

Ricerca di Sistema elettrico



Analisi LCA di sistemi SHTES ed LHTES

R. Petrucci, F. Dominici, J.M. Kenny, L. Torre



Analisi LCA dei sistemi SHTES e LHTES

Petrucci, F. Dominici, L. Torre, Università degli Studi di Perugia

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.2 Progetto Integrato Tecnologie di accumulo elettrochimico e termico Linea di attività: Numero LA4.10 - Studio di calcestruzzi auto-riscaldanti ed accoppiamento tubo-calcestruzzo per sistemi TEES/Concrete. Analisi LCA per sistemi SHTES-Concrete e di LHTES

Responsabile del Progetto: Margherita Moreno, ENEA.

Responsabile del Work Package: (se WP1-3 e WP5) Margherita Moreno, ENEA. (se WP4) Raffaele Liberatore, ENEA.

Responsabile Linea di Attività: Ing. Luigi Torre, Università di Perugia

Mese inizio previsto: Gennaio 2023

Mese inizio effettivo: Gennaio 2023

Mese fine previsto: Dicembre 2024

Mese fine effettivo: Dicembre 2024

Indice

1	Contenuti del Rapporto tecnico	Errore. Il segnalibro non è definito.
2	Risultati attesi	4
3	Risultati ottenuti.....	4
4	Prodotti attesi	4
5	Prodotti ottenuti.....	4
6	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	4
7	Sintesi delle attività svolte	4
8	Dettaglio delle attività svolte.....	5
9	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte	15
10	Pubblicazioni scientifiche	15
11	Eventi di disseminazione	15
12	Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale.....	15

Indice delle figure

Figura 1: Struttura tubolare per il sistema LH_TES (a) e per il SH_TES (b).....	6
Figura 2: Schematizzazione della struttura di rinforzo del singolo nucleo SH_TES.	7
Figura 3: Schematizzazione del sistema di accumulo termico ibrido sensibile/latente.	7
Figura 4: Contributo al processo dei flussi singoli per il sistema LH_TES.....	8
Figura 5: Confronto tra i punteggi LCA del sistema di accumulo a calore sensibile e quello a calore latente.....	8
Figura 6: <i>Contributo al processo dei flussi singoli per il sistema SH_TES</i>	9
Figura 7: <i>Categorie di impatto più rilevanti, coinvolte nel ciclo di vita del sistema LH_TES (a) e di quello SH_TES (b)</i>	10
Figura 8 <i>Danni ambientali di maggiore rilievo relativi al ciclo di vita del LH_TES (a) ed al SH_TES (b)</i>	12
Figura 9: Andamento nel tempo del punteggio LCA relativo al ciclo di vita del sistema a calore latente (a) e di quello a calore sensibile (b).	13

Indice delle tabelle

Tabella 1: Inventario inerente alla produzione della data unità funzionale di calcestruzzo attivo.....	5
Tabella 2: Valori degli indicatori di impatto ottenuti con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il sistema a calore latente.....	11
Tabella 3: <i>Valori degli indicatori di impatto ottenuti con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il sistema a calore sensibile</i>	11
Tabella 4: Indicatori di danno in base al metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il sistema a calore latente.....	12
Tabella 5: Indicatori di danno in base al metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il sistema a calore sensibile.....	13
Tabella 6 <i>Pay-back time per ogni Indicatore d'impatto valutate con il metodo ReCiPe 2016 mid-point (H/A)</i>	14
Tabella 7: Pay-back time per gli effetti ambientali valutati con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A).	14

1 Risultati attesi

Analisi LCA sia per sistemi SHTES-Concrete che per gli LHTES allo scopo di verificarne la performance ambientale sulla base delle norme ISO 14040 e 14044. La modellazione e studio riguarda prevalentemente quattro macroaree: i) Miscele attive di materiali; ii) Singolo prototipo/elemento attivo; iii) Modulo completo; iv) Service Life modulo.

2 Risultati ottenuti

Analisi LCA per i sistemi SHTES-Concrete che per gli LHTES, nonché la valutazione della performance e del contributo ambientale di ogni costituente, relativo ad ognuno dei prototipi considerati, ossia gli elementi e/o le miscele attivi/e (PCM), del mix costituente il calcestruzzo, ma anche gli elementi meramente strutturali ed i sistemi di isolamento termico. Ciò è stato fatto secondo le norme ISO 14040 e 14044. È stata valutata la performance ambientale della fase di produzione, assemblaggio, ma anche della service life. Grazie ai benefici effetti legata alla service life, è stato valutato anche il pay back time ambientale completo dei due moduli, ma anche quello inerente ai principali impatti ed effetti ambientali.

3 Prodotti attesi

Non era atteso alcun prodotto hardware/software

4 Prodotti ottenuti

Non essendo stato previsto, non è stato neanche ottenuto alcun prodotto hardware/software.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nessuno scostamento dalle attività previste

6 Sintesi delle attività svolte

È stata sviluppata l'analisi LCA per sistemi SHTES-Concrete e LHTES, a scopo di verifica della performance ambientale in base delle norme ISO 14040 e 14044. È stata modellata la produzione delle miscele attive di materiali utilizzati nei sistemi di accumulo a calore sensibile e latente. Nel primo caso si usano miscele idratate di Sali, incapsulati in un sistema poroso, mentre nel secondo caso di miscele secche. È stato modellato l'elemento completo per ognuna delle due tipologie, insieme ai relativi componenti di scambio termico e

coibentazione. In fine, è stata modellata la Service Life di entrambi i tipi di modulo, dal trasporto alla sede finale, dove espletano la loro funzione di accumulo di energia termica, che consente un risparmio di energia da fonti non rinnovabili.

Sia per quanto l'impatto complessivo che per indicatori di impatto e categorie di danno è stato calcolato il pay-back time ambientale, ossia il tempo necessario all'azzeramento del valore dei suddetti parametri.

7 Dettaglio delle attività svolte

Lo studio LCA ha riguardato due sistemi di accumulo energetico, ossia a calore sensibile e latente (sviluppato secondo le normative ISO 14040-44). Le aree di intervento sono state: produzione della miscela di Sali solari usati come PCM, quella del calcestruzzo attivo, quella dell'elemento attivo per le due tipologie, insieme ai sistemi di scambio ed isolamento termico. Nel caso del sistema a calore sensibile è stato preso un 42-esimo del modulo completo costituito da 42 nuclei attivi, coibente e basamento isolante. Una quarta area di intervento è la fase d'uso, che determina la produzione di energia termica, che fa risparmiare risorse fossili.

E' stata definita l'unità funzionale dei vari sistemi allo studio: sia nel caso del TES basato sul calore sensibile che quello basato sul calore latente, sono rappresentate dal singolo nucleo in condizioni operative (è stata inclusa l'energia minima accumulata in 20 anni di service life, calcolata dividendo il relativo valore nominale per un fattore di sicurezza pari a 1,75, il quale è rappresentativo di un quadro penalizzante (come se il modulo fosse inattivo per quasi il 42% del tempo di vita).

In merito alla qualità dei dati, il relativo orizzonte temporale è riferito alla produzione per l'anno 2024. Molti sono stati ricavati da riferimenti bibliografici.

Per quanto riguarda l'inventario inerente ai Sali solari, è stata considerata la miscelazione allo stato solido, riprodotta su scala industriale mediante blender rotativo. E' stato considerato il loro utilizzo nei sistemi a calore latente o dispersi in soluzione acquosa, con successivo incapsulamento nella diatomite, nel caso dell'utilizzo nei sistemi a calore sensibile.

Sono stati modellati i contributi energetici della fase di dispersione in soluzione a 84 °C (leggi termodinamiche), la miscelazione (modello di Skelland & Ramsey) e l'essiccazione sotto vuoto, così come la riduzione in volume del materiale (energia ricavata dalla Legge di Bond).

La miscelazione del calcestruzzo attivo (composizione riassunta in tabella 1) avviene all'interno di un'autobetoniera (potenza in ingresso pari a 85 kW e Capacità totale di 12 m³). I tempi di miscelazione considerati sono di 3 minuti.

Tabella 1: Inventario inerente alla produzione della data unità funzionale di calcestruzzo attivo.

Materiale	Fu = 1 m³	Fu = 1 Ton
Acqua (kg)	160,00	69,44
Cemento Portland (kg)	360,00	156,24
Sabbia (kg)	829,00	359,79
Brecciolino (kg)	368,00	159,71
Breccia (kg)	405,00	175,77
PCM Incapsulati (kg)	127,00	55,12
Fibre PP (kg)	1,00	0,434
Fibre metalliche (kg)	50,00	27,70

Superfluidificante (kg)	4,43	1,92
Energia (kWh)	0,71	0,308
Peso totale (kg)	2304,43	1000,00



Figura 1: Struttura tubolare per il sistema LH_TES (a) e per il SH_TES (b).

Non tutti i materiali utilizzati sono presenti nel database (Ecoinvent 3.9) del software preso in considerazione (SimaPrò 9.6.0). Ad esempio, la diatomite calcinata è stata modellata a partire dai carbonati di calcio, aggiungendo l'energia di calcinazione (1,90 MJ/kg).

Entrambi i tipi di moduli sono caratterizzati da una serie di tubi di acciaio inox (figura 1), sia dritti che curvi, saldati tra loro. Alcuni tubi sono alettati con delle lastre di acciaio inox.

Nell'inventario relativo è stato considerato il materiale (acciaio inox), la produzione del tubo, il taglio laser e la saldatura ad arco. È stata modellata anche la curvatura dei tubi.

Il sistema LH_TES è inserito all'interno di una scatola in acciaio inox, sagomata e chiusa con un coperchio. È stata modellata l'intera struttura, basata su lastre di acciaio inox tagliate a laser, piegate e saldate tra loro mediante saldatura ad arco.

Il sistema ad accumulo mediante calore sensibile ha una struttura di rinforzo in acciaio da costruzioni. Per questa è stata modellata la piegatura del materiale e la saldatura delle centine, oltre al materiale (figura 2).

È stata incluso entro i confini del sistema anche la gettata del cemento in un cassero con la spesa energetica legata all'utilizzo di un sistema di vibrazione (potenza pari a 1,15 kW), che è attivo per 1 minuto.

Nella fase di produzione del modulo SH_TES è stato modellato anche il processo di impilamento (computo energetico di un carroponte).

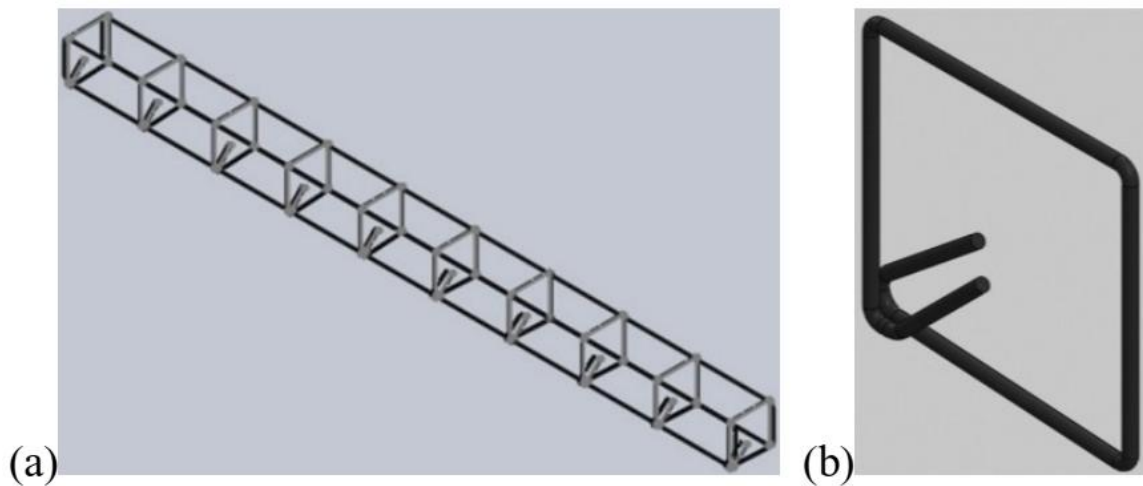


Figura 2: Schematizzazione della struttura di rinforzo del singolo nucleo SH_TES.



Figura 3: Schematizzazione del sistema di accumulo termico ibrido sensibile/latente.

Nel caso del singolo nucleo è stato considerato un 42-esimo dei flussi relativi all'operazione di impilamento, così come per l'allestimento del componente (1117 kg di materiale isolante - mineral wool, 317 kg di pavimento isolante e circa 6 kg di piping di connessione mediante tubi in inox). E' stato considerato lo scarto di materiale inerente che la fase di coibentazione (Waste of mineral wool) e quelli della pavimentazione (sistema di forati), nei cui interstizi) è presente anche polistirene espanso (40 kg/m³ caricato con grafite al 6%).

Anche nel caso del sistema di accumulo a calore latente sono stati considerati gli elementi di coibentazione sia a pavimento (a base di fibre refrattarie) che per le superfici laterali (a base di lana di roccia con superfici sottili di alluminio). Sono stati considerati anche gli scarti per il coibente (8% ÷ 10%).

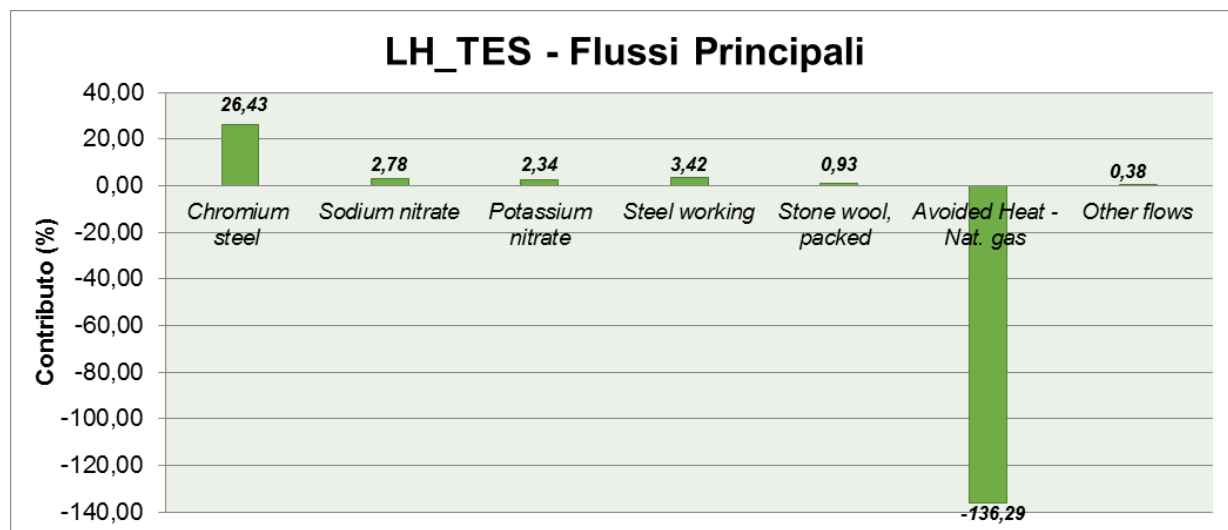


Figura 4: Contributo al processo dei flussi singoli per il sistema LH_TES.

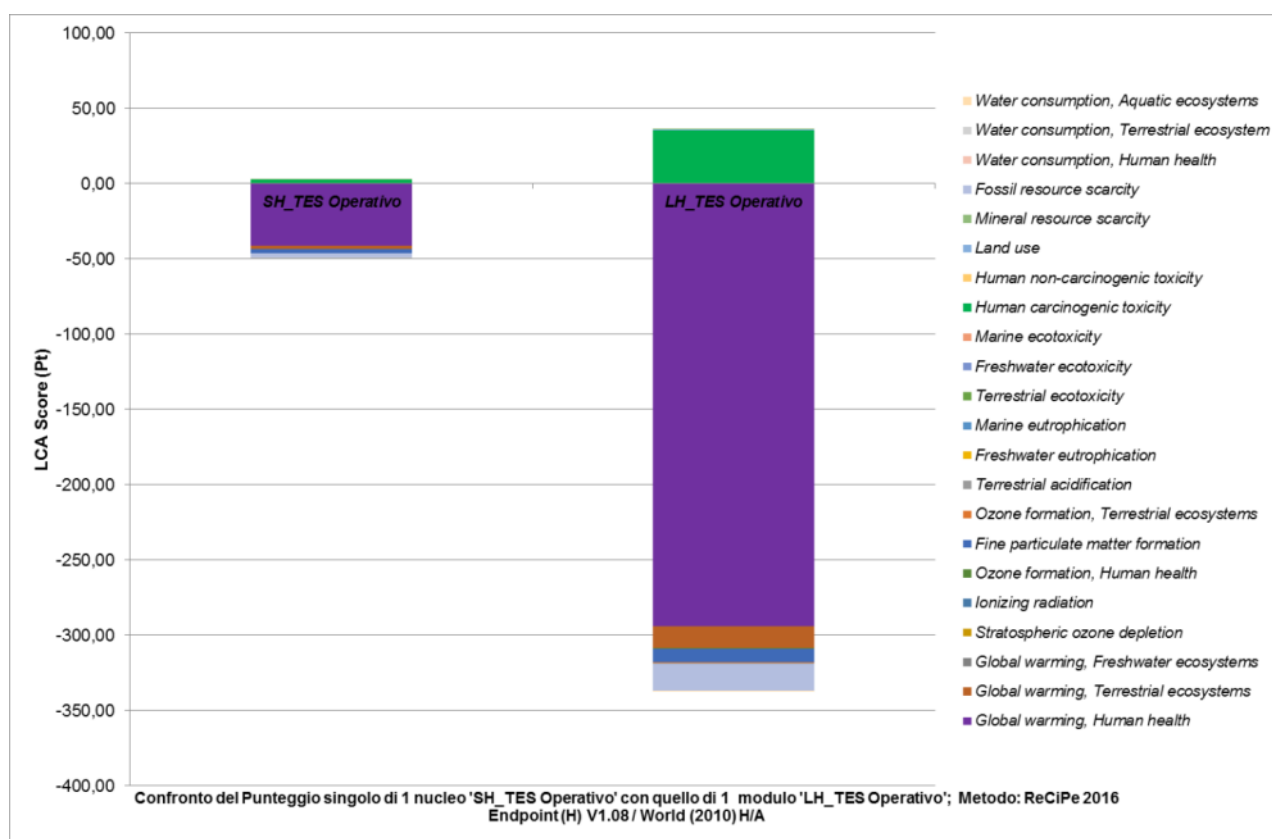


Figura 5: Confronto tra i punteggi LCA del sistema di accumulo a calore sensibile e quello a calore latente.

Entrambi i sistemi accumulano e cedono energia termica per un utente dislocato nella loro collocazione finale, consentendo un risparmio di risorse fossili (gas naturale). E' stato ipotizzato un trasporto stradale di 200 km, con un mezzo di capacità compresa tra 16 e 32 tonnellate, motorizzato Euro 5. I due tipi di componenti sono operanti in serie, come mostrato in figura 3.

Per quanto riguarda l'energia termica accumulata dal sistema LH_TES potenzialmente si ha una quantità giornaliera di 30,38 kWh. L'altro tipo di sistema è dotato di un rendimento intorno a 4,29 kWh/giorno.

I modelli sono stati implementati mediante il software SimaPrò 9.6.0 e sono stati selezionati gli strumenti di valutazione ReCiPe 2016(H/A) end point e ReCiPe 2016(H/A) mid point.

La costruzione del LH_TES genera un punteggio LCA positivo, quindi comporta un impatto ambientale, mentre il relativo utilizzo come sorgente di accumulo di calore è caratterizzato da un punteggio negativo, quindi porta dei benefici ambientali, la cui entità è molto rilevante e controbilancia gli impatti legati alla fase di produzione.

Più della metà dell'impatto ambientale relativo alla produzione, è dovuta allo sviluppo della scatola di contenimento dei Sali e degli scambiatori, costituiti da lastre e tubi in acciaio inox. Circa un quarto dell'impatto potenziale è legato alla serpentina completa, anche essa in acciaio inox. I Sali solari determinano solo il 14,25% dell'impatto potenziale.

Relativamente a tutto il ciclo di vita considerato, il flusso di maggiore rilevanza (figura 4) riguarda l'energia termica accumulata in venti anni di vita, quindi quella risparmiata, se fosse prodotta da una fonte fossile (gas naturale).

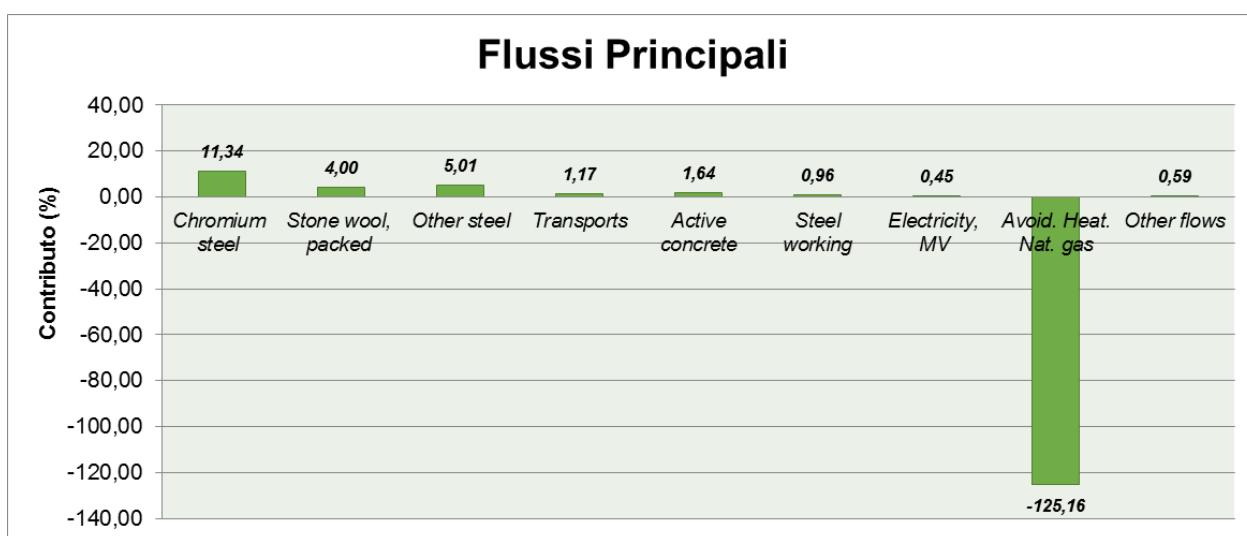


Figura 6: Contributo al processo dei flussi singoli per il sistema SH_TES.

Anche nel caso del SH_TES, la fase di produzione genera un punteggio LCA positivo, quindi un impatto ambientale negativo, anche se inferiore all'altro sistema. Il suo utilizzo come sorgente di accumulo di calore genera un punteggio negativo, quindi comporterebbe benefici ambientali di mitigazione dei danni (figura 5).

Nel caso del sistema a calore sensibile, la produzione del nucleo singolo è responsabile di circa il 24% del punteggio LCA, mentre il relativo uso determina un recupero del 125% di tutto l'impatto ambientale.

Per quanto riguarda la fase di produzione, più della metà dell'impatto ambientale è dovuta allo sviluppo dei tubi per lo scambio termico. Circa il 16,50% del punteggio è legato all'utilizzo del calcestruzzo attivo, che contiene i Sali solari e la diatomite. Lo stesso ammontare è attribuito alla coibentazione. Superiore al 15% rispetto al punteggio inerente alla costruzione risulta il contributo della gabbia metallica (armatura).

Il flusso di maggiore rilievo (grafico di figura 6), riguarda l'energia termica potenzialmente accumulata, quindi risparmiata, se fosse prodotta da una fonte fossile (gas naturale).

Il sistema basato sul calore latente è più performante in termini di accumulo di calore rispetto all'altro nucleo, quindi anche dal punto di vista ambientale.

Quanto detto per gli impatti ambientali globali dei due sistemi vale anche in termini di singole categorie di impatto, come il riscaldamento globale o la produzione di particolato fine. Ossia

la service life consente una mitigazione pressochè totale, salvo alcune eccezioni. A questo proposito, per il sistema a calore latente queste eccezioni sono rappresentate da Freshwater e Marine eutrophication, del Terrestrial e Marine Ecotoxicity, del Human carcinogenic e non-carcinogenic toxicity, dal Land use e del Mineral resource scarcity. Nel caso del sistema a calore sensibile, tali eccezioni sono: Terrestrial ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity e Mineral resource scarcity. Ogni eventuale prolungamento della service life dei moduli, oltre i venti anni considerati, comporterebbe un miglioramento del quadro generale. Viceversa, un eventuale rottura prematura peggiorerebbe la situazione.

La categoria d'impatto più importante (figura 7), è quella legata al riscaldamento globale per entrambi i sistemi. Il risparmio di fonti fossili per produzione energetica consente di abbattere, non solo l'utilizzo delle fonti stesse, ma anche le emissioni di gas serra.

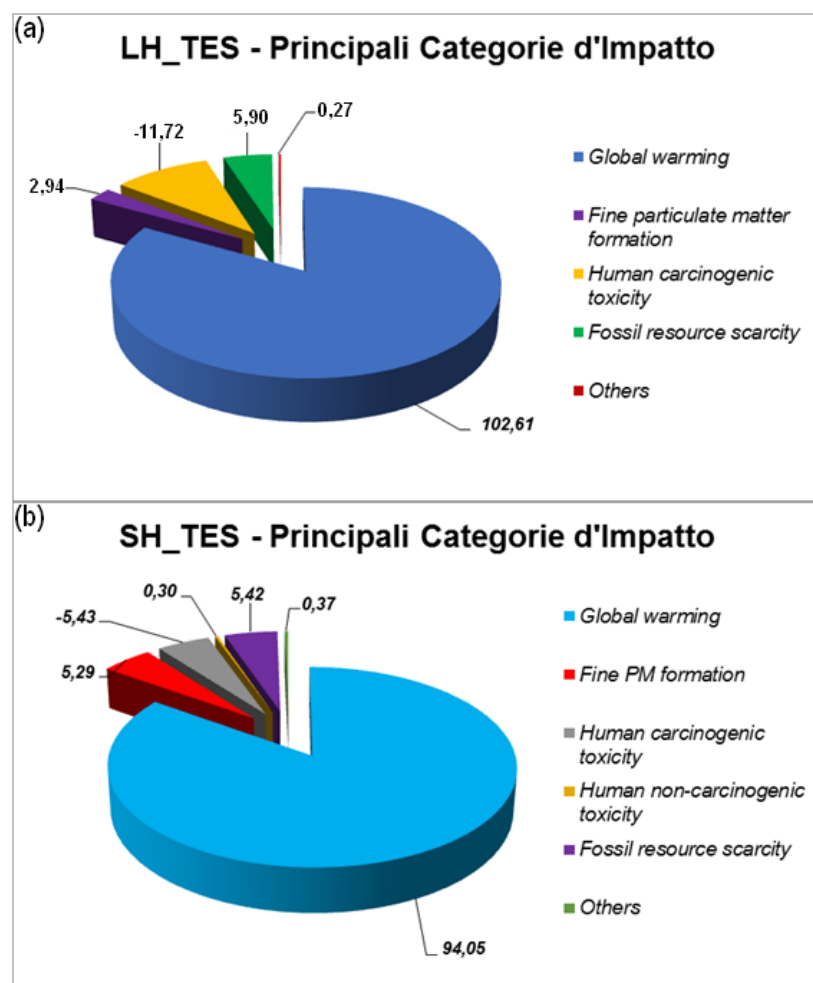


Figura 7: Categorie di impatto più rilevanti, coinvolte nel ciclo di vita del sistema LH_TES (a) e di quello SH_TES (b).

I valori degli indicatori d'impatto sono riassunti in tabella 2 e 3, rispettivamente per il singolo modulo di accumulo energetico a calore latente e per quello a calore sensibile. Non tutti assumono un valore negativo. Ciò significa che non si verifica per tutti gli impatti la completa mitigazione entro tutta la durata della service life.

Tabella 2: Valori degli indicatori di impatto ottenuti con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il sistema a calore latente.

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Produtz. LH_TES	Utilizz. LH_TES	Trans., lorry 16-32 ton, EU5
Global warming	kg CO ₂ eq	-19000,07	1059,18	-20080,07	20,82
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	-3,96*10 ⁻³	3,00*10 ⁻⁴	-4,27*10 ⁻³	1,01*10 ⁻⁵
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	-21,14	40,93	-62,27	0,20
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	-17,60	2,85	-20,52	0,06
Fine particulate matter formation	kg PM _{2,5} eq	-0,84	3,03	-3,90	0,02
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	-20,37	2,97	-23,41	0,07
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	-5,92	3,84	-9,80	0,04
Freshwater eutrophication	kg P eq	1,77*10 ⁻²	0,41	-0,40	1,80*10 ⁻³
Marine eutrophication	kg N eq	1,70*10 ⁻²	5,57*10 ⁻²	-3,92*10 ⁻²	4,81*10 ⁻⁴
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	13147,78	18369,43	-5543,34	321,68
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-0,58	70,21	-71,30	0,51
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	3,72	99,69	-96,82	0,85
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	636,21	952,47	-317,30	1,04
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	89,68	1276,27	-1203,06	16,48
Land use	m ² a crop eq	78,54	160,90	-83,19	0,82
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	132,99	147,99	-15,05	0,05
Fossil resource scarcity	kg oil eq	-6907,41	258,67	-7172,67	6,58
Water consumption	m ³	-20,21	5,04	-25,29	0,04

A tal proposito, indicatori come Terrestrial ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity e Mineral resource scarcity rimangono positivi (non abbattuti) per entrambi i moduli. Altri, come Freshwater e Marine eutrophication, Terrestrial ecotoxicity, Human non-carcinogenic toxicity e Land use, rimangono positivi solo al termine della service life relativa la sistema a calore latente.

Relativamente ai danni ambientali (figura 8), la prima tipologia è espressa in DALY (Disability-adjusted life year), ossia attesa di vita corretta per disabilità o per morte prematura. L'unità di misura per la qualità dell'ecosistema è "Species*yr", ossia il numero di specie perse in un anno in un'area di 1 m². La scarsità delle risorse è espressa come surplus in termini di costi legati alla produzione futura di risorse su un lasso di tempo infinito (assumendo una produzione annuale costante) e considerando un 3% di tasso di sconto. L'unità di misura è lo USD2013.

Più che di danni ambientali, si potrebbe parlare di benefici potenziali, dato che il valore delle categorie di danno è sempre negativo (tabelle 4 e 5).

Tabella 3: Valori degli indicatori di impatto ottenuti con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il sistema a calore sensibile.

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Produtz. SH_TES	Utilizz. SH_TES	Trans., lorry 16-32 ton, EU5
Global warming	kg CO ₂ eq	-2675,35	144,06	-2835,53	16,12
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	-5,67*10 ⁻⁴	2,71*10 ⁻⁵	-6,02*10 ⁻⁴	7,79*10 ⁻⁶
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	-2,35	6,29	-8,79	0,15
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	-2,50	0,34	-2,90	4,99*10 ⁻²
Fine particulate matter formation	kg PM _{2,5} eq	-0,23	0,30	-0,55	1,55*10 ⁻²
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	-2,89	0,36	-3,31	5,29*10 ⁻²
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	-0,83	0,52	-1,38	3,34*10 ⁻²
Freshwater eutrophication	kg P eq	-4,60*10 ⁻³	4,99*10 ⁻²	-5,59*10 ⁻²	1,40*10 ⁻³
Marine eutrophication	kg N eq	-1,31*10 ⁻³	3,86*10 ⁻³	-5,54*10 ⁻³	3,73*10 ⁻⁴
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	846,99	1380,79	-782,78	248,99
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-2,62	7,05	-10,07	0,40
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-3,10	9,91	-13,67	0,66
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	45,26	89,26	-44,81	0,81
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	-36,68	120,45	-169,89	12,76
Land use	m ² a crop eq	-2,72	8,39	-11,75	0,64
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	4,07	6,15	-2,12	4,19*10 ⁻²
Fossil resource scarcity	kg oil eq	-975,26	32,51	-1012,86	5,10
Water consumption	m ³	-2,32	1,22	-3,57	3,10*10 ⁻²

Indicatori come Terrestrial ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity e Mineral resource scarcity rimangono positivi (non abbattuti) per entrambi i moduli. Altri, come Freshwater e Marine eutrophication, Terrestrial ecotoxicity, Human non-carcinogenic toxicity e Land use, rimangono positivi solo al termine della service life relativa la sistema a calore latente. Relativamente ai danni ambientali (figura 8), la prima tipologia è espressa in DALY (Disability-adjusted life year), ossia attesa di vita corretta per disabilità o per [morte](#) prematura. L'unità di misura per la qualità dell'ecosistema è "Species*yr", che indica il numero di specie perse in un anno all'interno di un'area di 1 m². La scarsità delle risorse è espressa come surplus in termini di costi legati alla produzione futura di risorse su un lasso di tempo infinito (assumendo una produzione annuale costante) e considerando un 3% di tasso di sconto. L'unità di misura è appunto lo USD2013.

Tabella 4: Indicatori di danno in base al metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il sistema a calore latente.

Categoria di danno	Unità	Totale	Produtz. LH_TES	Utiliz. LH_TES	Trans., lorry 16-32 ton, EU5
Human health	DALY	-1,61*10 ⁻²	6,35E-03	-2,25*10 ⁻²	3,92*10 ⁻⁵
Ecosystems	species.yr	-5,63*10 ⁻⁵	6,19*10 ⁻⁶	-6,26*10 ⁻⁵	8,93*10 ⁻⁸
Resources	USD2013	-2454,44	100,31	-2557,51	2,76

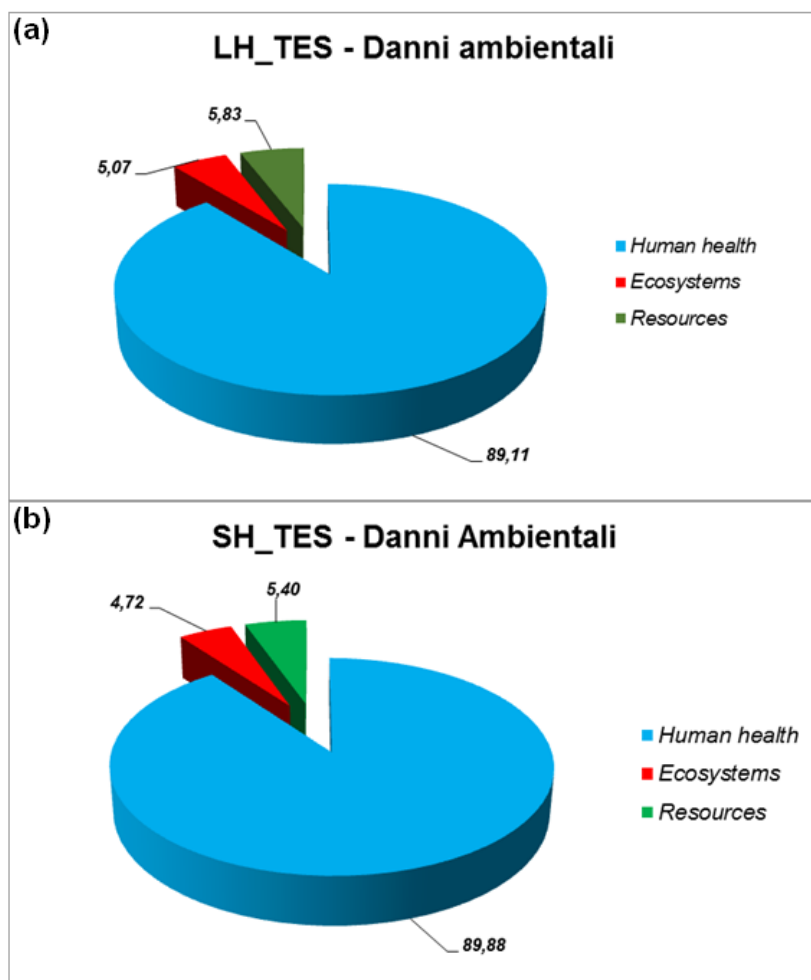


Figura 8 Danni ambientali di maggiore rilievo relativi al ciclo di vita del LH_TES (a) ed al SH_TES (b).

Più che di danni ambientali, in questo caso, si potrebbe parlare di benefici potenziali, dato che il valore delle categorie di danno è sempre negativo (tabelle 4 e 5).

Oltre a quanto visto, è stato calcolato il pay-back time ambientale dei due sistemi. A tal proposito, si può notare in figura 9 come il punteggio LCA inerente al ciclo di vita dei due sistemi diminuisca linearmente all'aumentare del tempo di utilizzo.

Tabella 5: Indicatori di danno in base al metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A) per il sistema a calore sensibile.

Categoria di danno	Unità	Totale	Produtz. SH_TES	Utiliz. SH_TES	Trans., lorry 16-32 ton, EU5
<i>Human health</i>	DALY	$-2,49 \cdot 10^{-3}$	$6,50 \cdot 10^{-4}$	$-3,17 \cdot 10^{-3}$	$3,03 \cdot 10^{-5}$
<i>Ecosystems</i>	species.yr	$-8,07 \cdot 10^{-6}$	$7,03 \cdot 10^{-7}$	$-8,84 \cdot 10^{-6}$	$6,91 \cdot 10^{-8}$
<i>Resources</i>	USD2013	-349,62	9,39	-361,15	2,13

Lo studio mette in evidenza un aspetto estremamente incoraggiante, ossia che l'impatto ambientale totale di suddetti componenti possa essere compensato a pieno già dopo pochi anni dal loro impiego. Per il sistema di accumulo basato sul calore latente il tempo di recupero potenziale ammonta a 5,35 anni, mentre quello inerente al sistema di accumulo a calore sensibile ammonta a 4,03 anni. Successivamente si avrebbe un totale beneficio, conseguente dal risparmio di risorse fossili, ma soprattutto dalla relativa mancata combustione.

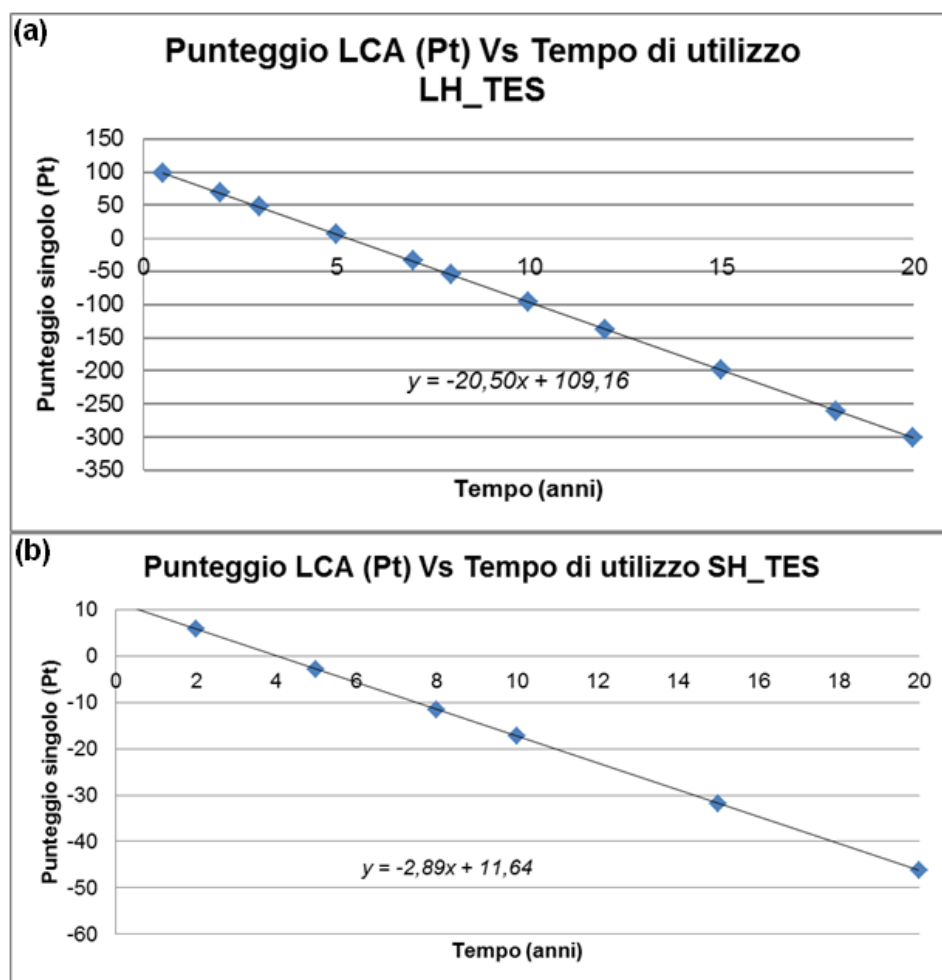


Figura 9: Andamento nel tempo del punteggio LCA relativo al ciclo di vita del sistema a calore latente (a) e di quello a calore sensibile (b).

Tale approccio è stato portato avanti anche nel caso degli indicatori di impatto, i quali hanno evidenziato una diminuzione (lineare) nel tempo. Purtroppo, non tutti i tipi di impatto sono completamente compensati, ma solo parzialmente mitigati.

A questo proposito, il tempo minimo di compensazione (Pay-back time) per ognuno degli indicatori considerati è stato riassunto in tabella 6 per entrambi i sistemi studiati.

Entrambi i moduli evidenziano tempi simili di compensazione degli indicatori più noti, come Global warming, Fossil resource scarcity e Water consumption, ma anche per alcuni meno noti, come Stratospheric ozone depletion, Ionizing radiation, Ozone formation, Terrestrial ecosystems e Terrestrial acidification.

Salvo eccezioni, i tempi di compensazione per i vari indicatori di categoria di impatto sono più lunghi per il sistema di accumulo a calore latente che per l'altra tipologia. Nel caso del sistema LH_TES, alcune categorie di impatto molto importanti vengono compensate nel breve o nel brevissimo periodo, come per Global Warming, Fossil resource scarcity, Stratospheric ozone depletion e le varie sotto-categorie inerenti all'Ozone formation. Altre vengono compensate a cavallo della emi-vita del sistema o appena oltre, come Water consumption, Ionizing radiation, Terrestrial acidification o Fine particulate matter formation, o alla fine della service life, come nel caso di Marine e Freshwater ecotoxicity, Freshwater eutrophication e Human non-carcinogenic toxicity.

Vi sono categorie di impatto, la cui compensazione rimane parziale, anche estendendo significativamente la vita utile del modulo, dato che il relativo pay-back time va oltre i quaranta anni di utilizzo, come per Terrestrial ecotoxicity, Human carcinogenic toxicity o Land use. Infine, nel caso della categoria inerente al Mineral resource scarcity si hanno potenzialmente tempi di compensazione superiori ai duecento anni.

Tabella 6 Pay-back time per ogni Indicatore d'impatto valutate con il metodo ReCiPe 2016 mid-point (H/A).

Indicatore d'impatto	Pay-back time (anni)	
	LH_TES	SH_TES
<i>Global warming</i>	1,08	1,13
<i>Stratospheric ozone depletion</i>	1,46	1,16
<i>Ionizing radiation</i>	13,21	14,66
<i>Ozone formation, Human health</i>	2,84	2,70
<i>Fine particulate matter formation</i>	15,67	11,55
<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	2,60	2,52
<i>Terrestrial acidification</i>	7,92	8,03
<i>Freshwater eutrophication</i>	20,90	14,80
<i>Marine eutrophication</i>	28,67	18,36
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	82,28	41,64
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	19,84	15,28
<i>Marine ecotoxicity</i>	20,77	15,46
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	60,10	40,20
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	21,49	15,68
<i>Land use</i>	38,88	15,37
<i>Mineral resource scarcity</i>	204,90	58,34
<i>Fossil resource scarcity</i>	0,58	0,74
<i>Water consumption</i>	4,02	7,00

Tabella 7: Pay-back time per gli effetti ambientali valutati con il metodo ReCiPe 2016 end-point (H/A).

Effetti ambientali	Pay-back time (anni)	
	LH_TES	SH_TES
<i>Human health</i>	2,01	4,29
<i>Ecosystems</i>	5,70	1,75
<i>Resources</i>	0,81	0,64

La situazione appare migliore nel caso del sistema di accumulo a calore sensibile, per il quale solo tre tipologie di impatto non vengono compensate entro la vita utile, come nel caso di Terrestrial ecotoxicity e Human carcinogenic toxicity. Molto critica è la situazione relativa alla Mineral resource scarcity, per la quale il tempo di compensazione è appena al disotto dei 60 anni.

Gli effetti ambientali sono mitigati molto presto dall'installazione di entrambi i sistemi di accumulo energetico, come mostrato in tabella 8. Il consumo di risorse è compensato dopo un anno, mentre le conseguenze sulla salute umana sono compensate dopo poco più di 2 anni nel caso del sistema a calore latente e dopo i 4 anni per quello a calore sensibile. I danni all'ecosistema sono abbattuti completamente dopo oltre un quarto della vita, nel caso del sistema LH_TES, e dopo due anni nel caso del sistema SH_TES.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state previste e assegnate consulenze

9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state previste né prodotte pubblicazioni scientifiche

10 Eventi di disseminazione

Non sono state previsti né organizzati eventi di disseminazione

11 Posizionamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale

Per quanto riguarda stato dell'arte inerente all'utilizzo di sistemi a cambiamento di fase, vi son studi abbastanza recenti sulla sostenibilità di sistemi per l'accumulo di energia termica nel settore delle costruzioni, alcuni dei quali basano la possibilità di sviluppare cicli estivi di disidratazione e reidratazione invernale di Sali di vario tipo, per agevolare la cessione di calore accumulato durante l'estate¹ da parte dei sali stessi. In genere, questi studi sono focalizzati sugli aspetti tecnici e sulla progettazione di questi sistemi, mentre raramente si va ad approfondirne quelli inerenti alla sostenibilità ambientale, economica e sociale.

Uno di questi studi (I. Hayatina, A. Auckaili, M. Farid, "Review on the Life Cycle Assessment of Thermal Energy Storage Used in Building Applications". Energies 2023, 16, 1170) ha fornito un quadro generale in questo senso su alcune delle tecnologie più comunemente usate nell'ambito dei sistemi a calore latente (LH_TES), a calore sensibile (SH_TES) e quelli termochimici (TCES).

Vi è da dire che ci sono 9 articoli relativi al LCA di TCES, alcuni dei quali basati su Sali idrati, e solo 5 riguardano il settore delle costruzioni. Tre soli di questi riguardano studi LCA a

livello di materiale/componente (B. Nienborg, S. Gschwander, G. Munz, D. Fröhlich, T. Helling, R. Horn, H. Weinläder, F. Klinker, P. Schossig, *"Life cycle assessment of thermal energy storage materials and components"*. Energy Procedia 2018, 155, 111-120), (B. Nienborg, T. Helling, D. Fröhlich, G. Horn, P. Schossig, *"Closed adsorption heat storage—A life cycle assessment on material and component levels"*. Energies 2018, 11, 3421) e (R. Horn, M. Burr, D. Fröhlich, S. Gschwander, M. Held, J.P. Lindner, G. Munz, B. Nienborg, P. Schossig, *"Life cycle assessment of innovative materials for thermal energy storage in buildings"*. Procedia CIRP 2018, 69, 206-211).

Sempre nel settore delle costruzioni, uno studio analogo al nostro ha riguardato lo sistemi a cambiamento di fase di vari natura chimica, basati su sistemi organici (Paraffine, esteri alcol, ecc.), sali idratati o fusi organici ed inorganici, sistemi eutettici a base di miscele di composti inorganici-inorganici, organici-inorganici e organici-organici (K. Struhala, M. Ostrý, *"Life-Cycle Assessment of phase-change materials in buildings: A review"*. Journal of Cleaner Production, Volume 336, 15 February 2022). Molto interessante è il fatto che anche in questo lavoro è contemplato il pay back time energetico, ambientale ed economico. Ciò testimonia la qualità dell'approccio adottato nel nostro studio.

La cosa particolare dello studio relativo a suddetto riferimento bibliografico riguarda l'analisi della sostenibilità energetica, dei materiali utilizzati e non di moduli specifici. Tale analisi è stata condotta semplicemente utilizzando uno strumento di Life Cycle Assessment di tipo "Single Issue", ossia il metodo "Cumulative Energy Demand" o CED. A tal proposito, si tratta di uno strumento, che consente approfondire aspetti legati all'uso di energia diretta ed indiretta durante tutto il ciclo di vita di un prodotto/processo/servizio.

Per quanto riguarda l'utilizzo di moduli di immagazzinamento energetico a calore sensibile, uno studio simile è già stato fatto in passato dall'ENEA stesso, anche se il relativo utilizzo era, almeno nei dettagli, leggermente differente da quello in oggetto (F. Dominici, R. Petrucci, M. Rallini, L. Torre. Ottimizzazione di calcestruzzi e mEPCM per sistemi SHTES e sviluppo di calcestruzzi auto-riscaldanti. Ottimizzazione dell'accoppiamento tubo-calcestruzzo in sistemi TES/Concrete. RT-1.02-4.10-2. Dicembre 2024).

Va detto che molti modelli utilizzati in quel frangente sono stati sottoposti a leggere revisioni ed utilizzati per lo sviluppo dello studio LCA di singoli moduli a calore sensibile, utilizzati insieme agli altri tipi e tenuti fissi nella loro destinazione finale. Inoltre, i sistemi in questione erano dei moduli non fissi, che potevano essere movimentati continuamente da una sorgente, dalla quale acquisire ed accumulare energia, ad un utilizzatore finale, cui cedere suddetta energia. Da ciò era prevista una stima della performance ambientale dei sistemi, includendo entro i confini del sistema, anche il trasporto del modulo entro un distretto industriale.