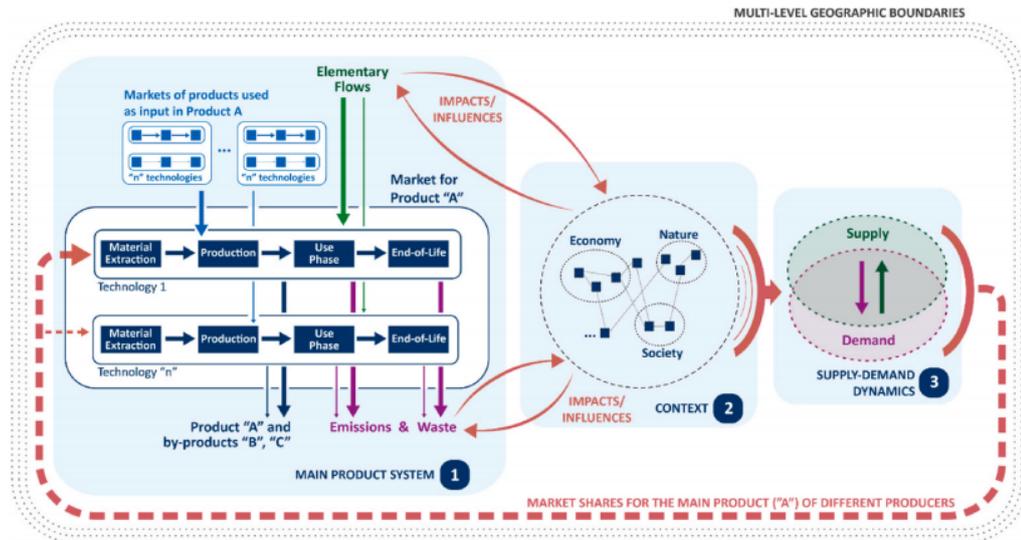


Figura 3 SD-CLCA products' system

Dalla Figura 3 si può notare che la zona 1 rappresenta il sistema del prodotto A analizzato, includendo i potenziali inputs e outputs del sistema da una prospettiva del mercato. La zona 2 rappresenta il contesto delle variabili dipendenti (rappresentate da piccoli quadratini), come per esempio i bisogni dei consumatori e il loro comportamento che influenza ed è influenzato dal mercato del prodotto A. Infine, la zona 3 rappresenta la costruzione dinamica della domanda-offerta che regola il mercato secondo i nessi di causa-effetto presenti nel contesto del sistema prodotto A. Le linee tratteggiate indicano i confini geografici multilivello del sistema dinamico (Isadora Correa Hackenhaar, 2022).

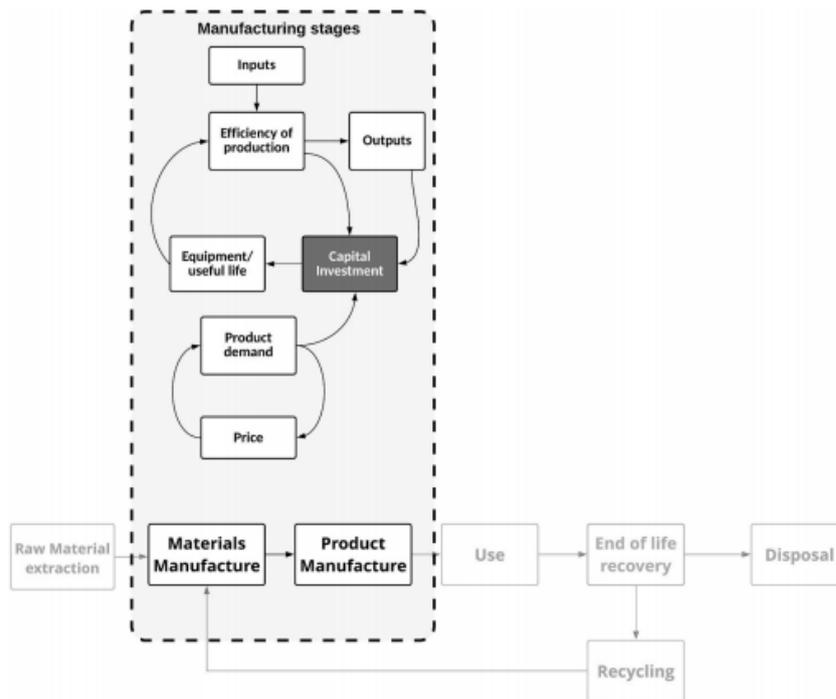


Figura 4 Estensione del SD delle fasi di produzione del LCA (S. McAvoy, 2021)

Il modello SD può essere integrato all’LCA attraverso due tipologie di approcci (S. McAvoy, 2021):

1. I risultati della valutazione dell’impatto vengono importati all’interno del modello SD

Questo approccio prende l’inventario o l’impatto dei risultati della valutazione da un modello LCA e li allega a stock e flussi in un modello SD. I risultati dell’LCA vengono trattati come moltiplicatori e l’impatto cumulativo viene calcolato nel tempo al variare dei livelli di stock e flussi nel modello SD.

Categorie di impatto più comuni utilizzate:

- L’impatto del cambiamento climatico basato sull’applicazione dei fattori di emissione dell’impronta di carbonio alle attività nel modello SD;
- L’impatto del consumo di energia;
- Gli impatti sociali.

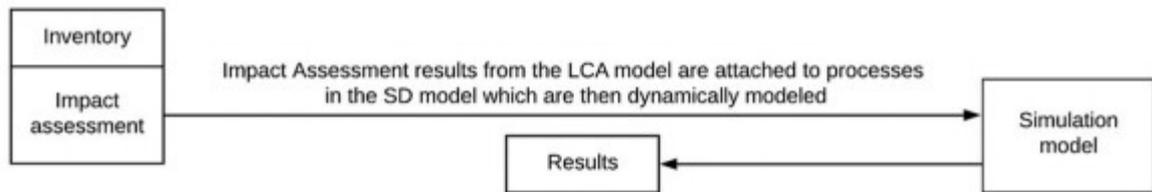


Figura 5 Integrazione di tipo 1 - SD utilizzando LCA (S. McAvoy, 2021)

Questa tipologia di approccio è la più utilizzata, perché:

- Estende l’LCA per incorporare i costi del ciclo di vita e la valutazione del ciclo di vita sociale;
- Considera le interazioni dinamiche tra gli indicatori di sostenibilità;
- Utilizzato in sistemi di prodotti che comprendono flussi di materiali non lineari che si verificano in un arco di tempo medio-lungo;
- Semplice e possono essere utilizzati i risultati LCA già disponibili in letteratura.

2. Fornire un input dinamico all’inventario LCA

Questo approccio prende i risultati da un modello SD, come la variazione di scorte e flussi nel tempo o il livello di scorte e flussi in un determinato momento e li utilizza per determinare i livelli di scorte nel modello LCA. L’LCA utilizza quindi questi livelli di inventario per condurre la valutazione d’impatto.

È stato osservato che in passato per le previsioni sono stati utilizzati modelli causali matematici e modelli di regressione, tuttavia questi sono basati su dati storici e quindi sono inadeguati quando si considerano possibili eventi futuri e il cambiamento concepibile con il progresso tecnologico.

Generalmente questa tipologia di approccio viene utilizzata quando i fattori di caratterizzazione degli impatti rimangono costanti nel tempo (es. il cambiamento della domanda di prodotti

alternativi guidato dalle dinamiche di mercato, che incide sul consumo di questi prodotti e sui loro successivi impatti nel tempo.).

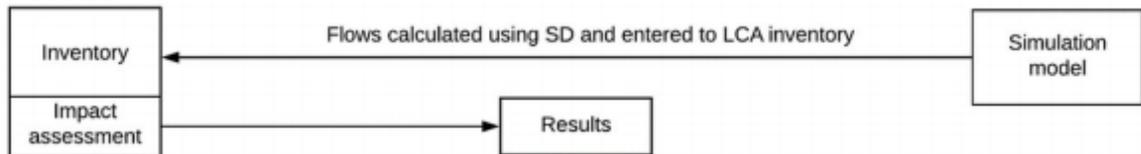


Figura 6 Integrazione di tipo 2 - LCA utilizzando SD (S. McAvoy, 2021)

La combinazione di LCA e SD, come descritto negli approcci di integrazione di Tipo 1 e Tipo 2, non è l'unico modo in cui il tempo e la dinamica vengono introdotti nell'LCA.

L'LCA dinamica aggiunge una dimensione temporale all'LCA esprimendo emissioni e processi unitari nel tempo piuttosto che assumendo emissioni istantanee. Tuttavia, il processo non utilizza modelli di dinamica del sistema e, ad oggi, non esamina i feedback del mercato e i vincoli del mercato.

Pertanto, ai fini della modellazione consequenziale, la questione chiave è l'identificazione dei processi unitari che cambiano come conseguenza di una decisione e questo porta ad avere conseguenze implicite per diversi elementi centrali della tecnica LCA. Per questo motivo bisogna definire:

- L'unità funzionale e i flussi di riferimento;
- In che modo i processi unitari sono collegati ai sistemi di prodotto tramite flussi di prodotti intermedi identificati tramite le reazioni attese di fornitori e utenti;
- Come gestire i processi unitari (o sistemi di prodotto) con più prodotti.

Sulla base di quelle che sono le maggiori proprietà dell'analisi è possibile stilare dei pro e dei contro.

	Pro	Contro
<i>Fattibile</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Può escludere parti del ciclo di vita che non sono interessate dalla produzione di sottoprodotti. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ È necessario ampliare il modello del sistema, poiché richiede dati ambientali su più processi e anche dati economici sui mercati interessati dalla produzione e dall'uso del prodotto; ✓ Più costoso di un'Attributional LCA. Il costo può essere ridotto limitando lo studio delle conseguenze; ✓ I database includono pochi dati marginali.
<i>Preciso</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fornisce maggiori informazioni su come le decisioni influiscono sull'ambiente; ✓ I risultati non convergono verso un risultato finale, bensì potrebbero cambiare completamente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Un CLCA dettagliato e completo potrebbe essere troppo costoso o addirittura impossibile da portare a termine.
<i>Comprensibile</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le conseguenze che caratterizzano il modello sono facilmente comprensibili. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gli altri concetti richiesti per comprendere lo studio sono più difficili da intendere.
<i>Ispirante</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fornisce maggiori informazioni su come le decisioni influiscono sull'ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Include conseguenze indirette che si verificano in processi a cui il prodotto non è collegato tramite flussi fisici o obblighi contrattuali.
<i>Robusto</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Fornisce maggiori informazioni su come le decisioni influiscono sull'ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Poco robusto, poiché i risultati dipendono da chi sta facendo lo studio; ✓ La grande incertezza sulle effettive conseguenze rende facile un uso improprio dei risultati consequenziali per mettere in dubbio decisioni ambientalmente desiderabili.

Tabella 4 Pro e Contro dei criteri per i metodi nell'analisi dei sistemi ambientali (Ekvall, 2019)

Allo stesso tempo possono essere stilate quelle che sono le maggiori differenze tra una valutazione attributiva e una di tipo consequenziale.

	Attributional LCA	Consequential LCA
<i>Concetto di base/Relazione con gli oneri ambientali</i>	Quota dell'impatto globale collegato con il ciclo di vita del prodotto.	Cambiamenti dell'impatto globale indotto da una decisione e le sue conseguenze.
<i>Relazioni e confini del sistema prodotto di cui si valuta l'impatto</i>	Tutti i processi hanno relazioni interconnesse basate su flussi fisici, energetici e di servizio, che costituiscono il ciclo di vita del prodotto, che è anche il sistema del prodotto. Il sistema del prodotto può essere infinito e anche la quantità propagata.	I processi indotti (esclusivamente consequenziali) dalla decisione, costituiscono il sistema prodotto. Il sistema prodotto può essere infinito e anche la quantità propagata.
<i>L'aspetto del tempo</i>	In senso assoluto i processi possono essere considerati nel passato, nel presente o nel futuro. In senso relativo considera i processi anche prima della finalizzazione del prodotto, ovvero la considerazione relativa passata.	In senso assoluto, decisione e processi possono essere considerati nel passato, nel presente o nel futuro. In senso relativo considera solo i processi dopo la decisione, cioè nessuna considerazione relativa al passato.
<i>Specificare il sistema del prodotto e il suo impatto separatamente o in scenari</i>	Separatamente: quota del sistema umano/industriale e il suo impatto globale. Scenario: differenza tra un mondo e un mondo ipotetico senza sistema prodotto e il suo impatto.	Separatamente: i processi aggiuntivi indotti dalla decisione. Scenario: differenza tra l'impatto di diversi scenari realistici che rappresentano scelte decisionali.
<i>Vincoli nella modellazione matematica dovuti al concetto teorico</i>	Limitato dall'additività (ad esempio, garantito dalla linearità), che richiede un controllo di validità o una considerazione del mondo estrapolato.	Non limitato.
<i>Come si affronta la multifunzionalità</i>	Deve essere effettuato attraverso processi di partizionamento, sia per LCI che, in caso di processi ambientali multi-input, per LCIA. Un'alternativa è l'espansione del sistema.	I processi completi sono considerati con effetti di co-funzione aggiuntivi. Questi ultimi dipendono dal mercato, un esempio di effetto di co-funzione è la sostituzione. Un'alternativa è l'espansione del sistema.
<i>Considerazioni marginali rispetto alla media nella valutazione</i>	È necessario considerare i fornitori interconnessi. Si consigliano effetti specifici per	È necessario considerare i fornitori consequenziali.

	<p>importo, ma in pratica sono possibili effetti di impatto medio o marginale e dovrebbero essere considerati in modo coerente.</p> <p>È possibile una considerazione media o marginale del prodotto.</p>	<p>Si consigliano effetti specifici per importo, ma in pratica sono possibili effetti di impatto medio o marginale.</p> <p>La considerazione di un prodotto medio o marginale è possibile.</p>
<p><i>Inquadratura completa della valutazione di impatto ambientale insieme al sistema del prodotto</i></p>	<p>La valutazione dell'impatto ambientale è puramente consequenziale (ad eccezione degli indicatori di inventario), ma limitata dall'additività, ad es. che necessita di partizionamento. Tutto questo richiede una considerazione separata dal sistema del prodotto, a causa di queste altre regole.</p>	<p>La valutazione dell'impatto ambientale è del tutto consequenziale e non vincolato, portando ad una possibilità di piena integrazione con il sistema del prodotto.</p>

Tabella 5 Definizioni UNEP-SETAC (Thomas Schaubroeck, 2021)

Alcune soluzioni per risolvere le problematiche dell'approccio consequenziale, riguardanti soprattutto la reperibilità dei dati in tempo reale legati alla supply chain, potrebbero essere la Blockchain e l'IoT.

La Blockchain è un registro distribuito, ovvero un database condiviso e sincronizzato tra più soggetti attraverso una rete telematica geografica ed accessibile da più persone, in grado di registrare transazioni tra due parti qualsiasi in modo efficiente, verificabile e permanente su base globale.

La tecnologia facilita un consenso decentralizzato mantenendo una registrazione digitale degli eventi utilizzando più blocchi, che sono incorporati nei programmi. Ogni blocco è identificato dal suo hash crittografico, ovvero un algoritmo matematico, ed è collegato ad altri in base all'hash del blocco precedente per formare una catena di blocchi (Abraham Zhang, 2020).

I ricercatori, infatti, credono che la Blockchain possa migliorare l'efficacia e l'efficienza del collezionare, analizzare e diffondere i dati relativi agli impatti ambientali per condurre un'analisi LCA.

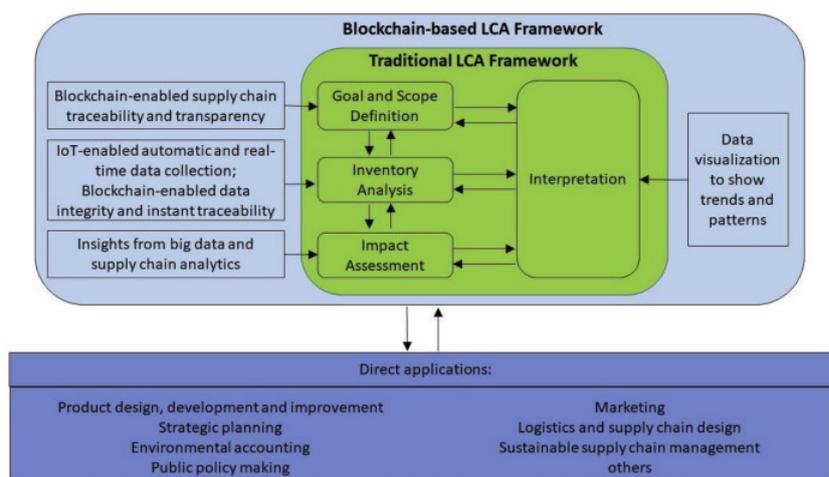


Figura 7 Framework LCA basato su blockchain (Abraham Zhang, 2020)

Dalla figura si nota che con questa visione tecnologica dell'LCA sono state implementate le quattro fasi che la caratterizzano (Abraham Zhang, 2020).

1. Goal and Scope definition

La tracciabilità e la trasparenza della supply chain abilitata per la blockchain rimuovono i vincoli associati all'acquisizione dei dati per l'LCA, riducendo la necessità di impostare in maniera soggettiva l'unità funzionale. Con questo nuovo sistema avendo già un sistema di informazioni presenti nella blockchain, sarà più facile definire l'obiettivo e l'ambito di studio LCA.

2. Inventory Analysis

In questa fase si utilizza questa nuova tecnologia per tenere conto di tutti i possibili input di complesse supply chains. Infatti, l'LCA basata sulla blockchain si basa su tecnologie IoT che forniscono funzionalità senza interruzioni per l'acquisizione automatica dei dati del ciclo di vita in tempo reale. Questi dati vengono quindi registrati ed è garantita la loro integrità e tracciabilità.

3. Impact Assessment

I big data e l'analisi della supply chain possono intervenire per scoprire approfondimenti che contribuiranno a un processo decisionale migliore e più rapido basato su dati che prima erano inaccessibili o inutilizzabili.

4. Interpretation

La standard ISO 14043 raccomanda tre passaggi per condurre questa fase:

- Identificazione delle questioni significative sulla base dell'analisi dell'inventario e della valutazione dell'impatto;
- Valutazione che tiene conto dei controlli di completezza, sensibilità e coerenza;
- Conclusioni, raccomandazioni e segnalazione.

L'LCA basata su blockchain garantisce che tutti gli elementi di dati che contribuiscono in modo significativo all'esito dei risultati siano adeguatamente valutati e soltanto i risultati convalidati vengono utilizzati per trarre conclusioni dallo studio LCA.

In generale l'LCA basata sulla blockchain può avere molte applicazioni dirette per migliorare la sostenibilità ambientale. Per esempio, i designer di prodotti devono incorporare criteri ambientali nelle loro decisioni di progettazione, quindi utilizzare questa nuova tecnologia attraverso cui è possibile utilizzare dei dati già presenti per prodotti simili può aiutare con la progettazione di nuovi prodotti. Dall'altra parte anche la logistica e la progettazione della supply chain hanno un grande impatto sulle emissioni di carbonio generate dai movimenti delle merci (Abraham Zhang, 2020).

Come si è visto, perciò, dietro l'architettura del sistema ci sono due tecnologie della blockchain: IoT e analisi dei big data. Grazie all'adozione delle tecnologie IoT, i dati possono essere raccolti più facilmente senza coinvolgere l'uomo, andando ad applicare su oggetti fisici strumenti come software, sensori ed attuatori. Infatti, recentemente le tecnologie IoT sono state utilizzate per

valutare le risorse manifatturiere, per sviluppare una piattaforma informativa per la valutazione del ciclo di vita del prodotto e per monitorare la salute degli users e attivare assistenza da remoto. Data la grande quantità di dati raccolti, l'analisi dei big data è stata utilizzata per estrarre informazioni importanti (Abraham Zhang, 2020).

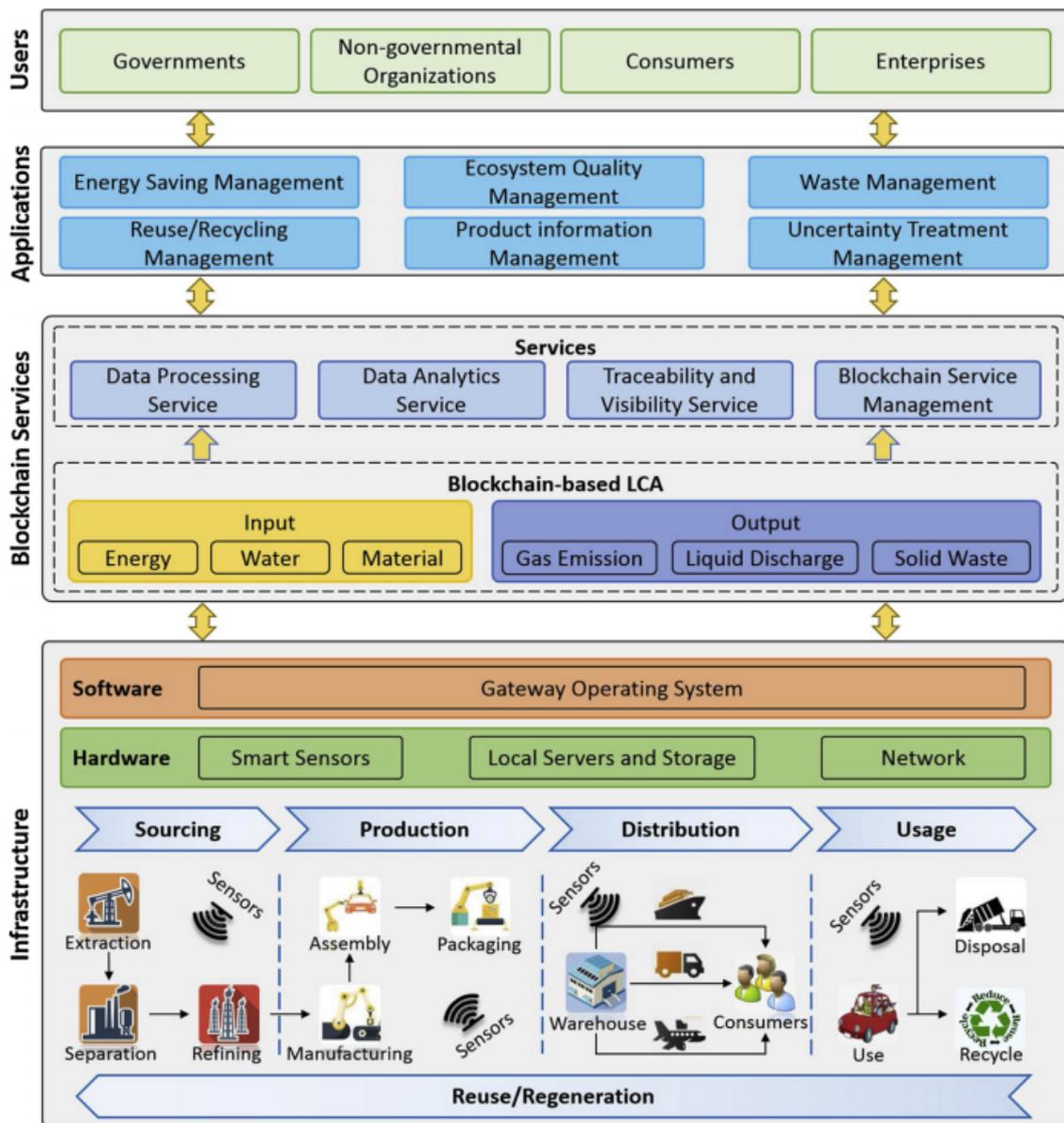


Figura 8 Esempio di sistema per la valutazione del ciclo vita basato sulla Blockchain (Abraham Zhang, 2020)

In conclusione, la blockchain ha le seguenti capacità per supportare le supply chains in modo sostenibile:

- Aiuta a ridurre la sostituzione di un prodotto a seguito dei difetti e la sua rilavorazione grazie alla capacità di tracciamento;
- Facilita il tracciamento dell'impronta ambientale dei prodotti e determina l'importo preciso della tassa sul carbonio che dovrebbe essere addebitata a ciascuna società;
- Facilita il riciclaggio incentivando le persone a partecipare a programmi di riciclaggio;
- Migliora l'efficienza dei sistemi di scambio di emissioni riducendo le frodi e migliorando la fedeltà del sistema (Behzad Esmaeilian, 2020).

2.3.1 Ecoinvent consequential database

Ecoinvent è un database che contiene una serie di dati che contribuiscono alla valutazione di un'eventuale analisi ed è l'unico che fornisce un database LCI intersettoriale consequenziale a livello globale. In particolare, è interessante valutare come il database di tipo consequenziale vada ad integrare una serie di informazioni legate ai mix marginali per l'approvvigionamento di energia elettrica, ovvero come questi possano cambiare a seguito di una variazione della domanda.

Le variazioni a lungo termine della domanda di energia elettrica sono meglio rappresentate dai mix tecnologici piuttosto che dai singoli processi, essendo più di un fornitore interessato alle variazioni della domanda. I tre metodi adottati per scegliere come identificare i processi marginali nel consequential LCA sono (Laurent Vandepaer, 2019):

1. Il primo approccio si basa sui mix di offerta attuali medi ed esclude tutte le tecnologie per la generazione dell'energia vincolate per generare mix marginali, includendo così solo le tecnologie in grado di reagire ad un cambiamento della domanda. Inoltre, il calcolo delle quote delle tecnologie incluse nei mix si basa su valori di produzione medi annui statici senza andare a fornire alcuna indicazione su come ciascuna capacità

tecnologica possa essere ampliata in risposta al cambiamento della domanda; questo, infatti, può portare a una sopravvalutazione del ruolo delle tecnologie che operavano nel passato e ad una sottostima del ruolo delle tecnologie in crescita.

2. Il secondo approccio si basa su un'iniziale definizione di uno scenario base che descrive la futura produzione di energia elettrica, andando poi a definire uno scenario energetico alternativo che tenga conto di una variazione della domanda di energia elettrica. Successivamente entrambi gli scenari vengono messi a confronto e quelle che sono le tecnologie per la produzione di energia elettrica che reagiscono alla variazione della domanda sono considerate marginali.
3. Il terzo approccio rispetto al secondo si basa sull'output di modelli energetici che sono spesso resi disponibili pubblicamente non richiedendo alcuna manipolazione. Pertanto, va a confrontare la produzione di ciascuna unità di generazione di elettricità con la loro produzione in un orizzonte temporale futuro in cui la decisione cesserà di avere effetto. Quindi la quota di ciascuna fonte nel mix marginale è proporzionale ai rispettivi tassi di crescita.

2.4 Durabilità e sostenibilità

Secondo la normativa EN 45552-2020 per durabilità di un prodotto si intende la “capacità di funzionare come richiesto, in condizioni definite di uso, manutenzione e riparazione, fino al raggiungimento dello stato limite”, dove lo stato limite è causato da fattori come la fatica e l'invecchiamento di una parte (KarstenSchischke, 2022).

La durabilità di un prodotto è in genere relazionata alla conservazione delle sue proprietà. Questo concetto è stato qualche volta associato all'ecodesign per la valutazione di possibili soluzioni che possano migliorare la performance di un prodotto e quindi la sua vita.

L'estensione della durata di un prodotto porta a diminuire l'impatto ambientale dovuto al ciclo di vita e ad evitare gli impatti che derivano dalla produzione di un nuovo prodotto che possa andare a sostituire il vecchio.

Cercare di ritardare sempre di più il fine vita del prodotto implica l'adozione di soluzioni tecnologiche e quindi energetiche che apportino dei benefici dal punto di vista ambientale.

Una possibile strategia per migliorare la durabilità dei prodotti è quella di renderli aggiornabili, così da diminuire la tendenza dell'oggetto alla condizione di obsolescenza e ridurre gli impatti in termini ambientali ed economici per i consumatori. Tuttavia, gli aggiornamenti hanno i loro limiti, soprattutto se relazionati a dei rapidi cambiamenti tecnologici.

Secondo la ISO/TR 14062 (2002) è necessario un bilanciamento tra l'estensione della vita di un prodotto e l'applicazione di tecnologie innovative che porta ad un miglioramento delle prestazioni ambientali durante l'uso attraverso la considerazione di un possibile aggiornamento durante lo sviluppo del prodotto.

La ISO/TR 14049 (2012) ha anche osservato che “per i prodotti a lunga durata, come i frigoriferi con una durata di 10 o 20 anni, lo sviluppo tecnologico può essere un fattore da non sottovalutare. Un frigorifero con una durata di 20 anni non può essere semplicemente paragonato a due frigoriferi odierni successivi con una durata di 10 anni. I frigoriferi disponibili tra 10 anni saranno sicuramente più efficienti dal punto di vista energetico (cioè avranno un minore apporto energetico per unità funzionale) rispetto a quelli attuali”.

Secondo le strategie politiche proposte dalla Commissione Europea: “allontanarsi da un'economia dispendiosa verso una basata sulla durabilità e riparabilità dei prodotti è come creare opportunità di lavoro durante tutto il ciclo di vita del prodotto in termini di manutenzione, riparazione, aggiornamento e riutilizzo”.

Possibili misure della politica di progettazione ecocompatibile includono la definizione di una durata minima garantita, la definizione di un tempo minimo di disponibilità per i pezzi di ricambio e la promozione della modularità, aggiornabilità e riparabilità dei prodotti.

In generale si è visto in letteratura che la valutazione della durabilità dei prodotti può essere suddivisa in due approcci principali: la previsione della durata prevista dei prodotti e la valutazione della sostenibilità della vita dei prodotti durante tutto il loro ciclo di vita.

Tra i diversi metodi adottati abbiamo:

- Il *Life Cycle Assessment (LCA)* di diversi scenari della durabilità dei prodotti, dove le assunzioni e gli scenari adottati sono modellati dagli autori per gli specifici casi di studio considerati;
- *Metodo e strumenti per la progettazione ecocompatibile*. In questi casi la valutazione della durabilità fa parte di un'analisi più completa, che include l'analisi di potenziali benefici derivanti dall'allungamento della vita dei prodotti (combinazioni di aspetti ambientali ed economici del ciclo di vita);
- *Analisi qualitativa e quantitativa della relazione tra durabilità dei prodotti e i loro impatti ambientali*. Quest'analisi è supportata dai giudizi degli esperti.

Il fattore affettivo, inoltre, potrebbe influenzare la decisione del consumatore riguardo la sostituzione o riparazione del prodotto. Infatti, quando si fa riferimento a una relazione tra l'uomo e il senso di possesso verso tutto ciò che è materiale, l'amore ha un'influenza sulla sostenibilità. Considerando il prezzo elevato dei prodotti durevoli, al fine di aumentare la domanda dei consumatori, è fondamentale comprendere i fattori chiave che influenzano il comportamento di consumo sostenibile dei consumatori nei confronti di questi prodotti. Di fatto, l'uso continuo di prodotti durevoli significa che il livello di esperienza del cliente cambierà nel tempo (Xuebing Dong, 2018).

2.4.1 Durability index

Uno dei tanti metodi utilizzati per valutare dal punto di vista ambientale la durabilità di prodotti energivori basato su un'analisi LCA considera il confronto tra due scenari (Fulvio Ardente, 2014):

(1) Lo scenario Base presuppone che il prodotto A debba essere sostituito, dopo la sua vita media T , dal nuovo prodotto B.

(2) Lo scenario Durability presuppone invece che la vita del prodotto A venga allungata di un ulteriore arco temporale X e solo successivamente venga sostituito dal nuovo prodotto B.

Durante la valutazione, inoltre, è bene considerare anche possibili incertezze riguardo i dati di input. Per esempio, il parametro X deve essere impostato sulla base delle informazioni riguardo la durata di vita media dalla produzione o basato su esperienze e dati statistici precedenti. Infatti, si raccomanda di effettuare un'analisi di sensibilità dei risultati considerando un possibile range di valori differenti.

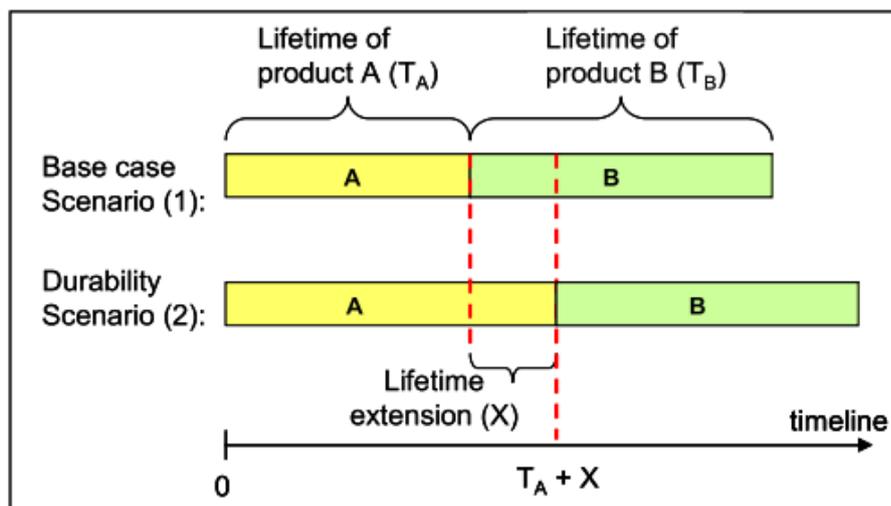


Figura 9 Scenari per la valutazione della durabilità di un prodotto (Fulvio Ardente, 2014)

Per quantificare la durabilità tra i due scenari si utilizzano due indici: Completo e Semplificato (Fulvio Ardenete, 2014).

- Completo

L'indice di durabilità è definito come il rapporto tra i benefici ambientali e gli impatti del ciclo vita del prodotto A.

$$D_n = \frac{\frac{P_{B,n}}{T_B} \cdot X + \frac{E_{B,n}}{T_B} \cdot X + (U_{B,n} - U_{A,n}) \cdot X - R_{A,n}}{P_{A,n} + U_{A,n} \cdot T_A + E_{A,n}} \cdot 100 [\%]$$

(Eq. 2)

Dove:

D_n , indice di durabilità per la categoria d'impatto "n" [%];

$P_{A,n}$ e $P_{B,n}$, impatto ambientale della categoria "n" per la produzione di A e B [unità];

$E_{A,n}$ e $E_{B,n}$, impatto ambientale della categoria "n" per il fine vita di A e B [unità];

$U_{A,n}$ e $U_{B,n}$, impatto ambientale annuale della categoria "n" per l'uso di A e B [unità\anno];

T_A e T_B , durata media della vita di A e B [anni];

X, estensione della durata di vita di A [anni];

- Semplificato

Il calcolo della precedente formula implica la conoscenza di entrambi i prodotti. Tuttavia, in alcuni casi può essere assunto che la fase di produzione e di fine vita del prodotto B non cambia dal punto di vita sostenibile rispetto al prodotto A, come nel caso di prodotti che non sono particolarmente influenzati da rapidi cambiamenti tecnologici. In questi casi, pertanto, l'indice farà riferimento soltanto al prodotto A.

Le assunzioni aggiuntive sono:

1. $T_A = T_B = T$ per prodotti che non sono influenzati da un cambiamento tecnologico;
2. $P_A = P_B = P$ e $E_A = E_B = D$ per prodotti che sono costituiti da materiali simili e hanno processi produttivi simili;
3. L'impatto dovuto dalla fase d'uso del prodotto B è espresso come funzione dell'impatto del prodotto A. In particolare, si assume che il prodotto B, rispetto ad A, avrebbe impatti minori durante la fase d'uso di una certa percentuale δ come segue: $U_{B,n} = \delta \cdot U_{A,n}$ con $0 \leq \delta \leq 1$.

Il parametro δ permette di confrontare il prodotto A con un prodotto a maggiore efficienza energetica B. Inoltre, anche in questo caso si raccomanda di effettuare un'analisi di sensibilità del valore δ , per via di possibili incertezze del fattore.

$$D'_n = \frac{\frac{P_n}{T} \cdot X + \frac{E_n}{T} \cdot X + (1 - \delta) \cdot U_n \cdot X - R_n}{P_n + U_n \cdot T + E_n} \cdot 100[\%]$$

(Eq. 3)

dove:

D'_n , indice di durabilità semplificato del prodotto considerato per la categoria di impatto "n" [%];

P_n , impatto ambientale (della categoria di tipo "n") per la produzione del prodotto [unità];

T, durata di vita del prodotto [anni];

E_n , impatto ambientale (della categoria "n") per il fine vita del prodotto [unità];

X, estensione della durata di vita del prodotto [anni];

U_n , impatto ambientale per unità di prodotto (della categoria "n") per la fase d'uso del prodotto [unità/anno];

R_n , impatto ambientale (della categoria “n”) per trattamenti aggiuntivi (es. riparazione) necessari ai fini dell’estensione della durata di vita del prodotto [unità];

δ , percentuale rappresentante gli impatti più bassi per la fase d’uso di un nuovo prodotto che potrebbe sostituire il prodotto caso di studio [%].

In letteratura si possono trovare anche altri tipi di indicatori, infatti secondo (María D. Bovea, 2020) impostando due scenari, quali “Repair & Reuse” e “Replacement”, si ottengono due indici ambientali che rappresentano la somma dell’impatto ambientale di ogni fase del ciclo vita del prodotto studiato.

- *Replacement scenario*: l’impatto ambientale di questo scenario ($EI_{REPLACE}$) considera l’impatto ambientale del ciclo vita iniziale fino a quando il prodotto non si rompe e l’impatto ambientale legato alla sua sostituzione, che è proporzionale agli anni rimasti fino al termine della sua durata, secondo la seguente equazione:

$$EI_{REPLACEMENT} = M_{initial} + D_{initial} + U_{initial} \cdot x + \left(\frac{M_{replacing}}{ls}\right) \cdot (ls - x) + D_{replacing} + U_{replacing} \cdot (ls - x) + EoL_{initial}$$

(Eq. 4)

Dove:

x : è l’anno in cui si rompe il prodotto [year];

ls : durata di vita media [years];

$\frac{M_{initial}}{M_{replacing}}$: impatto ambientale legato all’acquisto di materie prime e la fase di

lavorazione sia per lo scenario iniziale che quello sostitutivo;

$\frac{D_{initial}}{D_{replacing}}$: impatto ambientale legato alla fase di distribuzione sia per lo scenario iniziale

che quello sostitutivo;

$\frac{U_{initial}}{U_{replacing}}$: impatto ambientale legato alla fase d’uso sia per lo scenario iniziale che quello

sostitutivo;

$EoL_{initial}$: impatto ambientale legato al trattamento di fine vita sia per lo scenario iniziale che quello sostitutivo.

- *Repair & reuse scenario*: l'impatto ambientale di questo scenario ($EI_{R\&RY}$) considera l'impatto ambientale del ciclo vita iniziale fino a quando il prodotto non si rompe e l'impatto legato ai pezzi di ricambio/componenti e delle operazioni necessarie per il processo di riparazione, secondo la seguente equazione:

$$EI_{R\&RY} = M_{initial} + D_{initial} + U_{initial} \cdot ls + R_y + EoL_{initial}$$

(Eq. 5)

Dove:

y: tipologie di riparazione;

R_y : impatto ambientale dei pezzi di ricambio/componenti e delle operazioni necessarie per il processo di riparazione.

3. Metodo

Quando si ha a che fare con un prodotto, è importante valutare l'influenza e quindi l'impatto tra questo e il sistema che lo circonda. Infatti, per etichettare tale prodotto come "sostenibile" sono tenute in considerazione una serie di informazioni che possono riguardare questioni ambientali, sociali ed economiche. Nella maggior parte dei casi di fatto si tende a valutare l'impronta che la realizzazione, l'uso e il fine vita del prodotto hanno nei confronti dell'ambiente. Oltre alla considerazione dell'intero ciclo di vita del prodotto, è necessario però valutare anche come il prodotto e il "sistema" interagiscano tra loro. Quindi, piuttosto che concentrarsi sulla semplice valutazione dell'impatto che ha il prodotto durante il suo ciclo di vita, si può pensare di estendere i limiti imposti dall'analisi ambientale attributiva, andando ad analizzare cosa succede all'impatto ambientale del prodotto se si considera la variazione nel tempo di determinati parametri che lo descrivono nel suo ciclo di vita.

Generalmente quando si vuole valutare l'impronta che il prodotto ha nei confronti del sistema, si inizia con la raccolta di tutti i dati che potranno essere utilizzati durante la valutazione effettuata dall'analisi LCA. Si andranno quindi a reperire quelle informazioni utili alla trattazione del sistema, che verranno poi modellate all'interno di appositi software e sulla base dei database in essi presenti si andranno ad ottenere degli andamenti qualitativi e quantitativi degli impatti ambientali. Quest'ultimi variano a seconda della categoria d'impatto a cui fanno riferimento.

Per una valutazione attributiva del ciclo vita, i dati a cui si fa riferimento sono dei dati certi, perché si basano su degli scenari passati e presenti. Pertanto, i risultati ottenuti sono attendibili per un preciso caso di studio.

Dall'altra parte qualora si volesse valutare la sostenibilità del prodotto nel tempo, quindi come il sistema e i cambiamenti ad esso relativi influenzino il prodotto e le sue performance, dovremmo fare affidamento ad altri fattori attraverso i quali si sarà in grado di confrontare

scenari futuri con quelli attuali o passati. L'approccio di considerare una variabilità temporale di determinati parametri, è mutuata nella definizione di analisi ambientali di tipo consequenziale; un'analisi consequenziale "mira a descrivere come i flussi rilevanti dal punto di vista ambientale cambieranno in risposta a possibili decisioni" (Matthias Buyle, 2019). Quest'ultime a loro volta hanno effetto sull'andamento del mercato dei prodotti. Nel caso di un'analisi di tipo consequenziale, quindi, si considerano gli effetti ambientali sul sistema che alcune modifiche introdotte in un prodotto avranno in un orizzonte temporale a medio-lungo termine.

In questo caso, il metodo proposto vuole valutare gli effetti che l'evoluzione temporale (che ha effetti, ad esempio, sull'evoluzione tecnologica) determina sul prodotto. Quindi così come il mercato è in costante cambiamento, anche gli aspetti energetici e tecnologici non possono essere considerati statici; da questo nasce un approccio di LCA che tiene conto della dinamicità temporale di determinati fattori.

Gli impatti ottenuti da un'analisi LCA di questo tipo, non possono essere valutati come delle certezze, perché basata su dati previsionali, pertanto è necessario lavorare sulla base di diversi scenari associati a degli aspetti che potrebbero cambiare negli anni e quindi avere influenze diverse in quelli che sono gli impatti ambientali legati ad un prodotto.

Tale approccio è particolarmente adatto ad essere applicato a prodotti energivori. Questi prodotti, infatti, sono caratterizzati da una vita utile molto lunga e da un andamento degli impatti complessivi di prodotto fortemente influenzati dall'assorbimento energetico durante l'utilizzo; pertanto, è interessante valutare l'andamento temporale (durante la vita utile del prodotto) di parametri direttamente connessi con l'assorbimento energetico (come, ad esempio, l'evoluzione temporale dell'energy grid mix e l'andamento nel tempo delle performance di prodotto).

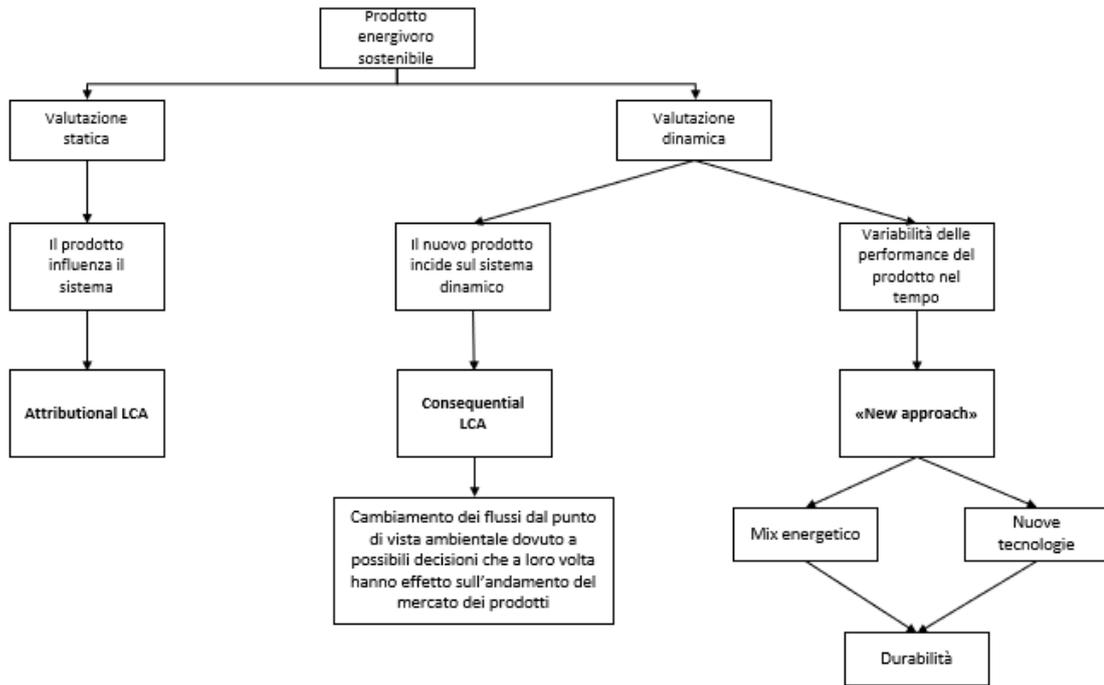


Figura 10 Schema valutazione prodotto energivoro sostenibile

4. Caso di studio: Electrolux fridge

4.1 Valutazione sostenibilità ambientale mediante LCA attributiva

L'azienda Electrolux con la sua agenda sostenibile mira a raggiungere la condizione di carbon neutrality e circolarità entro il 2030, implementando soluzioni migliori, ponendo la propria attenzione nei confronti di aspetti legati alla sostenibilità e garantendo attraverso i propri prodotti una vita migliore ai rispettivi consumatori.

Tramite ciò, Electrolux cerca anche di contribuire a quello che è l'obiettivo imposto dalle Nazioni Unite, ovvero limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5 °C.

Nel caso in esame sarà valutata la sostenibilità per la classe di elettrodomestici quali i frigoriferi, mettendo a confronto vecchie tecnologie (Baseline) con le nuove (Genesi).

Come ben sappiamo i frigoriferi sono presenti in gran parte delle attività che ci circondano, consumando un certo quantitativo di energia in Europa e generando un impatto negativo dal punto di vista ambientale a causa dei materiali che li caratterizzano, quali agenti refrigeranti e isolanti. Tutto questo riguarda sia il produttore, che cerca di seguire gli sviluppi del mercato e gli aspetti legati all'ambiente, sia il consumatore, che è consapevole del consumo energetico, ma raramente degli impatti ambientali.

Un utilizzo di energia più efficiente in Europa è un elemento chiave per raggiungere gli obiettivi di energia rinnovabile, per la riduzione dei gas serra e per il miglioramento della sicurezza della produzione di energia a causa di una minore dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili.

Si è visto, inoltre, come gran parte del consumo totale è costituito dal consumo energetico nella fase d'uso; fase che risulterà essere particolarmente influenzata da diversi fattori all'interno di questa trattazione.

Pertanto, prima di passare ad una valutazione temporale delle performance del prodotto, sono stati analizzati i risultati ottenuti dalla valutazione ambientale attributiva.

L'analisi LCA attributiva del caso in esame è stata sviluppata secondo le normative UNI EN ISO 14044 e UNI EN ISO 14044:2018.

In particolare, sono stati definiti:

Goal	Confronto degli impatti ambientali del ciclo di vita di due frigoriferi (BASELINE e GENESI), introducendo sia azioni attuali che futuri scenari.
Functional Unit	Conservare e mantenere gli alimenti freschi nel contesto degli elettrodomestici per un periodo di 16 anni; il cibo si conserva in frigorifero a +4°C e in congelatore a -8°C.
Method	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 World for Climate Change (2010) [kg CO ₂ eq]
Database	Ecoinvent 3.6 allocation, cut-off by classification
Software	SimaPro v9

Le fasi comprese all'interno dei confini del sistema sono:

- Materials;
- Manufacturing;
- Transports;
- Use Phase;
- End of Life.

Inoltre, si è tenuto conto anche di un'estensione dei confini attraverso lo studio del Food Waste.

Per entrambi i modelli, sulla base della nuova etichetta energetica, sono state considerate le seguenti classi:

- Classe energetica F (da 303 a 244 kWh/anno) per il Baseline;
- Classe energetica E (da 243 a 195 kWh/anno) per il Genesi.

Dal 1° marzo 2021 per i frigoriferi è stata resa disponibile la nuova energy label, che fornisce informazioni sul consumo energetico e sull'impatto ambientale del prodotto a cui farà riferimento.

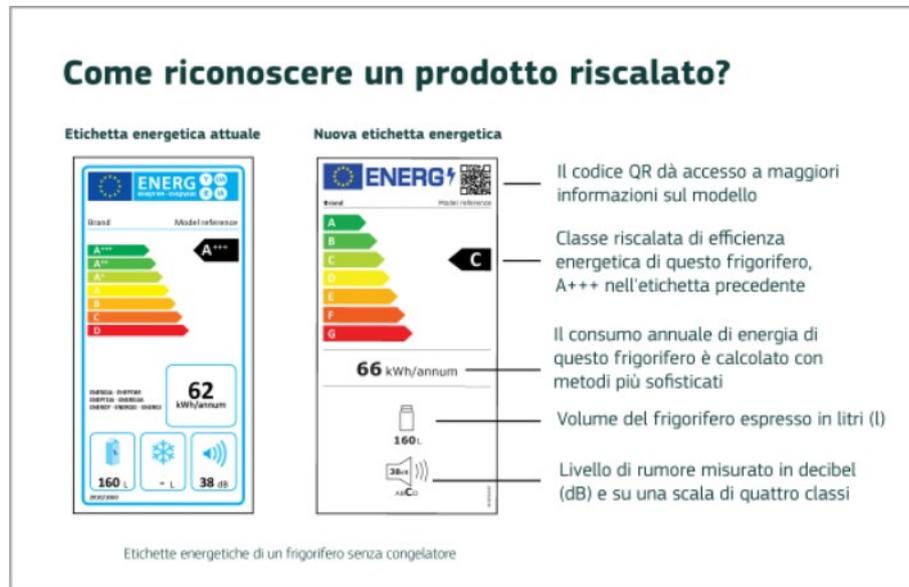


Figura 11 Nuova energy label frigoriferi

Dalla Figura 11 si nota che si è passati da un'etichettatura con una scala da A+++ a D a una nuova che va da A a G. La scala è stata modificata, perché, grazie all'introduzione di prodotti elettrici sempre più efficienti dal punto di vista energetico, nella maggior parte dei nuovi prodotti si tendeva ad associare molti + alla classe con una efficienza migliore e quindi risultava più conveniente riscaldare il tutto.

Inoltre, le categorie più elevate vengono lasciate vuote per agevolare le innovazioni e lasciare un margine di miglioramento. Nella nuova etichetta, la classe energetica di un prodotto è stabilita in base a criteri più rigorosi che tengono conto di diversi fattori. Un'altra novità è il QR che rimanderà direttamente alle informazioni sul modello contenute nella banca dati dei prodotti.

In generale, le etichette non sono solo una guida per risparmiare energia e denaro; alcune forniscono anche informazioni sull'impatto ambientale dei prodotti. Facendo una scelta più

informata, i consumatori potranno contribuire a un'economia più ecologica. (Commissione Europea, s.d.)

I risultati ottenuti dalla valutazione attributiva dei cicli di vita complessivi di entrambi i prodotti sono stati i seguenti:

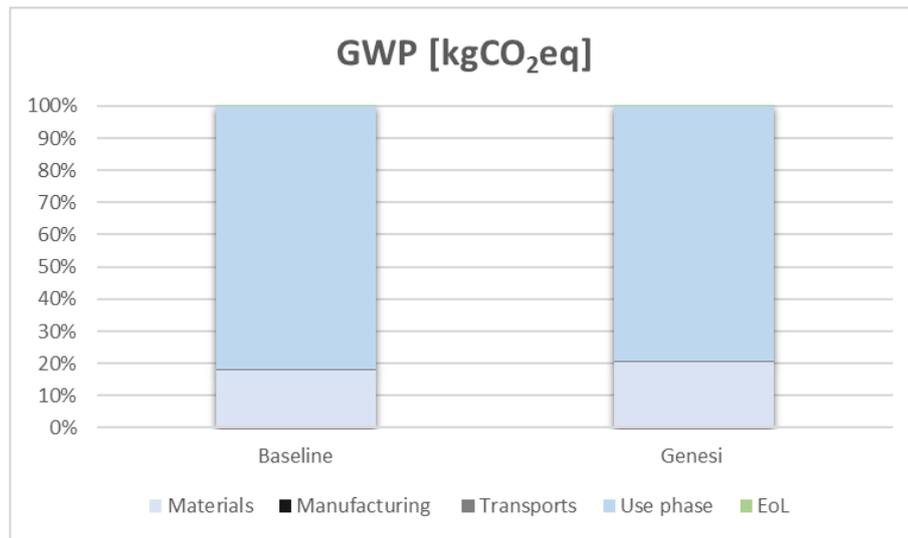


Figura 12 Impatti ambientali a confronto secondo la categoria GWP del ciclo vita del Baseline e del Genesi

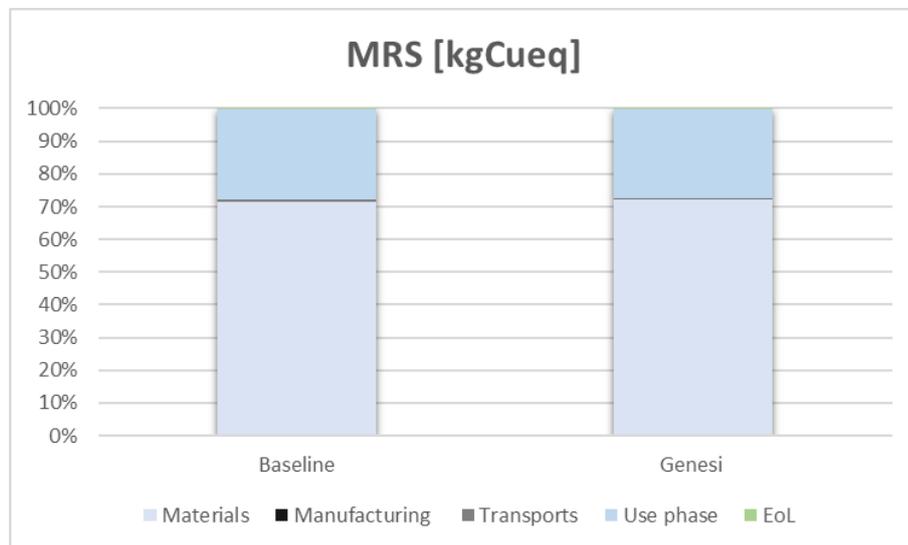


Figura 13 Impatti ambientali a confronto secondo la categoria MRS del ciclo vita del Baseline e del Genesi

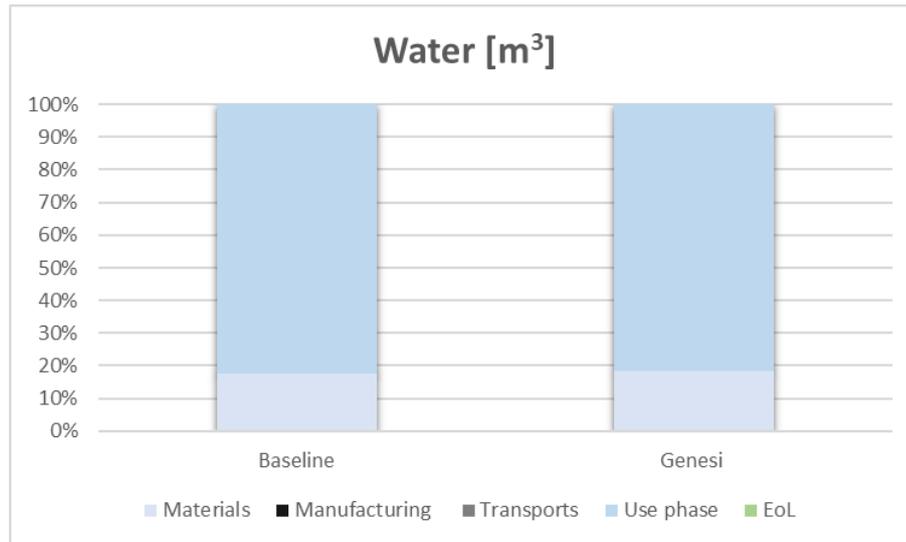


Figura 14 Impatti ambientali a confronto secondo la categoria Water use del ciclo vita del Baseline e del Genesi

Come si può notare per tutti gli indicatori è stato registrato un calo degli impatti ambientali legati all'intero ciclo vita. In particolare, per il Global Warming Potential [kg CO₂ eq] si ha una riduzione degli impatti del nuovo prodotto rispetto al vecchio pari al 17%, per il Mineral Resource Scarcity [kg Cu eq] del 18% e per il Water use [m³] del 20%.

Gli impatti, pur avendo un andamento generale del tutto decrescente, tendono ad essere analoghi in alcune fasi sia per il Baseline che per il Genesi, come ad esempio per il Manufacturing e Transports. Questo, infatti, sta a significare che il passaggio dal “vecchio” al “nuovo” ha una maggior influenza dal punto di vista degli impatti nelle fasi di Materials, Use Phase ed End of Life.

In generale sono stati ottenuti dei buoni risultati, ma non del tutto soddisfacenti, non considerando, infatti, quelli che possono essere possibili fattori che andranno ad influenzare le performance del prodotto nel tempo e della possibile variabilità degli impatti relativi alla fase d'uso.

4.1.1 Food waste

Il food waste si pone come un'estensione dei confini del sistema che va a diminuire l'impatto del ciclo di vita totale del frigorifero.

È stata fatta questa estensione, perché attualmente sono presenti dei metodi in grado di quantificare la riduzione dello spreco di alimenti così da allungare la permanenza dei cibi nel frigorifero senza che questi si deteriorino.

La riduzione degli sprechi alimentari offre, infatti, molteplici vantaggi per le persone e per il pianeta, migliorando la sicurezza alimentare, affrontando i cambiamenti climatici, risparmiando denaro e riducendo le pressioni su terra, acqua, biodiversità e sistemi di gestione dei rifiuti.

Secondo il report dell'UNEP del 2021, sull'intera produzione di alimenti il 17% viene sprecato e l'11% si trova in ambiente domestico (UNEP, 2021).

Si è visto inoltre che la produzione di rifiuti alimentari delle famiglie è ugualmente rilevante nei paesi a reddito alto, medio-alto e medio-basso.

In generale lo spreco alimentare può essere inteso come un'interazione di diversi fattori che risultano essere correlati tra loro. Ad esempio, la tipologia di dieta e le abitudini culinarie possono influenzare le decisioni di acquisto e quindi questo potrebbe avere effetti sulla conservazione e sulla preparazione degli alimenti. Oltre a questo, i consumatori potrebbero acquistare o cucinare troppo, avere limitate abilità in cucina o gestire il cibo in maniera scorretta. Infatti, la maggior parte delle persone è inconsapevole dell'impatto ambientale rilasciato a seguito dello spreco alimentare, così come quello economico (Silvia Gaiani, 2018).

Dall'altra parte però, potrebbe capitare che alcuni frigoriferi operino a temperature più alte rispetto a quella ideale per la conservazione degli alimenti. La soluzione ottimale sarebbe infatti quella di abbassare la temperatura dell'elettrodomestico per garantire le condizioni ideali, ma questo porterebbe poi ad un aumento del consumo di energia, dei costi e delle emissioni. Infatti,

uno studio ha riportato che le emissioni associate al cibo non sprecato risultino essere inferiori a quelle dovute al maggior consumo di energia.

Per limitare le conseguenze provocate dallo spreco alimentare, si potrebbe puntare a campagne educative rivolte ai consumatori su come acquistare, conservare, preparare e smaltire gli alimenti in modo sostenibile. Ad esempio, potrebbero essere implementate delle soluzioni smart che aiutino i consumatori ad utilizzare correttamente gli elettrodomestici quali appunto i frigoriferi, predisponendo dei display “user-friendly”, che vadano incontro ai bisogni e requisiti del consumatore (Federica Cappelletti, 2022).

Nei risultati della successiva trattazione non sarà considerato il food waste, ma è stata precedentemente modellata un’analisi attributiva che ha tenuto conto della divisione interna tra frutta&verdura e carne&pesce. La valutazione ha riportato una diminuzione dell’impatto ambientale del Genesi rispetto al Baseline sulla base della categoria GWP [kgCO₂eq] pari al 22% rispetto al 17% ottenuto dal confronto tra vecchio e nuovo senza tener conto del food waste.

4.2 Durabilità del prodotto

Nella maggior parte dei paesi europei le vendite si basano sulla sostituzione con nuovi elettrodomestici, motivata dal risparmio di consumo di elettricità e da questioni ambientali. Tuttavia, nonostante l’onnipresenza degli apparecchi di refrigerazione domestici, c’è ancora una mancanza di conoscenza della loro perdita di efficienza legata all’età nel tempo. La percentuale dell’impatto degradante dei vari componenti del sistema sul cambiamento dei modelli di consumo è quindi ancora sconosciuta e la sfida è proprio quella di identificare quale componente causa un determinato grado di efficienza nel tempo. (Christian Hueppe, 2021)

All'interno di questo paragrafo si andrà a valutare la variazione delle performance del prodotto nel tempo. Queste tendono ad essere particolarmente influenzate da diversi fattori che giocano un ruolo fondamentale soprattutto nella fase d'uso, che ricopre gran parte del ciclo vita del prodotto.

Tra i componenti del frigorifero che potrebbero peggiorare le loro prestazioni negli anni, sono stati considerati il compressore e la scheda madre, la cui obsolescenza è provocata dalla variabilità temporale di parametri legati al foam aging e all'energy mix.

L'arco temporale a cui lo studio ha fatto riferimento è pari a 16 anni, in particolare va dal 2020 al 2036.

Durante questo periodo di tempo, in seguito ad un peggioramento delle performance, sarà valutata la sostituzione del singolo componente o dell'intero prodotto.

4.2.1 Foam aging

Molti ricercatori hanno dichiarato che la temperatura ambiente è un fattore dominante nel consumo energetico di frigoriferi e freezers. Il motivo è che fino al 70% del carico termico totale arriva per conduzione attraverso le pareti del vano, considerando apparecchi di refrigerazione vuoti come cavità rettangolari chiuse. Indipendentemente dal materiale isolante effettivo il principio della conduttività termica λ si applica al trasferimento di calore attraverso l'isolamento termico di tutti i tipi di apparecchi di refrigerazione. Il valore λ è generalmente assunto come una costante per ogni strato di materiale e componente del prodotto. Tuttavia, la variabilità di λ attraverso l'isolamento in schiuma poliuretana dipende da molti fattori. Per le pareti multistrato dei compartimenti degli apparecchi di refrigerazione si verifica, quindi, un trasferimento di calore stazionario a causa delle differenze di temperatura tra T_a (temperatura ambiente) e T_i (temperatura interna del compartimento). (Christian Hueppe, 2021)

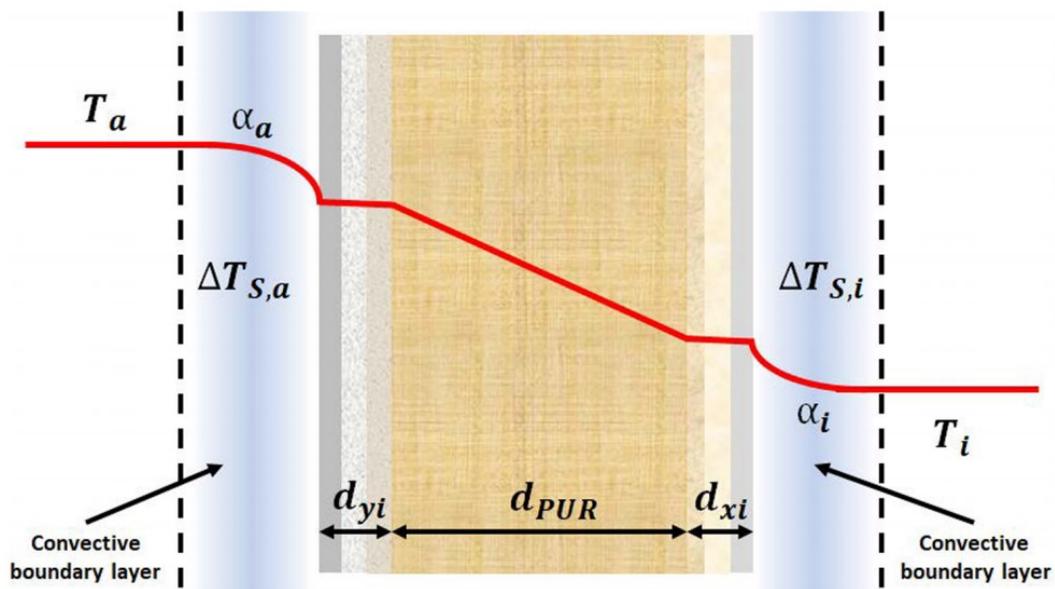


Figura 15 Profilo di temperatura causato dal trasferimento di calore attraverso pareti planari di un frigorifero (Christian Hueppe, 2021)

In generale, quando si parla del peggioramento delle prestazioni della schiuma, si fa riferimento ad un aumento della conduttività termica λ , ovvero ciò che misura l'attitudine di una sostanza a trasmettere calore attraverso la conduzione termica. Nella maggior parte dei casi questa assume un valore che per le schiume è maggiore di $20 \frac{mW}{m \cdot K}$. Quindi partendo già da un valore alto è immediato un suo successivo aumento nel tempo a seguito del deterioramento della schiuma.

Nel tempo i materiali isolanti in schiuma subiscono tre fasi durante il loro processo di invecchiamento. All'inizio del ciclo di vita, la conduttività di un materiale isolante in schiuma aumenta a una velocità relativamente elevata, poi rallenta per la maggior parte della sua vita fino al raggiungimento del plateau. Questo modello di invecchiamento è spesso considerato come guidato dagli agenti espandenti che fuoriescono dalle cellule del materiale espanso. Uno degli effetti dell'invecchiamento più impattanti, infatti, è la diffusione degli agenti espandenti altamente isolanti e la penetrazione di aria dall'ambiente che può trasportare umidità nel

materiale. Questi due effetti iniziano a manifestarsi immediatamente dopo il processo di fabbricazione, ma la velocità con cui si verifica il movimento del gas è molto più rapida per l'infusione di aria esterna che per la diffusione dei gas dell'agente espandente. È stato visto, inoltre, che l'infiltrazione dell'aria dall'esterno avvenga nei primi 2 anni del ciclo di vita del materiale, mentre la diffusione verso l'esterno dei gas degli agenti espandenti avvenga dopo 10-20 anni. Questo porta ad ottenere un andamento come quello mostrato in Figura 16. (Doug Belanger, 2018)

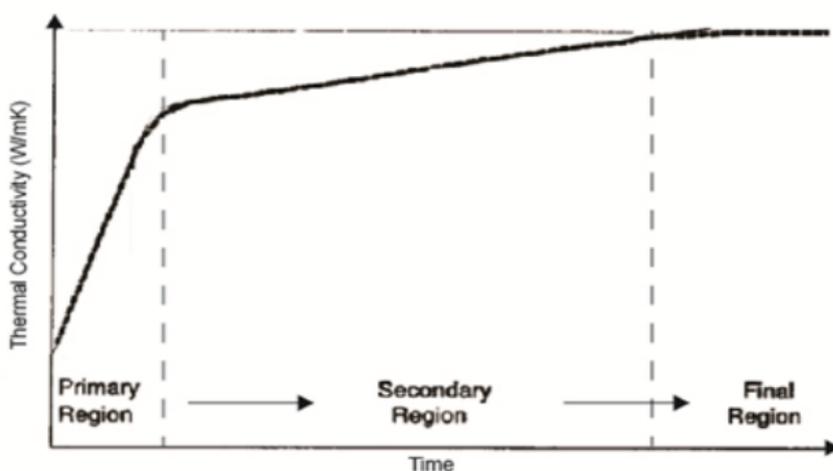


Figura 16 Curva tipica di invecchiamento della schiuma plastica isolante (Doug Belanger, 2018)

Gli agenti espandenti contenuti nei materiali isolanti si sono evoluti nel tempo. Lo sviluppo di agenti espandenti è stato spinto da normative ambientali come il Protocollo di Montreal del 1987. Infatti, i CFC (clorofluorocarburi) e i HCFC (idroclorefluorocarburi) sono stati vietati a causa di problemi legati allo strato di ozono. Gli HFC (idrofluorocarburi) non dannosi per l'ozono sono ampiamente utilizzati oggi nei poliuretani. Man mano che gli agenti espandenti si evolvono, è importante rivedere il modo in cui i nuovi materiali si comportano a causa degli effetti dell'invecchiamento, poiché mancano le indagini sui nuovi materiali espansi. (Doug Belanger, 2018)

All'interno della trattazione l'influenza dell'invecchiamento della schiuma nei confronti dei consumi energetici sarà tenuta conto attraverso due relazioni:

- Una formula empirica fornita dall'azienda Electrolux;
- Una formula presa dalla letteratura.

In particolare, quest'ultima tende ad associare l'incremento energetico, che si manifesta negli anni a seguito del deterioramento delle prestazioni del materiale isolante, ad un tasso di invecchiamento che varia a seconda dell'agente espandente considerato.

$$\Delta E = r \left[\frac{(20 - a)}{20} \right]^c$$

(Eq. 6)

Dove:

- r, tasso iniziale di invecchiamento (30% Baseline, 10% Genesi);
- a, anno;
- c, costante. (Hyung Chul Kim, 2005)

Questa relazione, inoltre, è stata suddivisa in due casistiche: variazione della conduttività termica λ durante i primi 5 anni di vita del frigorifero e variazione di λ costante negli anni.

Andando quindi a tracciare graficamente le tre espressioni che legano l'invecchiamento della schiuma isolante al consumo energetico, è stato registrato un aumento del consumo considerando per il Baseline la formula presa da letteratura con un andamento di λ crescente costantemente negli anni e per il Genesi la formula empirica fornita dall'azienda Electrolux.

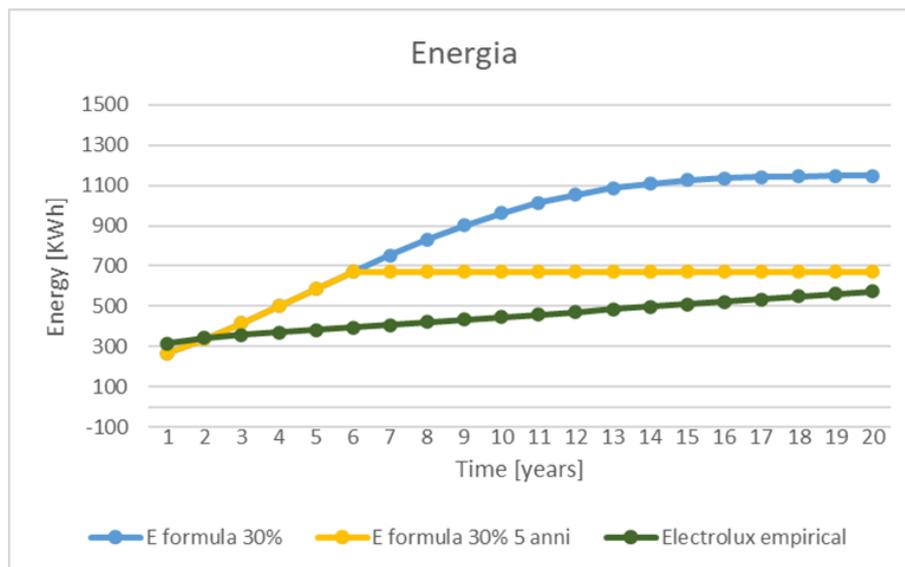


Figura 17 Andamento consumo energetico del Baseline legato al foam aging nel tempo

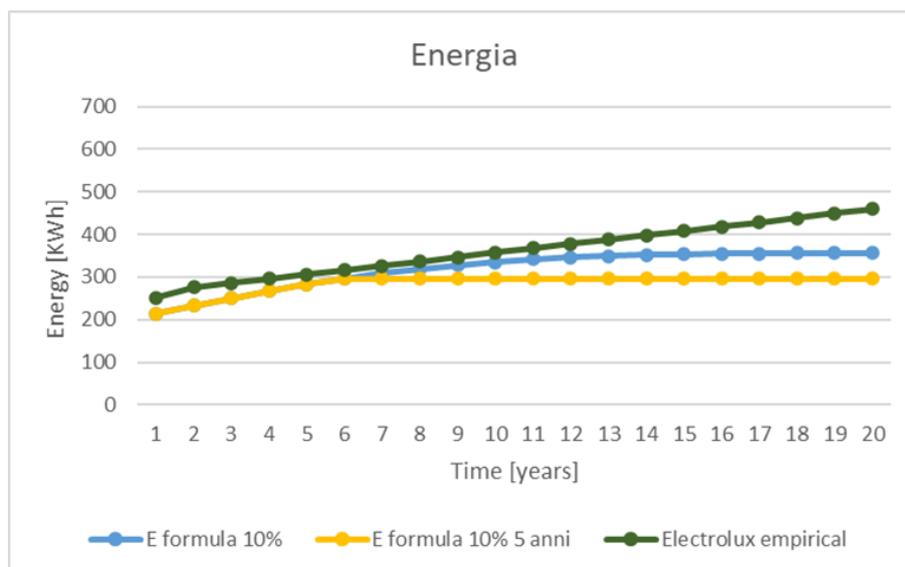


Figura 18 Andamento consumo energetico del Genesi legato al foam aging nel tempo

Un'alternativa alle schiume sono i Vacuum Insulated Panels (VIPs), ovvero una forma di isolamento termico costituito da un involucro a tenuta di gas che circonda un nucleo rigido dal quale è stata evacuata l'aria. La loro caratteristica è quella di avere un λ inferiore a $7 \frac{mW}{m \cdot K}$ e

quindi già partendo da un valore di conduttività termica più basso, si andrebbe a limitare l'aumento di λ negli anni, ottenendo prestazioni migliori rispetto alle schiume isolanti.

Alcuni studi riportano, infatti, una riduzione nel consumo energetico del 21% quando il 56% del frigorifero è ricoperto con VIPs al posto della schiuma poliuretana, affermando inoltre che l'isolamento della parte posteriore del frigorifero è più efficiente dell'isolamento della parte laterale. Tutto questo, quindi, potrebbe portare al passaggio da una determinata classe energetica di partenza ad una migliore. Tuttavia, i VIPs hanno dei punti deboli, quali:

- Incertezza su una conduttività termica assicurata;
- Incertezza sulla loro durata;
- Incertezza su una fornitura costante di VIP se la loro domanda dovesse aumentare;
- Il costo elevato (Sankarshan Verma, 2020).

Le performance termiche di questa tecnologia sono influenzate da proprietà del materiale, da parametri di progettazione e dalle condizioni operative; la Tabella 6 esplicita nel dettaglio i diversi parametri (Sankarshan Verma, 2020):

<i>Proprietà del materiale</i>	Proprietà termo-meccaniche (E, ν, k_p, E_R)
	Dimensioni particelle (d)
<i>Parametri di progettazione</i>	Dimensioni pori (D)
	Densità/pressione di compattazione (ρ)
	Pressione di tenuta (p)
<i>Condizioni operative</i>	Temperatura media di esercizio (T)
	Umidità nel nucleo (X_w)

Tabella 6 Parametri che influenzano le performance dei Vacuum Insulated Panels

In generale, si è visto che non c'è un'equazione in grado di descrivere l'andamento dell'invecchiamento della schiuma nel tempo e che sia in grado di relazionare accuratamente il foam aging al consumo energetico, poiché a seconda del modello di frigorifero considerato si registra un incremento del consumo in due formule diverse. Nonostante ciò, gran parte degli

studi realizzati sul foam aging hanno associato il deterioramento della schiuma isolante ad un aumento della conduttività termica λ .

4.2.2 Energy mix

L'energy mix è un gruppo di differenti fonti primarie dalle quali si ottiene energia per un uso secondario diretto, come ad esempio l'elettricità. La tipologia di fonti a disposizione varia a seconda di quelle che sono le risorse a disposizione di una nazione e delle tecnologie sviluppate per la produzione di energia secondaria.

Lo studio prevede la trattazione di due scenari: reale ed ottimistico.

Reale	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuzione emissioni gas serra • Bassa percentuale di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili
Ottimistico	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento percentuale di riduzione delle emissioni dei gas serra rispetto allo scenario reale • Maggior parte dell'energia generata da fonti rinnovabili

Tabella 7 Caratteristiche generali dello scenario reale ed ottimistico

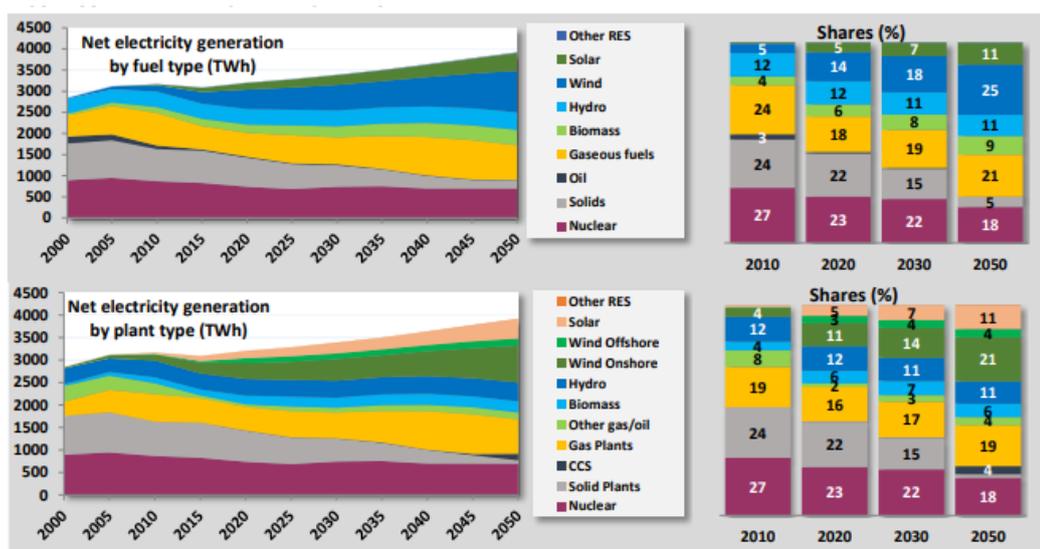


Figura 19 Produzione di energia elettrica per combustibile e per tipologia di impianto (Eu, 2016)

Nello scenario reale si prevede che entro il 2020 le risorse rinnovabili nella produzione di energia aumenteranno del 35,5% ed entro il 2050 aumentano del 56% (Eu, 2016).

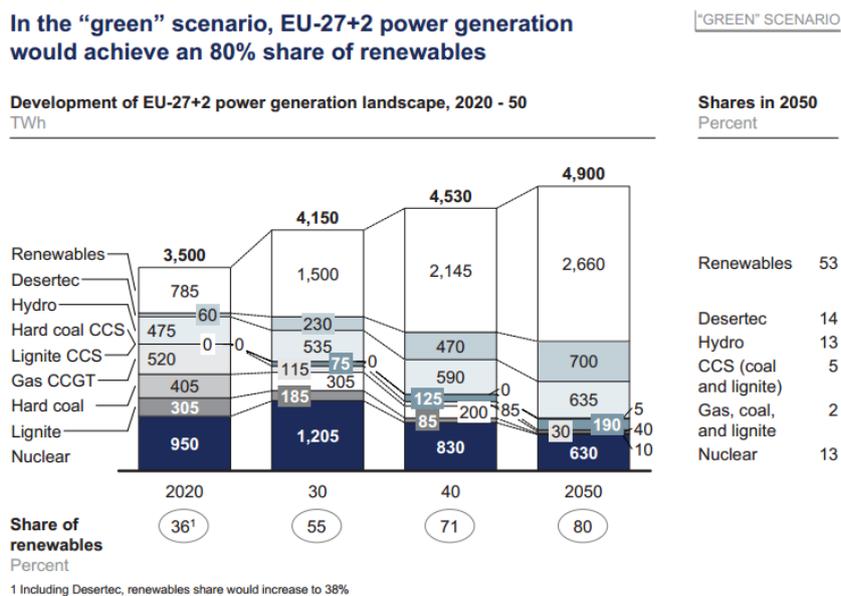


Figura 20 Sviluppo della produzione di energia elettrica dal 2020 al 2050

Dall'altra parte nello scenario ottimistico si può notare come il mix energetico bilanciato del 2020 si andrebbe a trasformare negli anni successivi in un mix dominato principalmente da rinnovabili rispetto allo scenario reale. Inoltre, rinnovabili e nucleare andrebbero a ricoprire il 93% dell'energy mix complessivo entro il 2050 (McKinsey & Company, Inc, 2010).

Sulla base di queste informazioni sono stati impostati dei datasets di mix energetici facenti riferimento allo scenario europeo, per i quali è stata poi realizzata la modellazione all'interno del software SimaPro.

Entrambi gli scenari sono stati valutati sulla base della suddivisione temporale che va dal 2020 al 2040, considerando variazioni di 5 anni, così da coprire il periodo d'interesse.

Ciascun dataset contiene fonti primarie, quali:

- Rinnovabili;
- Hydro;
- Carbone;
- Lignite;
- Natural gas;
- Petrolio;
- Nucleare.

Inoltre, sono stati modificati i datasets della bassa, media, alta tensione e delle trasformazioni da un voltaggio all'altro.

4.2.3 Durability Index

Per la valutazione della durabilità del prodotto sono stati considerati due componenti che risentono maggiormente del deterioramento delle loro prestazioni: compressore e scheda madre. Sulla base degli indici introdotti nella prima parte di questa tesi, sono state realizzate le seguenti approssimazioni:

1. Formula semplificata (Eq. 3)
2. Formula estesa (Eq. 2)
3. Formula estesa semplificata ($R_n=0$)

$$D_n = \frac{\frac{P_n}{T} \cdot X + \frac{E_n}{T} \cdot X + (U_{B,n} - U_{A,n}) \cdot X}{P_n + U_{T,n} + E_n} \cdot 100[\%]$$

(Eq.7)

Le informazioni presenti nella Tabella 8, invece, saranno prese in considerazione per il calcolo degli indici di durabilità.

T	10	Year	Expected lifetime
X	6	Year	Extension of lifetime
1- δ^1	80	%	Energy efficiency of Genesi vs Baseline

Tabella 8 Parametri iniziali utilizzati per condurre l'analisi di durabilità

La formula semplificata ed estesa dell'indice di durabilità è stata applicata sia al compressore che alla scheda madre tenendo conto dei tre metodi midpoint, quali:

- Global Warming Potential [kgCO₂eq];
- Water Consumption [m³];
- Mineral Resource Scarcity [kgCueq].

Con i dati ottenuti dall'analisi LCA e con l'aggiunta dell'influenza dei fattori quali energy mix e foam aging nella use phase, sono stati calcolati gli indici di durabilità e tracciati i rispettivi grafici. In particolare, D' è stato calcolato tenendo conto di un allungamento di 6 anni, partendo da una durata di 10 anni e quindi raggiungendo un ciclo vita complessivo pari a 16 anni, nonché la durata media di un frigorifero.

All'interno del grafico se D' si dovesse trovare nel semipiano con asse y negativo, non si trarrebbe alcun beneficio nell'estendere la durata di vita del prodotto e quindi sarebbe più conveniente sostituirlo con uno nuovo; in caso contrario, ovvero con D' nel semipiano con asse y positivo, converrebbe allungare la durata di vita del prodotto.

¹ Ciò significa che al Genesi viene associata una riduzione degli impatti relativi alla fase d'uso rispetto al Baseline pari al 20%

L'indice, inoltre, è stato calcolato sulla base di quattro ipotesi dell'allungamento del ciclo vita, pari a:

- X=1;
- X=3;
- X=5;
- X=6.

Per questo motivo come si vedrà compariranno quattro rette.

- *Compressore*
- Simplified durability index for **GWP [kg CO₂ eq]**

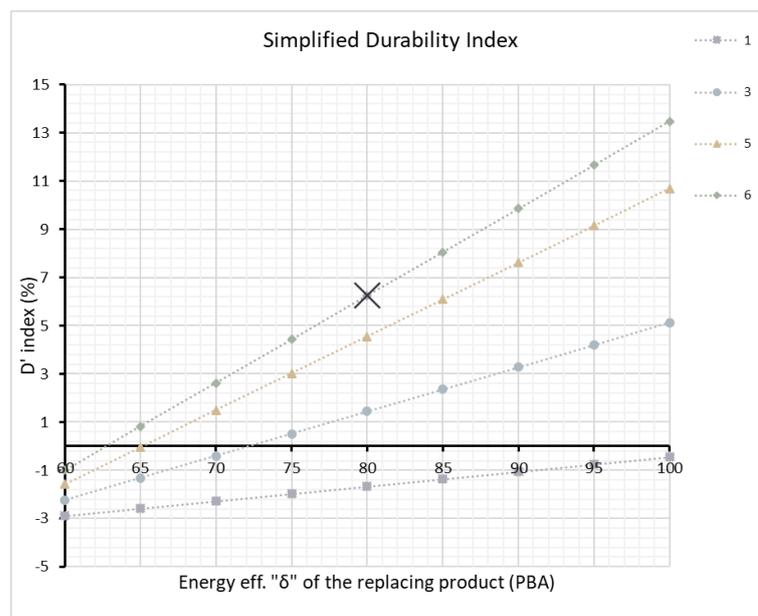


Figura 21 Variazione energy mix

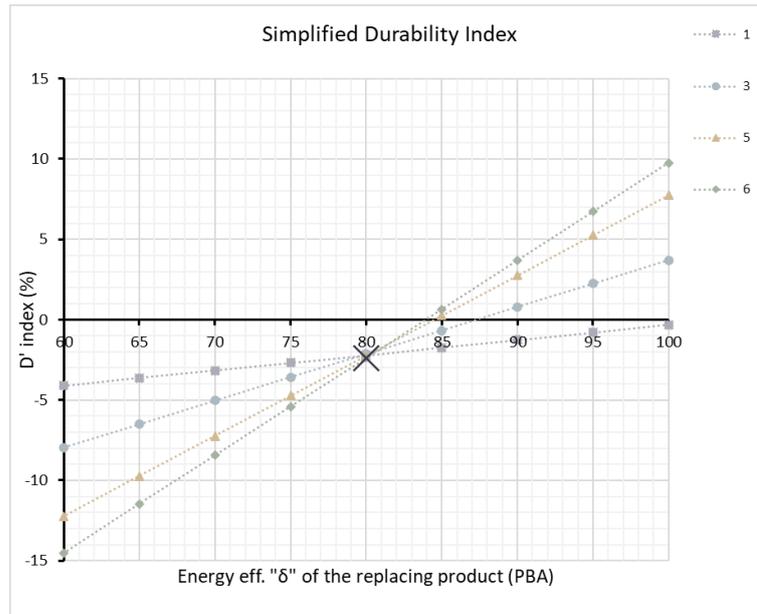


Figura 22 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

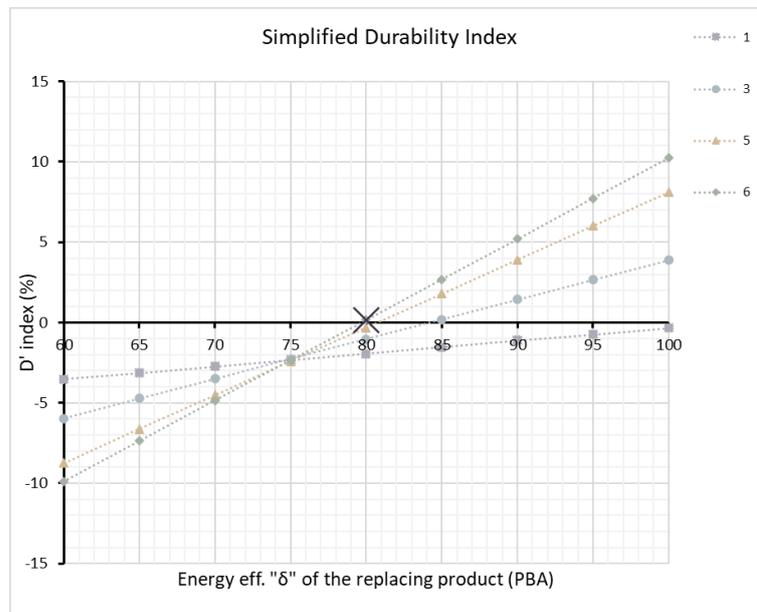


Figura 23 Variazione energy mix e foam aging

Sulla base dei grafici si può desumere che, considerando un cambiamento del mix energetico negli anni con o senza invecchiamento della schiuma isolante, sia preferibile sostituire il compressore; mentre, tenendo conto del solo deterioramento della schiuma che influenza il

consumo energetico secondo la formula empirica fornita da Electrolux, risulta essere più conveniente la sostituzione dell'intero prodotto.

➤ Simplified durability index for **Water [m³]**

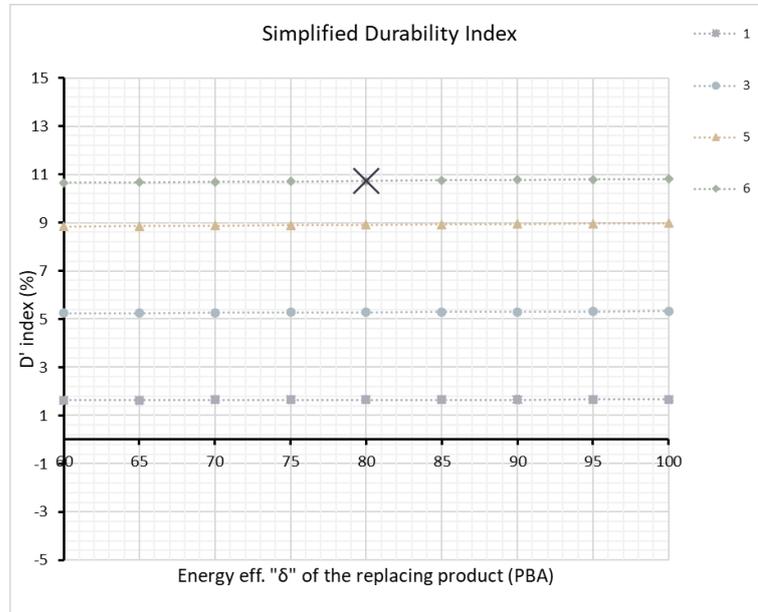


Figura 24 Variazione energy mix

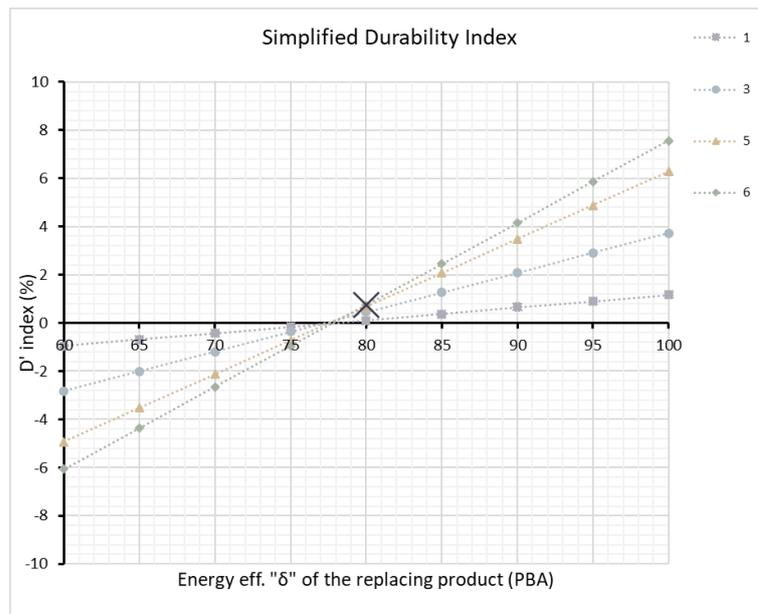


Figura 25 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

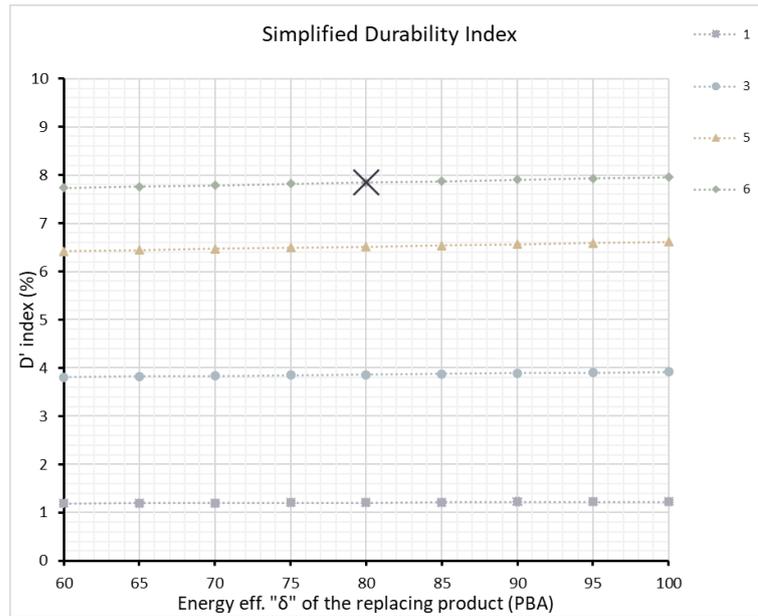


Figura 26 Variazione energy mix e foam aging

Nel caso del consumo di acqua si può notare invece che risulta essere sempre conveniente sostituire il singolo componente piuttosto che l'intero prodotto.

➤ Simplified durability index for **MRS [kg Cu eq]**

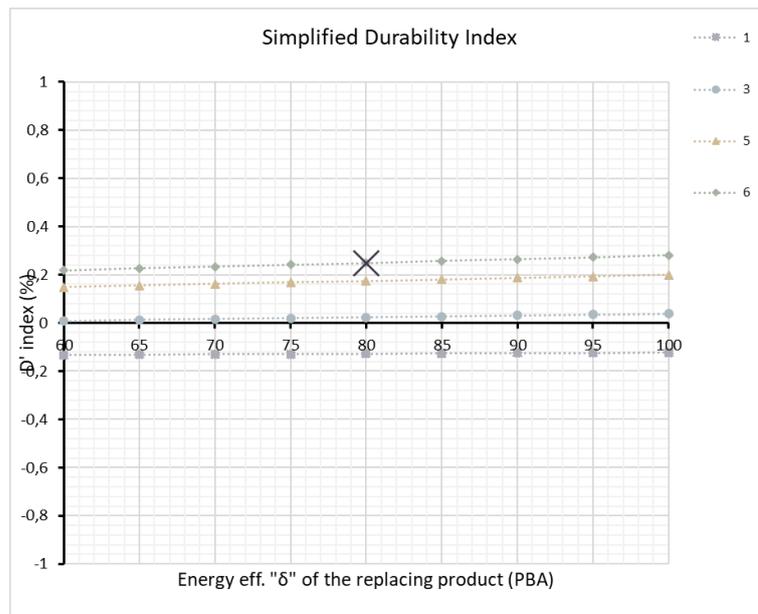


Figura 27 Variazione energy mix

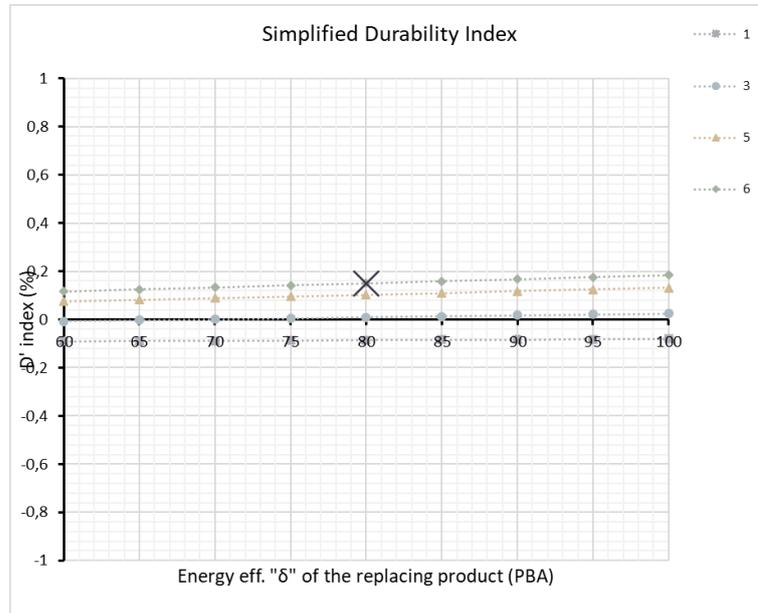


Figura 28 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

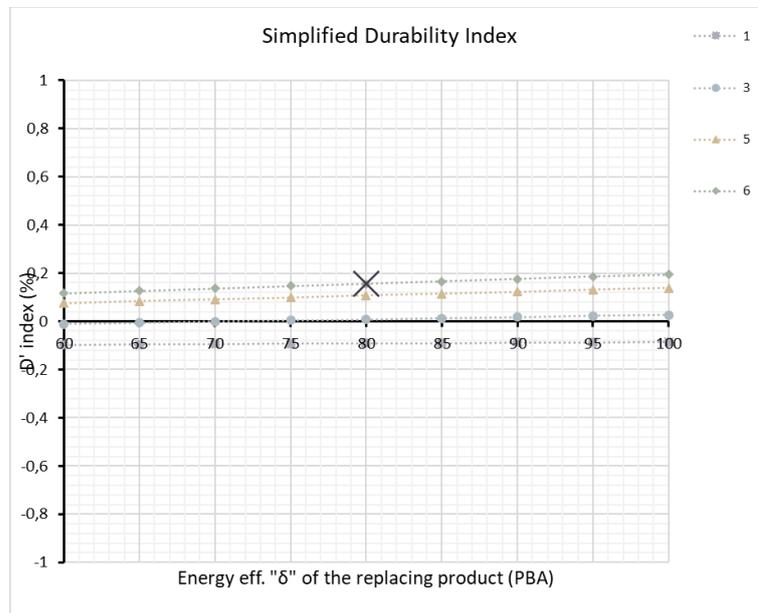


Figura 29 Variazione energy mix e foam aging

Per quest'ultima categoria d'impatto si è visto che, per tutte le ipotesi di peggioramento delle performance, risulta essere comunque conveniente sostituire il singolo componente.

- *Scheda madre*
- Simplified durability index for **GWP [kg CO₂ eq]**

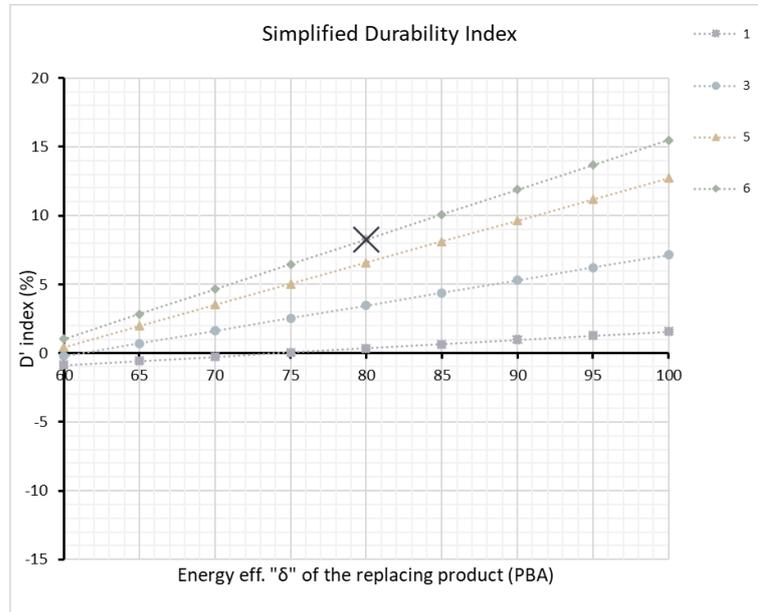


Figura 30 Variazione energy mix

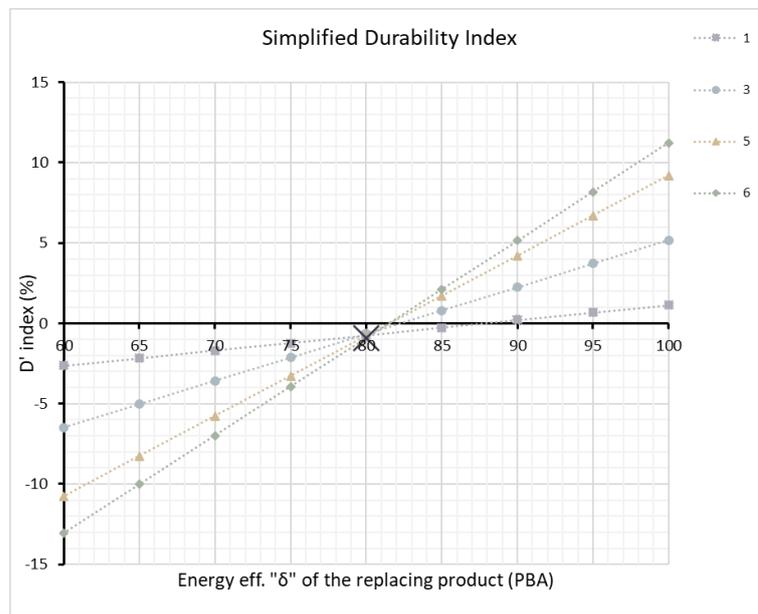


Figura 31 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

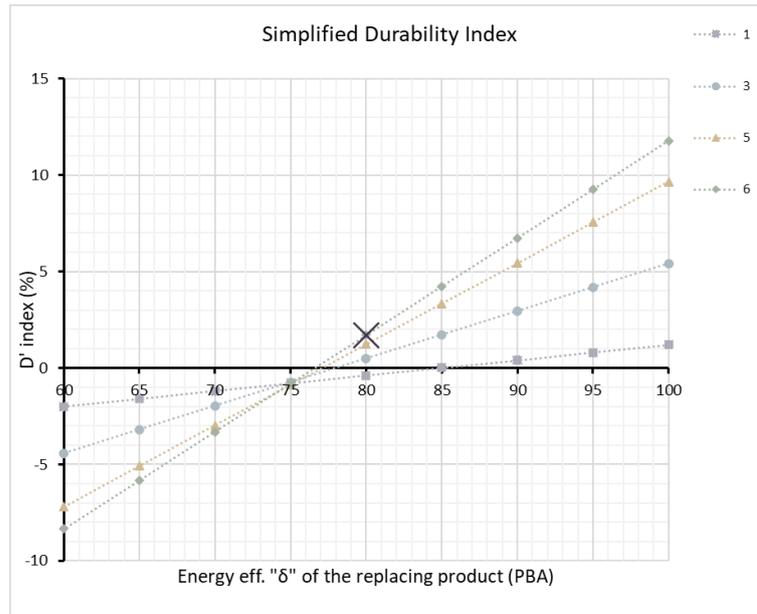


Figura 32 Variazione energy mix e foam aging

Anche per la scheda madre, come per il compressore, considerando una variazione del mix energetico con o senza invecchiamento della schiuma, sarebbe preferibile sostituire il singolo componente, mentre, considerando il foam aging, converrebbe sostituire l'intero frigorifero.

➤ Simplified durability index for **Water [m³]**

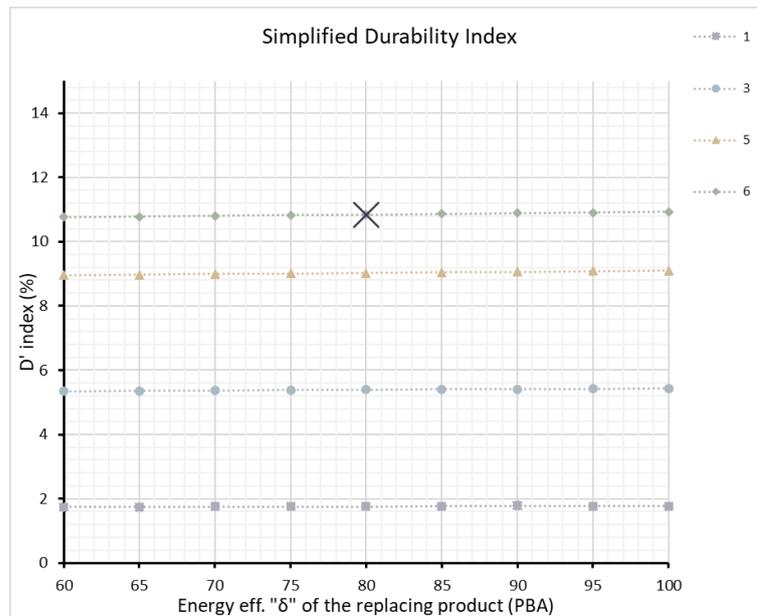


Figura 33 Variazione energy mix

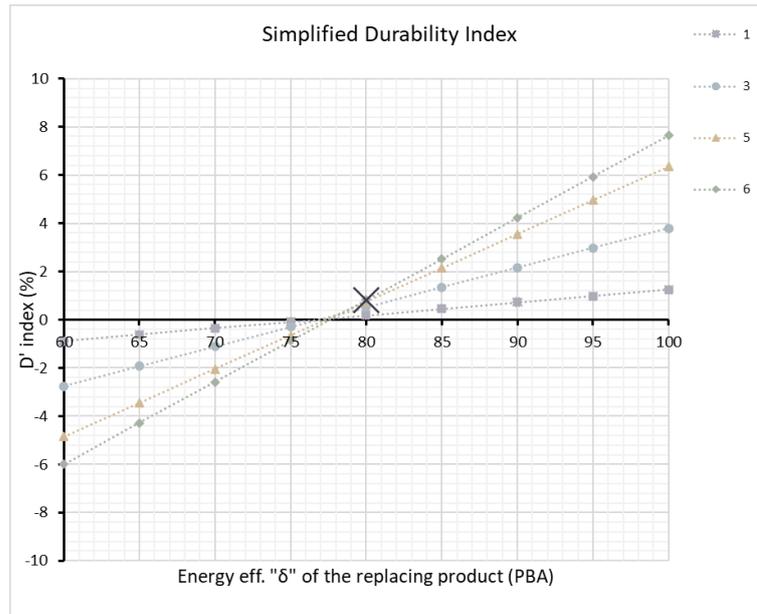


Figura 34 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

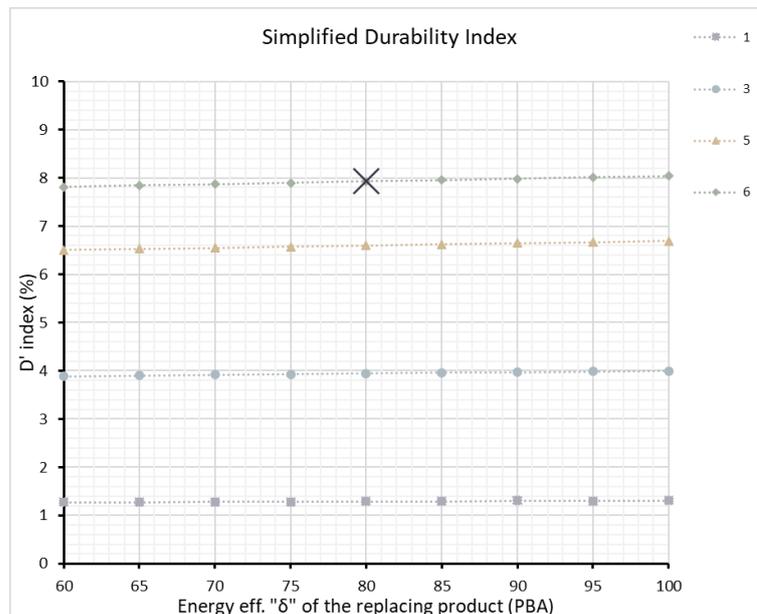


Figura 35 Variazione energy mix e foam aging

Secondo il Water consumption [m³] è sempre conveniente estendere la durata del vecchio frigorifero sostituendo il singolo componente.

➤ Simplified durability index for MRS [kg Cu eq]

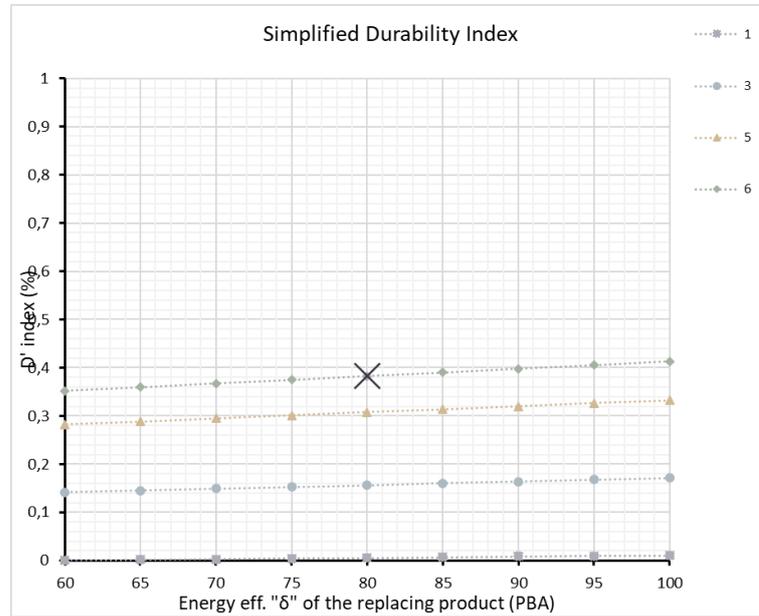


Figura 36 Variazione energy mix

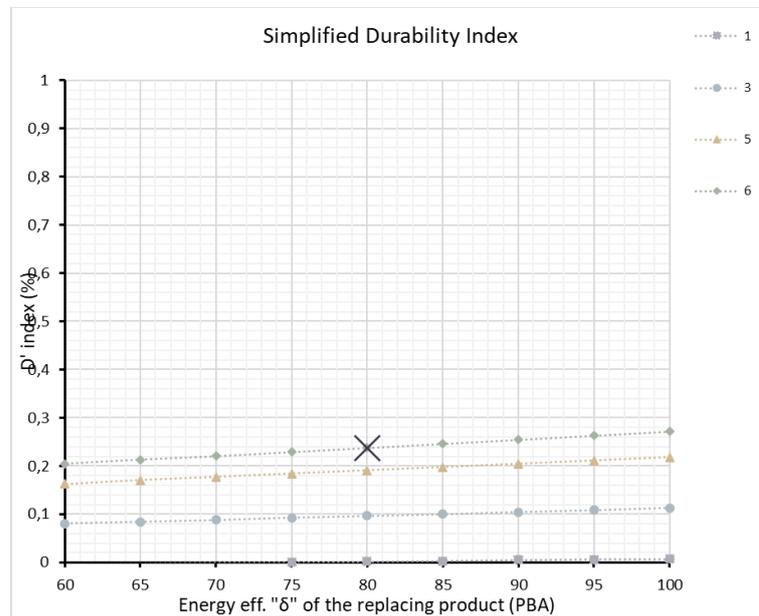


Figura 37 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

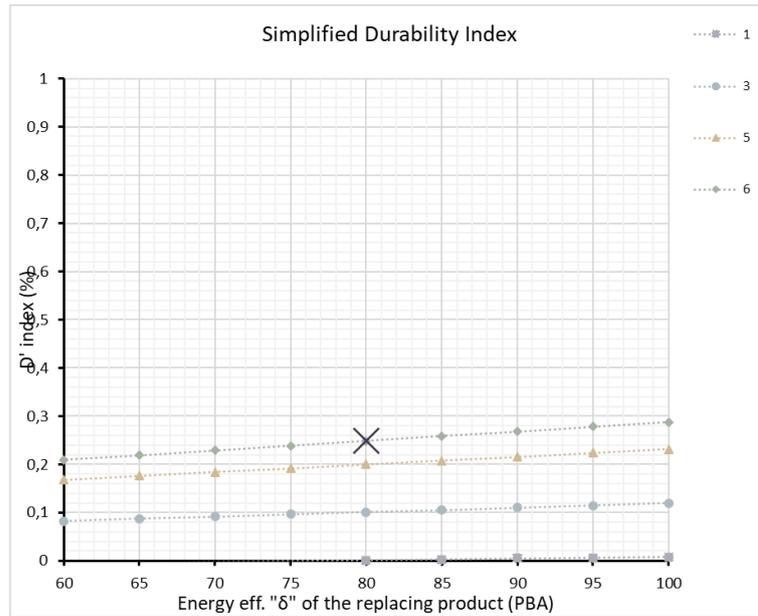


Figura 38 Variazione energy mix e foam aging

Anche per il Mineral Resource Scarcity [kgCueq] è preferibile sostituire la scheda madre.

- *Compressore*
- Extended durability index for **GWP [kg CO₂ eq]**

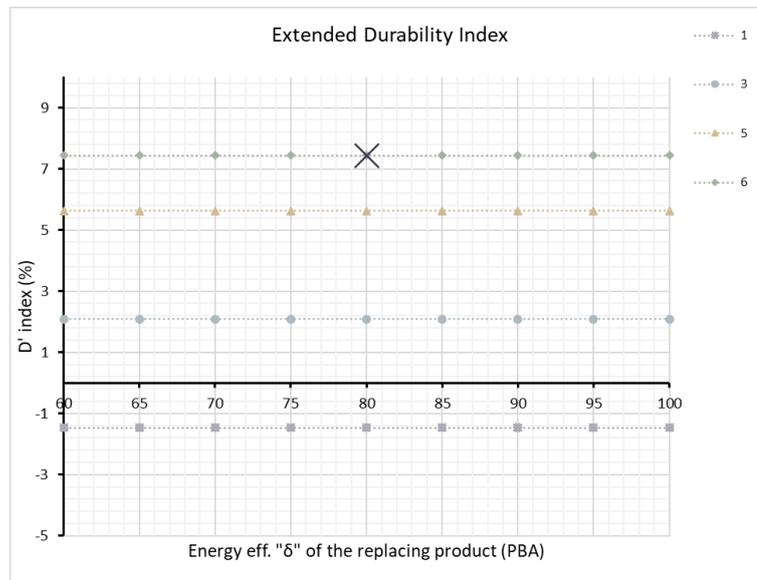


Figura 39 Variazione energy mix

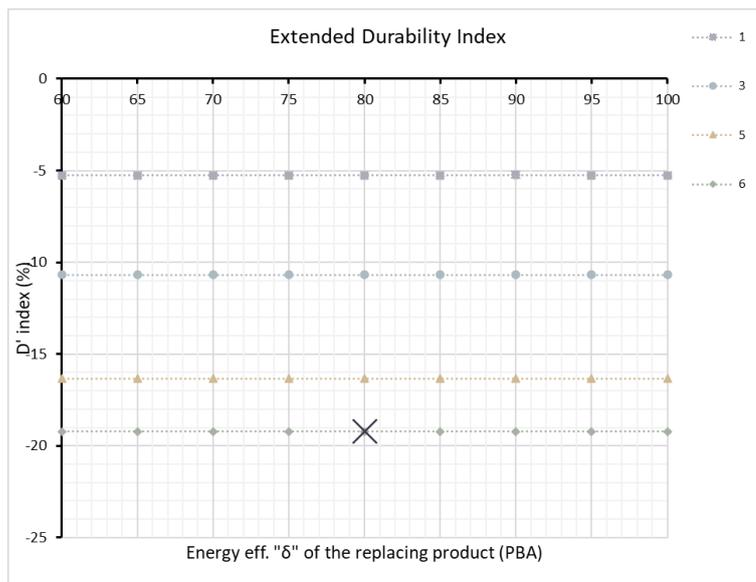


Figura 40 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

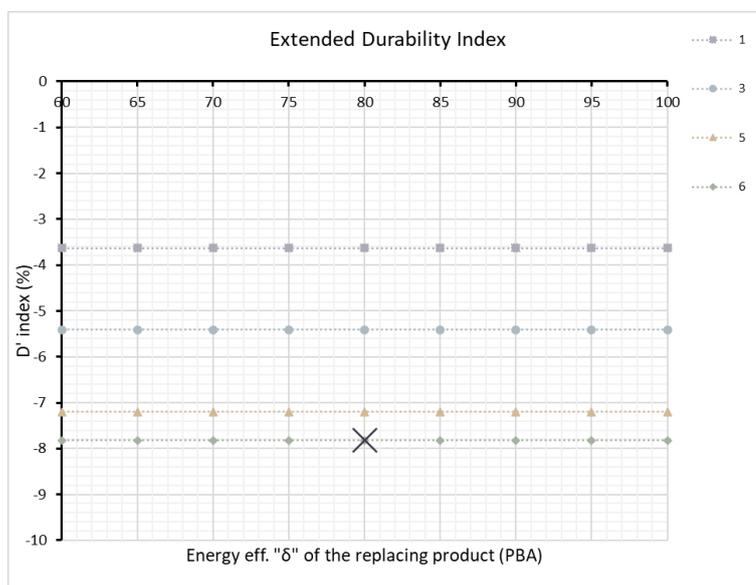


Figura 41 Variazione energy mix e foam aging

➤ Extended durability index for **Water [m³]**

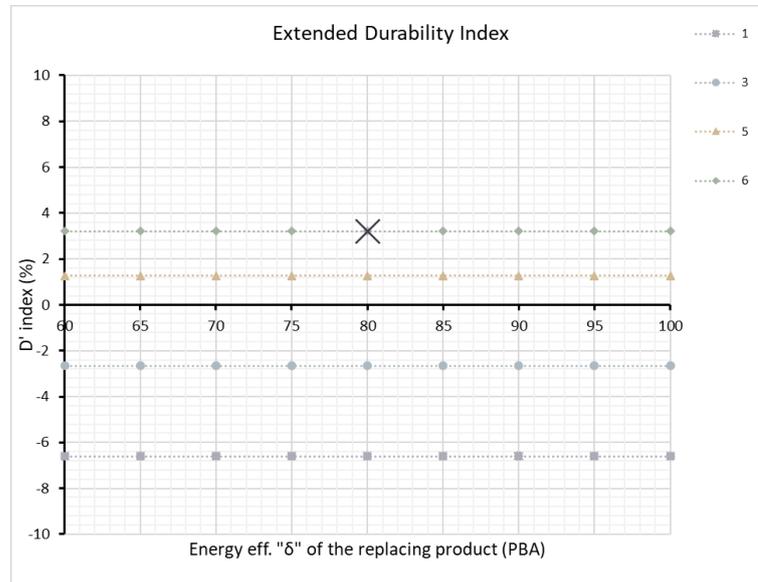


Figura 42 Variazione energy mix

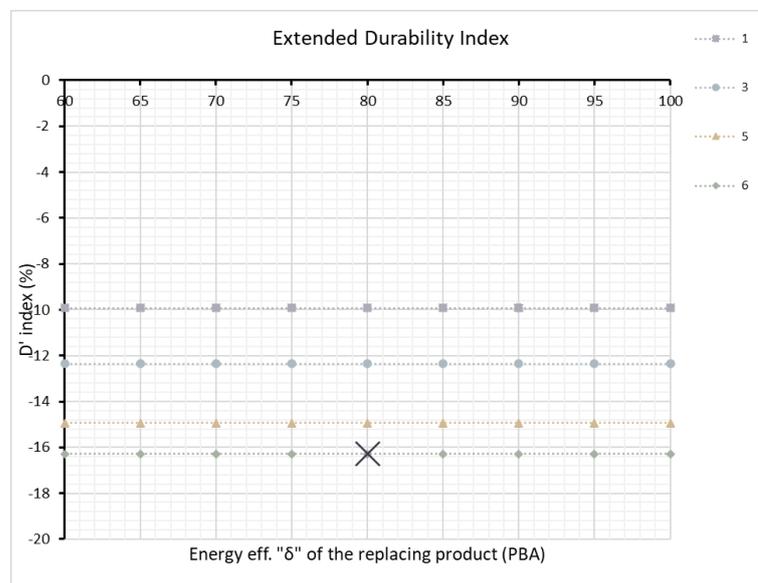


Figura 43 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

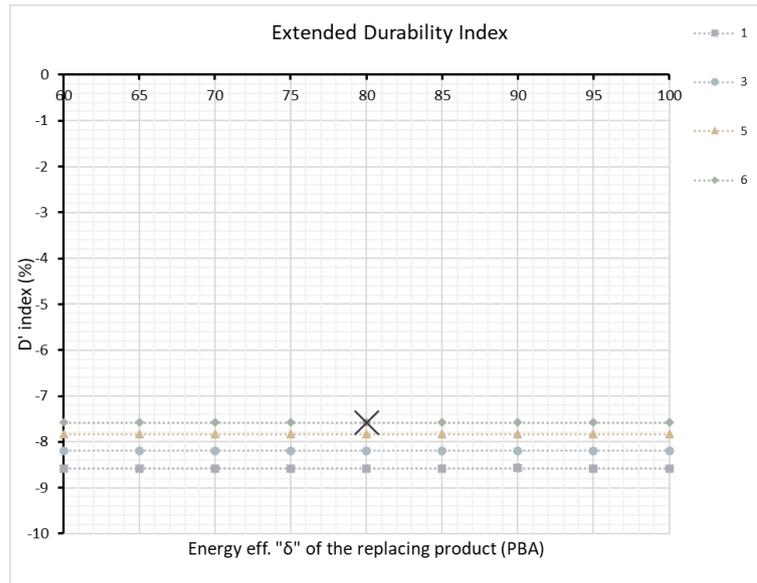


Figura 44 Variazione energy mix e foam aging

➤ Extended durability index for **MRS [kg Cu eq]**

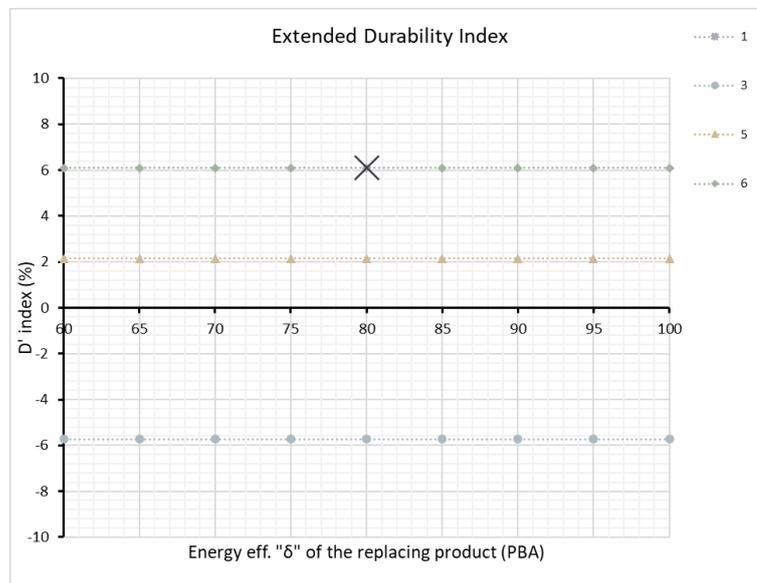


Figura 45 Variazione energy mix

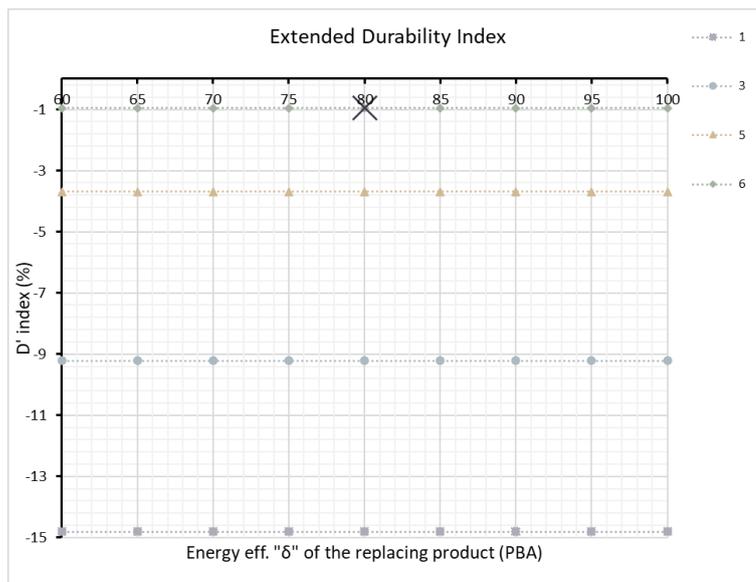


Figura 46 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

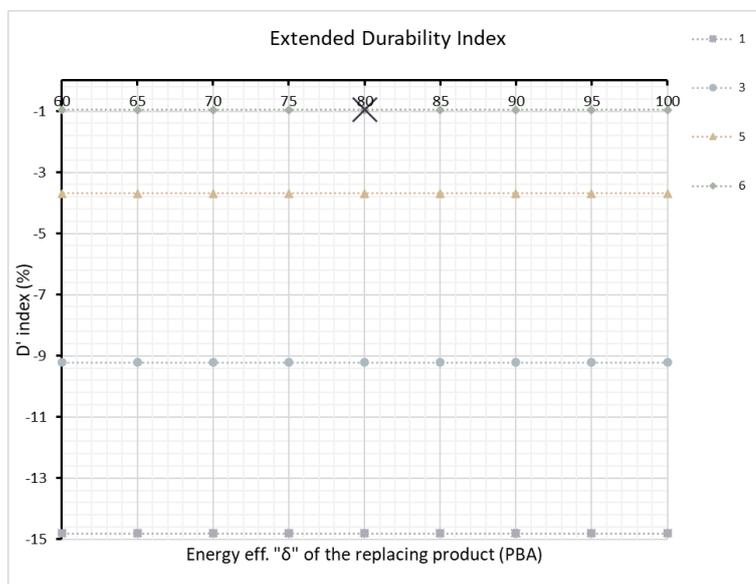


Figura 47 Variazione energy mix e foam aging

- Scheda madre

➤ Extended durability index for **GWP [kg CO₂ eq]**

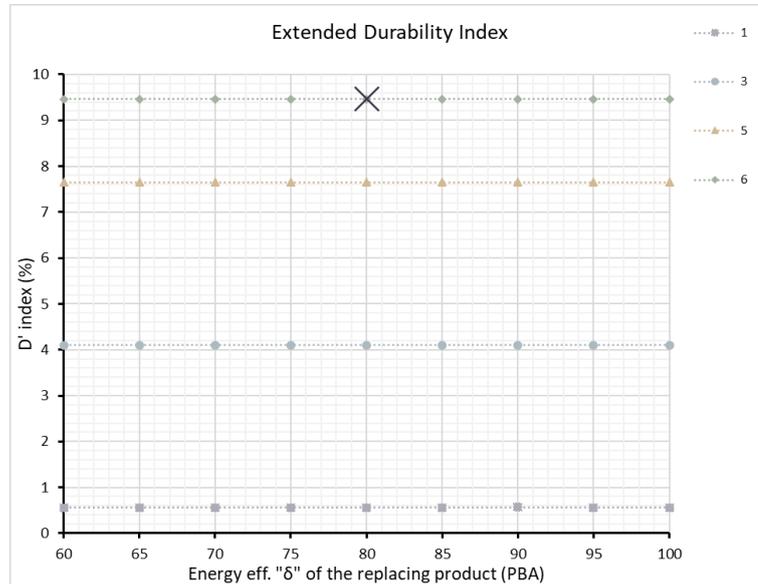


Figura 48 Variazione energy mix

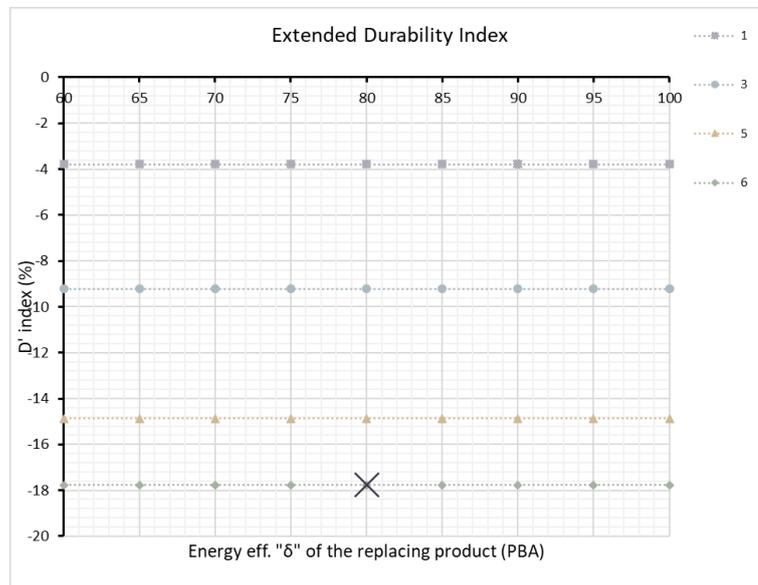


Figura 49 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

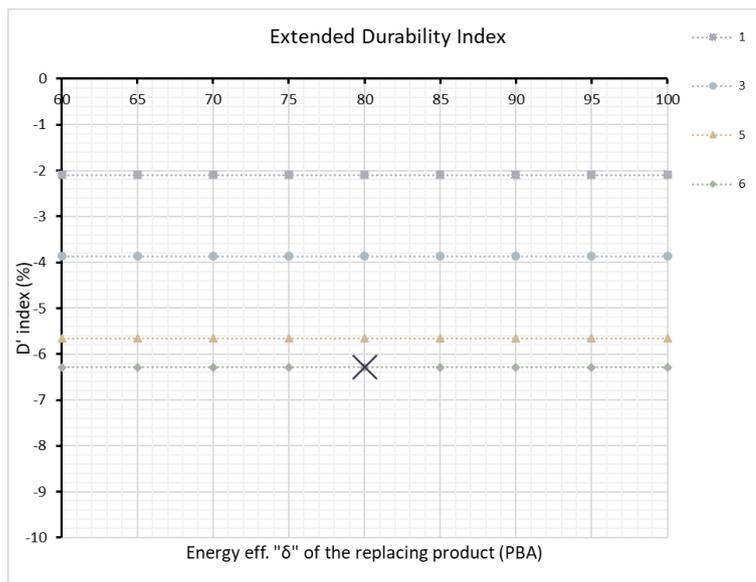


Figura 50 Variazione energy mix e foam aging

➤ Extended durability index for **Water [m³]**

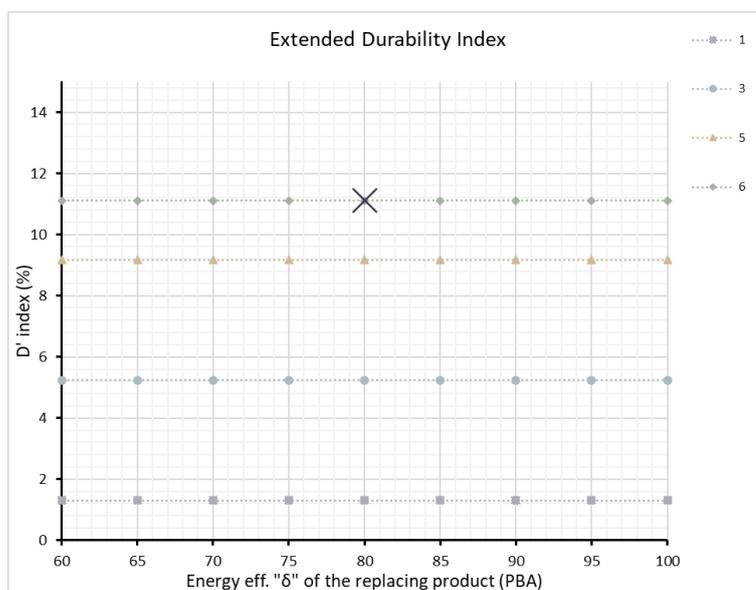


Figura 51 Variazione energy mix

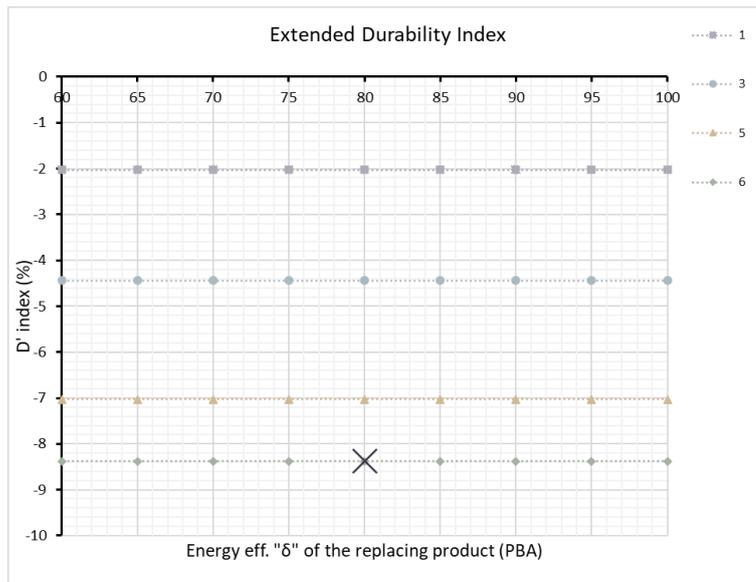


Figura 52 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

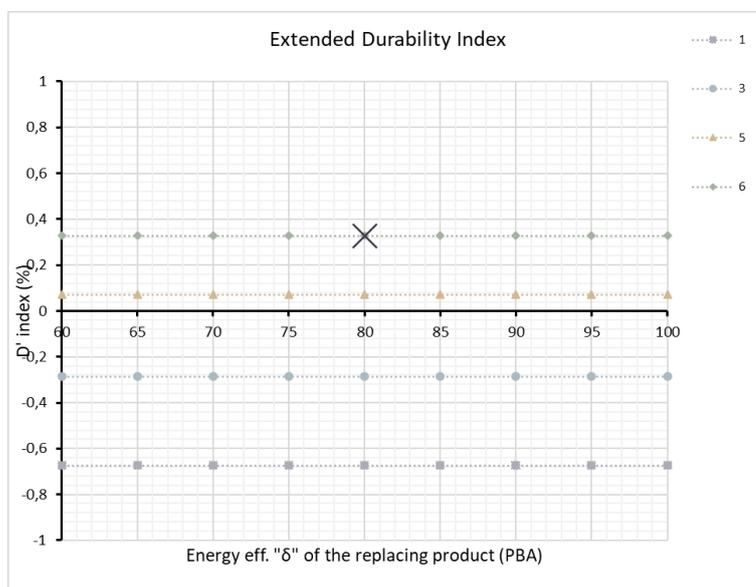


Figura 53 Variazione energy mix e foam aging

➤ Extended durability index for **MRS [kg Cu eq]**

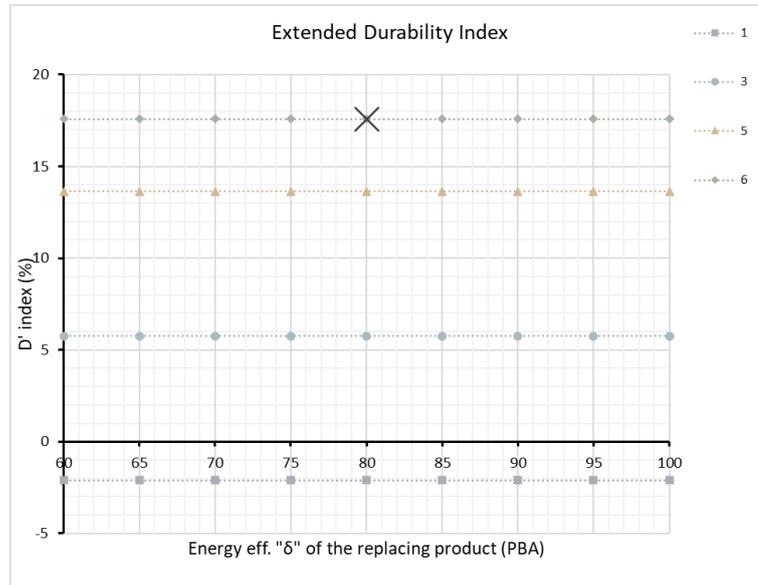


Figura 54 Variazione energy mix

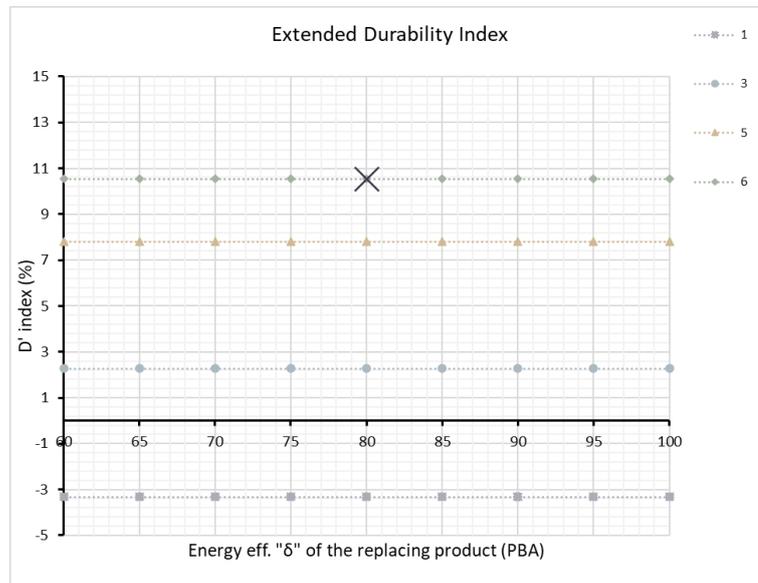


Figura 55 Variazione foam aging - Empirical formula by Electrolux

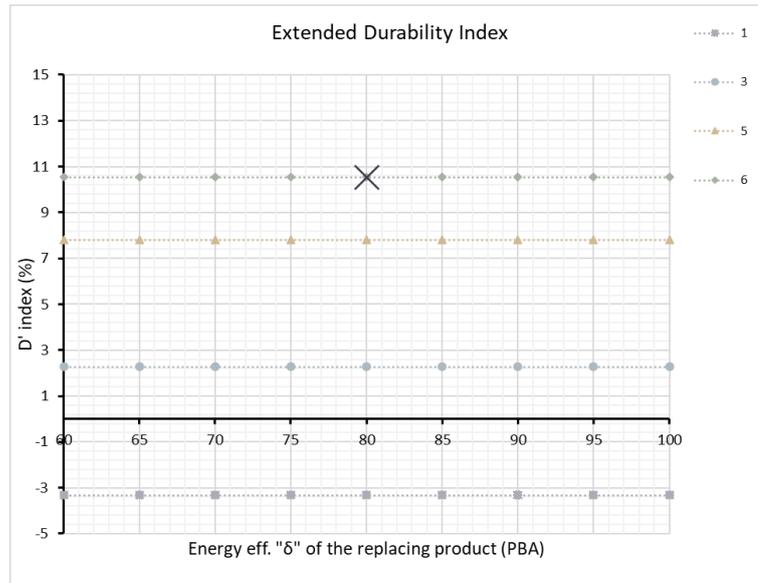


Figura 56 Variazione energy mix e foam aging

		GWP [kgCO ₂ eq]			Water [m ³]			MRS [kgCueq]		
		Energy mix	Foam aging	Energy mix + foam aging	Energy mix	Foam aging	Energy mix + foam aging	Energy mix	Foam aging	Energy mix + foam aging
Compressore	Formula semplificata									
	Formula estesa									
Scheda madre	Formula semplificata									
	Formula estesa									

Tabella 9 Risultati ottenuti dall'analisi di durabilità

LEGENDA	
	Sostituzione componente
	Sostituzione frigorifero

In generale, pertanto, è stato osservato che in tutte le categorie di impatto e a prescindere dalla formula utilizzata, considerando solamente l'influenza da parte dell'energy mix, è preferibile

sostituire il singolo componente; mentre andando ad analizzare la categoria d'impatto Global Warming Potential, si nota che, tenendo conto dell'invecchiamento della schiuma isolante, per entrambi i componenti ed entrambe le formule, è sempre conveniente sostituire il prodotto. Dall'altra parte, andando a considerare gli effetti di entrambi i fattori, la formula estesa che tiene in considerazione delle fasi d'uso di entrambi i prodotti e quindi risulta essere più accurata rispetto a quella semplificata, consiglia nella maggior parte dei casi di sostituire il vecchio frigorifero con uno nuovo.

Successivamente si è ipotizzato di sostituire il prodotto con uno nuovo, identico a quello di partenza. Sono stati tracciati dei grafici che andassero a riportare l'andamento dell'indice di durabilità nel tempo tenendo in considerazione di come il foam aging influenzasse il consumo energetico secondo l'Eq. 7.

Nel dettaglio sono stati valutati due scenari:

- Baseline vs Baseline;
- Genesi vs Genesi.

1. *Baseline vs Baseline*

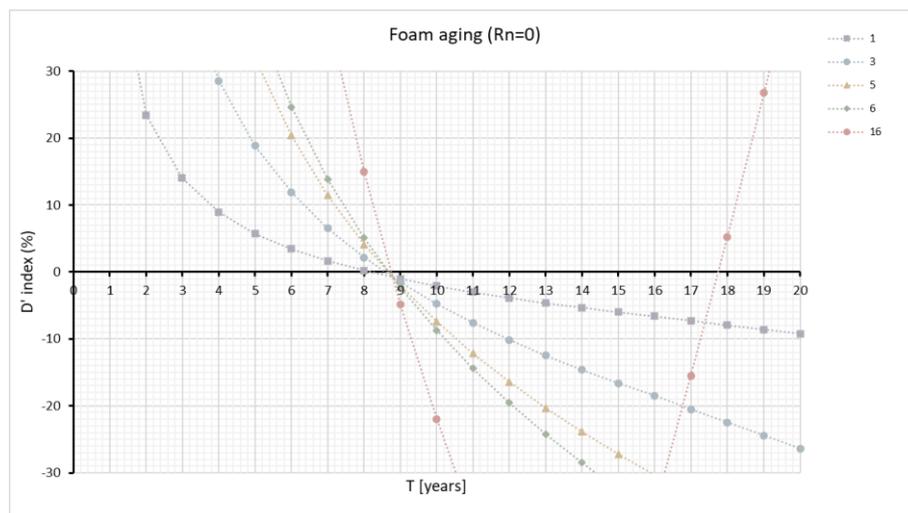


Figura 57 Foam aging - Empirical formula by Electrolux

Considerando $R_n=0$, attorno al 9° anno conviene sostituire il vecchio prodotto con uno del tutto analogo, ma nuovo. Inoltre, per un ciclo vita maggiore di 17 anni sarà più conveniente tenerlo.

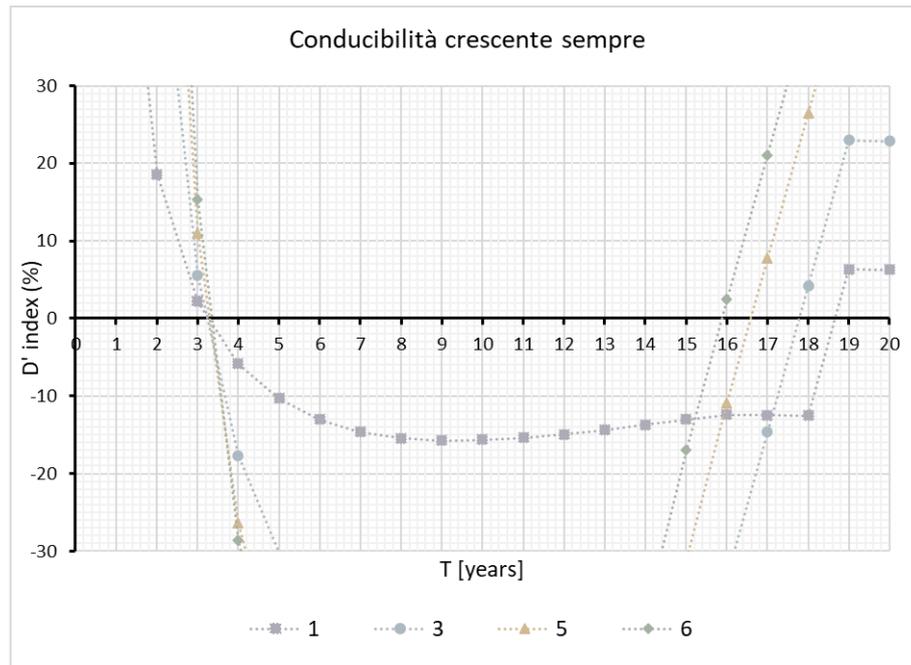


Figura 58 Foam aging - Formula presa dalla letteratura (λ sempre crescente)

In questo caso è conveniente sostituire il prodotto tra il 3° e il 4° anno, indipendentemente da X, se il ciclo vita del frigorifero è minore di 16 anni; mentre per uno maggiore, più grande è X, più sarà conveniente tenerlo.

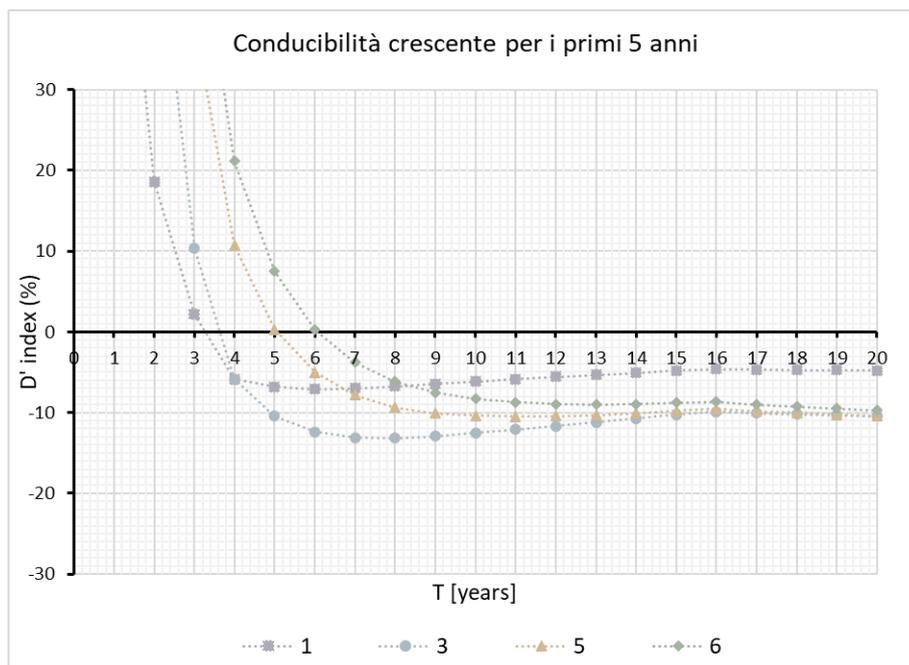


Figura 59 Foam aging - Formula presa dalla letteratura (λ crescente nei primi 5 anni)

La sostituzione varia al variare di X, ovvero maggiore è l'allungamento del ciclo vita, sempre più tardi è conveniente sostituire il frigorifero. Qui l'arco temporale durante il quale è preferibile sostituire il prodotto è compreso tra il 3° e il 6° anno.

2. *Genesis vs Genesis*

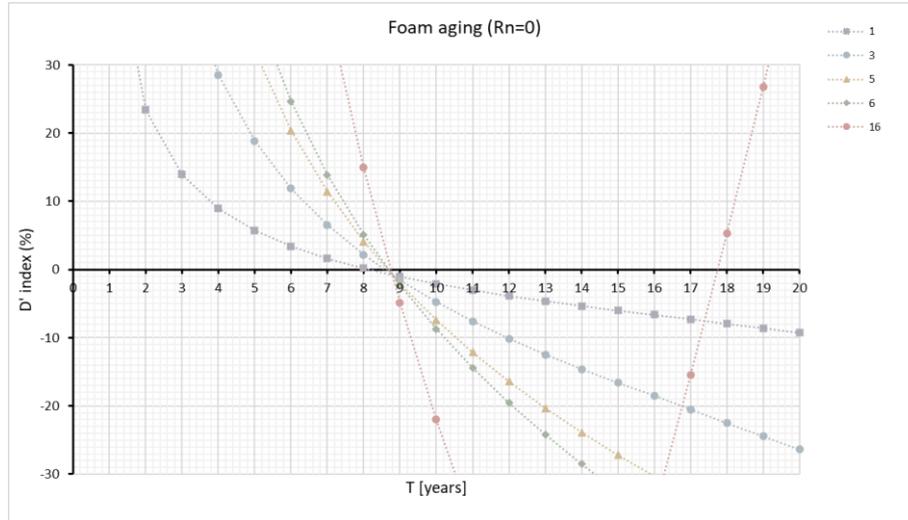


Figura 59 Foam aging - Empirical formula by Electrolux

In questo caso invece si può notare che a prescindere dall'estensione considerata, tutte le curve convergono in un punto e quindi tra l'8° e il 9° anno è conveniente sostituire il vecchio prodotto con uno analogo nuovo. Anche in questo caso per un ciclo vita maggiore di 17 anni è comunque conveniente tenere il vecchio prodotto.

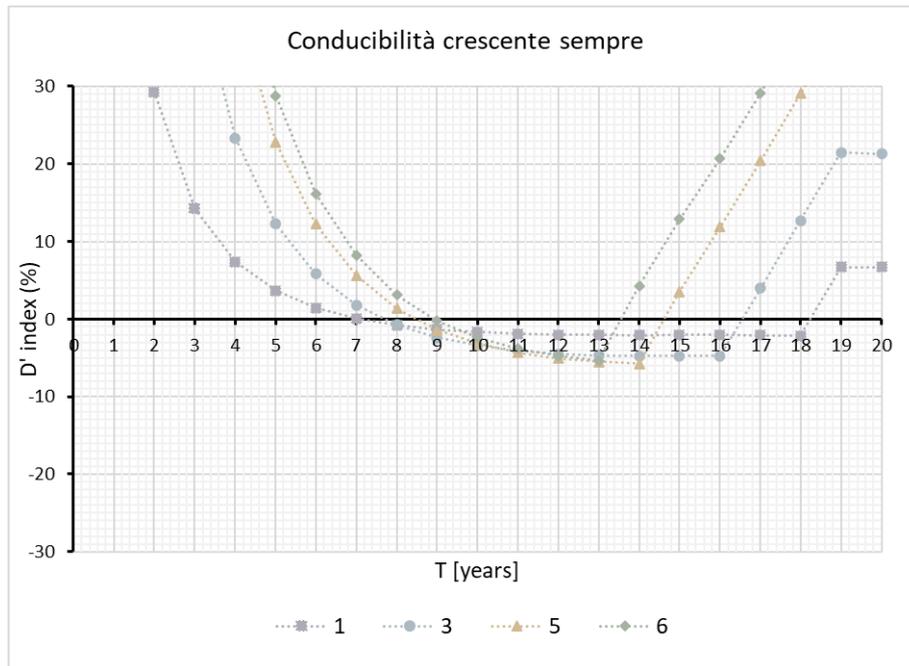


Figura 60 Foam aging - Formula presa dalla letteratura (λ sempre crescente)

Aumentando l'estensione è conveniente sostituire il prodotto tra il 7° e il 9° anno se il ciclo vita del frigorifero è minore di 13 anni, mentre per uno maggiore, più aumenta X, più è conveniente tenerlo.

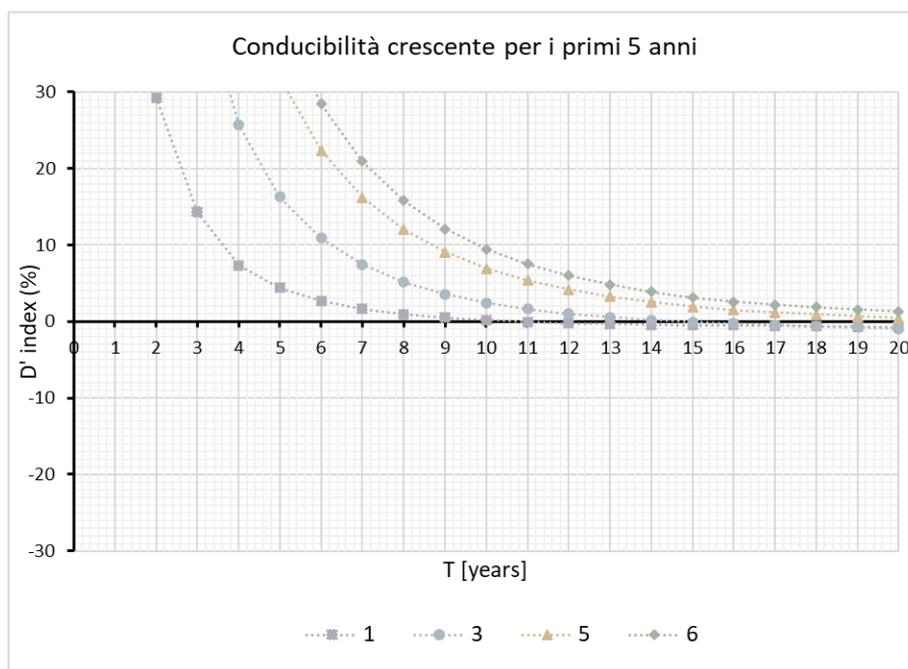


Figura 61 Foam aging - Formula presa dalla letteratura (λ crescente nei primi 5 anni)

Non c'è convenienza a sostituire il frigorifero per allungamento del ciclo di vita maggiore di 3 anni ($X > 3$).

4.3 Consequential LCA vs “New approach”

Pur non essendo l'analisi consequenziale un metodo standardizzato per questa tipologia di applicazione, è stata simulata una valutazione ambientale della fase d'uso e del ciclo vita di entrambi i frigoriferi utilizzando il database Ecoinvent 3.6 di tipo consequenziale all'interno del software SimaPro.

L'obiettivo di questa indagine, infatti, è quello di andare a confrontare i risultati ottenuti dalla valutazione dinamica ambientale del nuovo metodo utilizzando il database Ecoinvent

“Allocation, cut-off by classification” e quelli della valutazione dinamica consequenziale, database Ecoinvent “Substitution, consequential, long-term”, tenendo conto soltanto dell’influenza dell’energy mix nei confronti della fase d’uso e del ciclo vita nel periodo temporale che va dal 2020 al 2035.

Goal	Confronto degli impatti ambientali di due frigoriferi (BASELINE e GENESI), attraverso diversi database.
Functional Unit	Conservare e mantenere gli alimenti freschi nel contesto degli elettrodomestici per un periodo di 16 anni; il cibo si conserva in frigorifero a +4°C e in congelatore a -8°C.
Method	ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 World for Climate Change (2010) [kg CO ₂ eq]
Database	Ecoinvent 3.6 allocation, cut-off by classification, consequential
Software	SimaPro v9

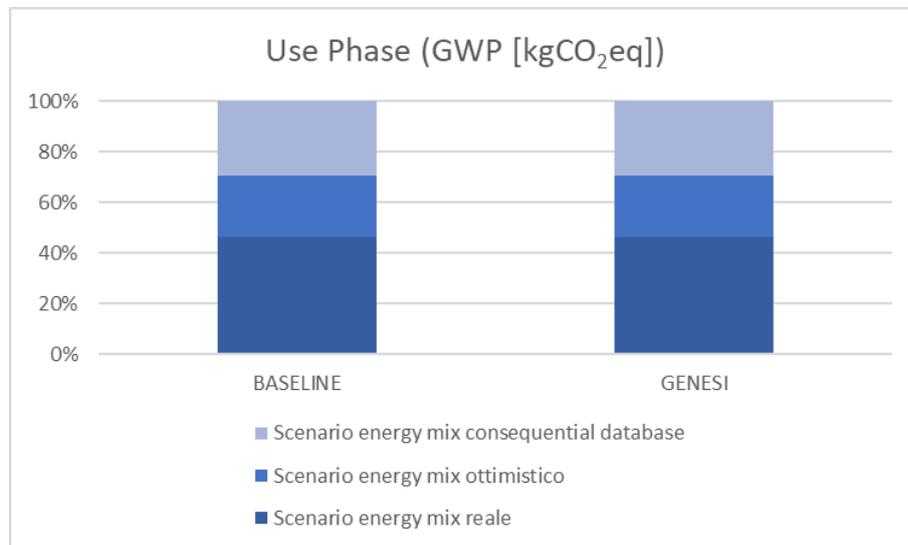


Figura 62 Impatti ambientali secondo la categoria GWP legati alla fase d’uso

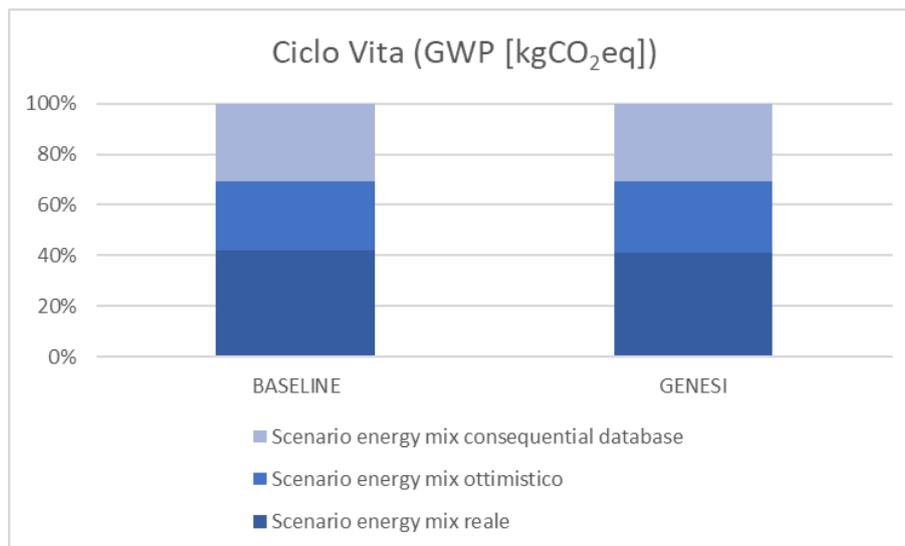


Figura 63 Impatti ambientali secondo la categoria GWP legati all'intero ciclo vita

BASELINE				
GWP [kgCo ₂ eq]	Fase d'uso		Ciclo vita	
	Ottimistico vs reale	Consequential vs ottimistico	Ottimistico vs reale	Consequential vs ottimistico
	-46,99%	-35,92%	-35,19%	-26,90%

Tabella 10 Scenari del Baseline a confronto

GENESI				
GWP [kgCo ₂ eq]	Fase d'uso		Ciclo vita	
	Ottimistico vs reale	Consequential vs ottimistico	Ottimistico vs reale	Consequential vs ottimistico
	-47%	-36%	-33%	-25%

Tabella 11 Scenari del Genesi a confronto

Dalla Figura 62 e Figura 63 e dalla Tabella 10 e Tabella 11, si nota un aumento degli impatti in entrambi i modelli di frigorifero, passando da un modello “pessimistico” ad uno più “ottimistico”, sia per la fase d’uso che per l’intero ciclo vita.

5. Discussione risultati

Inizialmente si è partiti dalla valutazione dell'intero ciclo vita del Baseline e del Genesi, ottenendo oltre ad una diminuzione degli impatti del nuovo frigorifero rispetto al vecchio pari al 17% secondo la categoria GWP [kgCO₂eq] anche una riduzione degli impatti della fase d'uso pari al 20%. Ciò sta a significare che il nuovo prodotto è meno impattante del vecchio dal punto di vista del consumo energetico.

Grazie a questi risultati è stato possibile poi analizzare i parametri legati al prodotto che presentassero un andamento variabile nel tempo e applicare le formule per il calcolo dell'indice di durabilità.

In generale si è visto che per il foam aging non esiste una formula in grado di descrivere l'invecchiamento della schiuma, quindi come la conduttività termica λ vari negli anni.

Inoltre, le formule che legano la variazione del consumo energetico al foam aging non sono universali, poiché si è visto che, a seconda della vecchia o nuova tecnologia (Baseline o Genesi) adottata, una relazione descrive meglio l'incremento del consumo energetico piuttosto che un'altra.

Per ciò che riguarda la durabilità in termini di convenienza nel garantire un'estensione della vita del vecchio prodotto piuttosto che sostituirlo con uno nuovo, la formula semplificata, che lega entrambi i frigoriferi attraverso una percentuale e quindi non risulta essere particolarmente accurata, ha registrato nell'89% dei casi una maggiore convenienza nella sostituzione del singolo componente tranne che per il foam aging nella categoria d'impatto GWP [kgCO₂eq].

Dall'altra parte, invece, la formula estesa che tiene conto delle fasi d'uso di ciascun frigorifero ha registrato nel 50% dei casi, in cui si considera il foam aging singolarmente ed insieme all'energy mix, una convenienza nella sostituzione dell'intero prodotto.

Analizzando la durabilità in termini di scenari che ipotizzino la sostituzione del vecchio prodotto con uno nuovo, ma del tutto uguale, si è visto che sia per lo scenario Baseline vs Baseline che per il Genesis vs Genesis, considerando il foam aging con la formula empirica fornita da Electrolux ($R_n=0$) e la formula presa da letteratura con λ sempre crescente, graficamente è presente una convergenza delle curve associate alle varie estensioni (X) della vita del frigorifero in due intervalli temporali differenti per entrambi gli scenari. In particolare, la sostituzione viene posticipata per lo scenario Genesis vs Genesis.

Negli altri grafici si registra una posticipazione della sostituzione al variare di X e una convenienza nel tenere il prodotto per X maggiore o uguale a 6 anni utilizzando la formula empirica fornita da Electrolux con $R_n \neq 0$.

Per quanto riguarda l'analisi condotta con il database Ecoinvent di tipo consequenziale, questa riporta un incremento dei consumi passando dallo scenario ottimistico a quello consequenziale. Nella realtà dei fatti non dovrebbe essere così poiché nel database si registra una produzione di energia elettrica che derivi per il 100% da fonti rinnovabili a differenza dello scenario ottimistico modellato sulla base di una percentuale del 93% entro il 2050.

6. Conclusione

Al giorno d'oggi la durabilità e quindi la riparabilità di un prodotto è un aspetto molto importante che gran parte dei consumatori considera. Molti di loro, infatti, sono sempre più influenzati da fattori emotivi ed economici che li lega al prodotto. Sarebbe utile, quindi, valutare la durata di vita media del prodotto così da fornire delle informazioni che possano in qualche modo mettere al corrente il consumatore su quelle che potrebbero essere delle scelte che saranno prese in futuro.

Per essere in grado di fare una serie di assunzioni più accurate legate alla durabilità di un prodotto, si potrebbe valutare come la variabilità temporale dei parametri considerati nel metodo “new approach” possano in qualche modo influenzare la domanda e quindi il mercato del prodotto, tenendo conto all'interno della trattazione anche di possibili flussi sociali ed economici.

Tutto questo è possibile svilupparlo andando ad allargare i confini dei datasets presenti attualmente attraverso dei modelli matematici lineari e non che siano in grado di fornire dei dati relativi agli impatti ambientali dei processi interessati ad una variazione della domanda.

Bibliografia

- Abraham Zhang, R. Y. (2020). Blockchain-based life cycle assessment: An implementation framework and system architecture.
- Behzad Esmaeilian, J. S. (2020). Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0.
- Christian Hueppe, J. G. (2021). Age-related efficiency loss of household refrigeration appliances development of an approach to measure the degradation of insulation properties.
- Commissione Europea.* (s.d.). Tratto da https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/product-database/qr-code-new-energy-label_it
- Doug Belanger, U. B. (2018). The impact of aging on the effective thermal conductivity of foam insulation: a simulation investigation using laboratory characterization data.
- Ekvall, T. (2019). Attributional and Consequential Life Cycle Assessment. In J. L.-B.-C. María José Bastante-Ceca, *Sustainability Assessment at the 21st century*. IntechOpen.
- Eu, R. S. (2016). *Energy, transport and GHG emissions. Trends to 2050*.
- Federica Cappelletti, A. P. (2022). Smart strategies for household food waste management.
- Fulvio Ardente, F. M. (2014). Environmental assessment of the durability of energy-use products: method and application.
- Hyung Chul Kim, G. A. (2005). Optimal household refrigerator replacement policy for life cycle energy, greenhouse gas emissions, and cost.

- Isadora Correa Hackenhaar, J. B. (2022). A spatiotemporally differentiated product system modelling framework for consequential life cycle assessment.
- Jesko Schulte, S. K. (2022). Sustainability impact and effects analysis - A risk management tool for sustainable product development.
- KarstenSchischke, A. B.-R. (2022). Durability, reparability and recyclability: Applying material efficiency standards EN 4555x to mobile phones and tablet computers.
- Laurent Vandepaer, K. T. (2019). The integration of long-term marginal electricity supply mixes in the ecoinvent consequential database version 3.4 and examination of modeling choices.
- María D. Bovea, V. I.-F.-B. (2020). Repair vs. replacement: Selection of the best end-of-life scenario for small household electric and electronic equipment based on life cycle assessment.
- Matilda Watz, S. I. (2022). Towards sustainable product development - Insights from testing and evaluating a profile model for management of sustainability integration into design requirements.
- Matthias Buyle, W. G. (2019). Sustainability assessment of circular building alternatives: Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context.
- McKinsey & Company, Inc. (2010). Electric Power and Natural Gas Practice.
- S. McAvoy, T. G. (2021). Combining Life Cycle Assessment and System Dynamics to improve impact assessment: A systematic review.
- Sankarshan Verma, H. S. (2020). Vacuum insulation panels for refrigerators.
- Silvia Gaiani, S. C. (2018). Food wasters: Profiling consumers' attitude to waste food in Italy.

Simon Mörsdorf, D. N. (2022). Beyond Sustainable Products - Concept for a Positive Impact Product Engineering (PIPE).

Thomas Schaubroeck, S. S. (2021). Attributional & Consequential Life Cycle Assessment: Definitions, Conceptual Characteristics and Modelling Restrictions.

UNEP. (2021). Food waste index report 2021.

Xuebing Dong, H. L. (2018). How does material possession love influence sustainable consumption behavior towards the durable products?