

# Applicazione del Life Cycle Assessment e valutazione degli aspetti energetici ed economici del sistema fotovoltaico di Biauzzo di CAFC S.p.A.

Corista  
Matej KLANJSCEK

Relatore  
Prof. Giovanni DE FEO  
Università degli Studi di Salerno

0

IL SISTEMA FOTOVOLTAICO È SOSTENIBILE DAL PUNTO DI VISTA

AMBIENTALE?

ENERGETICO?

ECONOMICO?



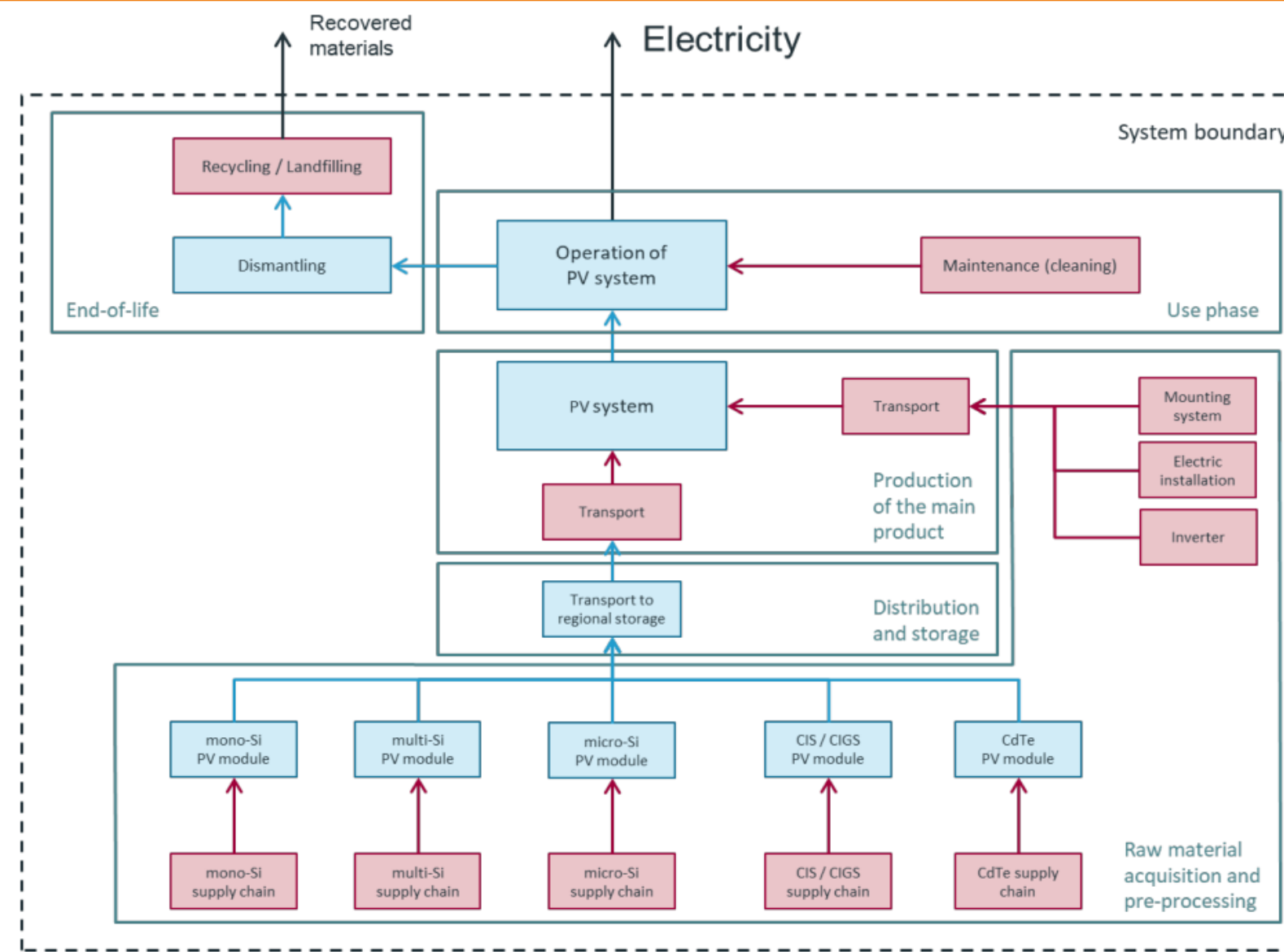
CASO STUDIO SUL SISTEMA FOTOVOLTAICO REALIZZATO A BIAUZZO DA CAFC S.P.A.



1

## L'APPROCCIO ALLA VALUTAZIONE

L'impiego delle tecnologie alimentate da fonti rinnovabili di energia è considerato nevralgico per affrontare le emergenze ambientali innescate dai cambiamenti climatici. La valutazione delle prestazioni delle tecnologie e la definizione di strategie energetiche si fonda su informazioni scientifiche sul ciclo di vita degli impianti. È necessario valutare gli scenari di impatto e confermare che la tecnologia poli-Si possa essere considerata dal punto di vista energetico, ambientale ed economico una strategia a lungo termine. La figura indica il ciclo di vita del fotovoltaico, che inizia con l'estrazione delle materie prime e termina con lo smaltimento o riciclaggio e recupero dei componenti fotovoltaici.



- Produzione di silicio di base, in APAC
- Produzione di silicio di grado solare, in APAC
- Trasporto del Si di grado solare verso impianti di produzione di silicio policristallino, in APAC
- Produzione di silicio policristallino, in APAC
- Produzione di wafer di silicio policristallino, in APAC
- Trasporto dei wafer di silicio verso impianti di produzione delle celle fotovoltaiche, in APAC
- Processo di metallizzazione fotovoltaica, in APAC
- Produzione delle celle PV, in APAC
- Trasporto delle celle PV verso i RER e altri paesi del mondo
- Produzione di laminati e pannelli fotovoltaici, in RER
- Trasporto (commercio) dei pannelli PV, in RER
- Installazione e montaggio dei sistemi di supporto dei pannelli PV
- Produzione di inverter
- Produzione di componenti elettrici, utilizzati nell'impianto PV
- Fine vita del prodotto: dismissione, recupero dei materiali e smaltimento

## Il processo di Life Cycle Assessment

Il processo di LCA ha permesso di valutare i carichi e gli impatti ambientali associati al sistema fotovoltaico di Biauzzo, attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell'ambiente. L'analisi ha riguardato l'intero ciclo di vita del prodotto ("dalla culla alla tomba"); dall'estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e alla collocazione finale del prodotto dopo l'uso. La potenza della LCA è affrontare l'analisi dei sistemi industriali con un approccio globale del sistema produttivo: tutti i processi di trasformazione, a partire dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento dei prodotti a fine vita, sono presi in considerazione, in quanto partecipano alla realizzazione della funzione per la quale essi sono progettati. Lo studio separato dei singoli elementi dei processi produttivi, tipici dell'ingegneria tradizionale, risulta quindi superato.

2

## IL PROCESSO CHIMICO - PRODUZIONE DI SILICIO

$SiO_2 + C \xrightarrow{2100} Si_{lmg} + CO_2 \quad \Delta H_{2100} = +695 \text{ kJ}$  Produzione di Si metallurgico

$Si_{lmg} + 3HCl \xrightarrow{600} HSiCl_3 + H_2 \quad \Delta H_{600} = -218 \text{ kJ}$

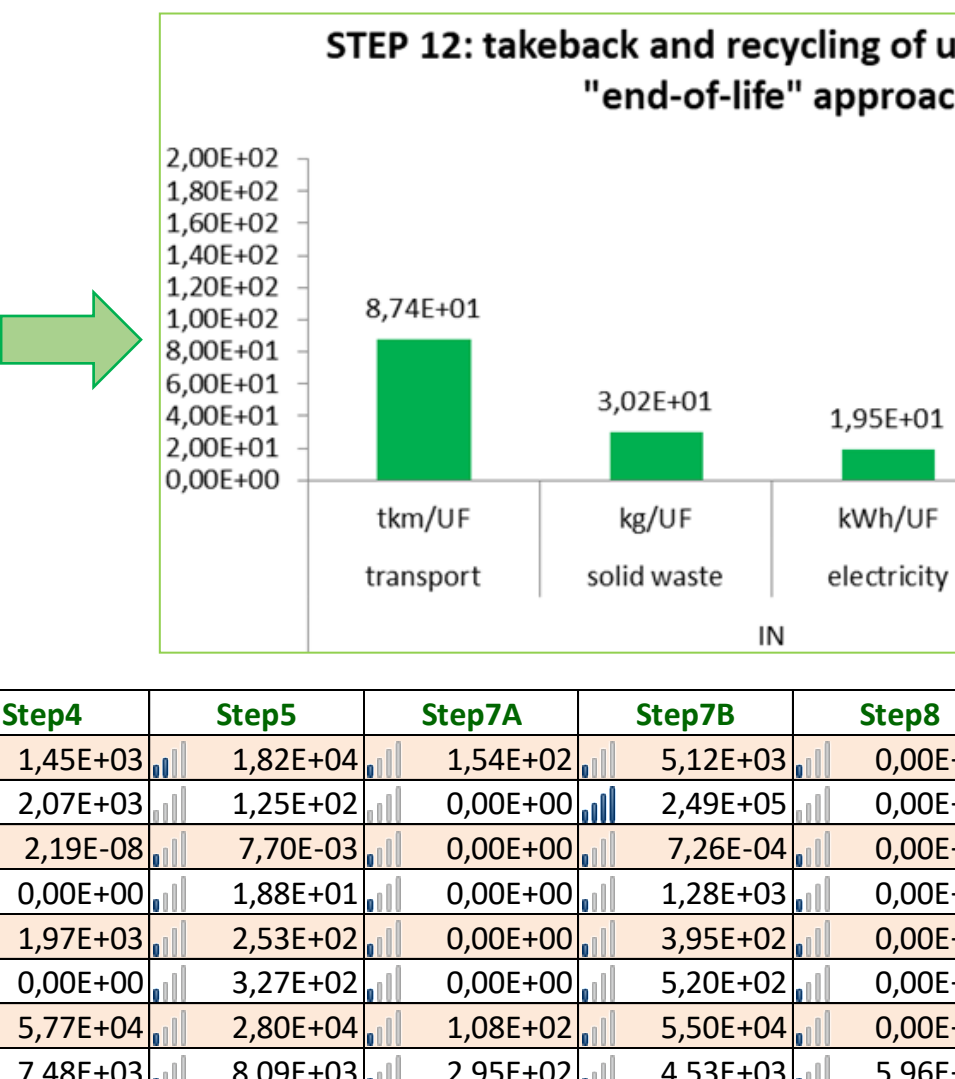
$2HSiCl_3 \xrightarrow{1400} Si + 2HCl + SiCl_4 \quad \Delta H_{1400} = +964 \text{ kJ}$  Produzione di poli-Si

Reazione globale:  $SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2$

Trattamenti con O<sub>2</sub> e Cl<sub>2</sub> per eliminare gli ossidi e alogenuari più stabili (Ca, Al, Fe, ecc.)

Name	Location	Unit	takeback and recycling, c-Si PV module	IN/OUT flow	Data category
takeback and recycling, c-Si PV module	RER	kg	1	OUT	primary products
electricity, medium voltage, production ENTSO, at grid	ENTSO	kWh	1,11E-1	IN	electricity
direct, burned in building machine, average	CH	MJ	6,48E-2	IN	energy
disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to municipal incineration	CH	kg	1,47E-1	IN	solid waste
disposal, plastics, mixture, 15.3% water, to sanitary landfill	CH	kg	2,57E-2	IN	solid waste
transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO 5	RER	tkm	1,00E-1	IN	transport
transport, freight, lorry, fleet average	RER	tkm	4,00E-1	IN	transport

## RISORSE IMPIEGATE ED EMISSIONI RILASCIATE



## 3

Nel LCA del sistema FV di Biauzzo la valutazione segue l'approccio "dalla culla alla tomba". L'unità funzionale (UF) prescelta corrisponde all'area netta fotovoltaica installata, pari a 2.319 m<sup>2</sup>. Per realizzare l'impianto fotovoltaico di Biauzzo:

- sono consumati 250 m<sup>3</sup> di acqua
- sono impiegate 130 t di materie prime
- il trasporto incide per 250 MWh
- sono consumati più di 500 MWh di energia
- sono prodotte 7 t di rifiuti

4

## GLI IMPATTI AMBIENTALI - VALUTAZIONE DELL'INDICATORE GLOBAL WARMING P.

Il fotovoltaico non emette gas serra durante il suo funzionamento. Ciò attrae l'attenzione a investire nel fotovoltaico. Tuttavia durante la produzione e il trasporto vengono rilasciate emissioni, anche CO<sub>2</sub>. L'indicatore Global Warming Potential (GWP, Potenziale di Riscaldamento Globale) rappresenta un fattore di equivalenza, che esprime la forza di una certa sostanza a produrre emissioni, le quali concorrono al riscaldamento globale, rispetto a una sostanza di riferimento. La sostanza di riferimento è la CO<sub>2</sub>. Vari fattori esprimono gli impatti potenziali delle varie sostanze in termini di g CO<sub>2</sub>-eq.

Indicatore	Step1	Step2	Step3	Step4	Step5	Step7A	Step7B	Step8	Step9	Step11	Step12	Step13	Step14	Step15	TOTALI
primary materials (kg/UF)	7,05E+03	4,39E+03	0,00E+00	1,45E+03	1,82E+04	1,54E+02	5,12E+03	0,00E+00	6,33E+04	1,74E+04	0,00E+00	-1,26E+02	4,80E+03	4,63E+03	126,340
water (kg/UF)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,07E+03	1,25E+02	0,00E+00	2,49E+05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35E+01	0,00E+00	0,00E+00	251,445
infrastructure (unit/UF)	2,48E-08	2,19E-08	0,00E+00	2,19E-08	7,70E-03	0,00E+00	7,26E-04	0,00E+00	9,25E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,54E+01	0,00E+00	65
emission air (kg/UF)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,88E+01	0,00E+00	1,28E+03	0,00E+00	1,23E+03	0,00E+00	0,00E+00	-2,16E+01	0,00E+00	0,00E+00	15,481
emission water (m3/UF)	0,00E+00	1,63E+02	0,00E+00	1,97E+03	2,53E+02	0,00E+00	3,95E+02	0,00E+00	1,05E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,66E+00	0,00E+00	2,791
solid waste (kg/UF)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,27E+02	0,00E+00	5,20E+02	0,00E+00	3,21E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,75E+02	9,87E+02	7,439
energia totale (kWh/UF)	1,62E+05	2,33E+05	0,00E+00	5,77E+04	2,80E+04	1,08E+02	5,50E+04	0,00E+00	1,40E+04	0,00E+00	2,26E+01	-6,52E+01	5,80E+03	0,00E+00	555,428
transport (kWh/UF)	1,88E+04	3,90E+04	1,00E+00	7,48E+03	8,09E+03	2,95E+02	4,53E+03	5,96E+03	1,22E+05	1,12E+04	2,38E+02	0,00E+00	1,48E+04	1,44E+04	248,658

## IL GWP NEL SISTEMA FV DI BIAUZZO

Il confine dell'analisi LCA è stato riferito ai soli processi di produzione del pannello fotovoltaico:

- step 4, produzione del poli-Si
- step 5: produzione wafer di poli-Si
- step 7A: metallizzazione
- step 7B: produzione di celle FV
- step 8: commercio delle celle FV
- step 9: produzione di pannelli fotovoltaici

I fattori di caratterizzazione del GWP sono stati riferiti all'orizzonte temporale di 100 anni.

$E = \sum_{i=1}^n GWP_i \cdot m_i$

- m<sub>i</sub>: massa in kg delle sostanze emesse in aria [kg CO<sub>2</sub> eq / UF]  
 - GWP<sub>i</sub>: indice di riscaldamento potenziale (Global Warming Potential)  
 - n: numero di sostanze emesse  
 - E: effetto serra in kg equivalenti di CO<sub>2</sub> emessi in aria [kg CO<sub>2</sub> eq / UF]

I dati calcolati sono riferiti all'Unità Funzionale e sono stati determinati per ogni processo unitario.

Step	Processo unitario	Causa emissione CO <sub>2</sub>
4	Produzione di poli-Si	↑ consumi energetici
5	Produzione di wafer	Consumo materie prime ↑ consumi energetici
7A	Metallizzazione	Consumo materie prime ↑ consumi energetici (utilizzo di argento e alluminio)
7B	Produzione delle celle FV	↑ consumi energetici
9	Produzione di pannelli fotovoltaici	Produzione di leghe di alluminio e di vetro (anche temperato)

5

## VALUTAZIONE ENERGETICA DELL'IMPIANTO FOTOVOLTAICO DI BIAUZZO

Le emissioni totali del ciclo di vita associate alla produzione di energia fotovoltaica sono superiori a quelle dell'energia nucleare ma inferiori a quelle della produzione di energia da combustibili fossili. In termini di gas serra: Silicio per FV: 45 g / kWh; Carbone: 900 g / kWh; Gas naturale: 400-439 g / kWh; Nucleare: 20-40 g / kWh. Durante i loro 20-30 anni di vita, i moduli solari generano più elettricità di quella consumata durante la loro produzione. Con il tempo di ammortamento dell'energia (EPBT) si determina il tempo necessario di un modulo FV a generare l'energia utilizzata per produrlo. Il ritorno sull'investimento energetico (EROI) è il rapporto tra l'energia prodotta da un sistema e l'energia impiegata per realizzare tale sistema. Quando l'EROI di una fonte energetica è inferiore a uno, il sistema energetico consuma più energia di quella che è in grado di produrre e non è conveniente utilizzarla (es. sistemi idroelettrici EROI 100:1; turbine eoliche EROI 18:1; FV EROI tra 6:1 - 8:1.). Energeticamente, i sistemi FV hanno basso impatto ambientale rispetto alla maggior parte delle forme convenzionali di energia. Essi rimborsano i costi energetici richiesti molto prima dello scadere della loro vita utile e sono generatori netti di energia per la maggior parte della loro vita.

$$EPBT = \frac{\text{Energia elettrica utilizzata per produrre il sistema FV}}{\text{Energia elettrica annualmente prodotta}} = \frac{E_{mat} + E_{manuf} + E_{trasp}}{F_{agen}} = 2,5 \text{ anni}$$

$$EROI = \frac{\text{Energia prodotta dal sistema}}{\text{Energia impiegata a realizzare il sistema}} = 7,7$$

	Electricity [kWh]	Energy supply [kWh]	Fuels [kWh]	Energy waste [kWh]	Transport [kWh]	Totale [kWh]
Produz. Si metallurg.	27.281	15.929	69.794	49.101	18.753	180.857
Produz. Si grado solar	107.543	17.559	0	107.552	38.990	271.644
Trasporto	0	0	0	0	1.495	1.495
Produz. Poli-Si	42.348	0	0	15.365	7.477	65.189
Produz. Wafer	15.399	1.925	0	10.695	8.094	36.113
Metallizzazione	38	32	0	38	295	403
Produz. Celle FV	54.919	126	0	0	4.534	59.579
Trasporto	0	0	0	0	5.955	5.955
Produz. Pannelli FV	10.894	6	0	3.126	122.352	136.378
Sistemi montaggio	0	0	0	0	11.229	11.229
Fine vita	19	3	0	0	238	261
Emissioni evitate	0	-65	0	0	0	-65
Inverter	2.477	848	0	2.477	14.847	20.648
Componenti elettr.	0	0	0	0	14.400	14.400
<b>Totale</b>	<b>260.918</b>	<b>36.362</b>	<b>69.794</b>	<b>188.353</b>	<b>248.658</b>	<b>804.086</b>

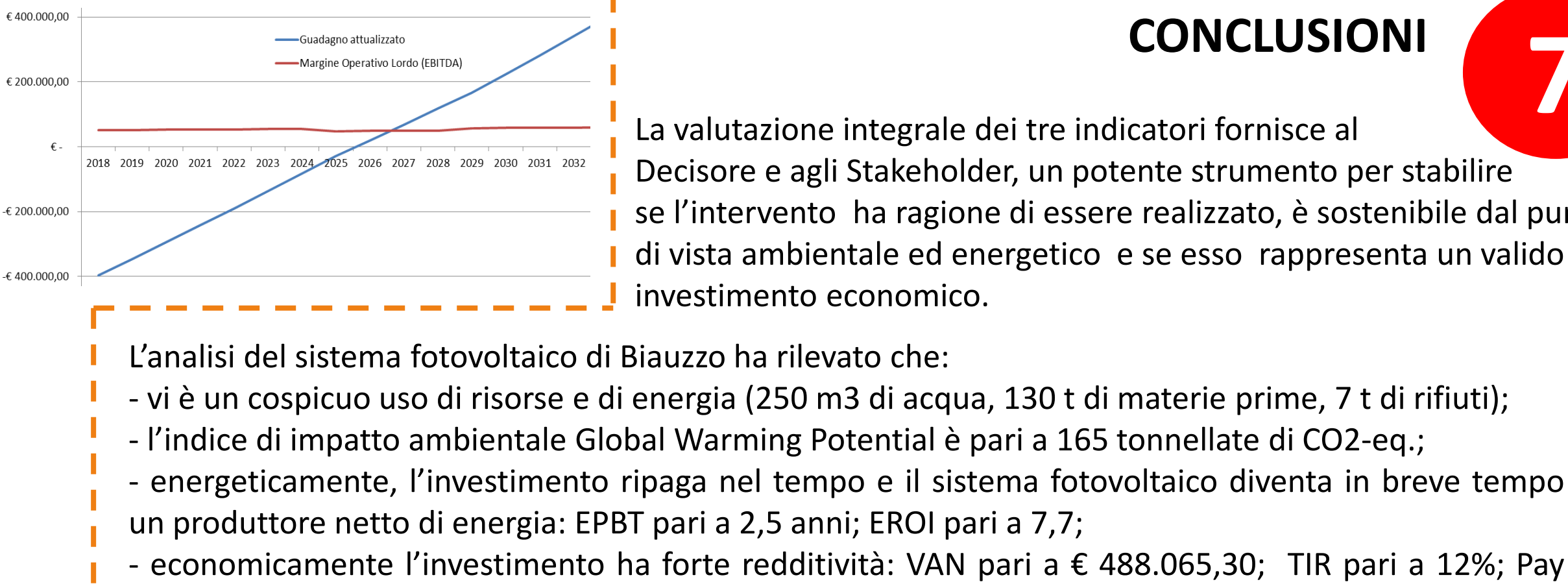
6

## VALUTAZIONE ECONOMICA DELL'INVESTIMENTO

Per la predisposizione del business plan e del calcolo del VAN e del TIR sono stati utilizzati i dati e assunte le ipotesi di seguito riportate:

- Potenza di picco dell'impianto: 392,04 kW
- Produttività media dell'impianto: 848 kWh/kW
- Costo dei lavori: 396.783,61 € (rapporto costo lavori / kWp: 1.012,10 €)
- Valorizzazione dell'energia ceduta a GSE: 0,05 €/kWh
- Costo per dell'energia acquistata in impianto: 0,20 €/kWh
- Tasso di inflazione (indice ISTAT): 2,00 %
- Percentuale autoconsumo energia istantaneo: 86,8%
- Vita utile impianto: 20 anni
- Riduzione resa pannello: 0,7 %/anno

Annualità	2019	2020	2021	2025	2026	2028
Energia annuale prodotta (kWh)	332.450	330.123	327.812	318.729	316.488	290.912
<b>RICAVI: Valore della produzione</b>						
Inflazione	-	1,02	1,049	1,326(2)210	1,3488(2)660	1,4568(1)179
Ricarica energia	€ 2.194,17	€ 2.222,39	€ 2.250,97	€ 2.369,01	€ 2.399,47	€ 2.797,11
Incentivo da GSE	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -
Risparmio in bolletta per minor acquisto EE	€ 57.713,31	€ 58.455,50	€ 59.207,24	€ 62.312,11	€ 63.113,45	€ 73.572,40
<b>Totale ricavi netti della produzione</b>	<b>€ 59.907,48</b>	<b>€ 60.677,89</b>	<b>€ 61.458,20</b>	<b>€ 64.681,12</b>	<b>€ 65.512,92</b>	<b>€ 76.369,51</b>
<b>COSTI: Consumi di beni e prestazioni di servizi</b>						
Mantenimento ordinaria ditte esterne	€ 1.190,35	€ 1.214,16	€ 1.238,44	€ 1.340,53	€ 1.367,34	€ 1.734,12
Mantenimento ordinaria personale CAFC	€ 2.016,00	€ 2.056,32	€ 2.097,45	€ 2.270,34	€ 2.315,75	€ 2.936,93
Mantenimento straordinaria - ripristino impianti	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 793,27
Mantenimento straordinaria - sostituz. inverter	€ -	€ -	€ -	€ -	€ -	€ 7.142,11
Assicurazione	€ 4.959,80	€ 5.058,99	€ 5.160,17	€ 5.585,53	€ 5.697,25	€ 7.225,48
Decommissioning	€ 934,00	€ 934,00	€ 934,00	€ 934,00	€ 934,00	€ 934,00
Corrispettivo a GSE su energia ritirata	€ 10,97	€ 11,11	€ 11,25	€ 11,85	€ 12,00	€ 13,99
<b>Totale costi di produzione</b>	<b>€ 9.111,12</b>	<b>€ 9.274,58</b>	<b>€ 9.441,31</b>	<b>€ 10.142,25</b>	<b>€ 10.142,25</b>	<b>€ 13.638,09</b>
<b>Margine operativo lordo (EBITDA)</b>	<b>€ 50.796,36</b>	<b>€ 51.403,30</b>	<b>€ 52.016,89</b>	<b>€ 54.538,87</b>	<b>€ 55.370,67</b>	<b>€ 62.731,42</b>
<b>Margine operativo netto (EBIT)</b>	<b>€ 345.987,25</b>	<b>€ 294.583,95</b>	<b>€ 242.567,06</b>	<b>€ 28.228,68</b>	<b>€ 19.815,80</b>	<b>€ 705.833,52</b>
<b>Valore attuale netto (VAN)</b>	<b>€ 488.065,30</b>					
<b>Tasso Interno di Rendimento (TIR)</b>	<b>12%</b>					



7

CONCLUSIONI

La valutazione integrale dei tre indicatori fornisce al Decisore e agli Stakeholder, un potente strumento per stabilire se l'intervento ha ragione di essere realizzato, è sostenibile dal punto di vista ambientale ed energetico e se esso rappresenta un valido investimento economico.

L'analisi del sistema fotovoltaico di Biauzzo ha rilevato che:

- vi è un cospicuo uso di risorse e di energia (250 m<sup>3</sup> di acqua, 130 t di materie prime, 7 t di rifiuti);
- l'indice di impatto ambientale Global Warming Potential è pari a 165 tonnellate di CO<sub>2</sub>-eq;
- energeticamente, l'investimento ripaga nel tempo e il sistema fotovoltaico diventa in breve tempo un produttore netto di energia: EPBT pari a 2,5 anni; EROI pari a 7,7;
- economicamente l'investimento ha forte redditività: VAN pari a € 488.065,30; TIR pari a 12%; Pay Back Period è di 8 anni.