



Corso di Laurea in
Ingegneria per l'Ambiente, le Risorse e il Territorio
Anno accademico 2014/2015

“LCA DI UN CICLO COMBINATO CON SOLARE IBRIDO”

“LCA of a solar-hybrid combined cycle power plant”

Relatore: Prof.Ing. Giampaolo Manfreda

Candidato: Virgilio Grigiotti

MODELLO: IL CICLO COMBINATO

L'impianto a ciclo combinato, situato a Stalowa Wola alimentato a gas naturale, è costituito da 3 apparecchi principali:

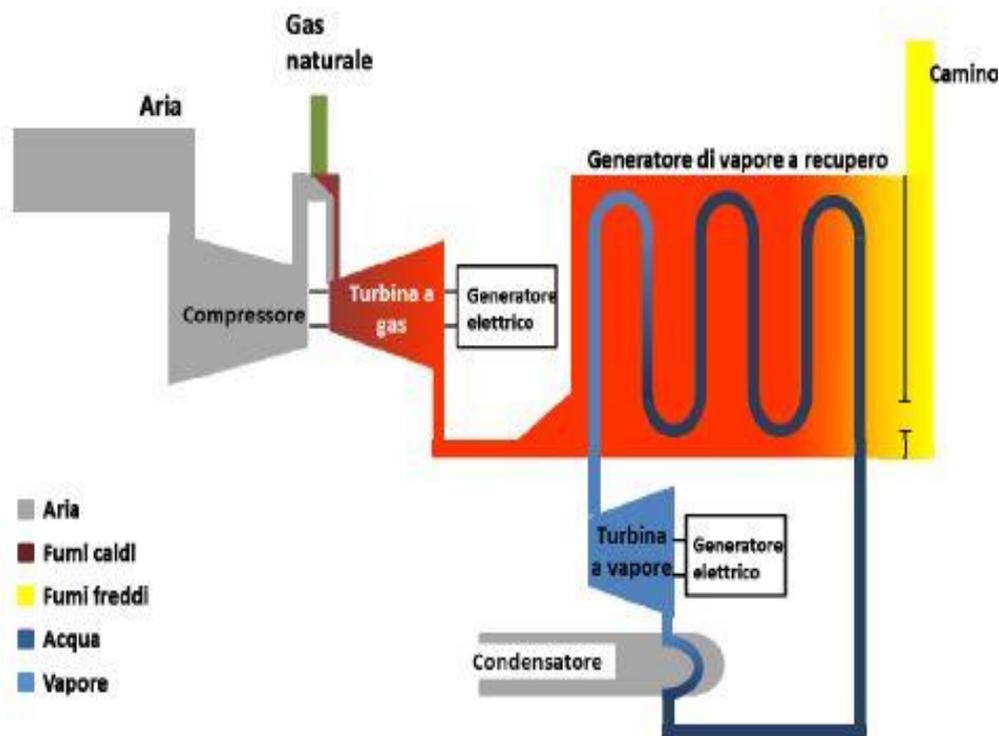
- Turbina a gas "GE serie 9f-5" con output nominale di 292,470 MW
- Turbina a vapore "Skoda MTD-60" con 3 involucri a bassa, media e alta pressione con output elettrico complessivo di 159,1 MW
- Caldaia a recupero (HRSG)

Schema di funzionamento:

Il turbogas è configurato a recupero totale con HRSG multipressione.

Complessivamente il ciclo combinato

produce 3998 GWh elettrici annui con un consumo specifico di calore pari a 6161 GJ/GWh, corrispondente ad un rendimento nominale del 58,4% circa.

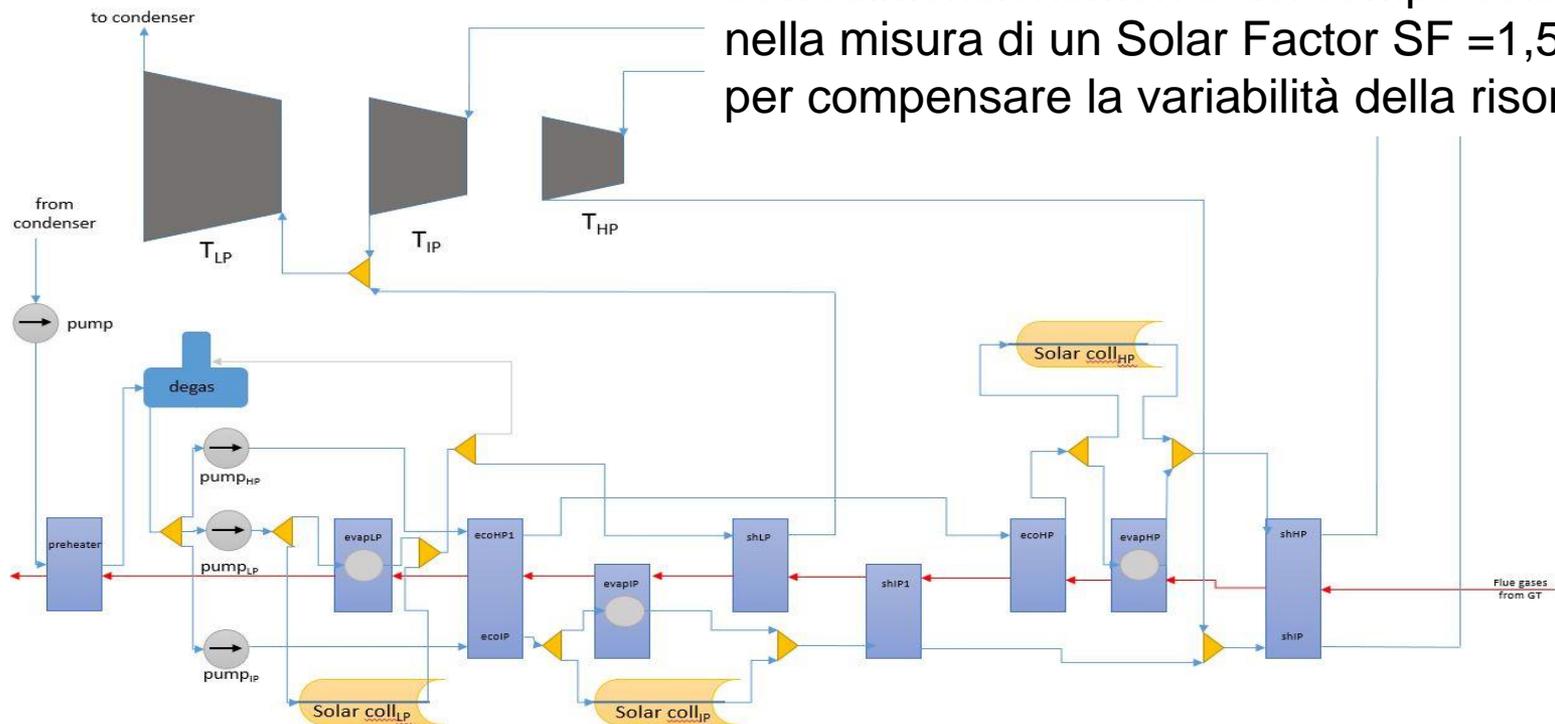


MODELLO: IBRIDAZIONE SOLARE DEL CICLO COMBINATO

L'ibridazione è stata effettuata tramite le seguenti apparecchiature:

- Collettori solari “Polytrough 1800” operante a bassa pressione
- Collettori solari “Eurotrough ET-150” operanti a media e alta pressione
- Generatore di vapore solare

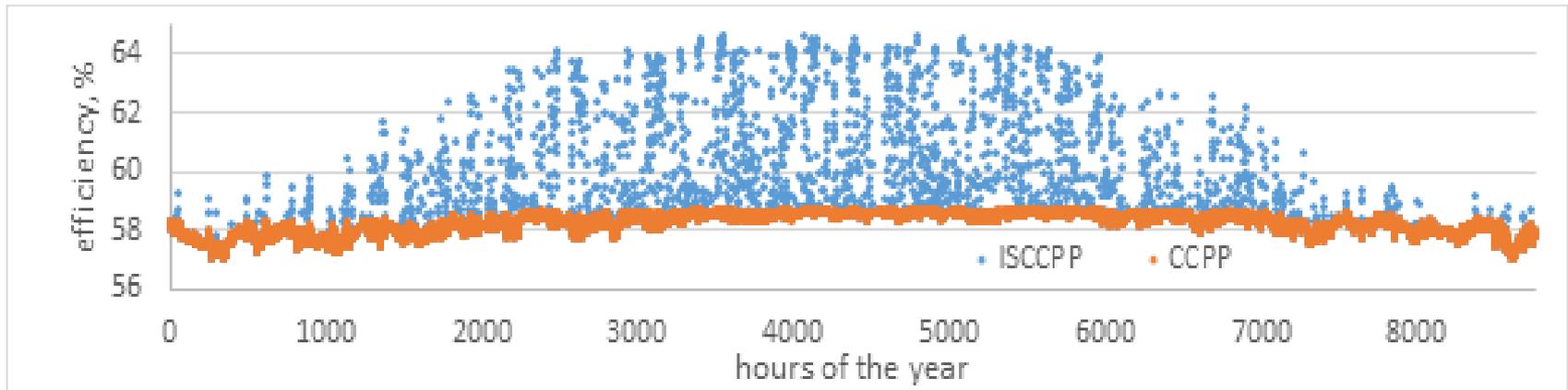
Schema di funzionamento:



Come è prassi comune negli impianti solari termodinamici, è stato applicato un sovradimensionamento del campo solare nella misura di un Solar Factor $SF = 1,5$ per compensare la variabilità della risorsa.

L'ibridazione è realizzata con una configurazione adattabile del campo solare e strategie di controllo ottimizzate, con evaporatori disposti in parallelo con la caldaia a recupero. In questo modo una quantità di calore importante viene prodotta dalla fonte rinnovabile, riducendo il quantitativo di gas naturale necessario per alimentare il ciclo combinato nel periodo dell'anno in cui le condizioni di temperatura e di radiazione solare sono favorevoli.

Le simulazioni condotte comprendono l'off-design del ciclo combinato con il variare delle condizioni ambientali; il miglioramento è sintetizzato dal rendimento riferito al solo consumo di gas naturale, che viene sensibilmente migliorato a seguito dell'ibridazione in molte ore dell'anno:



In base ai dati forniti da simulazioni precedenti, si è deciso di condurre uno studio LCA per quantificare l'effetto su precise categorie ambientali dato dal risparmio effettivo di gas naturale ottenuto mediante l'integrazione solare.

LCA è l'acronimo di "Life Cycle Assessment", che significa valutazione del ciclo di vita. L'obiettivo di questo strumento a supporto delle decisioni è quello di seguire un prodotto, un processo o un'attività durante tutta la sua esistenza allo scopo di identificare gli effetti che produce sull'ambiente.

Attraverso la metodologia LCA, si passa da un'analisi separata delle fasi produttive ad un approccio sistemico, in cui tutti i processi di trasformazione, a partire dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento dei rifiuti, sono presi in considerazione perché concorrono a realizzare la funzione per cui sono stati progettati. Questo approccio è definito "**dalla culla alla tomba**".

Il ciclo di vita del ciclo combinato ibrido è suddiviso in 4 stadi:

- *Definizione del sistema*
- *Costruzione dell'inventario del ciclo di vita (LCI)*
- *Analisi degli impatti (LCIA)*
- *Interpretazione dei risultati*

DEFINIZIONE DEL SISTEMA

L'impianto oggetto di studio LCA è modellato mediante il software SimaPro secondo 2 sottosistemi. Essi rappresentano il “volume di controllo” del sistema:

- Ciclo combinato
- Collettori solari con evaporatori di recupero integrati con il ciclo combinato

Per definire il modello del ciclo combinato ibrido all'interno del software occorre definire tutti i processi di input e output che intervengono nella caratterizzazione del sistema industriale.

Gli input sono costituiti da:

- Materiali per le apparecchiature
- Carburante

Gli output sono rappresentati da:

- Elettricità annua prodotta
- Emissioni annue del ciclo combinato
- Smaltimento dei rifiuti

Si assume che il sistema abbia una **vita nominale** di 30 anni.

I dati in input e in output precedentemente specificati sono stati riferiti ad una **unità funzionale** fissata, in modo che tutti i flussi di prodotto possano essere confrontati sebbene provengano da processi aventi unità di misura diverse.

L'unità funzionale scelta è il **MWh elettrico** prodotto dal ciclo combinato ibrido

Si elencano i principali parametri relativi ai cicli combinati ibrido e non integrato:

Caratteristiche	Ciclo combinato	Ciclo combinato ibrido
Potenza nominale	451,603 MW	
Operatività nominale	8760 ore / anno	8760 ore / anno
Produttività netta	3997860 MWh/ anno	4030310 MWh/ anno
Consumo specifico	6161 GJ / GWh	6111 GJ / GWh
Consumo di gas naturale	504000 ton/ anno	503966,6 ton/ anno
Consumo specifico	6161 GJ / GWh	6111 GJ / GWh
Rendimento medio	0,584	0,589

COSTRUZIONE DELL'INVENTARIO DEL CICLO COMBINATO CON SOLARE IBRIDO (LCI)

Il ciclo di vita dell'impianto è costituito da 3 fasi:

- Costruzione
- Esercizio
- Smaltimento

Eccetto la quantificazione delle emissioni, sono già noti i dati relativi alla fase di esercizio, in quanto forniti da precedenti simulazioni

L'LCI comprende dunque:

- la raccolta dei dati relativi ai componenti dei due sistemi
- La fase di esercizio e la quantificazione delle emissioni
- La formulazione di ipotesi riguardo lo scenario di smaltimento dei materiali raccolti

LCI: INVENTARIO DEL CICLO COMBINATO

Per rappresentare fedelmente il modello di ciclo combinato sottoposto a simulazione, sono stati presi come riferimento i dati sui materiali utilizzati per costruire un impianto a gas naturale avente una potenza elettrica nominale di 505 MW. Per riportare questo valore al dato effettivo del modello simulato si è considerato valido un metodo di stima per ordine di grandezza del costo d'impianto, utilizzando la **regola dei 6/10**:

$$C / C_{RIF} = (A / A_{RIF})^{0.6}$$

C = costo impianto di studio (451 MW)

C_{RIF} = costo impianto di riferimento (505 MW, Spath e Mann, 2001)

A = attributo (m², kg, MW) impianto di studio

A = attributo impianto di riferimento

0,6 = esponente di taglia (generalmente pari a n)

Poiché il costo di riferimento non era noto e comunque non risulta di interesse ai fini di una valutazione di tipo ambientale, si è applicato il rapporto in termini di massa:

$$M / M_{RIF} = C / C_{RIF}$$

Successivamente i dati scalati vengono divisi per apparecchiatura, cercando di scorporare in primo luogo la parte gas dalla parte vapore.

LCI: INVENTARIO DELLA PARTE SOLARE

I materiali relativi alla parte solare sono stati ricavati da un impianto solare a concentrazione con ciclo Rankine avente le seguenti caratteristiche (Piel, 2012):

*Area dei collettori solari*_{RIF}: 512000 m²

*DNI*_{RIF}: 2300 kWh / m² * anno

Dalla simulazione (TRNSYS) della parte solare dell'impianto si sono ricavati i seguenti dati complessivi:

Area dei collettori solari: 398936 m²

DNI: 900 kWh / m² * anno

Si utilizza ancora la regola dei 6/10 ipotizzando una proporzionalità diretta tra massa e area.

Successivamente il dato ottenuto viene normalizzato al valore di DNI dell'impianto di studio con l'***equazione di Kearney:***

$$M = M_{RIF} * (1-0,045)^{[I-I(rif)]/100}$$

M = massa

I = irradianza normale diretta

Si applica quindi un nuovo parametro di sovradimensionamento del campo solare dovuto all'applicazione in zona a bassa insolazione.

La massa normalizzata incrementa di 2,06 volte il valore trovato con la stima tramite la regola dei 6/10.

LCI: DESCRIZIONE DELLA FASE DI ESERCIZIO DEL CICLO COMBINATO IBRIDO

Il ciclo combinato ibrido produce complessivamente 4030 GWh/anno, di cui 32,8 sono forniti dall'ibridazione.

Il calore prodotto tramite il campo solare va ad aumentare l'output elettrico annuo del ciclo a vapore; pertanto la fase di esercizio è scomposta in 2 processi:

- Esercizio della turbina a gas
- Esercizio della turbina a vapore

Ad entrambi viene assegnato un consumo di energia proveniente dal combustibile proporzionale alla propria produttività, tramite una feature di Simapro che consente di attribuire un'allocazione agli input di processo:

	Produttività	Allocazione degli input
Turbina a gas	2614470 MWh / anno	64,87 %
Turbina a vapore	1415840 MWh / anno	35,13 %

LCI: EMISSIONI DEL CICLO COMBINATO

Le emissioni di riferimento per il ciclo combinato sono tratte dall' U.S. EPA. Per calcolare il quantitativo annuo di emissioni del ciclo in fase di esercizio si utilizza l'approccio 1:

$$\mathbf{Emissioni\ GHG}_{, gas\ naturale} = \mathbf{Consumo\ energia}_{gas\ naturale} \times \mathbf{EF\ GHG}_{, natural\ gas}$$

EF = fattore di emissione espresso in kg / GJ

Il consumo di energia chimica è espresso in GJ / anno. Le emissioni di gas serra sono espresse in kg / anno.

Si calcolano i valori di emissione per i seguenti climalteranti:

- CO
- SO₂
- PM
- Formaldeide
- NO_x
- CO₂
- CH₄

Il consumo di energia chimica è calcolato mediante il consumo specifico netto (net heat rate):

$$\text{Consumo di energia} = \text{Consumo specifico netto} * \text{Produttività annua}$$

Grazie alla diminuzione del consumo specifico netto, si può calcolare la diminuzione assoluta di emissioni per il ciclo combinato ibrido:

<i>kg/anno</i>	<i>Emissioni ciclo combinato</i>	<i>Emissioni ciclo combinato ibrido</i>	<i>Miglioramento con ibridazione</i>
CO	104344,4	103497,6	
SO ₂	22554,071 1	22371,03	
PM	45814,79	45442,98	
Formaldeide	1948,683	1932,869	
NO _x	684603,3	679245,7	
CH ₄	59704,34	59219,81	
CO ₂	15991440 00	1598956733	

LCI:IPOTESI DI SMALTIMENTO DEI MATERIALI

Poiché sono stati ipotizzati due differenti sottosistemi (ciclo combinato ed impianto solare), sono stati formulati due diversi scenari di smaltimento. Si suppone che i principali materiali, comuni ad entrambi i processi di costruzione vengano trattati secondo queste percentuali:

- Acciaio: 90% riciclo, 10% scarica
- Cemento: 100% riuso
- Ferro: 90% riciclo, 10% scarica
- Alluminio: 95% riciclo, 10% scarica
- Rame: 90% riciclo, 10% scarica
- Vetro e derivati: 70% riciclo, 30% scarica
- Argento: 70% riciclo, 30% scarica

I due scenari di smaltimento costituiscono il fine vita del ciclo combinato ibrido.

VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI (LCIA)

La valutazione degli impatti viene effettuata mediante la libreria Ecoinvent v.2 disponibile in SimaPro e dotata di oltre 4000 processi industriali.

Il metodo di valutazione scelto per calcolare i danni alle categorie d'impatto è il ReCiPe EndPoint V1.09 H/A, di cui si considera solo 3 fasi:

- Caratterizzazione
- Peso
- Punteggio singolo

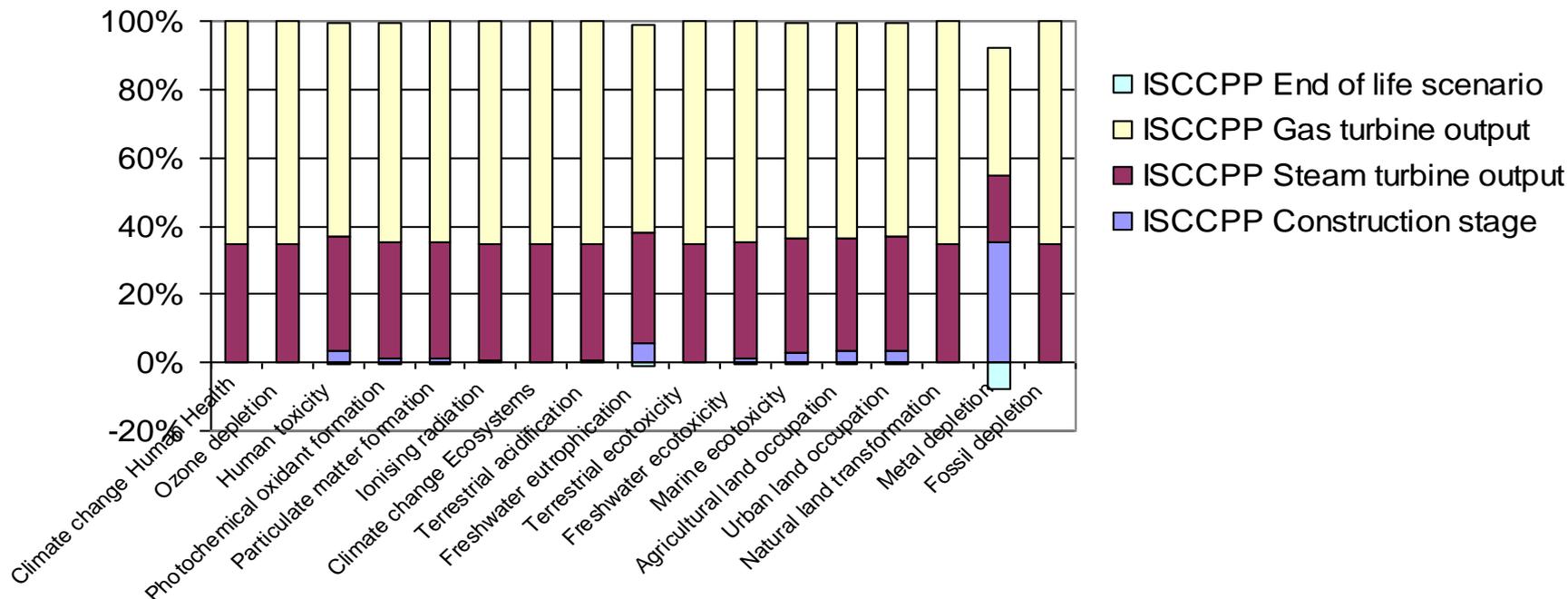
Tale metodologia consente anche di valutare l'impatto sulle categorie di punto medio (MidPoint) e su 3 categorie di danno finale (EndPoint):

- Salute umana
- Ecosistema
- Risorse

LCIA: CARATTERIZZAZIONE

La caratterizzazione del ciclo combinato ibrido mostra che per quasi tutti gli indicatori d'impatto, la fase di esercizio è preponderante perché influisce per una frazione superiore al 90% del totale della categoria. L'impatto della fase di costruzione del ciclo combinato influisce per il 40% sulla deplezione di materiale metallico. La fase di smaltimento consente un risparmio del 10% del materiale grezzo.

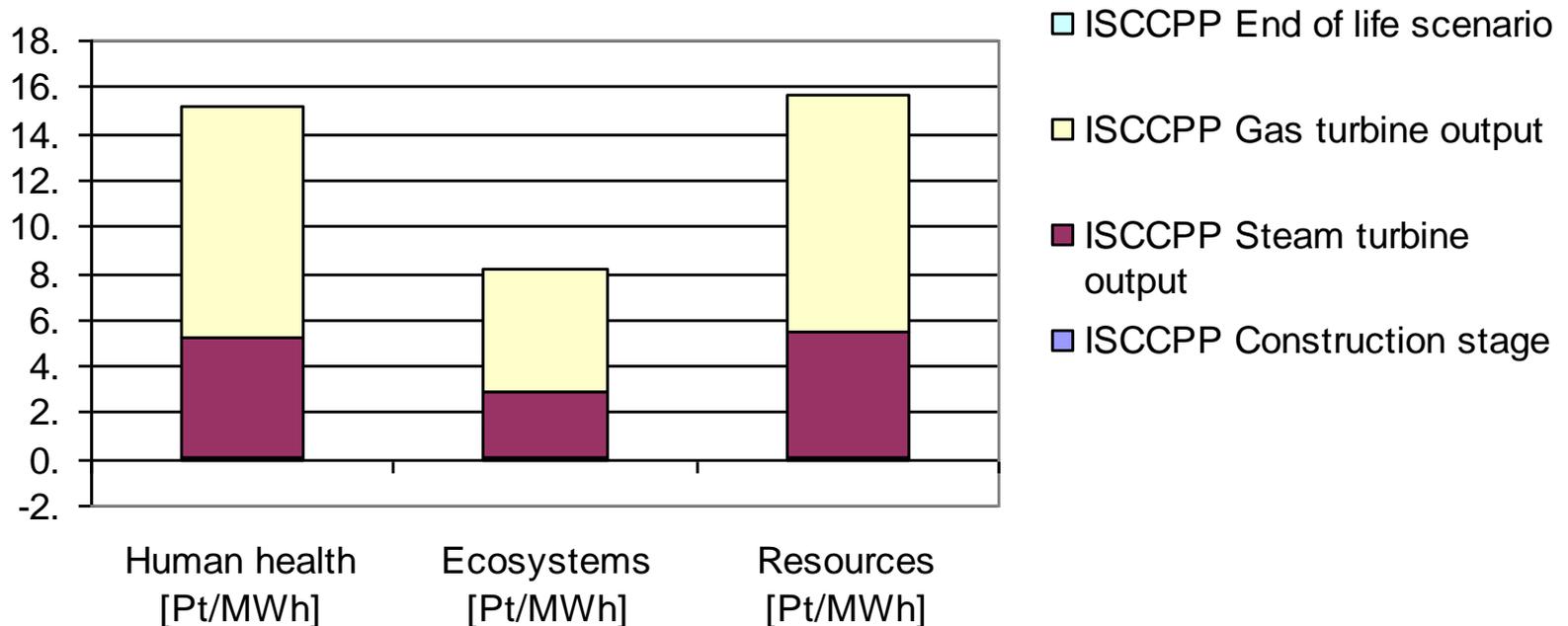
Characterization of ISCCPP: focus on MIDPOINT categories



LCIA: PESO

Il peso consente di comprendere quanto una categoria è danneggiata. Si ottiene moltiplicando il valore della caratterizzazione per un fattore di peso. Viene dunque assegnato un punteggio ad ogni categoria di danno, sia a livello di punto medio che di punto finale. Il punteggio generato dal ciclo combinato ibrido è pesato nei 3 indicatori finali in proporzione 400/400/200 (EcoIndicator 99, Recipe End Point). Le categorie relative alla salute e all'ecosistema risultano quelle maggiormente danneggiate:

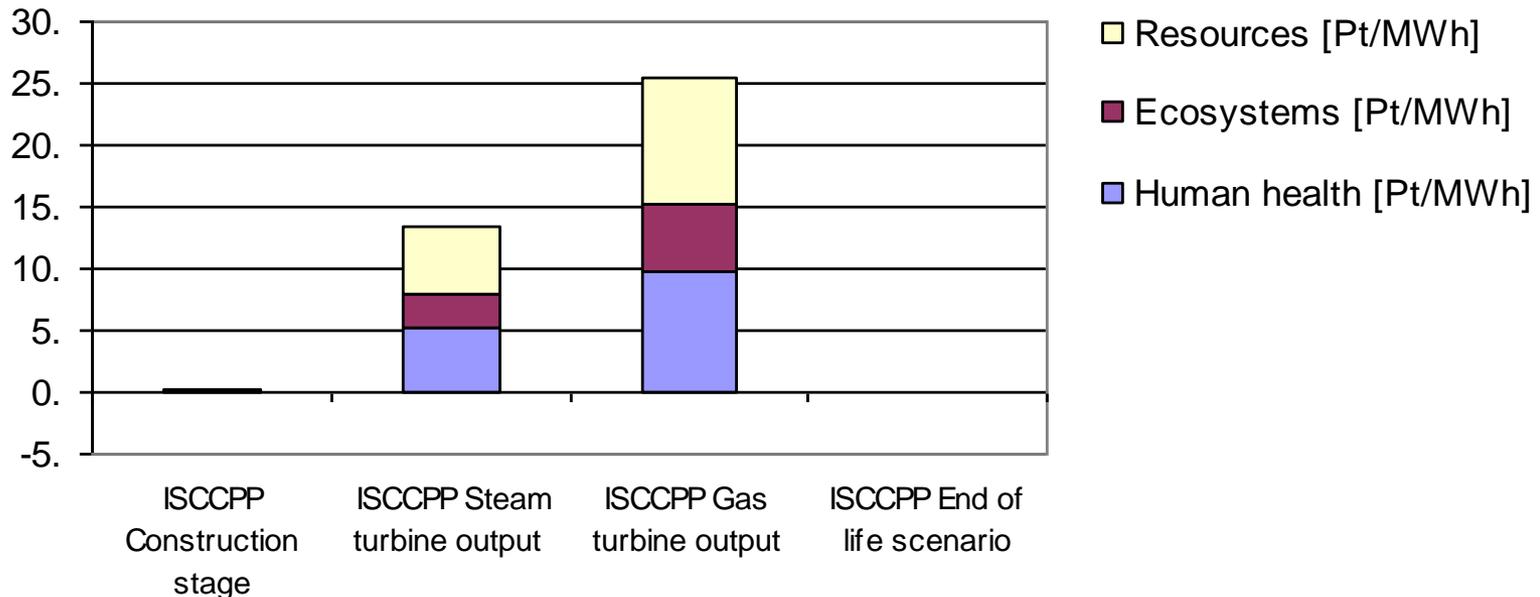
Weighing of ISCCPP: focus on ENDPOINT categories



LCA: PUNTEGGIO SINGOLO

Il punteggio singolo mostra il contributo al danno da parte di ogni singolo processo. Si può notare che l'impatto della fase di costruzione è 1/300 rispetto alla fase di esercizio comprendente turbina a vapore e turbina a gas. Il punteggio totale generato dalla LCA del ciclo combinato con solare ibrido è pari a 39,1 Pt/MWh

Single score of ISCCPP: focus on ENDPOINT categories

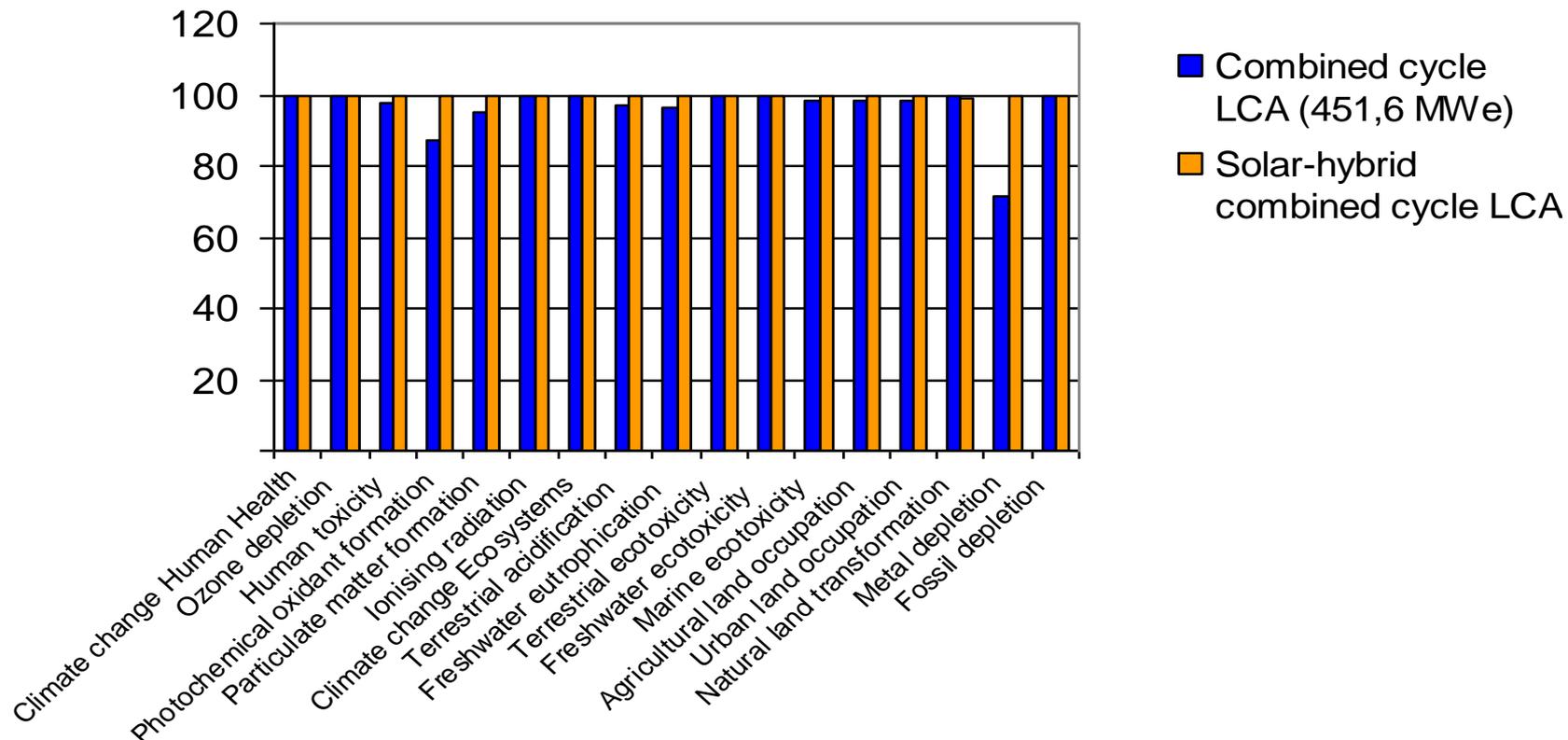


CONFRONTO TRA CICLO COMBINATO IBRIDO E CICLO COMBINATO NON INTEGRATO

Il confronto tra il ciclo combinato non integrato e ibrido viene effettuato tramite analisi della caratterizzazione e del peso, cercando di evidenziare le differenze riscontrate nella valutazione delle due fasi preponderanti della LCA, ovvero costruzione ed esercizio, dato che la frazione di punteggio legata allo smaltimento è irrisoria.

In fase di caratterizzazione si mostra che per 9 categorie di danno l'impatto dell'ibridazione è maggiore, mentre per le altre 7 categorie, i valori sono pressoché equivalenti.

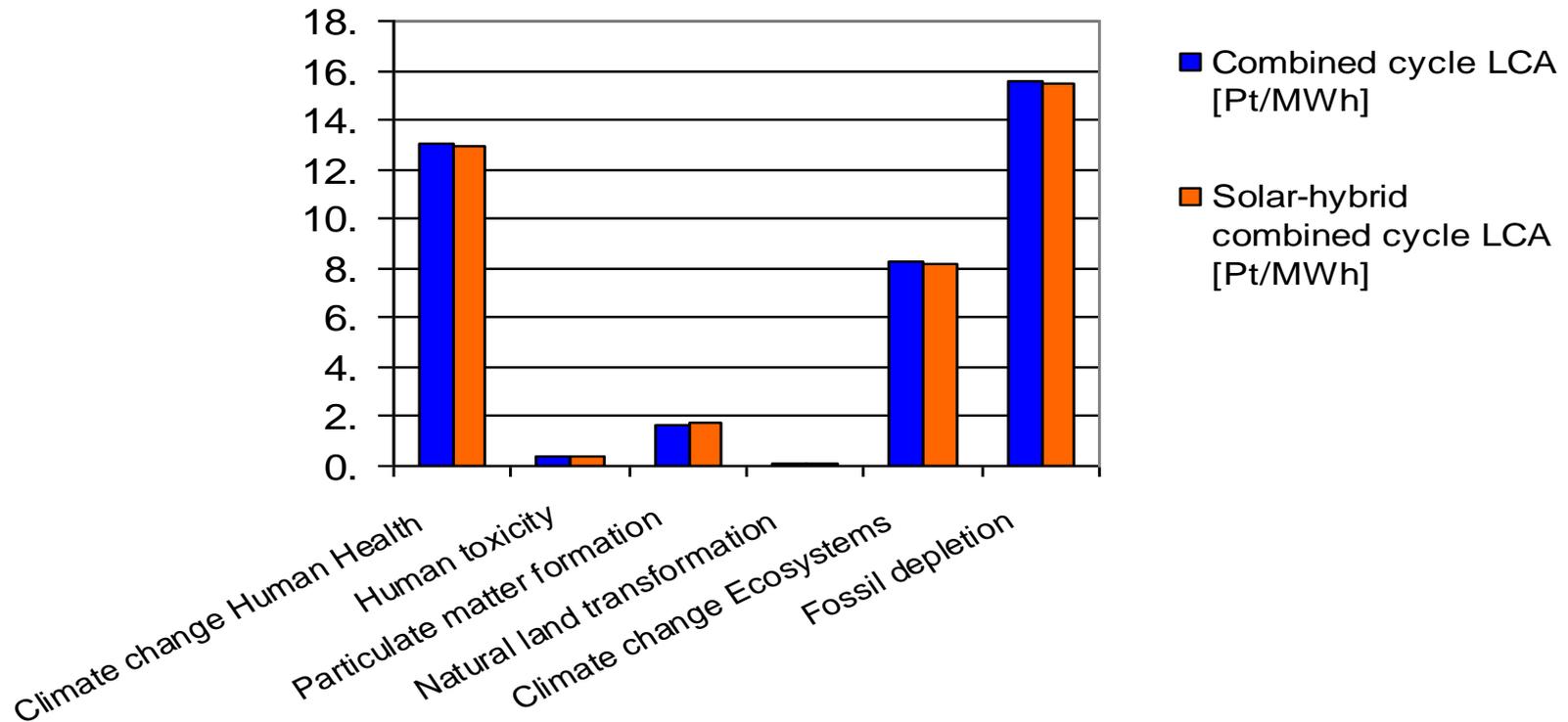
Comparison between ISCCPP and CCPP: characterization



CONFRONTO TRA CICLO COMBINATO IBRIDO E CICLO COMBINATO NON INTEGRATO

L'analisi in termini di peso mostra che per le 2 principali categorie intermedie, cioè l'impatto sulla salute legato al cambiamento climatico e il consumo delle risorse fossili, il contributo (espresso in Pt per MWh) proveniente dal ciclo ibridato è lievemente minore rispetto a quello del ciclo combinato:

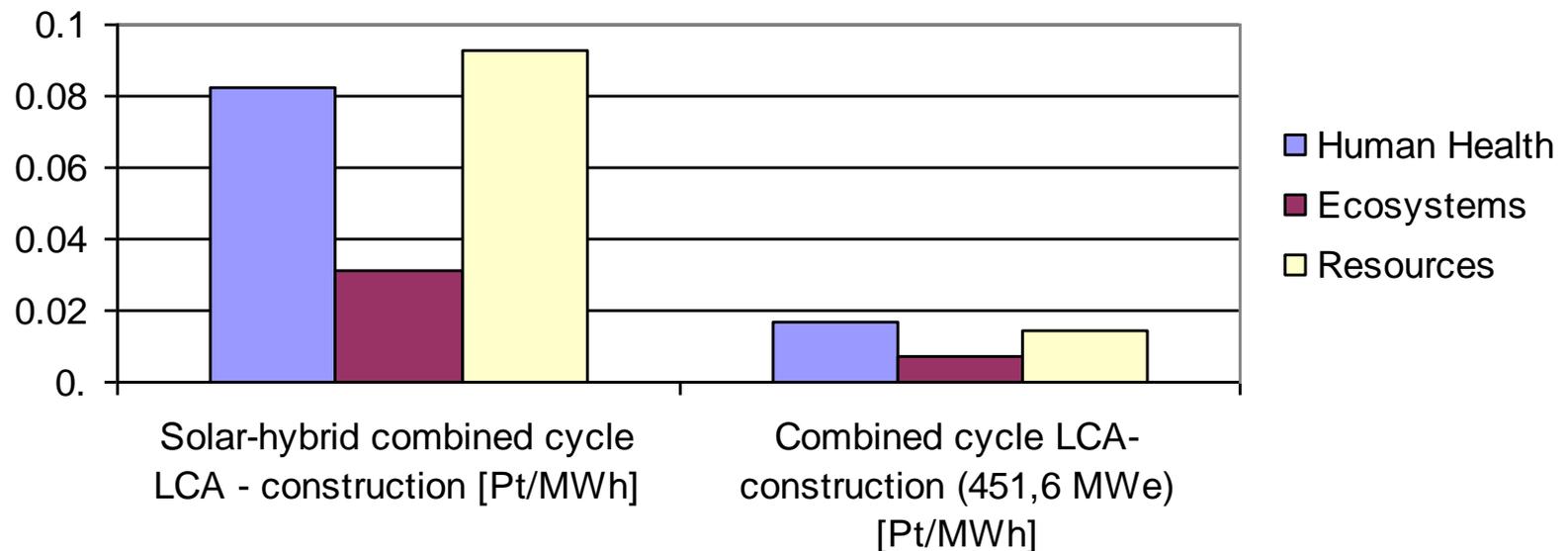
Comparison between ISCCPP and CCPP: weighing



Entrando nel dettaglio del confronto tra i due cicli, si può far vedere la differenza fra i punteggi relativi generati dalle due fasi di costruzione e di esercizio:

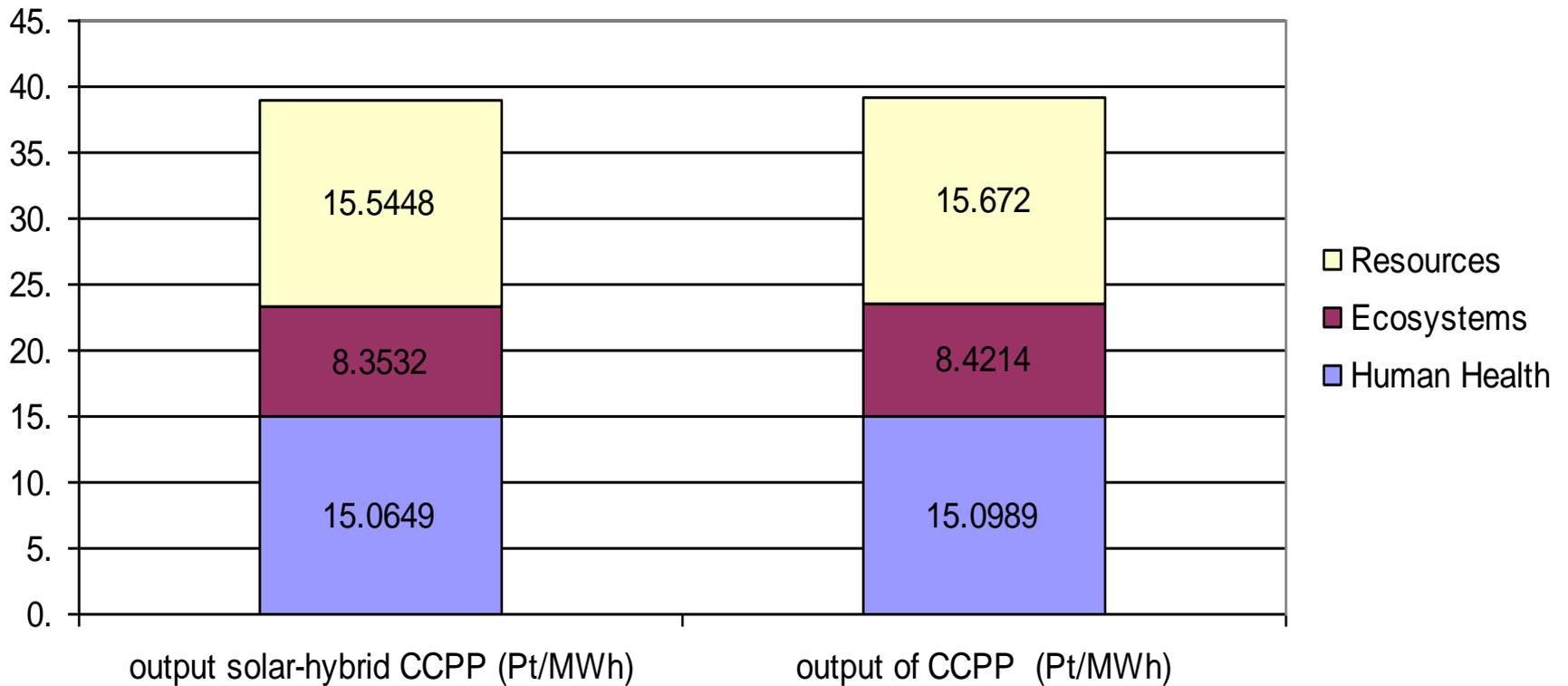
In fase di costruzione dell'impianto ibrido, l'ampliamento del sistema comporta un incremento del danno a livello di punteggio finale pari a +0,16 Pt/MWh:

Comparison between ISCCPP and CCPP construction stage: single score (ENDPOINT)



Il confronto delle 2 fasi di esercizio mostra che la differenza di punteggio è pari a 0,24 Pt/MWh.

Comparison between ISCCPP and CCPP exercise stage: single score(ENDPOINT)



INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E MARGINI DI MIGLIORAMENTO DELLA LCA

L'ibridazione del ciclo combinato consente di ridurre a livello assoluto le emissioni e di risparmiare 0,1 Pt per ogni MWh di elettricità prodotto rispetto al ciclo combinato non integrato.

Complessivamente questa LCA è stata costruita secondo un metodo che non consente un buon approfondimento di tutti i processi coinvolti in un ciclo combinato e di tutte le singole apparecchiature in termini di materiali primari necessari ed energia termica. Si è però compreso che il danno complessivo generato dalla costruzione di un campo di collettori solari è piccolo rispetto alla fase di esercizio del ciclo combinato, se si considera anche il fatto che secondo l'analisi ReCiPe le categorie d'impatto intermedio associate al consumo di suolo non creano danni a livello finale

Per migliorare la LCA si possono effettuare analisi di sensitività, eliminando i 2 fattori di moltiplicazione applicati cautelativamente per dimensionare l'area del campo solare, in modo da ottenere un ulteriore decremento sul punteggio singolo finale fornito dall'apparecchiatura solare.