



Università di Palermo
Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM)

ANALISI DEL CICLO DI VITA DEL MICROEOLICO: UN CASO STUDIO IN SICILIA

Autori: F. Ardente, M. Cellura, G. Ciulla , S. Longo, M. Mistretta

Introduzione

Obiettivi Unione Europea entro il 2020 (COM, 2008):

- ✓ ridurre del 20% le emissioni di gas serra;
- ✓ raggiungere una quota di energie rinnovabili pari al 20% del consumo energetico complessivo.

Introduzione

L'utilizzo dell'energia eolica per la produzione di energia elettrica rappresenta oggi una delle tecnologie più diffuse di sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili ed ha, quindi, un ruolo fondamentale nel raggiungimento dei suddetti obiettivi.

Nel 2009, su un totale di 25.963 MW di potenza installata, circa il 39% (10.163 MW) è rappresentato dall'eolico, il 26% dal gas naturale, il 16% dal solare fotovoltaico e il rimanente 19% da carbone, olio combustibile, rifiuti, biomasse ed energia nucleare (Fonte: *EWEA "Wind in power. 2009 European statistics"*).

Introduzione

L'installazione di impianti eolici, sia di piccola taglia (fino 200 kW) che di grande taglia (>200 kW), può contribuire all'incremento della produzione di energia da fonti rinnovabili ed alla conseguente riduzione di gas climalteranti.

Tuttavia la tecnologia eolica, così come tutte le tecnologie per lo sfruttamento delle fonti rinnovabili di energia, non può essere considerata ad impatto ambientale nullo. È infatti necessario esaminarne gli impatti relativi alle fasi di manifattura, trasporto, installazione, uso, manutenzione e smaltimento finale, secondo un approccio di ciclo di vita.

Obiettivi dello studio:

- ✓ Valutare le prestazioni energetico-ambientali di un sistema microeolico per la produzione di elettricità
- ✓ Stima dell'eco-profilo di 1 kWh di energia elettrica prodotta con un impianto microeolico con configurazione grid-connected o stand-alone, ipotizzando che venga installato in un edificio della città di Palermo (Sicilia);
- ✓ Confronto con eco-profili di elettricità prodotta con altri sistemi di generazione che utilizzano sia fonti fossili che rinnovabili.

Caratteristiche dell'impianto microeolico



Potenza nominale:	1 kW
Numero pale:	3
Velocità di cut-in:	3,1 m/s
Velocità di cut-out:	20,3 m/s
Velocità nominale:	12,5 m/s
Diametro rotore:	2,7 m
Area spazzata:	5,73 m ²
Peso navicella:	30 kg

PALE

MOZZO

ROTORE

NAVICELLA

TIMONE
DIREZIONALE

TORRE



Analisi del ciclo di vita dell'impianto microeolico

■ UNITÀ FUNZIONALE

L'unità funzionale selezionata è 1 kWh di energia elettrica prodotta dall'impianto microeolico (EPD system).

■ CONFINI DEL SISTEMA

- ✓ produzione ed installazione dell'impianto microeolico;
- ✓ uso e manutenzione;
- ✓ scenario di fine vita;
- ✓ trasporti relativi a ciascuna fase del ciclo di vita.

Analisi del ciclo di vita dell'impianto microeolico

■ REGOLE DI CUT-OFF

Sono stati trascurati tutti i componenti con una massa inferiore all'1% della massa totale del sistema e dei quali non si hanno informazioni specifiche:

- ✓ regolatore di carica (0,48% della massa totale)
- ✓ dispositivi d'interfaccia per la connessione con la rete elettrica (0,05% della massa totale).

Produzione e installazione dell'impianto

La raccolta dei dati è stata eseguita tramite un'analisi diretta dell'impianto e l'utilizzo di report tecnici.

Gli eco-profilo dei materiali e dell'energia utilizzati per la realizzazione dei vari componenti del sistema sono stati stimati attraverso l'ausilio di database ambientali (Ecoinvent ver.2.0, SimaPro ver. 7.1).

La fase di installazione prevede la realizzazione di un basamento in calcestruzzo e il successivo assemblaggio dei vari elementi dell'impianto.

Produzione e installazione dell'impianto

Materiali dei principali componenti dell'impianto e relative masse

Componente	Materiale	Massa [kg]
Navicella	Lega di alluminio	30
Torre	Acciaio	53
Pale	Fibra carbonio rinforzata	2,04
Prolungamento pale	Acciaio	2,47
Cavi elettrici	Rame	12,87
Parte terminale coda	Acciaio	2
Timone direzionale	Plexiglass	1
Basamento	Calcestruzzo armato	500
Batterie (configurazione stand-alone)	Materiali vari	301,8
Inverter	Materiali vari	31

Fase d'uso

SISTEMA
STAND-ALONE



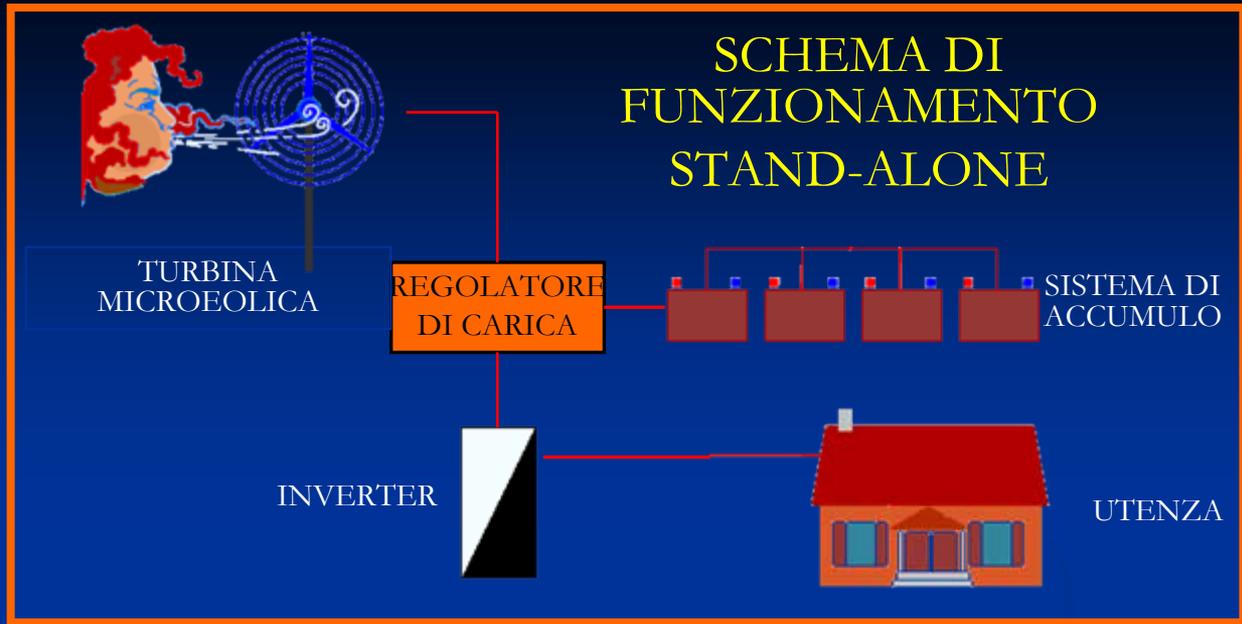
IMPIANTO
MICROEOLICO



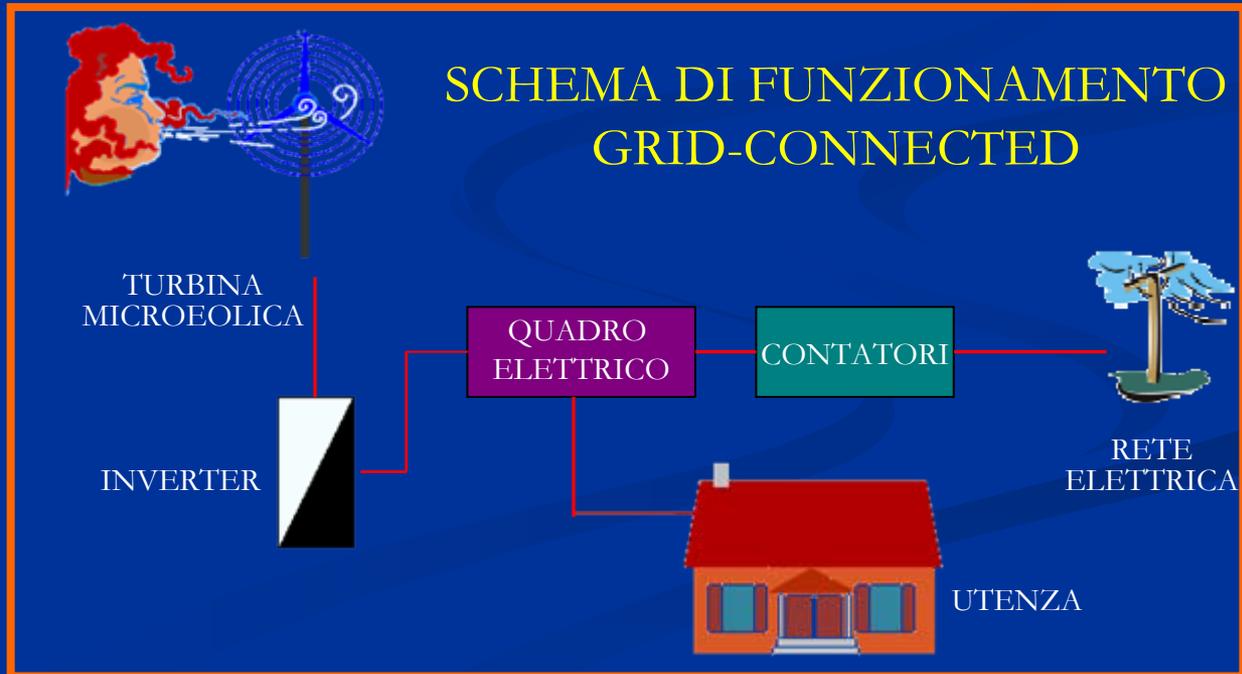
SISTEMA
GRID-CONNECTED



SCHEMA DI FUNZIONAMENTO STAND-ALONE



SCHEMA DI FUNZIONAMENTO GRID-CONNECTED



Uso e manutenzione

La vita utile prevista per l'impianto microeolico è pari a 20 anni, mentre per le batterie utilizzate nel sistema stand-alone è stata ipotizzata una vita utile pari a **10** anni.

L'impianto non richiede particolari interventi di manutenzione.

Manutenzione ordinaria periodica (una volta l'anno) per verificare il corretto esercizio dei componenti.

Manutenzione straordinaria non periodica necessaria al rinnovamento o alla sostituzione di parti dell'impianto, sia strutturali che tecnologiche.

Lo studio include due interventi di manutenzione straordinaria:

- sostituzione di una pala della turbina, danneggiata dal crollo della torre
- sostituzione del sistema di accumulo al termine della sua vita utile.

Fine vita dell'impianto

Ipotesi:

- Il 90% dell'acciaio, dell'alluminio e del rame viene avviati ad un impianto di riciclaggio e il rimanente 10% in discarica, assieme agli altri materiali (plexiglass e fibre di carbonio).

Batterie:

- piombo e acido solforico sono avviati ad un impianto di riciclaggio
- fibre di vetro sono avviati in discarica,
- 67% del polipropilene è riciclato e il rimanente 33% è avviato in discarica.

Trasporti

Il trasporto dei materiali e dei componenti necessari per l'installazione dell'impianto avviene tramite l'utilizzo di camion e di una nave cargo.

Ipotesi per la stima delle distanze percorse

- La turbina microeolica è prodotta nell'Italia settentrionale
- Le batterie e l'inverter sono prodotti nell'Italia meridionale
- La torre e il calcestruzzo utilizzato per realizzare il basamento sono prodotti in loco.

Risultati dell'analisi di inventario per l'impianto

SISTEMA GRID-CONNECTED

Emissioni in aria [kg]

CO ₂	758
CO	4,3
SO _x	3,5
NO _x	2,4
Polveri	7,6
CH ₄	1,5

Emissioni in acqua [kg]

COD	4,1
BOD ₅	1,9
Si	34,5
TOC	1,5
Solfati	5,4
Cloruri	8,9

SISTEMA STAND-ALONE

Emissioni in aria [kg]

CO ₂	1682
CO	7,3
SO _x	15,5
NO _x	6,9
Polveri	8,8
CH ₄	3,9

Emissioni in acqua [kg]

COD	10,9
BOD ₅	4,4
Si	39,3
TOC	6,6
Solfati	12,4
Cloruri	19,5

Risultati dell'analisi di inventario per l'impianto

SISTEMA GRID-CONNECTED

Emissioni al suolo [kg]

Cloruri	0,3
Oli	0,2
Al	0,002
Fe	0,02
Na	0,04
Ca	0,01

Rifiuti solidi [kg]

Inerti	0,9
Plastica	1
Acciaio	6,5
Rame	1,8
Alluminio	1,1

SISTEMA STAND-ALONE

Emissioni al suolo [kg]

Cloruri	1,1
Oli	0,6
Al	0,005
Fe	0,1
Na	0,05
Ca	0,02

Rifiuti solidi [kg]

Inerti	1
Plastica	36
Acciaio	6,5
Rame	1,8
Alluminio	1,1

Risultati dell'analisi degli impatti per l'impianto

Sistema grid-connected:

Consumo di energia totale (GER): **14,4** GJ,

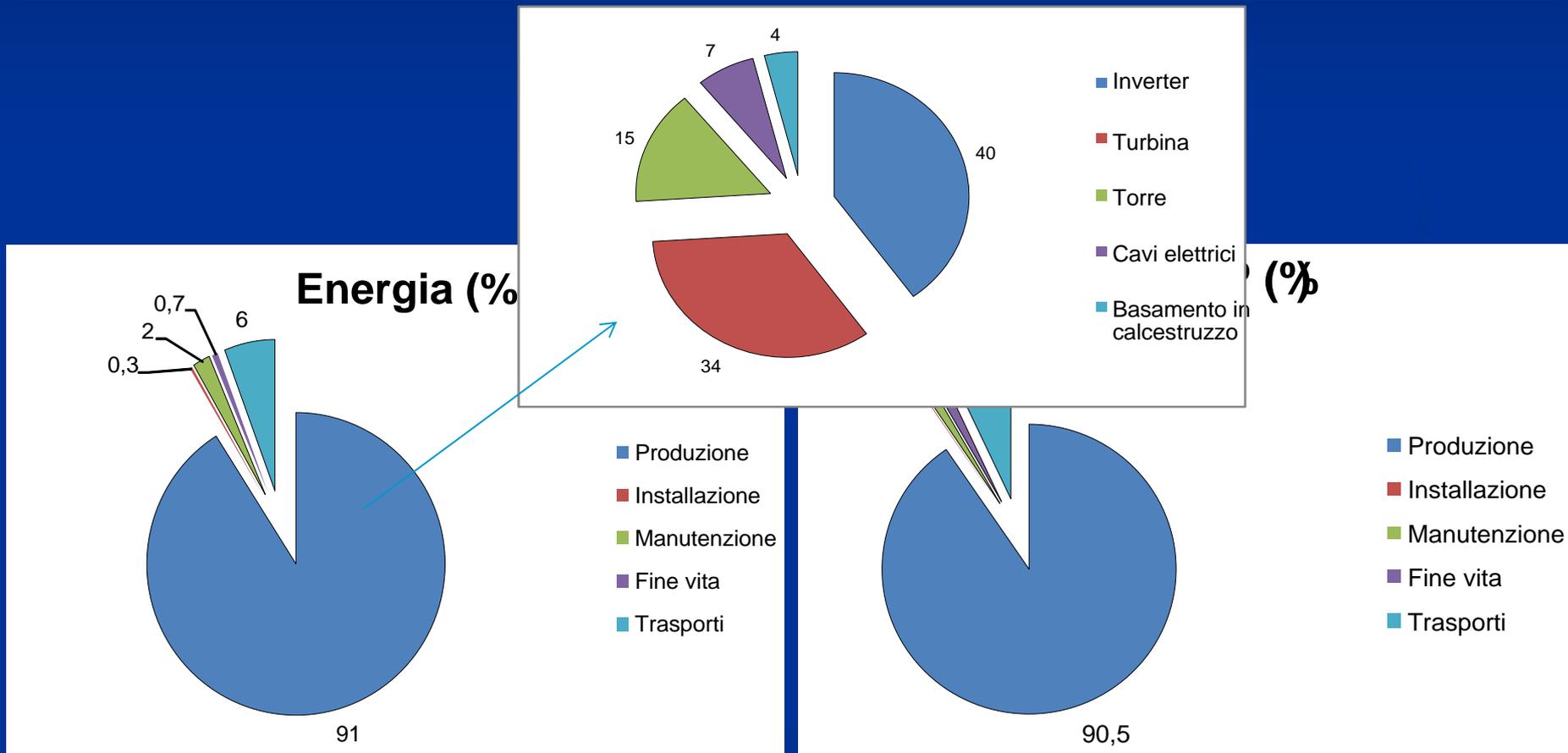
- il 91% è utilizzato per la produzione dell'impianto,
- circa il 6% per i trasporti,
- il rimanente 3% è utilizzato nelle fasi di installazione, manutenzione e fine vita.

Contributo all'effetto serra (GWP_{100}):

809 kgCO_{2eq}, dovuto principalmente (circa il 90%) alla fase di produzione dei componenti dell'impianto.

Risultati dell'analisi degli impatti per l'impianto

Sistema grid-connected:



Risultati dell'analisi degli impatti per l'impianto

Sistema stand-alone:

Consumo di energia totale (GER): 32 GJ

- 64% è relativo alla fase di produzione dell'impianto
- 28% è relativo alla fase di manutenzione
- 7% è relativo alla fase dei trasporti
- la fase di fine vita e di installazione incidono rispettivamente per lo 0,9% e lo 0,1%.

Contributo all'effetto serra (GWP₁₀₀): 1.793 kg CO_{2eq}

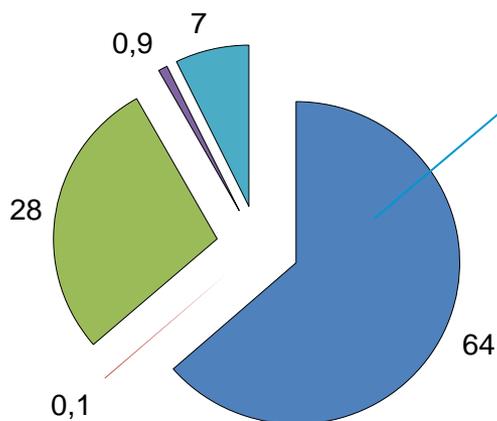
- 62% è relativo alla fase produzione dell'impianto
- 28% è relativo alla fase di manutenzione
- il 9% è relativo ai trasporti.

Installazione e smaltimento dell'impianto hanno un'incidenza dell'1% sul totale.

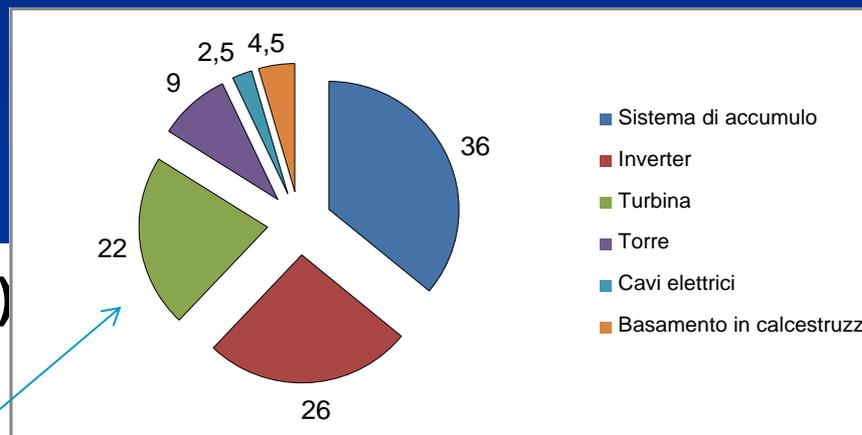
Risultati dell'analisi degli impatti per l'impianto

Sistema stand-alone:

Energia (%)

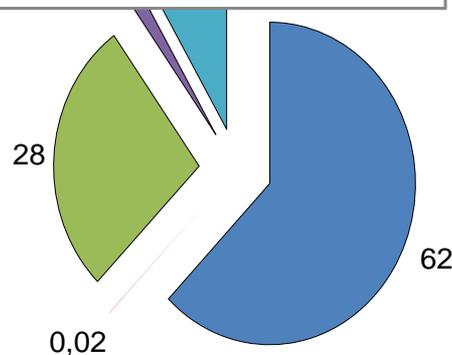


- Produzione
- Installazione
- Manutenzione
- Fine vita
- Trasporti



- Sistema di accumululo
- Inverter
- Turbina
- Torre
- Cavi elettrici
- Basamento in calcestruzzo

Impatto (%)



- Produzione
- Installazione
- Manutenzione
- Fine vita
- Trasporti

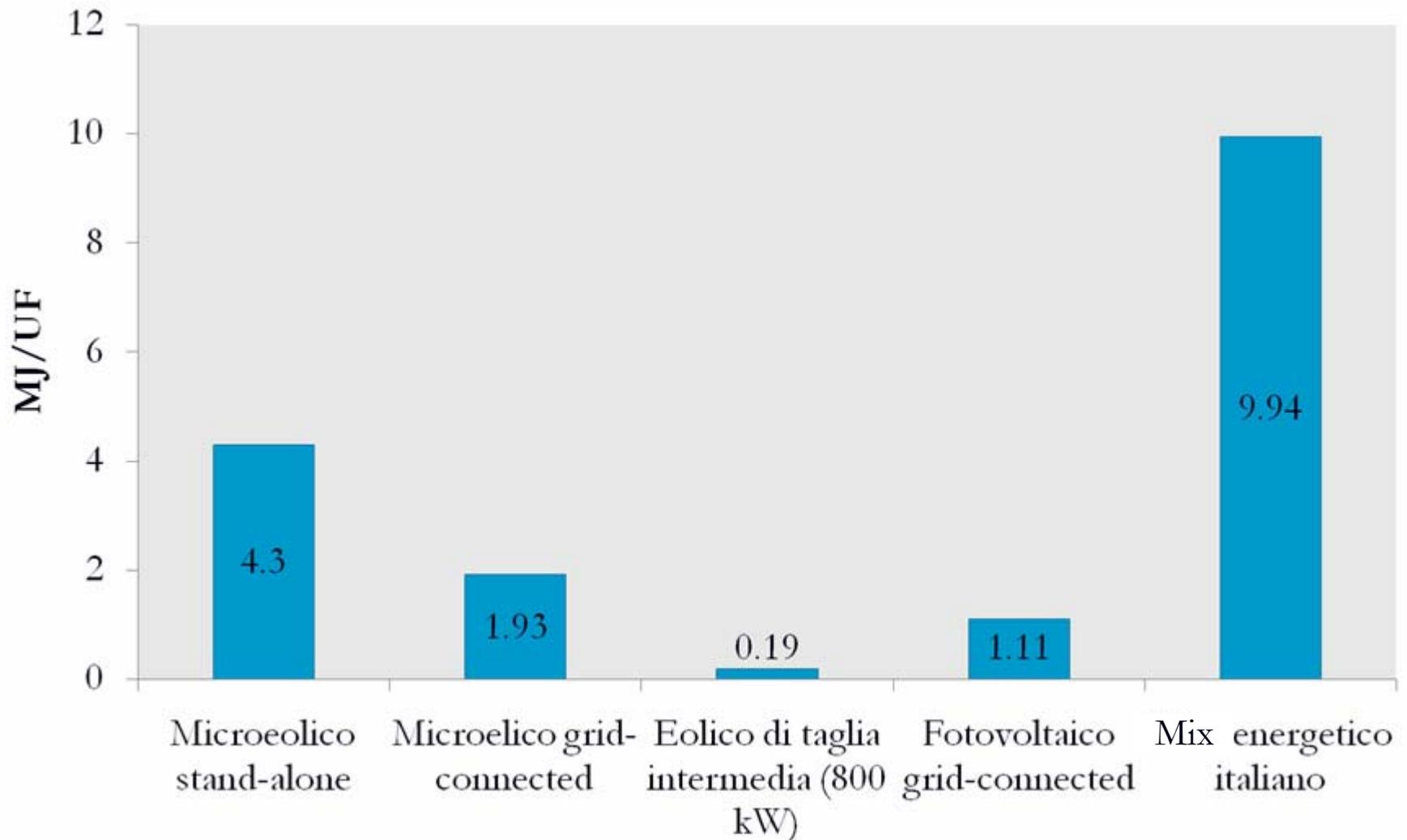
Risultati dell'analisi degli impatti per l'UF

L'eco-profilo di 1 kWh di energia elettrica è stato calcolato dividendo gli impatti energetico-ambientali globali dell'impianto per la produzione di energia durante la sua vita utile.

	Stand-alone	Grid-connected
GER [MJ/UF]	4,3	1,93
GWP ₁₀₀ [kgCO _{2eq} /UF]	0,24	0,11
ODP [kg CFC-11 _{eq} /UF]	2,93E-08	2,04E-08
POCP [kg C ₂ H _{4eq} /UF]	2,4E-04	9,4E-05
AP [kg SO _{2eq} /UF]	3,05E-03	7,6E-04
EP [kgPO ₄ ³⁻ _{eq} /UF]	1,9E-04	7,6E-05

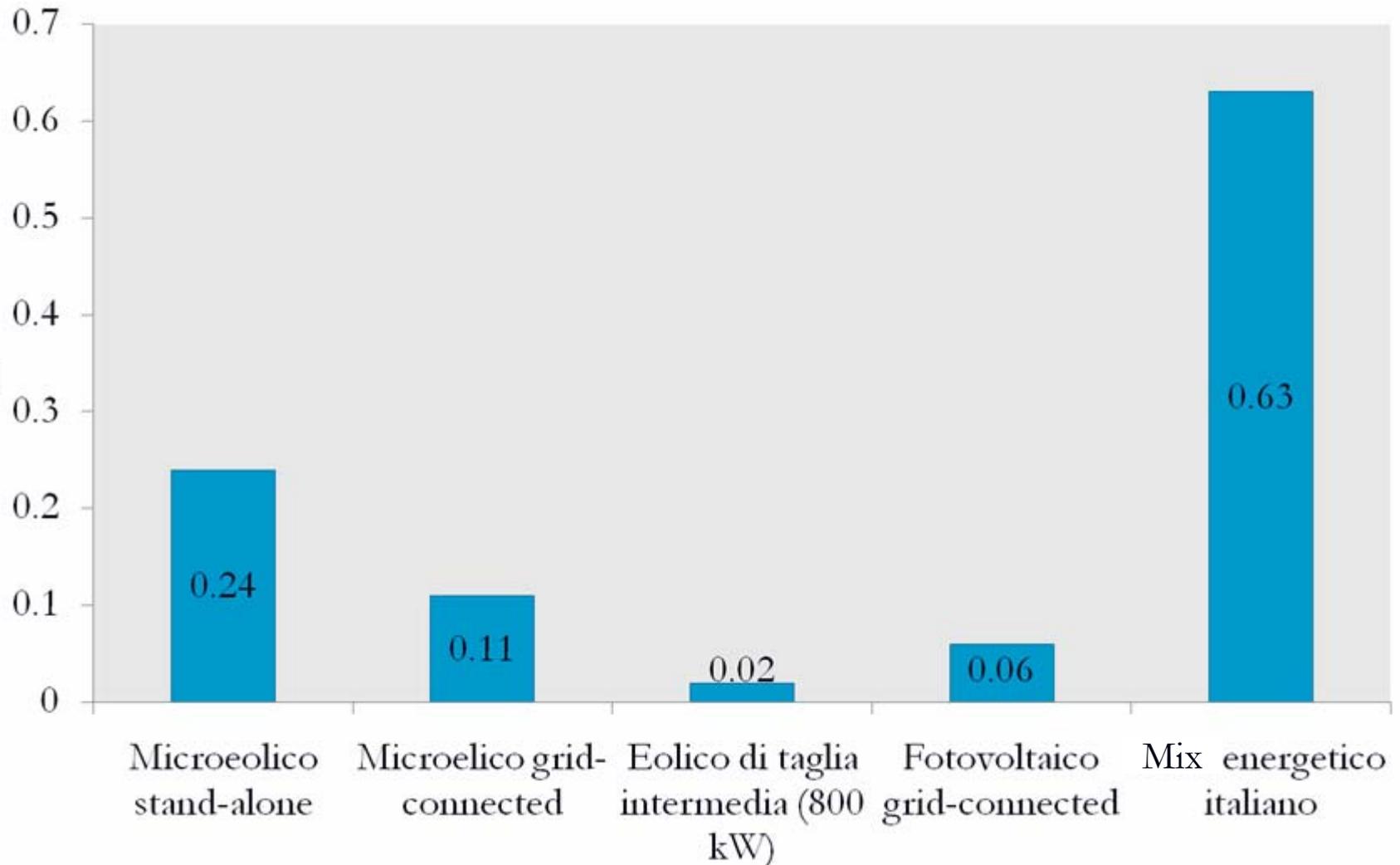
Confronto eco-profilo di elettricità

GER



Confronto eco-profilo di elettricità

GWP
[kgCO_{2eq}/UF]



Confronto eco-profili di elettricità

Da un'analisi dei risultati si osserva che, tra le diverse tecnologie considerate, i maggiori impatti sono imputabili alla produzione di energia elettrica da fonte fossile.

Tra le tecnologie per lo sfruttamento delle fonti rinnovabili, invece, il microeolico in configurazione stand-alone produce i maggiori impatti ambientali specifici.

Ciò è da attribuirsi alla bassa producibilità dell'impianto ed alla presenza del sistema di accumulo.

Risultati dell'analisi degli impatti per l'UF

Al fine di valutare i benefici connessi all'utilizzo dell'impianto microeolico, è stato necessario stimarne la producibilità, ipotizzando che l'impianto venga installato in Sicilia, in un edificio del centro urbano della città di Palermo.

La **producibilità** della turbina microeolica è stata stimata pari a **372 kWh/anno**, attraverso l'analisi della distribuzione di frequenza della velocità del vento espressa tramite la funzione di Weibull.

Benefici energetico – ambientali (impatti evitati)

I benefici energetico - ambientali connessi all'impiego della tecnologia microeolica per la produzione annua di energia elettrica sono stati stimati sulla base dell'eco-profilo del mix italiano di elettricità.

GER [MJ/anno]	3.698
GWP ₁₀₀ [kgCO _{2eq} /anno]	238
ODP [kg CFC-11 _{eq} /anno]	2E-05
POCP [kg C ₂ H _{4eq} /anno]	0,08
AP [kg SO _{2eq} /anno]	1,2
NP [kg PO ₄ ³⁻ _{eq} /anno]	0,07

Energy Payback Time

$$E_{PT} = \frac{GER}{E_{s,y}}$$

E impianto = energia primaria totale spesa durante il ciclo di vita dell'impianto (MJ);

E risparmiata = energia primaria risparmiata in un anno di funzionamento dell'impianto, pari alla quantità di energia primaria necessaria ad un impianto tradizionale per produrre la stessa quantità di energia elettrica (MJ/anno).

SISTEMA GRID-CONNECTED

3,9 ANNI

SISTEMA STAND-ALONE

8,6 ANNI

CO_{2eq} Payback Time

$$CO_{2eq PT} = \frac{GWP}{GWP_{y,a}}$$

GWP impianto = kg di CO₂ eq emessi durante il ciclo di vita dell'impianto (kg di CO_{2eq});

GWP evitato = kg di CO₂ eq evitati in un anno dalla produzione di energia elettrica dell'impianto, equivalenti ai kg di CO₂ emessi da un tradizionale sistema per produrre la stessa quantità di energia elettrica (kg di CO_{2eq}).

SISTEMA GRID-CONNECTED

3,4 ANNI

SISTEMA STAND-ALONE

7,5 ANNI

Conclusioni

La ricerca ha mostrato che la maggior parte degli impatti energetico-ambientali causati da un impianto microeolico sono dovuti al consumo di energia e di materiali durante la fase di produzione dei componenti impiantistici.

Consumo di energia primaria:

- Ciclo di vita del sistema impiantistico grid-connected: GER 14,4 [GJ]
- Ciclo di vita del sistema impiantistico stand-alone: GER 32 [GJ]

La notevole differenza è dovuta prevalentemente alla presenza del sistema di accumulo nella configurazione stand-alone.

Differenze analoghe sono relative all'indice GWP:

- Ciclo di vita del sistema impiantistico grid-connected: GWP 809 [kgCO_{2eq}]
- Ciclo di vita del sistema impiantistico stand-alone: GWP 1.793 [kgCO_{2eq}]

Conclusioni

Indici di payback energetici e ambientali

Installazione dell'impianto con configurazione stand-alone:

- E_{PT} 8,6 anni;
- $CO_{2eq,PT}$ 7,5 anni

Installazione dell'impianto con configurazione grid-connected:

- E_{PT} 3,9 anni;
- $CO_{2eq,PT}$ 3,4 anni

Confronto tra i differenti sistemi di generazione:

I benefici energetico-ambientali derivanti dall'utilizzo di un impianto microeolico rispetto ad altre tecnologie per lo sfruttamento delle RES è significativamente influenzato da:

- presenza del sistema di accumulo
- producibilità dell'impianto, legata alle caratteristiche del sito di installazione e alla potenza di targa del generatore.