



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

TESI DI LAUREA

**ANALISI DEL CICLO DI VITA
DI UNA MICROTURBINA EOLICA
AD ASSE VERTICALE**

Laureanda:
Ester Valeri

Relatore:
Prof. Anna Stoppato
Correlatore:
Ing. Dora Biondani

Anno Accademico 2012/2013

Sommario

1. INTRODUZIONE.....	1
1.1 VALUTAZIONE GENERALE.....	1
1.2 SCOPO.....	2
2. LA METODOLOGIA "LCA"	5
2.1 LIFE CYCLE ASSESSMENT	6
2.1.1 Definizione Scopi e Obiettivi	7
2.1.2 Analisi d'inventario.....	9
2.1.3 Analisi degli impatti.....	12
2.1.4 Interpretazione e miglioramento	17
3. LCA APPLICATA ALLA MICROTURBINA EOLICA IN ESAME	19
3.1 LA "FREETREE"	19
3.1.1 Il sistema analizzato	19
3.1.2 Il software Boustead Model	21
3.1.3 Il software SimaPro	23
3.2 DEFINIZIONE DI SCOPI E OBIETTIVI	30
3.3 CAMPO DI APPLICAZIONE	31
3.3.1 Unità funzionale.....	32
3.3.2 Fasi del ciclo di vita	32
3.3.3 Assunzioni.....	33
3.4 DESCRIZIONE DEL SISTEMA ANALIZZATO	38
3.4.1 Pale.....	38
3.4.2 Calotte.....	40
3.4.3 Monotirante	42
3.4.4 Cavi di tenuta	44
3.4.5 Generatore	46
3.4.6 Componenti elettroniche.....	49
3.4.7 Palo.....	51
3.4.8 Imballaggio.....	52
3.4.9 Fondazioni.....	55
3.4.10 Manutenzione.....	56

4. ANALISI DEGLI IMPATTI	59
4.1 ANALISI DI CONFRONTO DEI SOFTWARE	59
4.1.1 Comparazione dei risultati degli impatti	59
4.1.2 Comparazione dell'analisi energetica	62
4.1.3 Scelta del software di approfondimento.....	63
4.2 APPROFONDIMENTO DEGLI IMPATTI CON SIMAPRO	64
4.2.1 Eco-Indicator 99 (E)	64
4.2.2 CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995	67
4.2.3 Europe ReCiPe H/A, Endpoint method.....	68
4.3 IMPATTO AMBIENTALE DEI SITI EOLICI DISPONIBILI	71
4.3.1 Fonte dei dati utilizzati.....	71
4.3.2 Determinazione dell'AEP	71
4.3.3 Risultati e caso limite	73
4.4 CASI DI STUDIO	78
4.4.1 Modello turbina e palo di supporto: fondazioni e manutenzione a carico dell'installatore	78
4.4.2 Risultati - modello solo turbina	80
4.4.3 Risultati - modello solo turbina e trasporto locale, solo turbina e trasporto transoceanico	82
4.4.4 Conclusioni sulla convenienza	86
5. ANALISI DEL TEMPO DI RITORNO ENERGETICO t_{payback}.....	89
5.1 DESCRIZIONE TEORICA DEL METODO	89
5.2 TEMPO DI RITORNO ENERGETICO PER IL MODELLO COMPLETO DELLA FREETREE	90
5.2.1 Dati in ingresso per la FreeTree	90
5.2.2 Il modello eolico italiano	91
5.2.3 Tempo di ritorno per la produzione energetica dei siti eolici disponibili.....	92
5.2.3 Tempi di ritorno: limite minimo di accettabilità	95
5.3 APPLICAZIONE AI CASI DI STUDIO	96
5.3.1 Risultati - modello turbina e palo di supporto: fondazioni e manutenzione a carico dell'installatore.....	96
5.3.2 Risultati - modello solo turbina	99
5.3.3 Risultati - modello solo turbina e trasporto locale, solo turbina e trasporto transoceanico	101
5.3.3 Conclusioni sulla convenienza energetica	105

6. ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI	107
6.1 CONFRONTO CON ALTRI IMPIANTI EOLICI	107
6.1.1 Turbina eolica da 2 MW	107
6.2 CONFRONTO CON IMPIANTI FOTOVOLTAICI	116
6.3 CONCLUSIONI DI CONFRONTO	118
7. CONCLUSIONI	119
7.1 RISULTATI OTTENUTI	119
7.2 EVOLUZIONI FUTURE	121
Bibliografia	123
Bibliografia siti internet	127

1.INTRODUZIONE

1.1 VALUTAZIONE GENERALE

Negli ultimi decenni la percezione comune ha iniziato ad interessarsi e a essere sensibile al tema dell'inquinamento atmosferico causato dalle centrali di produzione di energia elettrica che, usando combustibili fossili, quale carbone, gas, petrolio, emettono in atmosfera un'elevata quantità di sostanza impattanti, in primo luogo CO₂, ma anche CO, SO_x, NO_x.

Col passare degli anni la tecnologia si è evoluta e si è arrivati alla possibilità di sfruttare risorse "pulite" che consentono di produrre energia elettrica limitando quasi a zero l'immissione nell'ambiente di tali sostanze, grazie allo sfruttamento di fonti energetiche praticamente inesauribili. Questa è stata una scelta doverosa nella consapevolezza che le risorse fossili un giorno si esauriranno, e necessaria a sopperire al trend di crescita vertiginosa che ha coinvolto il mondo nell'ultimo mezzo secolo portando a un raddoppiamento della richiesta di energia elettrica globale, passando dai quasi 6.000 Mtep del 1970 a più di 12.000 Mtep nel 2010 [1].

E' in questo quadro che s'inseriscono le energie rinnovabili, la cui capacità produttiva sta diventando via via sempre più rilevante e il cui peso sta iniziando a farsi sentire nel contesto economico mondiale, sia perché l'avanzamento tecnologico ha permesso negli anni un sempre maggiore sfruttamento di queste risorse, sia perché la produzione energetica definita "*ad impatto zero*" si pone come unica possibilità per il periodo presente e futuro di produrre "*energia pulita*". Questo potrebbe consentire a un Paese di diventare indipendente dal punto di vista dell'importazione elettrica e delle risorse fossili, permettendogli di svincolarsi da legami economico - politici gravosi.

Basti pensare alla situazione italiana che vede le importazioni elettriche definite nei Decreti Ministeriali e nelle Delibere [2] [3] secondo accordi intercorrenti con gli Stati confinanti ai quali rimaniamo vincolati tramite contratti pluriennali. Inoltre, esistono degli accordi internazionali che ci impegnano con Stati come San Marino e la Città del Vaticano in misura ridotta, con la Grecia e la Svizzera per capacità più rilevanti, per quel riguarda le esportazioni.

Per quanto concerne la situazione italiana degli ultimi anni, lo sviluppo delle fonti rinnovabili ha portato all'incirca a un raddoppiamento della produzione elettrica da tali fonti tra il 2008 e il 2012: si è passati da 58,2 TWh a 92,5 TWh. In particolare, l'installazione d'impianti eolici ha riguardato una potenza pari a 3736 MW a fine 2008, che è più che raddoppiata a fine 2012 raggiungendo gli 8144 MW installati, per una produzione all'incirca di 10 TWh [4] [5].

Per sfruttare le fonti alternative si sono costruiti sistemi *ad hoc* quali pannelli fotovoltaici, turbine eoliche, centrali a biomassa; le stesse centrali idroelettriche, che comunque esistono da molto più tempo, sono un esempio di sfruttamento di fonti rinnovabili. Tutti questi impianti, per essere realizzati, consumano una certa quantità di energia elettrica spesso derivante dall'uso di combustibili fossili: ogni elemento che li compone, dalla struttura portante alle celle di silicio, dalle pale alla torre, dalle viti ai contatti elettrici, è a sua volta fabbricato in appositi stabilimenti allacciati alla rete elettrica nazionale. Per questa ragione, nel considerare l'energia pulita che essi producono durante la loro vita

utile, bisogna fare attenzione a sottrarre ciò che hanno consumato per essere costruiti: tale aspetto è molto spesso sottovalutato, ma è quello che effettivamente può far rendere conto di quanto questi impianti siano "puliti".

La LCA, *Life Cycle Assessment*, si presta molto bene a eseguire analisi energetiche poiché permette di valutare quali sono gli impatti ambientali associati a una certa produzione e di fare delle valutazioni in merito. La metodologia che sta alla base è ormai ben consolidata e normata, anche se in realtà analisi di questo tipo iniziano a diffondersi e a essere richieste frequentemente solo negli ultimi anni, da quando le Aziende produttrici hanno iniziato a sentirsi responsabili dell'impatto ambientale conseguente ai loro prodotti, rispondendo alle esigenze della società che chiedeva il rispetto dell'ambiente e la dimostrazione dell'impegno su questo fronte.

1.2 SCOPO

Nel seguente elaborato si vuole valutare la convenienza della produzione di una microturbina eolica, denominata FreeTree e prodotta dall'Azienda Linz Electric S.p.A., utilizzando due programmi differenti per l'analisi LCA.

I dati utilizzati sono messi a disposizione dalla ditta stessa utilizzando i report dei materiali dei fornitori di tutti gli elementi costituenti l'aerogeneratore.

I programmi che saranno utilizzati per tale analisi sono due:

- *Boustead Model*, uno dei primi software di modellizzazione LCA che attinge a data base per la valutazione dei consumi di processo risalenti a una decina di anni fa, ma che a livello di realizzazione del lavoro è molto intuitivo e facilmente modificabile.
- *SimaPro*, molto più recente, attualmente è uno dei più diffusi al mondo per effettuare analisi LCA e dispone di un elevatissimo numero di informazioni da data base aggiornati.

Si potranno confrontare così i risultati dei calcoli degli impatti, dell'energia associata e valutare le differenze tra i due software.

L'obiettivo principale di questa tesi è stimare l'impatto ambientale che ha la realizzazione della FreeTree nel suo complesso, includendo la manutenzione, il trasporto e le fondazioni. Infatti, essendo una tecnologia atta allo sfruttamento delle risorse rinnovabili, il suo unico contributo è legato alla fase di costruzione: durante la sua vita utile il solo impatto ambientale attribuibile sarebbe quello dovuto alla manutenzione, che è stata inclusa nell'analisi. Perciò si può assumere che la microturbina abbia emissioni nulle durante i dieci anni di utilizzo ipotizzati.

Variando le ipotesi del modello originale di partenza, se ne sono analizzati diversi, quali:

- Solo turbina eolica con trasporto locale ma palo di supporto e fondazioni a carico dell'installatore e/o del cliente;
- Turbina e palo di supporto, con fondazioni e manutenzione a carico dell'installatore;
- Solo turbina e trasporto locale;
- Solo turbina e trasporto transoceanico.

Il livello d'impatto ambientale attribuibile a ogni kWh prodotto dalla FreeTree non è univocamente determinabile poiché dipende dalla produzione elettrica nei dieci anni di vita ipotizzabile. L'AEP (*Annual Energy Production*), calcolato per i siti di prova

d'installazione della turbina eolica, è molto variabile: per esempio, la differenza dell'AEP tra Viterbo e il Sito 9 è di circa dieci volte e anche l'impatto imputabile a ogni kWh elettrico è differente.

E' in conformità a queste differenze che si è scelto di:

- Esprimere i risultati utilizzando come unità di misura il $\text{kg}_{\text{eq}}/\text{kWh}$ per rendere maggiormente confrontabili gli impatti di tutti i siti presi in esame;
- Ipotizzare una producibilità media considerando il fattore di carico del parco eolico italiano ($f_C = 17\%$);
- Valutare la producibilità minima per avere "*impatto zero*" in dieci anni.

Il tutto è stato ripetuto anche per la valutazione del tempo di ritorno energetico $t_{\text{pay-back}}$ che si basa sul calcolo degli anni in cui la turbina ripaga i consumi energetici della sua fabbricazione. E' su queste basi che ci si può rendere conto di quanti anni concorrono alla produzione netta di "energia elettrica pulita", vale a dire fornita alla rete senza immissione in atmosfera di sostanze nocive.

Si è potuto quindi valutare quali, tra i siti di cui si avevano i dati, sono siti favorevoli all'installazione della FreeTree per ogni modello considerato, e qual è il valore minimo dell'AEP sotto il quale è sconsigliabile installare la turbina.

Infine, si è confrontata la FreeTree con altre realtà atte allo sfruttamento delle risorse rinnovabili, un pannello fotovoltaico e una megaturbina eolica, in modo da verificare la validità dei risultati ottenuti comparandoli con dati reperiti in letteratura.

Il risultato ultimo di questo elaborato è di fornire all'Azienda una visione d'insieme della FreeTree che permetta, analizzando tutti i pezzi che la compongono, di valutare su quali processi si potrebbe intervenire per abbattere le sostanze impattanti prodotte e rendere la microturbina eolica ancora più competitiva e conveniente dal punto di vista ambientale.

2.LA METODOLOGIA "LCA"

L'origine dell'*Environmental Life Cycle Thinking*, cioè la considerazione delle problematiche ambientali dal punto di vista del ciclo di vita, risale alla fine degli anni '60 quando alcuni ricercatori iniziarono a studiare i problemi riguardanti il consumo di risorse e alla produzione di reflui connessi ai processi industriali, utilizzando metodi scientifici [6].

L'idea innovativa, rispetto al passato, era quella di considerare il prodotto come un insieme di operazioni, flussi di materiali in input e output e forme di energia associate a tutti gli step del suo ciclo di vita, che vanno dalla progettazione alla dismissione, recupero o smaltimento finale.

Questo tipo di analisi "*from cradle to grave*" non assunse immediatamente la denominazione LCA, ma inizialmente fu identificata con le diciture "*cradle to grave analysis*", "*resources and environmental profile analysis*", "*life cycle analysis*", "*eco balance*".

Tale metodologia era alquanto innovativa, poiché fino a quel momento non era mai stata rivolta la dovuta attenzione all'aspetto globale di tutto il ciclo di vita del prodotto, ma ci si era concentrati solo sullo studio e sul miglioramento dei singoli componenti senza ampliare la visione al processo completo.

Agli inizi degli anni '70 vi furono i primi esempi applicativi della teoria *Life Cycle Thinking*, seguita in particolar modo da alcune grandi compagnie statunitensi e dall'agenzia per la protezione dell'ambiente americana (EPA, *Environmental Protection Agency*).

E' doveroso citare gli studi commissionati da Coca Cola® che voleva valutare i carichi ambientali connessi alla produzione di diversi contenitori di bevande (plastica, vetro, alluminio) e quale tipologia di fine vita (a rendere o a perdere) fosse la migliore a livello ambientale ed energetico. Di notevole interesse furono gli studi dell'azienda Mobil Chemical Company riguardo l'eco-compatibilità dei fogli in polistirene rispetto ai fogli di carta per incartare i prodotti alimentari.

Attorno agli anni '80 studiosi e ricercatori iniziarono ad affrontare il tema dello sfruttamento incondizionato delle risorse e dei suoi effetti sull'ambiente, poiché iniziava a diffondersi sempre di più la consapevolezza che lo sfruttamento delle risorse esauribili, avveniva in modo incondizionato e incontrollabile, ancora prima della crisi petrolifera che da lì a poco sarebbe seguita.

Contemporaneamente in Europa fu pubblicato il manuale "*Handbook of Industrial Energy Analysis*" di Boustead e Hancock, che riportava la prima effettiva descrizione dal punto di vista operativo del procedimento presente tuttora come parte fondamentale della LCA attuale.

A seguito di queste importanti pubblicazioni, la metodologia LCA iniziò a svilupparsi come strumento di supporto allo sviluppo delle attività produttive e cominciò a essere sottoposta a successivi miglioramenti.

Solo durante il congresso SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) del 1990 svoltosi a Smuggler Notch (Vermont, U.S.A.) fu coniato il termine LCA (*Life Cycle Assessment*) per caratterizzare in modo chiaro l'obiettivo della procedura che fino ad allora era stata chiamata in svariati modi. La definizione fu la seguente: "procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali

usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale" [7].

L'organizzazione della LCA prevedeva inizialmente lo svolgimento ciclico di tre fasi: inventario, interpretazione dei risultati e delle problematiche ambientali, miglioramento del sistema in oggetto.

Nei primi anni '90 vi furono numerose iniziative per la standardizzazione della metodologia con conseguenti pubblicazioni di manuali e testi scientifici, banche dati e strumenti di calcolo per l'applicazione pratica.

Bisogna aspettare il 1997 per la prima norma di regolamentazione della LCA, la ISO 14000, alla quale seguirono tra il 1998 e il 2000 le norme specifiche di prodotto della serie ISO 14040, con i requisiti, i principi e le linee guida per l'applicazione della metodologia ad un servizio o prodotto.

Le norme attuali di riferimento sono: la *ISO 14040:2006 - Principle and framework* e la *ISO 14044:2006 - Requirements and guideline*.

L'interesse sempre maggiore rivolto all'analisi energetica che si è sviluppato negli anni, ha permesso di avere oggi una struttura ben definita dello studio LCA e un procedimento consolidato, anche se i modelli di calcolo dell'LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*) e i data base di riferimento sono in continuo aggiornamento e sviluppo.

2.1 LIFE CYCLE ASSESSMENT

La norma ISO 14040:2006 definisce la LCA come "compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita degli elementi in ingresso e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali, di un sistema prodotto". L'obiettivo che si pone quest'analisi è la valutazione dei flussi di energia, materia e risorse in entrata al sistema industriale in esame e i flussi in uscita che riguardano produzioni di calore ed energia, rifiuti e la stima dei potenziali effetti sull'ambiente. E' importante sottolineare il fatto che essa non riguarda, né include, fattori di carattere economico e sociale, quindi non garantisce la sostenibilità monetaria del prodotto: è una tecnica atta a valutare gli aspetti ambientali e i potenziali impatti sull'ambiente legati all'intero ciclo di vita di un determinato prodotto, servizio o attività.

La struttura della LCA, così come proposta sempre dalla norma ISO 14040, è descrivibile in quattro fasi e visibile:

1. Definizione di obiettivo e campo di applicazione (*Goal and Scope*); include i limiti del sistema e il livello di dettaglio, ma tutto dipende dal soggetto e dall'utilizzo che si prevede di fare dello studio.
2. Analisi di Inventario (*Life Cycle Inventory, LCI*); riguarda lo studio del ciclo di vita del processo in esame, la raccolta e l'inventario dei flussi in ingresso e in uscita utili al raggiungimento dell'obiettivo preposto.
3. Valutazione degli Impatti (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*); ha come scopo quello di fornire informazioni aggiuntive per contribuire alla valutazione dei risultati dell'LCI, in modo da ottenere una migliore comprensione del carico ambientale associato al processo o attività analizzato.
4. Interpretazione e Miglioramento (*Life Cycle Interpretation*); è la fase finale che permette di riepilogare e discutere i risultati ottenuti nelle fasi precedenti, tenendo presenti l'obiettivo e il campo di applicazione indicati. Si pone come base per la

formulazione di conclusioni, raccomandazioni e decisioni sui miglioramenti da poter applicare al fine di ridurre l'impatto ambientale.

La struttura della metodologia è visibile nello schema di Figura 2.1.

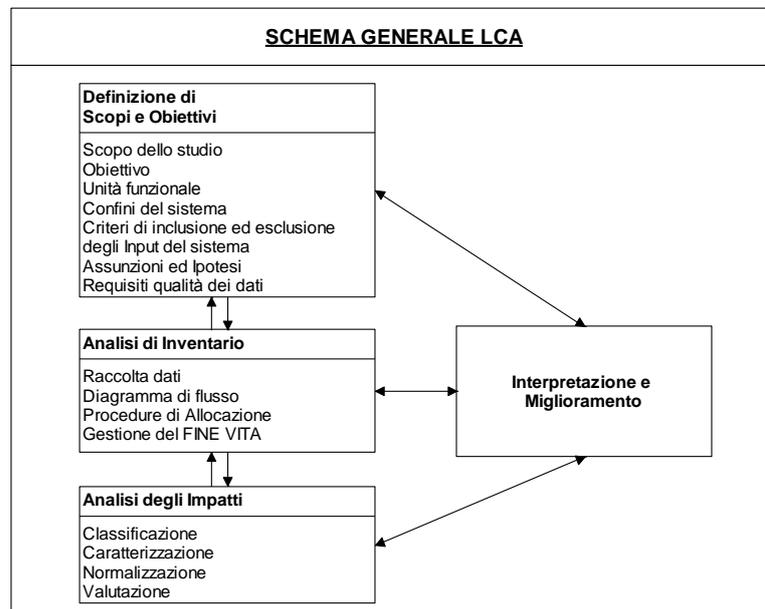


Figura 2.1 - Struttura generale di una LCA

2.1.1 Definizione Scopi e Obiettivi

In questa fase si definisce quale sia l'obiettivo o gli obiettivi dello studio, l'applicazione prevista, le motivazioni per le quali lo studio è stato indotto, il pubblico cui è rivolto l'elaborato e se i risultati sono destinati o meno ad asserzioni comparative che vogliono essere divulgate. Tali elementi devono essere chiaramente elencati e stabiliti senza dar spazio ad ambiguità interpretative.

Nel definire il campo di applicazione è necessario tener conto di diverse considerazioni e precisazioni che caratterizzano lo studio che si sta compiendo.

Potrebbe capitare che l'obiettivo e il campo di applicazione vadano modificati in corso d'opera a causa d'impedimenti non previsti, limitazioni o informazioni aggiuntive che si sono rese disponibili a posteriori. In questo caso eventuali modifiche dovrebbero essere opportunamente documentate.

Molti sono i punti che andrebbero sviluppati per eseguire una scrupolosa analisi LCA seguendo le direttive date dalla normativa:

- Il sistema dei prodotti allo studio
- Le funzioni del sistema di prodotti
- L'unità funzionale
- I confini del sistema
- Le procedure di allocazione
- La metodologia della LCIA e i tipi d'impatto
- L'interpretazione da utilizzare
- I requisiti dei dati

- Le ipotesi
- Le scelte dei valori e gli elementi opzionali
- Le limitazioni
- I requisiti di qualità dei dati
- Il tipo di riesame critico, se presente
- Il tipo e il formato del rapporto richiesto per lo studio

In realtà solamente alcuni vengono elencati e dettagliatamente esplicitati all'inizio dello studio, altri vengono rivelati solo in corso d'opera.

Il sistema di prodotti allo studio

Prima di tutto è opportuno definire il sistema in esame, convenientemente suddiviso in "operazioni unitarie" in modo da poter essere più facilmente ricostruito: ognuna di esse riceve gli input da operazioni a monte e offre gli output ad operazioni a valle.

Ogni operazione unitaria è definita "eco-bilancio" in modo da poterla distinguere dal sistema globale: la LCA è perciò un insieme di eco-bilanci fra loro collegati.

La determinazione dei sottoinsiemi è legata alla loro funzione nell'insieme del processo, al grado di dettaglio che si ottiene con le informazioni disponibili e ai limiti di tempo imposti per terminare il progetto.

Le funzioni del sistema prodotto

Rappresenta la necessità di definire caratteristiche e prestazione del sistema in analisi.

L'unità funzionale

L'unità funzionale deve essere coerente con l'obiettivo e il campo di applicazione e serve come riferimento per normalizzare tutti i flussi in ingresso e in uscita dai confini del sistema indicati. Nell'ambito di uno studio LCA essa permette di confrontare sistemi differenti, ma potenzialmente equivalenti. Rappresenta, infatti, l'unità di riferimento rispetto alla quale vanno normalizzati tutti i flussi in ingresso e in uscita dai confini del sistema indicati. La norma UNI EN ISO 14044 definisce l'unità funzionale come "prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento".

I confini del sistema e le limitazioni

Per effettuare una corretta analisi LCA è importante definire i confini del sistema e cioè "l'insieme di criteri che specifica quali processi unitari fanno parte di un sistema prodotto" così come riportato nelle normative di riferimento [8].

E' utile descrivere il sistema tramite un diagramma di flusso che identifica i processi unitari e le loro interrelazioni.

Generalmente quando si fa un'analisi LCA si cerca di definire un criterio di cut-off che permette di eliminare gli elementi poco influenti sull'analisi. Si può scegliere un criterio di:

- Massa: non considerare gli elementi la cui massa totale sia inferiore ad esempio all'1% della massa totale;
- Energia: non considerare i flussi di energia con valore inferiore all'1% dell'energia cumulativa in ingresso;

- Rilevanza ambientale: eliminare quelle produzioni il cui impatto ambientale risulta inferiore all'1% dell'impatto totale.

Le procedure di allocazione

Qualora il carico energetico fosse connesso a più processi produttivi, è opportuno eseguire la ripartizione dei flussi di materia ed energia in ingresso e in uscita dai processi coinvolti. Bisogna perciò specificare a quali elementi è stato applicato il criterio di allocazione e in quale modo.

I requisiti dei dati e della qualità dei dati

S'identifica con precisione il tipo di dati selezionati per la LCA in funzione dell'obiettivo e del campo di applicazione, la raccolta e la provenienza dei dati utilizzati per lo studio, il grado di precisione, cioè il livello di qualità dei dati (ossia se i dati sono forniti direttamente dal produttore, assunti, presi da banche dati o sono valori medi), la completezza e la fonte, la copertura temporale, geografica e tecnologica.

Le ipotesi

In alcuni casi non è possibile avere dei valori di riferimento ben precisi, oppure i dati forniti sono parziali o insufficienti rispetto all'obiettivo preposto. In uno studio LCA però tutto deve essere giustificato e le scelte fatte devono essere motivate; nel caso alcuni dati siano incompleti, è doveroso formulare delle ipotesi per rendere chiaro il quadro in esame.

La metodologia della LCIA e i tipi d'impatto

E' opportuno definire le categorie d'impatto, gli indicatori di categoria e i modelli di caratterizzazione che sono inclusi nella LCA.

Il tipo di riesame critico, se presente

Tale punto deve essere precisato nel campo di applicazione, con riferimento alla necessità o no di eseguire un riesame critico, come condurlo, di quale tipo deve essere e chi deve eseguirlo.

2.1.2 Analisi d'inventario

L'analisi di Inventario è detta anche *Life Cycle Inventory*, LCI; comprende la raccolta dati e i metodi di calcolo che permettono di quantificare i dati in ingresso e uscita da un sistema prodotto. Il procedimento è iterativo poiché procedendo con la raccolta dei dati si aumenta la conoscenza del sistema e possono rendersi necessarie modifiche sulla procedura di raccolta, si possono identificare nuovi requisiti o limitazioni ai dati stessi.

L'analisi d'inventario deve essere la più realistica e veritiera possibile: a tale scopo la modalità di raccolta e l'attendibilità dei dati sono indispensabili.

Si rende necessario anche qui il diagramma di flusso del sistema, che riporta i processi unitari e le loro interrelazioni: il modello di tipo analitico deve rappresentare il più fedelmente possibile la realtà e gli scambi tra le singole operazioni.

Raccolta dei dati

Utilizzando il modello disegnato come guida, fanno seguito le descrizioni dettagliate di ogni singolo processo o unità di processo che comprende l'elenco di tutti i flussi e i dati ad esso pertinenti, i materiali, le unità di misura, le tecniche di raccolta dei dati e della loro elaborazione.

I dati ottenuti possono essere stati recuperati direttamente, allora si parla di *primary data*, oppure possono essere stati ricavati dalla letteratura o da banche dati pertinenti, in questo caso si parla di *secondary data*. A tale proposito molti software utilizzando banche dati riconosciute a livello internazionale o realizzate da gruppi di ricerca; in altri casi l'origine delle banche dati potrebbe non essere attendibile.

Tale fase termina con la presentazione dei risultati elaborati che possono essere raggruppati nelle seguenti categorie:

1. Materie prime
2. Combustibili primari
3. Risultati energetici
4. Rifiuti solidi
5. Emissioni gassose
6. Emissioni liquide

Per quel che riguarda i "Risultati energetici" bisogna precisare che il consumo globale relativo ad un sistema produttivo o di servizi è chiamato *Gross Energy Requirement* (GER), carico energetico complessivo o energia cumulativa.

Il carico energetico complessivo (GER) comprende i contributi forniti dalla produzione e trasporto del combustibile o "energia indiretta", contenuto energetico del combustibile o "energia diretta", energia impiegata nei trasporti, energia *feedstock*.

L'importanza di questa classificazione sta nel fatto che le voci "energia diretta" e "energia *feedstock*" dipendono dalle tecnologie adoperate dagli operatori nei processi che le utilizzano, (la prima è energia irreversibilmente persa l'altra è invece potenzialmente recuperabile a fine vita), mentre l'energia indiretta dipende dal Paese di provenienza del combustibile derivato e dal mix di fonti primarie che in esso si adopera per generare il combustibile derivato (per esempio l'energia elettrica).

Questi sei parametri rappresentano la base di partenza per la fase successiva della LCA e cioè l'Analisi degli Impatti.

Calcolo dei dati

Tutte le procedure di calcolo utilizzate devono essere documentate e le ipotesi giustificate. E' opportuno utilizzare la composizione reale della produzione soggetta all'analisi, in modo da riflettere con più precisione possibile i vari tipi di risorse consumate. Per esempio, nel considerare la produzione di energia elettrica, bisogna tener conto della composizione delle fonti dalle quali deriva, dell'efficienza di generazione, conversione, trasmissione e delle perdite di distribuzione.

I confini del sistema devono, in questa fase, essere opportunamente revisionati ed essere coerenti con il processo di calcolo effettuato. Anche i flussi di materia, energia, prodotti e co-prodotti devono essere coerenti e riferiti tutti all'unità funzionale definita in partenza.

Allocazione

Una problematica che potrebbe sorgere durante la fase d'inventario è quella dell'allocazione che consiste nell'associare i carichi energetici e ambientali ai vari coprodotti e sottoprodotti di un processo. Ciò significa che lo studio deve identificare i processi condivisi tra più sistemi di prodotto e trattarli secondo il processo di allocazione che prevede di:

- Evitare l'allocazione, se possibile, dividendo il processo unitario in più sottoprocessi, oppure ampliando il sistema dei prodotti per includere funzioni aggiuntive;
- Ripartire gli elementi in ingresso e in uscita tra i suoi differenti prodotti, o funzioni, utilizzando le proprietà fisiche (massa, volume, energia) come termine di riferimento;
- Se l'allocazione fin qui descritta non fosse opportuna, si deve passare alla ripartizione degli elementi seguendo altri tipi di proprietà, ad esempio di carattere economico.

Alcuni elementi in uscita possono essere considerati come rifiuti o coprodotti: anche in questo caso si deve rimanere coerenti con il procedimento di allocazione.

Per il riciclo o riutilizzo si possono applicare due tipi di approcci:

1. Allocazione a ciclo chiuso: applicata a prodotti a ciclo chiuso. Il materiale da avviare al riciclo rientra in circolo nel medesimo processo che l'ha generato sostituendo i materiali vergini in ingresso, o se non c'è cambiamento di proprietà nel materiale;
2. Allocazione a ciclo aperto: applicata a prodotti a ciclo aperto. Il materiale scartato o giunto a fine vita rientra in circolo in un processo diverso da quello iniziale coinvolgendo un cambiamento delle sue proprietà.

Il "fine vita"

Un opportuno studio di ciclo di vita non può prescindere dalla valutazione delle ricadute ambientali legata alla gestione *dell'"end of life"* dei materiali utilizzati nel processo.

Quando un bene ha terminato la sua vita utile, ci sono tre strade che si possono seguire:

1. Il recupero di materia, distinto tra riciclo e riuso. Il primo processo permette di riutilizzare il materiale, dopo un trattamento opportuno, per realizzare il medesimo prodotto o un altro. Il secondo prevede il riutilizzo dello stesso dopo un'eventuale rivitalizzazione;
2. Il recupero di energia: il materiale è utilizzato come combustibile in un termovalorizzatore,
3. Lo smaltimento in discarica.

Il trattamento, la movimentazione e il trasporto che coinvolgono questi prodotti o scarti aumentano i consumi energetici, ma allo stesso tempo concorrono alla diminuzione del carico ambientale legato alla diminuzione dell'estrazione di materiali vergini, all'evitata messa in discarica del materiale o alla produzione di energia elettrica.

Il risultato di questo approccio che tiene conto del "fine vita", permette di quantificare gli impatti associabili al processo, ma anche i benefici legati agli eventuali recuperi.

2.1.3 Analisi degli impatti

La fase di analisi e valutazione degli impatti è denominata LCIA (*Life Cycle Impact Assessment*) e consiste nell'elaborare i risultati ottenuti dall'Analisi di Inventario per comprendere gli effetti ambientali associati al sistema. L'obiettivo che ci si pone in questa fase è di quantificare l'entità delle modificazioni ambientali generate dall'attività produttiva, conseguenti al rilascio di sostanze inquinanti nell'ambiente e al consumo di risorse. La fase della LCIA include la raccolta dei risultati negli indicatori delle varie categorie d'impatto, che nel loro insieme rappresentano il profilo LCIA per il sistema prodotto.

Tale fase deve tener conto dell'obiettivo proposto, del campo di applicazione e dell'unità funzionale definiti nello studio LCA. E' necessario definire e selezionare accuratamente le categorie d'impatto e gli indicatori di categoria in modo che siano coerenti con il contesto ambientale di riferimento in cui il sistema prodotto è inserito.

I risultati derivanti dall'Analisi di Inventario devono essere convertiti negli opportuni indicatori ambientali: le categorie d'impatto devono corrispondere a quelle accettate a livello internazionale e devono "rappresentare gli impatti aggregati degli elementi in ingresso e in uscita del sistema dei prodotti sulle finalità di categoria attraverso gli indicatori di categoria" [9].

Esse sono definite secondo principi fondamentali che tengono conto dell'ecologia legata all'ecosistema e alla popolazione, della salute e sicurezza dell'uomo, dell'esaurimento e consumo di risorse e energia, dei riflessi sociali tra cui l'impatto su tutte le attività umane che vengono a contatto con il sistema analizzato.

Basandoci su questi principi sono stati determinati specifici effetti caratterizzanti le categorie d'impatto, così definite:

- Effetto Serra
- Assottigliamento della fascia di Ozono
- Acidificazione
- Eutrofizzazione
- Formazione di Smog fotochimico
- Tossicità per l'uomo e per l'ambiente
- Consumo di risorse non rinnovabili

A ogni effetto corrisponde una diversa sfera d'influenza che può essere globale, regionale o locale.

Si classificano quindi i risultati della fase d'inventario nelle categorie d'impatto considerate e si caratterizzano i vari processi coinvolti nell'analisi in base agli indicatori scelti.

Effetto serra, GWP

L'effetto serra è un fenomeno del tutto naturale indispensabile per la vita sulla Terra; garantisce una temperatura superficiale vivibile al nostro pianeta che senza tale fenomeno sarebbe molto più freddo di circa 30°C rispetto alla temperatura attuale.

La Terra diffonde quasi la stessa quantità di calore che riceve, mantenendo in questo modo una temperatura costante. La quantità di radiazione terrestre che fuoriesce nello spazio è ridotta da diversi gas presenti in atmosfera che assorbono i raggi infrarossi.

Una concentrazione crescente di questi gas sta portando a un riscaldamento globale, come conseguenza di un aumento dell'effetto serra.

I gas presenti in atmosfera e maggiormente responsabili di questo surriscaldamento globale sono il vapor acqueo (H_2O), l'anidride carbonica (CO_2), l'ozono (O_3) e il metano (CH_4), l'ossido nitrico (N_2O) e i clorofluorocarburi (CFC e HCFC).

L'indice caratteristico dell'effetto serra è il GWP (*Global Warming Potential*) la cui sostanza di riferimento è la CO_2 cui è attribuito valore unitario ($GWP = 1$). Ogni sostanza è esprimibile in termini di kg di CO_2 equivalenti: ciò rappresenta la misura del potenziale contributo che una sostanza arreca all'effetto serra rispetto a quello provocato dallo stesso peso di anidride carbonica. Ogni gas serra, infatti, presenta un potenziale di riscaldamento globale in base alla sua capacità di assorbimento delle radiazioni e del tempo di permanenza nell'atmosfera.

Naturalmente anche l'energia elettrica utilizzata per le varie trasformazioni di materiali o produzioni varie contribuisce all'effetto serra: per produrre energia elettrica da combustibili fossili si rilascia in atmosfera una certa quantità di anidride carbonica, con ulteriore impatto sull'effetto serra.

Vengono di seguito riportati in Tabella 2.1 i valori di riferimento del GWP per varie sostanze, così come definiti dall'IPCC. [10]

Risultato d'inventario		Fattore di caratterizzazione
CO ₂	Anidride carbonica	1
CH ₄	Metano	21
N ₂ O	Protossido d'azoto	310
CFC11	CFC13	3800
CO	Monossido di carbonio	2
HC	Idrocarburi	3
CHCl ₃	Cloroformio	4
SF ₆	Esafluoruro di zolfo	23900
CH ₂ Cl ₂	Diclorometano	9

Tabella 2.1 - Fattori di caratterizzazione del GWP

L'effetto GWP viene valutato per diversi periodi di esposizione, chiamati "tempi orizzonte", che comunemente sono di 100, 200 o 500 anni.

Normalmente il "tempo orizzonte" di riferimento è di 100 anni.

Acidificazione, AP

L'acidificazione riguarda la deposizione di alcune sostanze e dei rispettivi acidi sul suolo e in acqua, causando l'alterazione del PH naturale.

Le principali cause dell'acidificazione sono gli ossidi di zolfo (SO_x), gli ossidi di azoto (NO_x) sia naturali, cioè rilasciati da microrganismi, emissioni vulcaniche e disgregamento di rocce, sia artificiali e cioè generati dalle attività umane di estrazione, lavorazione dei combustibili fossili che li riversano alle alte temperature, nonché l'ammoniaca (NH_3).

La maggior parte dei composti di zolfo si deposita entro 2 - 4 giorni con maggiore concentrazione vicino al luogo di emissione, come conseguenza a piogge oppure in fase secca con sedimentazione diretta.

L'acidificazione causa seri danni alle foreste, specialmente a quelle caratterizzate da terreno sabbioso o roccioso, mentre i terreni argillosi risentono meno di tale fenomeno: può danneggiare anche gli ecosistemi fluviali e lagunari provocando addirittura la morte dei pesci. Inoltre l'acidificazione del terreno contribuisce alla progressiva aridità del suolo e fa sì che elementi chimici come l'alluminio si mobilizzino: le foreste non muoiono a causa dell'acidificazione, ma proprio per le sostanze tossiche mobilizzate.

L'indicatore di categoria è l'AP (*Acidification Potential*) espresso in termini di kg di SO₂: la massa di ogni sostanza che può provocare acidificazione deve essere moltiplicata per il fattore di caratterizzazione che esprime il suo potenziale d'inquinamento rispetto ai kg equivalenti di SO₂ cui è attribuito AP = 1.

Nella Tabella 2.2 sono presentate le sostanze che causano acidificazione con i rispettivi fattori di caratterizzazione secondo uno studio della *Danish Technical University* [11].

Risultato d'inventario		Fattore di caratterizzazione
SO ₂	Anidride solforosa	1
SO ₃	Anidride solforica	0,80
NO ₂	Biossido d'azoto	0,70
NO	Monossido d'azoto	1,07
NO _x	Ossido di azoto	0,70
HCl	Acido cloridrico	0,88
H ₂ SO ₄	Acido solforico	0,65
HF	Acido fluoridrico	1,60
H ₂ S	Acido solfidrico	1,88
NH ₃	Ammoniaca	1,88

Tabella 2.2 - Fattori di caratterizzazione dell'AP

L'acidificazione è un tipico problema continentale.

Eutrofizzazione, NP

Il potenziale di Eutrofizzazione è l'NP (*Nutrication Potential*) valuta l'aumento della concentrazione di sostanze nutritive nel suolo e nell'acqua. L'NP contribuisce alla formazione di biomasse; è ricavato in modo analogo al GWP o all'AP ed espresso in kg di nitrato NO₃⁻.

A concorrere al fenomeno dell'eutrofizzazione ci pensano i composti a base di fosforo e azoto provenienti soprattutto dall'uso agricolo dei fertilizzanti e dagli scarichi industriali e urbani. Numerose sostanze che entrano nell'ambiente a causa delle attività umane si comportano come fertilizzanti, stimolando cioè la crescita delle piante: troppi fertilizzanti causano un incremento di alghe in fiumi e laghi che producono a loro volta una carenza di ossigeno nell'acqua e una conseguente moria dei pesci.

L'eutrofizzazione ha molto in comune con l'acidificazione: le sostanze acide agiscono anche come nutrienti per le piante e sono normalmente i principali ingredienti dei fertilizzanti artificiali.

Questo è un problema a scala regionale - locale: effetti locali dovuti alle particolari caratteristiche delle acque conducono a dei risultati che devono essere valutati caso per caso.

E' anche qui la *Danish Technical University* [11] che fornisce i fattori di caratterizzazione che permettono di valutare i kg equivalenti di NO_3^- di varie sostanze, visibili in Tabella 2.3.

Risultati d'inventario		Fattore di caratterizzazione
NO3-	Ione nitrato	1
N2O	Protossido di azoto	2,82
NOx	Ossidi di azoto	2,07
NH3	Ammoniaca	3,64
CN-	Ione cianuro	2,38
Azoto totale		4,43
PO4---	Ione fosforoso	10,45
P2O7--	Ione fosforico	11,41

Tabella 2.3 - Fattori di caratterizzazione dell'NP

Formazione di ossidi fotochimici, POCP

Lo smog fotochimico è un particolare tipo d'inquinamento dell'aria che si manifesta in certi periodi dell'anno, prevalentemente in estate durante il traffico intenso mattutino, quando le emissioni degli scarichi degli autoveicoli contribuiscono ad aumentare la presenza in atmosfera d'idrocarburi (C_xH_y) e ossidi di azoto (NO_x). La luce ultravioletta induce una complessa serie di reazioni fotochimiche che portano alla formazione di ozono troposferico (O_3) che a sua volta, reagendo con l'ossido nitrico (NO), produce NO_2 e O_2 . Queste tre reazioni costituiscono il ciclo fotostazionario dell'ozono e mantengono la concentrazione di quest'ultimo ad un livello stabile e non inquinante grazie ad un equilibrio dinamico. Il ciclo fotostazionario avviene solamente alla presenza della luce del sole: di notte l'ozono viene, infatti, consumato nel corso di altri processi.

Per azione dei raggi UV, il radicale ossidrilico (OH), derivante da reazioni che coinvolgono l'ozono, reagisce con gli idrocarburi volatili (VOC) e gli ossidi di azoto (NO_x) presenti nelle emissioni di scarico degli autoveicoli, generando sostanze come le aldeidi, i nitrati organici e gli idrocarburi ossidati (RO_x).

Gli RO_x generano a loro volta NO_x senza il coinvolgimento dell'ozono comportando un aumento della sua concentrazione fino a livelli considerati tossici. Parte del biossido di azoto può reagire con vari idrocarburi volatili per formare composti chimici tossici come il perossiacetil nitrato (PAN), perossibenzoil nitrato (PBN), aldeidi e centinaia di altre sostanze.

Il risultato di tutte queste reazioni consiste in quello che è definito smog fotochimico: sono stati ricavati dei potenziali chiamati POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*) per ognuna delle sostanze che partecipano alla formazione degli ossidi coinvolti.

Lo smog fotochimico è un problema di rilevanza regionale, influenzato da variabili atmosferiche locali, è tossico per l'uomo, ma anche per animali e i vegetali; può inoltre degradare molti materiali grazie al suo forte potere ossidante e inoltre man mano che

compare, la visibilità diminuisce per l'effetto di deviazione della luce provocato dagli aerosol che si formano.

La sostanza di riferimento è l'etilene C₂H₄: si ha quindi un indicatore in kg di etilene equivalenti ottenuto moltiplicando la massa della sostanza per il fattore di caratterizzazione.

La Tabella 2.4 riporta a fattori caratteristici per la determinazione dell'OPCC [11].

Risultato d'inventario	Fattore di caratterizzazione
Alcani	0,4 ± 0,1
Metano	0,007
Alcheni	0,3 ÷ 1,1
Aldeidi	0,5 ± 0,4
Alcoli	0,3 ± 0,1
Eteri	0,4 ± 0,2
Alchini (acetilene)	0,2 ÷ 0,4
Aromatici	0,3 ÷ 1,1
Esteri	0,2 ± 0,1
Cloroalcani	0,2 ÷ 0,4
Monossido di carbonio	0,03 - 0,04

Tabella 2.4 - Fattori di caratterizzazione del POCP

Assottigliamento della fascia di ozono stratosferico, ODP

Oltre a luce e calore, il Sole irradia la Terra anche con raggi UV e raggi X che sarebbero estremamente pericolosi se la Terra non disponesse di uno strato di ozono (O₃) presente nell'atmosfera e particolarmente significativo ad un'altezza di 12 - 40 km sopra la superficie terrestre, in corrispondenza della stratosfera. L'ozono assorbe le forme di radiazioni solari più pericolose e la sua concentrazione varia nel tempo e nello spazio, a causa di processi di formazione, distruzione e trasporto.

Alcune specie chimiche inquinanti presenti in atmosfera, quali NO, OH, o i composti di cloro (Cl), fluoro (F) e bromo (Br) anche se presenti in quantità modesta nell'atmosfera, attivano cicli largamente distruttivi dell'ozono, diminuendone la concentrazione atmosferica e quindi la sua azione protettiva nei confronti della radiazione ultravioletta.

L'impovertimento dell'ozono stratosferico è un problema di rilevanza globale, indipendentemente dalla provenienza delle emissioni.

L'indicatore di categoria in questo caso è l'ODP (*Ozone Depletion Potential*) esprimibile in kg di CFC₁₁ equivalente per kg di relativa sostanza. Anche in questo caso i valori della Tabella 2.5 derivano dalla *Danish Technical University* [11].

Risultati d'inventario	Fattore di caratterizzazione	
CFC13	CFC11	1
CF2Cl2	CFC12	0,82
CCl4	Tetraclorometano	1,20
CH3Cl	Cloruro di metile	0,02
CH3Br	Bromuro di metile	0,64

Tabella 2.5 - Fattori di caratterizzazione dell'ODP

Tossicità per l'uomo e l'ambiente

La tossicità è fattore molto difficile da valutare poiché è legata alla caratteristica di localizzazione dell'impatto, in quanto il danno dipende sia dalle modalità di esposizione, sia dalla naturale predisposizione dell'organismo interessato. A causa di queste difficoltà non è ancora stata definita una metodologia valida per la valutazione della tossicità umana.

Consumo di risorse non rinnovabili

Il consumo di risorse non rinnovabili è espresso in MJ o in kg di materiale consumato. Il concetto di risorsa non rinnovabile è direttamente collegato al concetto di riserva e può essere utile usare come indicatore il consumo attuale su base annua, rapportato alle riserve totali accertate.

2.1.4 Interpretazione e miglioramento

La fase d'interpretazione dei risultati ottenuti dall'analisi LCA è strettamente legata al riesame critico "una tecnica per verificare se uno studio di LCA soddisfi i requisiti per ciò che concerne la metodologia, i dati, l'interpretazione e la comunicazione e se sia coerente con i principi" così come definito dalla norma ISO 14040:2006. Rappresenta in sintesi la valutazione, successiva alla stesura della LCA, della congruenza tra l'analisi d'inventario e i risultati ottenuti.

Il riesame critico deve garantire che:

- I metodi usati per eseguire la LCA siano coerenti con le norme di riferimento e validi scientificamente;
- I dati utilizzati siano appropriati in funzione dell'obiettivo dello studio;
- Le interpretazioni siano coerenti con le limitazioni e l'obiettivo dello studio;
- La reportistica sullo studio sia chiara e trasparente.

Il tipo di riesame critico e il suo campo applicativo devono essere definiti nel campo di applicazione della LCA. Esso può essere compiuto da un esperto interno all'Azienda oppure da un comitato combinato di parti interessate che facciano eventuali valutazioni critiche onde evitare spiacenti equivoci, qualora il fine ultimo dell'analisi sia di formulare un'asserzione comparativa.

3. LCA APPLICATA ALLA MICROTURBINA EOLICA IN ESAME

3.1 LA "FREETREE"



Figura 3.1 - La FreeTree

3.1.1 Il sistema analizzato

La FreeTree, visibile in Figura 3.1, è una microturbina ad asse verticale ideata dall'Azienda Linz Electric S.p.A.; ha una potenza di picco di 1,2 kW e si colloca nella fetta del mercato elettrico che riguarda le piccole produzioni da fonti rinnovabili dell'ambito domestico e civile che contribuiscono alla riduzione del costo della bolletta e alla diminuzione dell'immissione di sostanze inquinanti in atmosfera.

La velocità di cut-in è di 3,4 m/s, mentre la potenza di picco è raggiunta a 14 m/s, quando la turbina arriva al massimo numero di giri, 375 rpm; qualora dovesse raggiungere i 400 rpm, la frenatura si attiverebbe automaticamente per evitare cedimenti strutturali e la fuga della turbina.

In Figura 3.2 si può vedere la curva d'interpolazione dei dati dispersi della potenza della FreeTree, acquisiti dalle rilevazioni fatte dei dati sui 10 s del sito in Germania. Naturalmente, i dati ottenibili dipendono fortemente dalle condizioni climatiche esterne, dalla temperatura, umidità, stagionalità che influenza la velocità del vento e l'intensità.

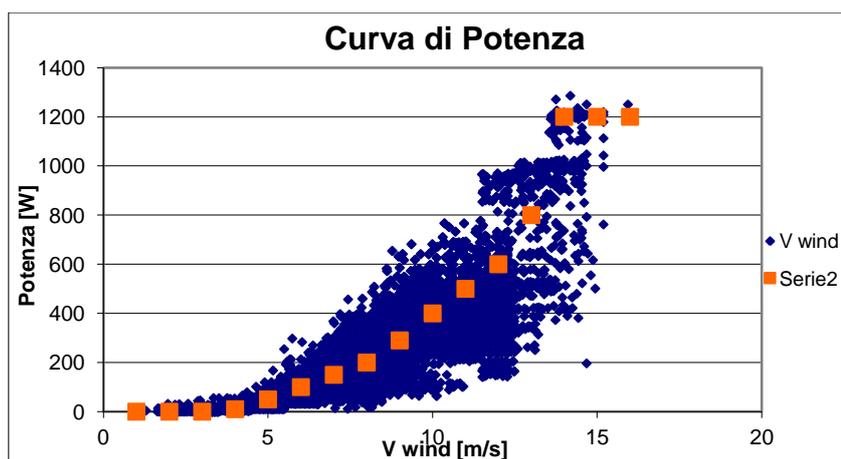


Figura 3.2 - Curva di Potenza della FreeTree

Il mercato delle micro e mini turbine eoliche è ancora giovane e dinamico: molte sono le nuove soluzioni tecnologiche equivalenti alla FreeTree proposte soprattutto da ditte europee che stanno conquistando anche le realtà oltreoceano. Basti pensare che la soluzione in analisi è l'ultima adottata dal gruppo Linz Electric S.p.A. che solo l'anno scorso presentava una macchina più pesante e con componentistica leggermente diversa dall'attuale: le prestazioni risultano in miglioramento, mentre il carico energetico e di inquinamento legato alla produzione della stessa è sicuramente diminuito essendo stato alleggerito il peso totale della struttura eliminando alcune componenti e sgravandone altre. Il progetto strutturale preso in esame risale a fine 2012.

Bisogna precisare che l'idea, il progetto (forma, peso, componentistica e la struttura in generale) e tutte le caratteristiche dei pezzi che formano la FreeTree rispondono alle direttive di Linz Electric S.p.A.; il generatore è l'unico pezzo assemblato presso lo stabilimento aziendale, mentre la componentistica interna ed esterna viene da commerciali specializzati.

La progettazione gioca un ruolo fondamentale sulle prestazioni della macchina e per questo deve essere molto accurata: per esempio, i magneti hanno una forma appositamente studiata per permettere al generatore di avere un valore ridotto della coppia di spunto tale da favorire l'avviamento della turbina anche a basse velocità del vento (vel cut-in 3,4 m/s). In questo modo si garantisce l'avviamento autonomo della macchina evitando l'utilizzo di un generatore ausiliario per lo spunto iniziale. Inoltre, la particolare conformazione studiata per le pale permette alla FreeTree di ricevere il vento da tutte le direzioni e avviarsi indipendentemente da queste.

Il tempo di vita ipotizzato per l'aerogeneratore è di 10 anni: questo valore è stato scelto come limite inferiore di durata della macchina, che in realtà le previsioni danno a 12-15 anni.

In ogni caso la variazione di questo dato è un vantaggio in termini di aumentata producibilità elettrica rispetto a quella prevista e diminuzione delle sostanze inquinanti associabili a ogni kWh prodotto dall'aerogeneratore.

Anche la scelta del sito di collocamento dell'aerogeneratore gioca un ruolo fondamentale sulle analisi che in seguito saranno proposte: Linz Electric S.p.A. possiede diversi campi prova, soprattutto in Italia ma anche in Germania, per il recupero dei dati utili all'analisi della producibilità annua e necessari al calcolo delle emissioni legate a ogni kWh di energia prodotta dalla turbina eolica e alla valutazione dell' *Energy Payback Time*.

La variabilità dei dati da zona a zona incide fortemente sui risultati: una producibilità di 34.000 kWh/anno è molto più conveniente e redditizia di una producibilità di 270 kWh/anno, caso in cui l'installazione dell'aerogeneratore potrebbe essere non conveniente.

Per rendere semplice e diretta la comprensione degli impatti della FreeTree sarebbe meglio considerare la realizzazione della turbina eolica nel suo complesso, per svincolarsi dalla dipendenza del sito di locazione dell'aerogeneratore. In realtà, però, tutte le analisi LCA presentano i risultati in funzione del kWh della producibilità energetica media annua.

Per questo motivo inizialmente i risultati saranno presentati utilizzando come unità funzionale la FreeTree, mentre in seguito si approfondiranno tutti i casi di studio per le località di cui si dispone dei dati di producibilità del vento, assumendo come unità funzionale, cui far risalire tutti i risultati degli impatti, il kWh: questo permette la comparazione della FreeTree con altre tipologie di macchine affini e non.

La Figura 3.3 mostra il diagramma di flusso che si è usato come riferimento per il progetto di studio.

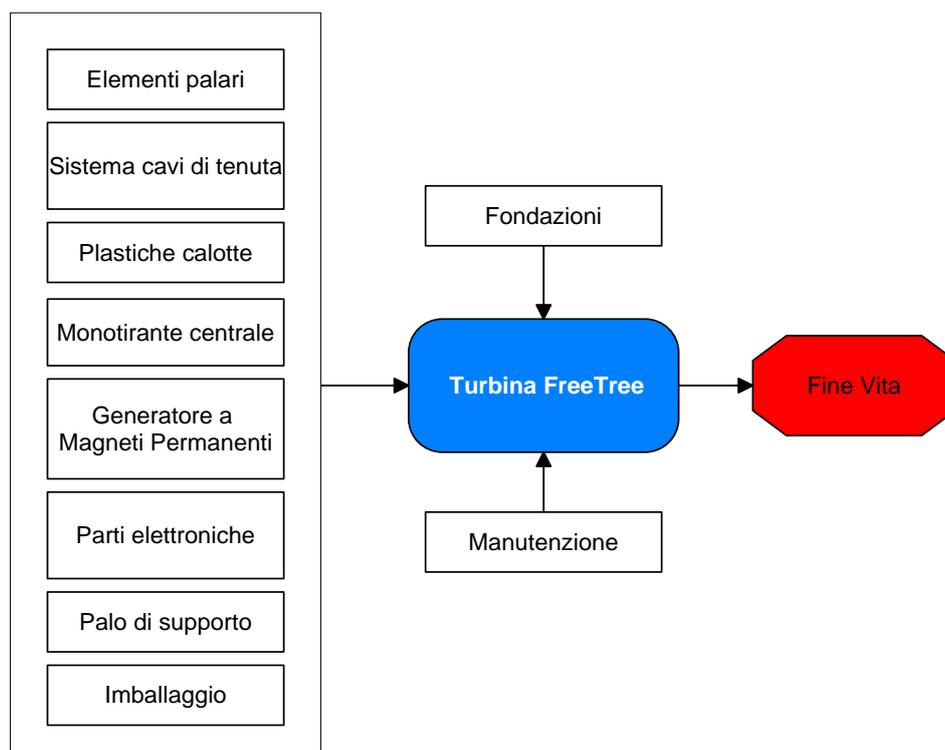


Figura 3.3 - Diagramma di flusso su cui si basa l'LCA della FreeTree

3.1.2 Il software Boustead Model

Il programma Boustead Model è un software progettato dalla società inglese Boustead Consulting Ltd. Fino a pochi anni fa rappresentava il programma più diffuso tra le Aziende per eseguire analisi LCA. Il data base del programma non viene più aggiornato: con l'interesse sempre crescente delle Aziende nei confronti dell'inquinamento legato

alla produzione di un determinato bene, sul mercato si sono affacciati programmi sempre più corposi e dettagliati, togliendo il primato al Boustead Model. In ogni caso esso è molto intuitivo e funzionale, ottimo per i primi approcci al mondo della LCA.

Il software è composto da una banca dati, una serie di programmi per la sua gestione e un menù a tendina per indirizzare i comandi all'utente durante la modellizzazione. Esso permette di redigere un'analisi del ciclo di vita secondo una metodologia caratterizzata dall'impostazione di singoli processi concatenati tra loro che costituiscono la riproduzione della filiera produttiva analizzata; fa riferimento a una banca dati cospicua che presenta oltre 5000 operazioni unitarie che individuano singole fasi del sistema in esame. Un'*operazione unitaria* non è altro che "la più piccola unità in cui un sistema produttivo può essere suddiviso e per la quale sono disponibili dati". [6]

L'idea di base è quella di realizzare un modello analogico del processo da analizzare che sia il più vicino possibile alla realtà, in cui sia possibile identificare le operazioni unitarie che lo compongono: ognuna di esse riceve i propri *input* dalle operazioni unitarie a monte e i suoi *output* vanno ad alimentare la filiera produttiva a valle.

Inoltre, possono rappresentare l'emissione in aria di una singola sostanza o l'intera produzione di un particolare materiale; possono infine essere singolarmente valutate e utilizzate per la realizzazione di ecobilanci.

La tecnica di modellizzazione è legata alla realizzazione delle *input table*, ossia delle tabelle contenenti le singole operazioni unitarie di *input* e/o *output* che analizzano un determinato processo della filiera in analisi. Ogni processo produttivo viene suddiviso in più *input table* tramite un elenco di tutte le operazioni unitarie che lo compongono; al loro interno sono poi elencate tutte le operazioni di produzione che a loro volta contengono informazioni legate a emissioni e consumi energetici, tutte richiamate dal codice numerico associato.

Tale approccio è molto semplice perché permette di:

1. Stabilire e collegare operazioni in modo logicamente semplice, permettendo che ogni singola variazione effettuata rientri automaticamente nel calcolo del processo;
2. Analizzare e inserire operazioni complicate quali il riciclo.

Per iniziare l'analisi è importante generare un diagramma di flusso abbastanza dettagliato che evidenzi in modo intuitivo il processo analizzato, visualizzando la concatenazione dei singoli flussi di materia.

Bisogna fare attenzione all'unità di misura utilizzata: deve essere resa compatibile con quella di riferimento nel programma che altro non richiede se non le unità di misura del SI; qualora sia necessario, ci si può avvalere del programma interno *convert units*. I dati devono essere normalizzati in funzione dell'*unità funzionale* considerata, che può essere identificata ad esempio nel singolo oggetto esaminato o in un kWh di energia elettrica in uscita. Infine, è importante identificare i codici numerici degli *input* e degli *output* per rispettare i legami delle singole operazioni unitarie all'interno del modello.

Il software dispone poi di un'intera sezione dedicata alla considerazione delle emissioni e dei consumi di trasporto e che vanno espressi in *vehicle*km*.

Per comprendere meglio il lavoro realizzato con Boustead Model, è necessario esplicitare le tipologie dei *data set* che sono state utilizzate:

- *Material Processing (Mat. proc. core)* contiene archivi di dati di produzione di un'ampia varietà di processi e trasporti;

- *Fuel production (Fuel prod. Core)* contiene i dati di produzione media di combustibile ed energia elettrica di molti Stati del mondo;
- *Stand Alone data (SA data)* riporta i valori della produzione media di un certo numero di prodotti basati su un elevato numero di stabilimenti per la fabbricazione su larga scala;
- *Solid waste* è una lista empirica delle principali categorie di rifiuti solidi che possono essere utilizzate per identificare gli operatori di processo, permette cioè di identificare i rifiuti e la loro destinazione a termine della vita utile;
- *EU solid waste* è una lista che consente la valutazione delle emissioni dei rifiuti solidi secondo le direttive dell'Unione Europea definite nel Gennaio 2001, categorizzando i rifiuti solidi in funzione a come possono essere lavorati e riutilizzati per altri scopi.

3.1.3 Il software SimaPro

SimaPro è oggi uno dei software più diffusi per effettuare analisi LCA. È prodotto dalla Prè Consultant, una ditta olandese che dagli inizi degli anni '90 si è interessata a questo tipo di studio e si è dedicata alla realizzazione di un software adatto a fare analisi del contributo che danno elementi, materiali e processi, all'impatto ambientale valutato sotto molti aspetti.

Attualmente SimaPro è usato in oltre 60 Paesi al mondo ed in particolar modo da grandi industrie, società di consulenza e università per condurre accurate valutazioni sulle prestazioni ambientali ed energetiche di vari prodotti, processi e servizi. In realtà permette anche di effettuare valutazioni di carattere economico, che per il momento sono circoscritte alla sola realtà americana da cui derivano i dati dei database economici. Il software ha un'ottima flessibilità di utilizzo e di analisi in quanto dispone di vari parametri di modellizzazione e database continuamente aggiornati.

La versione che è stata utilizzata è l'ultima disponibile sul mercato SimaPro 7.3.3 che riporta al suo interno gli aggiornamenti più recenti.

Questo programma presenta un'interfaccia grafica accattivante e altamente performante che permette di avere una visualizzazione dettagliata di tutti i processi che concorrono alla realizzazione dell'oggetto in esame: infatti si può visualizzare un digramma di flusso con spessore delle frecce di collegamento proporzionali alla rilevanza dell'inquinamento del processo calcolata rispetto alla realizzazione dell'unità di output considerata.

È possibile effettuare un'accurato esame del fine vita degli elementi, avendo a disposizione un numero elevato di scenari per il trattamento del materiale di rifiuto.

A questo proposito è molto interessante anche la possibilità di ricostruire la filiera produttiva tramite *step* che possono essere valutati singolarmente, così da poter facilmente confrontare ipotesi sull'utilizzo di vari materiali per una stessa produzione e svariati modelli di fine vita, in modo semplice, diretto e intuitivo.

Riassumendo tutte le caratteristiche principali di questo software, che lo hanno reso così famoso e diffuso per le analisi LCA, si possono citare :

1. L'esistenza di vari pacchetti di SimaPro in relazione all'utilizzo e alle esigenze individuali. Il pacchetto "*SimaPro Compact*" è la versione più semplice che fornisce i risultati più veloci, "*SimaPro Analyst*" è per studi LCA più approfonditi, "*SimaPro Developer*" permette il collegamento anche con software esterni;

2. Un'interfaccia intuitiva con l'utente e conforme alla norma UNI EN ISO 14040;
3. La possibilità di modellizzazione di vari parametri e di definire relazioni non lineari, valutando scenari alternativi e diversificati in relazione all'obiettivo di studio finale;
4. La disponibilità di molte banche dati;
5. Link diretti a Excel e ASP;
6. La possibilità di valutazione degli impatti ad ogni fase del modello,
7. L'analisi d'incertezza tramite il metodo *Monte Carlo Analysis*,
8. La visualizzazione di un albero di processo per l'identificazione di eventuali punti caldi;
9. L'analisi del trattamento dei rifiuti e degli scenari di riciclaggio;
10. L'assegnazione di molteplici processi produttivi.

Inoltre l'essere dotato di data base che comprendono migliaia di processi ben dettagliati e moltissimi materiali collegati ai rispettivi sistemi produttivi, ne fanno uno dei software più apprezzati.

Come già anticipato, le banche dati presenti sono di svariato tipo: da quella americana, a quella svizzera, piuttosto che olandese o tedesca, oppure riferite a caratteristiche generali adatte ad una simulazione su scala globale o europea.

Facendo qualche esempio:

- *Ecoinvent 2.2* è una banca dati del 2010, di origine svizzera, che comprende circa 400 processi nel settore industriale dell'energia, dei trasporti, dei materiali da costruzione, prodotti chimici, prodotti per il lavaggio, carta e cartone, trattamento degli inquinati, agricoltura, sia relativi ad attività svizzere che dell'Europa Occidentale;
- *Industry data v.2.0* è una banca dati del settore industriale che analizza il processo specifico di un prodotto seguendo l'approccio "*from cradle to grave*";
- *ETH-ESU* tratta i dati legati ai combustibili, l'energia elettrica, le materie prime, il trasporto e il trattamento di inquinanti della realtà svizzera, che può anche essere presa come riferimento per la situazione media europea.
- *BUWAL250* è un inventario dei materiali di imballaggio dell'Istituto Packaging svizzero, realizzato da EMPA. Comprende le emissioni derivanti dalla produzione di materie prime, produzione di energia, produzione di semilavorati e materiali ausiliari e i trasporti sulla base del consumo svizzero in funzione delle importazioni ed esportazioni locali. I sistemi energetici sono basati su dati ETH.
- *IDEMAT 2001* è stato sviluppato presso la Delft University of Technology, dipartimento di ingegneria di progettazione industriale, nell'ambito del progetto Idemat. L'attenzione è rivolta alla produzione di materiali e i dati derivano da un'ampia varietà di fonti. Il riciclo di materiale secondario è preso in considerazione in base alla situazione media in Europa occidentale.

Infine è molto interessante osservare la molteplicità di metodologie di analisi degli impatti presenti all'interno del software: questa fase risulta molto importante, ma non sempre la scelta della metodologia adatta è semplice e intuitiva.

In realtà ogni singolo caso di studio necessita di una certa metodologia: si possono ottenere risultati molto differenti tra loro e discrepanze rilevanti, riguardanti la sensibilità rispetto ad alcuni fattori particolari, confrontando analisi degli impatti diverse.

Il programma è già munito di un'interfaccia grafica che realizza automaticamente istogrammi organizzati secondo le categorie di impatto considerate all'interno del metodo di analisi scelto. Oltre a ciò, possono essere visualizzati i valori percentuali e quelli puntuali associabili a ciascun impatto, con la rispettiva unità di misura. Per finire, è possibile anche visualizzare l'elenco dettagliato di tutti i materiali concorrenti alla creazione dell'*output*.

In questo studio LCA utilizzeremo alcuni metodi di calcolo per le varie analisi, qui di seguito elencati.

CED, Cumulative Energy Demand

Analizza dettagliatamente l'energia utilizzata per la produzione del sistema studiato, quella derivante da combustibili fossili, centrali nucleari, idroelettriche, da impianti rinnovabili quali biomassa, eolico e fotovoltaico.

EDP (2008), Environmental Product Declarations

Questo metodo è specifico per la creazione di Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD). Le categorie d'impatto che analizza, sono quelle tradizionali:

- *GWP, Global Warming Potential*
- *AP, Acidification Potential*
- *NP, Nutrification Potential*
- *POCP, Photochemical Ozone Creation Potential*
- *ODP, Ozone Depletion Potential*
- *GCV, Gross Calorific Values*

L'aggiornamento del metodo in conformità con eventuali nuove regole di determinazione e calcolo degli impatti risale a Novembre 2009.

Eco-Indicator 99 (E)

E' un metodo di normalizzazione e pesatura degli effetti ambientali che danneggiano gli ecosistemi e la salute umana su scala europea. La valutazione è eseguita a livello di categoria di danno e il valore dell'eco-indicatore è proporzionale al potenziale impatto ambientale.

Esistono tre diversi "archetipi" di prospettiva di analisi che rappresentano tre modelli concettuali. La versione utilizzata in questo caso è quella contraddistinta dalla lettera *E = Egalitarian* che valuta la prospettiva di danno a lungo termine tenendo conto di tutti i possibili effetti che si possono verificare e che potrebbero portare a catastrofi. Gli altri due "archetipi" si riferiscono a una prospettiva a medio e breve termine, ma non saranno considerate in questo elaborato.

Gli *eco-indicatori* sono dei numeri che esprimono il carico ambientale di un prodotto o di un processo; tengono conto degli effetti tipici che danneggiano l'ecosistema e la salute umana (effetto serra, eutrofizzazione, acidificazione, smog e sostanze tossiche), usando un metodo scientifico che stabilisce opportuni fattori di pesatura, gli *Eco-indicator points*. La loro somma permette di ottenere il valore finale dell'eco-indicatore e confrontare la gravità dei diversi danni normalizzati su una stessa scala di riferimento.

Per ogni categoria d'impatto è elaborata una *Damage Function* che stabilisce la relazione tra impatto e danno provocato.

Ci sono tre *categorie di danno* principali:

- *HH = Human Health*, unità *DALY = Disability-adjusted life year*. Considera i danni alla salute umana, quali malattie, morte prematura, inabilità dovute a cause riconducibili all'ambiente (cambiamenti climatici, radiazioni ionizzanti). *DAILY* è la somma degli anni di vita persi a causa di morte prematura e di quelli persi a causa di disabilità $DAILY = YLL + YLD$
con $YLL = \text{numero decessi per ogni età} \cdot \text{speranza di vita ideale standard}$ (80 anni per gli uomini; 82,5 per le donne)
 $YLD = w \cdot D$
 w fattore di gravità della malattia, compreso tra 0 (completa salute) e 1 (morto)
 D durata della malattia;
- *EQ = Ecosystem Quality*, unità $PDF \cdot m^2 \cdot yr$ = Frazione Potenzialmente Scomparsa di specie vegetali. Considera i cambiamenti climatici nella distribuzione geografica e nell'ampiezza delle popolazioni di specie non umane. Il danno all'ecosistema può essere legato all'eco-tossicità, mentre acidificazione ed eutrofizzazione incidono sulla scomparsa dell'ecosistema;
- *R = Resources*, unità MJ. Considera il surplus di energia necessario in futuro per estrarre risorse minerali e fossili; tiene anche conto dell'esaurimento delle risorse agricole.

Le *categorie d'impatto* analizzate da *Eco-Indicator 99* sono:

- *Carcinogens (DAILY)*: rappresenta il rischio tossicologico e i potenziali impatti delle sostanze chimiche cancerogene rilasciate in aria, acqua e suolo da vari settori (Mg C₂H₃CL eq);
- *Respiratory organics (DAILY)*: rappresenta il rischio per la salute respiratoria di particelle organiche rilasciate nell'aria (kg C₂H₄ eq);
- *Respiratory inorganics (DAILY)*: rappresenta il rischio per la salute respiratoria di particelle inorganiche rilasciate nell'aria (kg PM_{2.5} eq);
- *Climate change (DAILY)*: considera i cambiamenti climatici che non generano gravi danni attualmente, ma che li creeranno in un immediato futuro; tiene ad esempio conto del cambiamento della temperatura terrestre che provoca sia effetti nocivi sia benefici alla salute umana, o dell'effetto serra europeo che influisce in realtà a livello mondiale;
- *Radiation (DAILY)*: esprime i danni causati da radiazioni radioattive;
- *Ozone layer (DAILY)*: analizza il danno provocato dalle radiazioni UV, come risultato di emissioni di sostanze lesive dell'ozono nell'aria;
- *Land use (PDF*m²yr)*: basandosi su osservazioni sul campo, è stata determinata una scala che esprime le diversità delle specie in base alla tipologia di uso del suolo e dimensione dell'area occupata. L'effetto è sia regionale che locale. Il danno è il risultato della combinazione di occupazione e trasformazione del suolo.
- *Ecotoxicity (PAF*m²yr)*: riguarda i danni alla qualità dell'ecosistema a seguito di emissione di sostanze eco-tossiche in aria, acqua e suolo. E' espresso in funzione dei chilogrammi di sostanza emessa;

- *Acidification/Eutrophication (PDF*m2yr)*;
- *Minerals (MJ surplus)*;
- *Fossil Fuel (MJ surplus)*.

CML baseline 2000

E' stato creato nel 2001 da un gruppo di scienziati, sotto la guida del CML (*Center of Environmental Science of Leiden University*), i quali hanno proposto una nuova serie di categorie d'impatto e metodi di caratterizzazione per la fase di valutazione del danno. Questo metodo presenta un'elaborazione dell'approccio a livello di *midpoint* e fornisce una lista di categorie di valutazione dell'impatto raggruppate in:

1. Categorie obbligatorie;
2. Categorie aggiuntive (esistono vari indicatori operativi, ma spesso non vengono inclusi negli studi di LCA);
3. Altre categorie (dove non sono presenti indicatori operativi, perciò impossibili da inserire in studi di LCA).

Per quelle obbligatorie gli indicatori sono stati scelti in base al principio delle migliori prassi disponibili esistenti per la valutazione e riguardano categorie d'impatto a livello di *midpoint*.

Per ciascun indicatore iniziale, i punteggi di normalizzazione sono calcolati per le situazioni di riferimento: il mondo nel 1990, l'Europa nel 1995 (che è il riferimento usato in questo progetto) e i Paesi Bassi nel 1997.

Il risultato normalizzato per una data categoria, riferito a una precisa regione, è ottenuto moltiplicando i fattori di caratterizzazione per le rispettive emissioni. La somma dei prodotti di ogni categoria dà il fattore di normalizzazione.

Il metodo CML tiene conto delle categorie obbligatorie già presenti nella fase dell'LCIA (GWP, ODP, POCP, NP, AP), ma ne propone anche molte altre:

- *Abiotic depletion (kg Sb eq)*: si occupa della protezione della salute umana e di quella dell'ecosistema; l'indicatore è legato all'estrazione di minerali e combustibili fossili introdotti nel ciclo. Il fattore d'impoverimento abiotico (ADF) è determinato per ogni estrazione di minerale e combustibile fossile (kg Antimonio eq / kg di estrazione) sulla base delle riserve concentrate e del tasso di mancato accumulo. L'ambito geografico è riferito alla scala globale.
- *Human toxicity (kg 1,4-DB eq)*: questa categoria riguarda gli effetti di sostanze tossiche per l'ambiente umano; i rischi per la salute dell'esposizione nell'ambiente di lavoro non sono inclusi. I fattori di caratterizzazione, *Human Toxicity Potentials* (HTP) descrivono la vita, l'esposizione e gli effetti delle sostanze tossiche per un orizzonte temporale infinito. Per ogni HTP l'unità di misura è kg 1,4-diclorobenzene eq/kg di emissione. L'ambito geografico di questo indicatore può variare tra la scala locale e quella globale.
- *Fresh-water aquatic eco-toxicity (kg 1,4-DB eq)*: questo indicatore si riferisce alla categoria d'impatto sugli ecosistemi di acqua dolce, a causa delle emissioni di sostanze tossiche nell'aria, nell'acqua e nel suolo. L'orizzonte temporale è infinito. L'indicatore si applica a livello globale, continentale, regionale e locale.

- *Marine eco-toxicity (kg 1,4-DB eq)*: si riferisce agli impatti delle sostanze tossiche sugli ecosistemi marini (si ricollega alla tossicità delle acque dolci).
- *Terrestrial eco-toxicity (kg 1,4-DB eq)*: si riferisce agli impatti delle sostanze tossiche sugli ecosistemi terrestri (idem).

Europe ReCiPe H/E

Fornisce un'altra chiave di lettura e di calcolo per il ciclo di vita degli indicatori di categoria degli impatti.

L'acronimo rappresenta le iniziali degli istituti che sono stati i principali collaboratori di questo progetto: RIVM e Radboud University, CML, e Pré Consultants.

Si può scegliere tra l'utilizzazione di due tipi di indicatori, a livello di *midpoint*, o di *endpoint*: ogni metodo è stato creato per tre diversi punti di vista che rispecchiano quelli dell'*Eco-Indicator 99*: E = *Egalitarian*, H = *Hierarchist* e I = *Individualist*. La versione utilizzata in questo elaborato è la *hierarchist* con normalizzazione europea, pesata su valori medi.

La creazione del metodo risale al 2008, ma l'ultimo aggiornamento è di Settembre 2011. Il metodo ReCiPe sviluppa ed utilizza meccanismi ambientali che hanno una validità globale ove possibile; l'acidificazione, l'eutrofizzazione, la formazione di ozono fotochimico, la tossicità, l'uso del suolo e dell'acqua dipendono invece dalle condizioni e dai parametri regionali.

Gli schemi di valutazione sono generalizzati per essere rilevanti per tutti i Paesi sviluppati nelle regioni a clima temperato, sulla base dei modelli europei.

A livello di *endpoint* le categorie d'impatto sono poco differenti da quelle tradizionali usate più comunemente nelle analisi LCIA e viste per l'*Eco-Indicator 99*:

- *Damage to human health (HH)*, unità: yr = perdita di anni di vita; precedentemente indicata con *DAILY*;
- *Damage to ecosystem diversity (ED)*, unità: yr = perdita delle specie in un anno. Rispetto all'*Eco-Indicator 99* che definiva solo l'unità di misura $PDF \cdot m^2 \cdot yr$ riferita alle specie animali, ReCiPe definisce anche un'unità di riferimento per l'eutrofizzazione acquatica avente come indicatore $PDF \cdot m^3 \cdot yr$ comportando un'integrazione su volume invece che su superficie.

Il fattore finale di caratterizzazione del danno può essere quindi calcolato come

$$CF_{ED} = PDF_{terr} \cdot SD_{terr} + PDF_{fw} \cdot SD_{fw} + PDF_{mw} \cdot SD_{mw}$$

CF_{ED} = fattore di caratterizzazione di *endpoint* per i danni all'ecosistema

$PDF_{terr} \cdot SD_{terr}$ = fattore di caratterizzazione in $PDF \cdot m^2 \cdot yr$ e fattore di densità di specie per i sistemi terrestri in *species/m²*

$PDF_{fw} \cdot SD_{fw}$ = fattore di caratterizzazione in $PDF \cdot m^3 \cdot yr$ e fattore di densità di specie per i sistemi di acqua dolce in *species/m³*

$PDF_{mw} \cdot SD_{mw}$ = fattore di caratterizzazione in $PDF \cdot m^3 \cdot yr$ e fattore di densità di specie per i sistemi di acqua marina, in *species/m³*.

- *Damage to resource availability (RA)*, unità: \$ = aumento del costo. Il modello si basa sulla distribuzione geologica di minerali e di risorse fossili e valuta in che modo l'uso di queste risorse provoca cambiamenti negli sforzi di estrazione delle risorse future. A differenza del modello usato in *Eco-Indicator 99*, non è valutata la maggiore richiesta di energia necessaria in un futuro, ma si valuta l'aumento marginale dei

costi dovuto all'estrazione di una risorsa. Per quanto riguarda i minerali l'effetto dell'estrazione è il calo medio del minerale, mentre per le risorse fossili l'effetto è lo sfruttamento non solo dei combustibili fossili tradizionali ma anche di quelli meno convenzionali, per sopperire alle richieste alla presenza di scarsità di risorse fossili tradizionali.

Per quanto riguarda la salute umana si devono considerare:

- *Climate change Human Health*: tiene conto di alcuni effetti diretti come le ondate di calore, l'inquinamento atmosferico e aero-allergeni. La frequenza e l'intensità di ogni effetto sono di carattere regionale e tempo dipendenti. Inoltre, se la scala temporale è ampia, può darsi che gli esseri umani si adattino e che quindi i danni siano minori rispetto a un periodo più breve;
- *Ozone depletion*: conteggia l'esaurimento dello strato di ozono stratosferico dovuto a emissioni antropiche (ODS);
- *Human toxicity*: valuta la tossicità per l'uomo e conteggia l'eco-tossicità per la persistenza ambientale e l'accumulo nella catena alimentare umana di una certa sostanza chimica;
- *Photochemical oxidant formation*: tiene conto delle formazioni di ossidi fotochimici in relazione al danno umano che possono provocare;
- *Particulate matter formation*: considera gli effetti del particolato (PM10) proveniente da fonti antropiche, la cui inalazione può causare diversi problemi di salute;
- *Ionising radiation*: descrive i danni provocati alla salute umana, connessi alle emissioni di routine di materiale radioattivo nell'ambiente.

Per il danno all'ecosistema i fattori di caratterizzazione sono:

- *Climate change Ecosystems*;
- *Terrestrial acidification*: calcola l'incidenza dell'acidificazione su specie vegetali negli ecosistemi forestali, su scala europea, considerando la persistenza ambientale di una sostanza acidificante e il danno causato da questa all'ecosistema;
- *Freshwater eutrophication*: valuta il carattere di lungo raggio dell'arricchimento di nutrienti attraverso l'aria o i fiumi; ciò implica che sia le acque interne che marine siano soggette a questa forma d'inquinamento, anche se con impatti e cause diverse. L'inquinamento delle acque è superiore a quello delle emissioni di sostanze tossiche, perlomeno in ambito europeo;
- *Terrestrial ecotoxicity*;
- *Freshwater ecotoxicity*;
- *Marine ecotoxicity*;
- *Agricultural land occupation* : questa voce e la seguente, tengono conto del fatto che molti processi di produzione necessitano e occupano una certa superficie di terreno, ma ognuno ha un diverso tipo di incidenza sulla biodiversità. L'unità di misura è $m^2 \cdot yr$;
- *Urban land occupation*;
- *Natural land transformation*: analizza il danno inflitto agli ecosistemi tenendo conto del tempo necessario all'area interessata dalla trasformazione di ripristinare l'uso originale del suolo. I tempi di ripristino per le aree naturali possono essere molto

lunghi, anche migliaia di anni. È utilizzato un set di tempi di ripristino che si differenziano secondo i tipi d'uso del suolo, prima e dopo la trasformazione. Ciò significa che l'unità della trasformazione è il m².

Per l'ultima categoria d'impatto, quella del danno provocato alla disponibilità delle risorse, si considera:

- *Metal depletion*: tiene conto dell'estrazione di minerali vergini e dell'aumento del costo delle ricerche qualora il metallo primo scarseggiasse;
 - *Fossil depletion*: si concentra sulla sostituzione delle fonti fossili convenzionali con risorse non convenzionali per compensare la scarsità delle prime.
- Le risorse non convenzionali sono generalmente a più alta intensità energetica e più costose e di ciò bisogna tenerne conto.

3.2 DEFINIZIONE DI SCOPI E OBIETTIVI

L'obiettivo di questo studio è fare un'analisi del ciclo di vita della microturbina eolica ad asse verticale "FreeTree" prodotta dalla Linz Electric S.p.A. della potenza di 1 kW; si desidera valutare gli impatti e le emissioni atmosferiche legate alla produzione di questa macchina. Infatti, l'unica fase inquinante attribuibile a una turbina eolica o un pannello fotovoltaico, è quella legata alla loro produzione, ma durante la fase di utilizzo non emettono in atmosfera alcuna sostanza impattante.

Ciò è positivo se consideriamo che questi elementi possono sopperire al fabbisogno energetico di una famiglia e che hanno una durata di vita che può variare dai 10-12 anni per una microturbina eolica fino ai 20 anni per un pannello fotovoltaico.

Per avere un maggior raffronto con altri sistemi che generano "energia pulita" possiamo considerare una centrale termica: è vero che la sua produzione in termini di kWh è nettamente superiore e anche la sua vita utile (stimabile attorno a 45 anni), ma è vero che lo è anche il suo impatto di realizzazione e inoltre, essa durante tutto il suo ciclo produttivo continua ad emettere sostanze nocive in atmosfera dovute all'utilizzo di combustibili fossili (quali possono essere il carbone o il gas naturale) usati come combustibile in ingresso per il suo funzionamento.

Lo studio non vuole essere uno strumento di paragone della FreeTree con altre turbine eoliche della stessa tipologia e taglia, ma vuole essere un mezzo interno all'Azienda per la valutazione, come già detto, dell'impatto ambientale che essa genera durante tutto il suo ciclo di vita, dei processi più dispendiosi in termini di energia e più impattanti per quel che riguarda l'inquinamento e sui quali si potrebbe intervenire.

Inoltre tale analisi rappresenta la base per la valutazione del tempo di ritorno dell'energia spesa per la produzione dell'aerogeneratore: si vuole capire quanti anni la turbina eolica lavora per ripagare l'energia spesa per la sua costruzione e quanti anni invece rappresentano l'effettiva immissione in rete di energia pulita ad "impatto ambientale nullo", termine che in questi ultimi anni si è sempre di più radicato nell'immaginario collettivo come sinonimo di ecologico.

In breve ciò che interessa è fare un bilancio energetico della FreeTree.

Lo studio sarà utilizzato dall'Azienda per:

- Analisi interna del processo produttivo;
- Identificazione dei processi più dispendiosi a livello di risorse e produzione di inquinanti;

- Identificazione delle aree di miglioramento e ottimizzazione della tecnologia e dello sviluppo produttivo;
- Utilizzo dei risultati in campagna non comparativa del prodotto;
- Utilizzo dei risultati per la presentazione del prodotto.

Come precisato dalle norme UNI EN ISO 14044 e UNI EN ISO 14040, è necessario identificare e precisare anche i principali utenti a cui l'analisi è destinata; si può così dire che i destinatari di tale lavoro sono:

- Gli addetti interni alla produzione di FreeTree;
- I clienti di Linz Electric S.p.A.;
- Gli investitori nella turbina eolica FreeTree;
- Altri utenti che possono essere interessati alle risorse rinnovabili e al loro potenziale impatto ambientale.

3.3 CAMPO DI APPLICAZIONE

L'approccio dell'analisi LCA che si è deciso di avere e definito "from cradle to grave" e cioè "dalla culla alla tomba": si parte, infatti, dall'analisi dei singoli processi legati alla produzione delle materie prime necessarie alla realizzazione della turbina eolica e si termina con le considerazioni inerenti al fine vita degli stessi componenti. In questo modo è possibile considerare tutta la catena produttiva e l'inquinamento legato al deteriorarsi del materiale se destinato alla discarica, oppure al riutilizzo dello stesso qualora fosse destinato a un impianto di termovalorizzazione. Per quest'analisi si è tenuto conto anche del riciclo di alcuni materiali o il loro utilizzo in termovalorizzatori secondo le tecnologie che attualmente lo permettono.

Importante è evidenziare che per i consumi legati alla fabbricazione della FreeTree ci si è basati su valori medi derivanti da data base, in quanto non era possibile risalire ai consumi di tutti gli impianti di produzione, poiché i componenti provengono da sedi dislocate e convergono nella sede della Linz Electric S.p.A. predisposti per essere imballati e spediti verso l'area di montaggio presso il cliente assieme al generatore, che risulta essere l'unico pezzo assemblato nella sede dell'Azienda. In realtà è la sola produzione dell'aerogeneratore a essere legata all'Azienda, mentre il montaggio, l'erezione e le fondazioni presso il cliente sono a carico dell'installatore che dovrà attenersi alle direttive fornite da Linz Electric S.p.A. per il montaggio a livello del terreno o l'applicazione della turbina eolica sui tetti di condomini e edifici. Quest'ultima scelta, recentemente, sta andando per la maggiore vista la caratteristica del vento a essere più costante ad altezze maggiori da terra. E' per questo motivo che il grattacielo ha un vantaggio non trascurabile rispetto ad altri edifici; in contrapposizione è anche vero che le turbolenze generate da edifici circostanti o da ostacoli di forma diversa presenti sui tetti stessi (impianti di condizionamento, antenne) rendono spesso critica la collocazione e determinano produzioni che possono essere anche largamente inferiori alle attese. Di fatto, quando il vento incontra tali ostacoli, si crea una zona di separazione che s'inarca a partire dal bordo verticale dell'ostacolo stesso: in questo modo al di sopra di questa zona il vento rimane laminare, al di sotto si crea turbolenza. Pertanto è necessario prevedere una torre di altezza sufficiente da non risentire di queste turbolenze.

Per quel che riguarda la manutenzione, essa è difficilmente quantificabile: non si può sapere quali tipi d'intervento particolari possono essere richiesti durante i 10 anni di vita

della macchina, né se e quali componenti dovranno essere sostituiti. La progettazione tenderebbe a prevedere un funzionamento ottimale per tutto il ciclo di vita della FreeTree, escludendo la sostituzione dei suoi pezzi necessaria solo in circostanze eccezionali di malfunzionamento o rottura. In caso di funzionamento ottimale, la manutenzione mira al solo controllo del buono stato dei componenti.

Si è perciò deciso di trascurare questo tipo d'interventi straordinari e ipotizzare una manutenzione ordinaria e in particolar modo l'inquinamento legato allo spostamento del tecnico per i controlli di routine della turbina eolica.

Concludendo: si è tenuto conto dello scenario più costoso in termini di inquinamento e cioè del caso che prevede la realizzazione delle fondazioni in calcestruzzo per il posizionamento a terra, le emissioni legate allo spostamento dell'addetto alla manutenzione e anche del trasporto dell'imballaggio finale nel luogo di installazione della turbina eolica in termini di distanza media.

3.3.1 Unità funzionale

In questo lavoro l'unità funzionale scelta è l'unità "microturbina eolica FreeTree", in funzione della quale verranno espressi i risultati relativi agli impatti. Una decisione è legata alla considerazione che la produzione di energia, quindi di kWh della turbina eolica, durante la sua vita utile dipendono fortemente dal luogo di installazione della stessa, così come verrà mostrato nel Capitolo 4.

Perciò, per rendersi conto nell'immediato degli effetti legati alla realizzazione, si è scelto di utilizzare come unità funzionale, almeno in questa parte di analisi, la FreeTree includendo anche la manutenzione e le fondazioni.

3.3.2 Fasi del ciclo di vita

Il ciclo di vita della microturbina eolica FreeTree va dalla fabbricazione dei componenti nei rispettivi luoghi di lavorazione, il trasporto presso la sede principale di Linz Electric S.p.a., dove il tutto viene imballato e spedito al cliente assieme al generatore, assemblato nella sede di convergenza, per concludere con la dismissione e lo smaltimento dei componenti.

Può essere rappresentato tramite una sequenza di quattro fasi di seguito illustrate:

- **Costruzione:** fabbricazione dei singoli componenti che fanno parte dell'aerogeneratore; le pale, i tiranti, le calotte di copertura, il generatore, il palo di supporto, le fondazioni e i restanti elementi, il che include anche l'eventuale estrazione della materia grezza e la loro lavorazione per ottenere il prodotto finito da utilizzare (quali le viti, la fibra di vetro e molti altri). Le singole produzioni specifiche non sono propriamente inserite e incluse nell'analisi, di cui si tiene in realtà conto per un valore medio.
- **Trasporto:** si considera il trasporto dei singoli componenti dalle zone di produzione fino alla sede di Linz Electric S.p.A., dove viene aggiunto il generatore, imballato il tutto e inviato all'installatore.
- **Operazioni in loco:** comprende la fase di erezione e montaggio della FreeTree, il collegamento con la rete elettrica nazionale tramite cavi elettrici, il controllo periodico e la manutenzione della turbina eolica durante il ciclo di vita. Bisogna ricordare e

sottolineare che la FreeTree è una fonte di energia rinnovabile e durante la sua vita utile non produce emissioni atmosferiche, per cui l'immissione in rete dell'energia elettrica generata dallo sfruttamento del vento non è conteggiata come fase inquinante.

- Fine vita: s'ipotizza un prospetto di fine vita che include la dismissione, lo smaltimento con eventuale riciclo di alcuni pezzi, il riutilizzo di altri, la scarica per altri ancora o la termovalorizzazione con relativa scarica circoscritta alle sole scorie rimanenti dopo l'incenerimento.

3.3.3 Assunzioni

Nello svolgere tale analisi si è cercato di rimanere il più fedeli possibile alla struttura della FreeTree nei minimi dettagli. A tale proposito si deve fare una distinzione tra i due software poiché si sono fatte assunzioni molto diverse tra loro.

❖ Boustead Model

Nonostante il data base di Boustead Model fosse abbastanza fornito, non si sono potuti inserire con precisione alcuni elementi, per i quali ci si è accontentati di considerare i consumi legati alla produzione generica del materiale o a processi affini, per poter comunque descrivere il processo associato alla realizzazione di ogni elemento in maniera opportuna. Per esempio non è stata fatta distinzione tra l'acciaio inox delle viti e quello da bonifica delle boccole o quello del palo, giacché il data base in uso non permetteva tale distinzione.

E' importante evidenziare alcune assunzioni imprescindibili:

1. Non essendo presenti dati inerenti ai magneti permanenti di terre rare all'interno del software, né essendo riusciti a trovare materiale in letteratura che potesse rispondere all'esigenza di conoscere l'energia associabile alla produzione di 1,1 kg di magneti permanenti e le emissioni conseguenti alla loro realizzazione, si è deciso di considerare semplicemente un materiale non specificato. Per l'assemblaggio del generatore, infine, si è tenuto conto sia delle produzioni dei singoli elementi che lo compongono, sia del montaggio finale. Si è considerato l'uso di una pressa e di un avvitatore elettrico per la durata totale di 10 minuti, mentre 5 minuti occorrono per il collaudo del prodotto effettuato con l'utilizzo di un computer e di un motore elettrico per un totale di 15 minuti di energia elettrica a medio voltaggio, con un consumo ipotizzato di 6.5 MJ;
2. Lo stesso discorso è stato fatto per le componenti elettroniche. Suddividerle e calcolare il peso di tutti i più piccoli elementi non è stato possibile e non essendo presenti valori riguardanti la loro produzione nel data base, si è considerato una produzione media non specificata, per un totale di 5.6 kg;
3. Per il trasporto degli elementi dal proprio sito di fabbricazione fino alla sede di imballaggio, si è assunto il trasporto su strada di un furgone con portata inferiore a 1 t "*Road transport - rigid < 1 tonne*"; per il calcestruzzo e l'acciaio strutturale si è assunto invece un trasporto per un carico massimo inferiore a 10 - 12 t "*Road transport - rigid 10-12 tonne*", mentre la manutenzione include un macchinario per il trasporto di persone "*Private car transport*" per i controlli periodici nei 10 anni di vita

utile della turbina eolica e per il trasporto di alcuni pezzi quali le unità di controllo. Un camion con capacità di circa 3 t "*Road transport - rigid 3 tonne*" è stato usato come trasporto della FreeTree fino a destinazione.

❖ SimaPro

I data base di SimaPro sono molto elaborati e hanno al loro interno una molteplicità di materiali tra cui scegliere davvero rilevante. Per il solo caso dell'alluminio, per esempio, è possibile scegliere tra una cinquantina di processi tra cui: la produzione in diversi stati europei, una valutazione sulla media europea, alluminio derivante da materiale vergine, riciclato al 20, 50, 80 o 100%, di scarto derivante da processi industriali, altamente o debolmente legato, primario o secondario, tra diversi tipi specifici di leghe e molto altro ancora.

La stessa pluralità di scelta esiste per i trattamenti di fine vita: l'analisi finale risulta quindi molto vincolata dalle scelte fatte per i diversi componenti e il loro trattamento finale.

L'unica assunzione particolare fatta in questo caso è quella riguardante il trasporto.

1. Per l'assemblaggio del generatore, in questo caso, si è ipotizzato di usare l'elettricità della pressa, dell'avvitatore elettrico e del motore per un consumo totale di 5 MJ e 5 min di utilizzo del computer per il collaudo;
2. Per il trasporto degli elementi dal proprio sito di fabbricazione fino alla sede di imballaggio, si è assunto il trasporto su strada di un furgone con portata inferiore a 3.5 t "*Transport, van <3.5t/RER S*", i cui consumi derivano da una valutazione media fatta sulla realtà europea, data base ancora utilizzato anche qua per il trasporto delle unità di controllo. Per il calcestruzzo si è assunto invece trasporto su strada con portata tra 3.5 e 16 t "*Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER S*", mentre nella dicitura "manutenzione" vi è la macchina privata per i controlli del manutentore "*Transport, passenger car, diesel EURO 4/RER* " e il trasporto della FreeTree completa dalla sede di Linz Electric S.p.A fino al cliente, "*Transport, lorry 7.5-16t, EURO 4/RER S*";
3. E' stato possibile inserire il processo di zincatura del palo d'acciaio di supporto "*Zinc coating*" processo necessario per garantirne la protezione dagli agenti atmosferici.

Copertura Tecnologica

Lo studio in esame utilizza le indicazioni fornite da Linz Electric S.p.A. sulla base della componentistica che nel primo semestre 2013 costituisce la microturbina eolica FreeTree; fa riferimento a dati di progetto internamente definiti e a dati ricavati dai fornitori dei vari elementi. Naturalmente i valori dei consumi legati alla produzione dei componenti, non si può dire siano contemporanei allo studio: come già detto infatti, per l'analisi si sono utilizzati dei data base già esistenti.

Copertura Temporale e Geografica

L'anno di riferimento dello studio è il 2013, mentre l'indagine sull'AEP (Producibilità Elettrica Annuale) della FreeTree fa riferimento a dati provenienti da siti eolici nel periodo tra il 2010 e il 2012, anno in cui è stato realizzato lo studio. Poiché i dati di alcuni siti eolici derivavano da pochi mesi di rilevazioni, è stato adottato il metodo probabilistico di

Monte Carlo, adatto all'analisi di sistemi stocastici in natura, in modo da rendere i risultati validi ingegneristicamente.

Criterio di cut-off

Avendo la possibilità di inserire tutti i pesi caratteristici dell'aerogeneratore, che non è molto grande, sono state inserite nell'analisi anche le singole viti e perciò si è deciso di non applicare un criterio di questo tipo. Sono stati esclusi dall'analisi solo due elementi, perché il loro peso non era quantificabile giacché esiguo:

- la loctite, una colla speciale a forte tenuta, della quale viene utilizzata solo una piccola striscia durante l'assemblaggio del generatore;
- la vernice isolante spray che serve per verniciare il generatore finito, anche in questo caso non quantificabile.

Il criterio di cut-off usato è perciò semplicemente relativo alla mancanza di dati, ma in ogni caso la quantità utilizzata per questi due materiali è davvero esigua: la loro assenza non comporta rilevanti modifiche dei dati finali.

Confini del sistema

Si è tenuto conto di tutto il processo produttivo che, come descritto in precedenza, va dalla realizzazione delle singole viti e di tutta la componentistica interna ed esterna alla turbina eolica, compreso il loro imballaggio e il trasporto delle stesse fino al luogo d'installazione, l'installazione stessa, l'ipotetica manutenzione, la dismissione al termine della vita utile. E' importante ricordare che durante i 10 anni di funzionamento ipotizzati, la turbina eolica non emetterà alcuna sostanza in atmosfera, generando così energia "pulita".

Non fanno parte del modello considerato le operazioni al di fuori della produzione, installazione e dismissione, cioè si escludono la fase di monitoraggio preventiva del sito eolico, tramite installazione periodica di anemometri per lo studio di producibilità, o la valutazione dell'adeguatezza del sito all'installazione della FreeTree; né si è tenuto conto degli interventi successivi alla dismissione quali ad esempio il riassetto del terreno qualora, come nell'ipotesi fatta, si usino fondazioni cementizie che non necessariamente devono essere smantellate con essa, ma potrebbero non essere rimosse.

Infatti, al termine della vita utile della FreeTree il cliente potrebbe richiedere l'installazione di una nuova macchina, sfruttando le fondazioni già esistenti: il calcestruzzo ha durata di vita di circa 40 anni.

Ipotesi

Per compiere tale analisi LCA si sono fatte delle assunzioni, ben precise:

- Esclusione di elementi non quantificabili perché di valore esiguo in termini di peso;
- Distanza media di trasporto della turbina eolica al sito d'installazione 200 km;
- Distanza media percorsa dal manutentore per i controlli periodici durante il ciclo di utilizzo della FreeTree, 2300 km;
- Non sostituzione di pezzi danneggiati;
- Lunghezza del cavo di collegamento turbina-rete elettrica nazionale di 20 m;

- Valori delle produzioni, dei consumi e delle emissioni legati ai processi di fabbricazione dell'aerogeneratore, derivanti dai data base presenti nei software utilizzati per l'analisi;
- Circostanze atmosferiche canoniche per il funzionamento della turbina eolica;
- Fondazioni cementizie;
- Utilizzo dell'AEP calcolato con il metodo Monte Carlo.

Requisiti dei dati

I dati utilizzati sono tutti dati secondari: i dati forniti direttamente dalla ditta produttrice sono quelli riguardanti le tipologie di materiali utilizzati per ogni pezzo e i pesi, il luogo di produzione degli elementi e perciò la distanza percorsa dai trasportatori per fare le consegne alla sede di Linz Electric S.p.A., i dati di producibilità del vento. Il rimanente deriva dai data base presenti nei software di analisi e perciò tutti i valori di energia consumata, emissioni, scarti di materiale, consumi allocabili ad ogni singolo elemento sono valori medi, il più delle volte riferiti alla tecnologia attuale presente e utilizzata nell'Europa dell'Ovest.

Tempo di fine vita della macchina

Il tempo di utilizzo della macchina è stimato approssimativamente attorno ai 10 anni per difetto: naturalmente c'è la possibilità che alcune parti durante tale periodo possano essere danneggiate a causa di eventi atmosferici straordinari, che possono nuocere alla macchina o al funzionamento della stessa. L'ipotesi fatta qui, come già detto, è che i componenti, grazie ad un'accurata manutenzione periodica e all'esclusione di eventi atmosferici imprevedibili, possano funzionare e non essere sostituiti per tutti gli anni di funzionamento dell'apparecchio.

In realtà le previsioni danno un tempo di fine vita attorno ai 12 - 15 anni.

Trattamenti di fine vita

L'idea di Linz Electric S.p.a. sul trattamento del "*fine vita*" è quella di smaltire nel modo più corretto possibile, seguendo le direttive europee e italiane in merito, tutti gli elementi della FreeTree facendosene carico, qualora il cliente lo desiderasse e svincolandolo dall'onere dell'adeguato smaltimento di tutti i pezzi.

Questa scelta è stata fatta nel rispetto dell'ambiente stesso, poiché la turbina eolica è una tecnologia atta allo sfruttamento della risorsa ventosa, affinché si abbia produzione di energia pulita; uno smaltimento errato che non segua tale principio, sarebbe un controsenso.

I trattamenti di fine vita della macchina sono stati valutati in modo dettagliato ed esteso in modo diverso per i due software:

❖ Boustead Model

Si sono potute includere le emissioni in atmosfera legate allo smaltimento in discarica degli elementi, o al riutilizzo degli stessi in termovalorizzatori e lo stoccaggio delle sole ceneri in discarica; ciò è stato possibile grazie a un data base presente nel software.

L'ipotesi di base è di eseguire il corretto smaltimento degli elementi seguendo le indicazioni di riciclo indicate dalla normativa italiana. Le percentuali ipotizzate per il riciclo sono visibili in Tabella 3.1.

MATERIALI	TRATTAMENTO
ABS + metacrilato	80% inceneritore + 20% polveri
Acciaio	90% riciclo + 10% discarica
Alluminio	90% riciclo + 10% discarica
Cartone	100% riciclo
Cemento	100% discarica
Elementi elettronici	100% discarica
Fibra di Vetro	100% discarica
Magnete	90% riciclo + 10% scarto
Pallet	100% riciclo
PET	80% inceneritore + 20% polveri
Plastica	80% inceneritore + 20% polveri
Rame	90% riciclo + 10% discarica
Vernice	100% discarica

Tabella 3.1 - Ipotesi di fine vita dei materiali in Boustead Model

❖ SimaPro

Il trattamento del fine vita dei materiali in SimaPro varia molto da caso a caso. Alcuni materiali e processi contengono già l'ipotesi di derivare da materiale riciclato, includendo i benefici legati a questo, oppure di essere prodotti da materiale vergine: in relazione a tali considerazioni il loro impatto sulla salute umana, sugli indicatori di inquinamento, sulla materia prima utilizzata o sui combustibili fossili impiegati cambia.

Ci sono inoltre molte destinazioni finali possibili per i materiali, ma alcune possono risultare incomplete, con processi mancanti o non definite al loro interno, oppure in altre può essere inclusa una certa quota di ammortamento della realizzazione dello stabile e dei macchinari necessari per trattare il rifiuto. Il "fine vita" deve essere valutato e scelto accuratamente, considerando tutte le descrizioni che vengono fornite per ogni elemento. Solo per alcuni materiali è stato necessario fare una scelta sul loro smaltimento: queste assunzioni verranno specificate successivamente per ogni elemento della turbina eolica.

3.4 DESCRIZIONE DEL SISTEMA ANALIZZATO

Di seguito si analizzano tutte le parti in cui la FreeTree è stata suddivisa per essere analizzata, i processi di fabbricazione degli elementi che la compongono, i materiali, i trasporti.

3.4.1 Pale



Figura 3.4 - Le pale

Il profilo aerodinamico delle pale della FreeTree è stato opportunamente studiato per sfruttare situazioni ventose, le più variabili possibili, in termini di direzione e intensità, utilizzando simulazioni fluidodinamiche e con modelli in scala ridotta in galleria del vento. Le tre pale si sono rese necessarie come numero per garantire la generazione di una potenza maggiore, mentre la forma a spirale assicura l'avviamento autonomo della turbina al raggiungimento della velocità di cut-in, evitando l'ausilio di un generatore aggiuntivo per dare lo spunto iniziale.

Gli elementi palari sono tre, di altezza 2,025 m e sistemati in modo circolare tale da coprire un diametro di 1,880 m, come mostrato in Figura 3.4. Sono composte di due spessori di fibra di vetro, saldati tra loro e cavi all'interno, rivestiti da una vernice in polvere, per un peso totale di 7,476 kg; per lo stampaggio si utilizzano matrici appositamente realizzate generando un piccolo scarto di materiale non quantificabile, né considerato in questa relazione durante la fase di levigatura.

La fibra di vetro è un materiale particolare che è spesso utilizzato in materiali compositi strutturali associati a resine sintetiche ed è il materiale basilare per la costruzione delle pale di quasi tutte le turbine eoliche: rimane ancora incerto il metodo del suo smaltimento.

Per la situazione italiana ci si affida alle direttive redatte nel documento della FIVRA [12] che riguarda il rifiuto in lana minerale: i rifiuti costituiti da fibre minerali artificiali possono essere smaltiti nelle discariche per scorie non pericolose, ma non possono essere riutilizzati e non sono biologicamente degradabili.

In realtà ci sono molteplici Aziende del Nord Europa che si stanno adoperando per il riciclo delle pale in fibra di carbonio e vetro composito: *Refiber Aps*, con sede in Danimarca si sta concentrando sul trattamento termico delle pale eoliche danneggiate

che vengono tagliate a misura e poi inserite in un forno a 500°C; il gas che deriva dalla combustione viene utilizzato per la produzione di energia elettrica e per il riscaldamento dei forni. La *Fiberline*, anch'essa con sede in Danimarca, mira al riciclaggio della plastica rinforzata con vetro (GRP) presente nelle pale, inviando il prodotto di scarto ad una società produttrice di cemento che si occupa di combustibili; la GRP viene quindi ridotta a brandelli e miscelata per aumentarne il potere calorifico, in modo da alimentare i forni per il cemento [13].

La Commissione Europea ha finanziato un progetto per lo studio del riciclaggio di prodotti plastici miscelati con fibra di vetro, cui hanno partecipato Germania, Regno Unito e Paesi Bassi che hanno sviluppato nuove tecniche di riciclaggio meccanico: un ibrido - trituratore che riduce le dimensioni dei rifiuti FRP a 15-25 mm, permettendo di separare le fibre e rimuovere le impurità (PVC e metalli); il materiale così prodotto può essere utilizzato in vari modi tra cui la produzione di calcestruzzo rinforzato con fibre.

Al momento tali soluzioni sono lontane dal nostro Paese che, come già detto, prevede il semplice smaltimento in discarica in celle esclusivamente dedicate.

La Tabella 3.2 mostra l'elenco dei componenti e dei rispettivi materiali che formano le pale.

COMPONENTI	CARATTERISTICHE		
GRUPPO PALA 1 kW	h	2,025	m
	d	1,880	m
	s	0,005	m
Semipale Superiori GOE386D	Fibra vetro	3,39	kg
	Vernice	0,162	kg
		3,63	
Semipale Inferiori GOE386D	Fibra vetro	0,294	kg
	Vernice	3,39	kg
Trasporto: locale		103	km

Tabella 3.2 Inventario dei materiali del gruppo pala

❖ Boustead Model

Per descrivere le pale si sono considerati i codici riferiti alla produzione di polvere di fibra di vetro "*Fiber glass sand production*" e di una vernice generica "*Varnish production*" di rivestimento, mentre per lo smaltimento si è considerato il confinamento in discarica del 100% del prodotto (Tabella 3.3).

Data base	Code	Processo	Peso	Unità
Solid waste	11	Unspecified refuse (Process)	7,02	kg
Solid waste	11	Unspecified refuse (Process)	0,456	kg
EU solid waste	263	080201 waste coating powders	0,456	kg
EU solid waste	437	101103 waste glass-based fibres	7,02	kg
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	1,31062	vehicle-km
Mat. proc. core	3909	Varnish production	0,456	kgdry
Mat. proc. core	4017	Fibre glass sand production	7,02	kg

Tabella 3.3- Inventario dei materiali del gruppo pala in Boustead Model

❖ SimaPro

Per considerare la fibra di vetro delle pale si è utilizzato il data base "*Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant, RER*" riguardante lo stampaggio ad iniezione di fibra di vetro con resina poliammidica, che include anche gli input di materiale, processi e infrastrutture; i dati sono stati forniti da un produttore su inventario generico. La vernice utilizzata è l'"*Acrylic varnish, 87,5% in H2O, at plant/RER*" e rimarrà la stessa anche in tutti i successivi componenti dell'aerogeneratore: i suoi dati derivano dalla letteratura basandosi su informazioni di Aziende manifatturiere, non si conosce però la rappresentatività di tali valori per l'industria europea.

Nei data base non ci sono riferimenti "al fine vita": entrambi i materiali sono stati destinati alla discarica, ma solo per la fibra di vetro sono considerate le emissioni conseguenti al deposito, mentre della vernice non si hanno dati a riguardo.

3.4.2 Calotte



Figura 3.5 - Le calotte di copertura

Le calotte di copertura sono di materiale composito ABS e metacrilato di colore blu, visibili in Figura 3.5; forniscono un ulteriore grado di protezione per il generatore, le parti meccaniche ed elettriche, evitando all'acqua e alla sporcizia dovute agli agenti atmosferici di entrare in contatto con le parti meccaniche. Inoltre garantiscono una buona flessibilità e assicurano la protezione ignifuga alle parti interne.

Il peso totale è di circa 3,014 kg con forma e pesi differenti tra la plastica superiore e quella inferiore, così come precisato in Tabella 3.4; il peso è stato ripartito tra i due materiali ipotizzando una composizione di circa 2/3 di ABS 1/3 di metacrilato, affermazione avvalorata anche da dati reperibili in letteratura e confermata da Linz Electric S.p.A.

Considerati singolarmente, ABS e metacrilato, sono riciclabili al 100%, ma per fare questo servono impianti specifici per il riciclo, diffusi soprattutto nella realtà Nord Europea, Austria e Germania; il loro riciclo avviene tramite processi termici che prevedono la frantumazione e l'immissione in forni ad alta temperatura, permettendo la scomposizione del materiale nei suoi elementi principali, con separazione delle sostanze solide.

Il restante materiale presente nella dicitura "calotte di copertura" è l'acciaio che compone le viti e gli elementi affini. La componentistica di collegamento di tutta la struttura è fornita dallo stesso commerciale ed è tutta in acciaio inox.

L'acciaio è una lega a base di ferro, contenente carbonio in quantità variabile fino ad un massimo del 2%, a cui si aggiungono altri elementi metallici e non metallici in quantità

controllate per conferirgli particolari proprietà in funzione degli usi a cui è destinato: nel nostro caso sono indispensabili viti, rondelle, bulloni e dadi in acciaio inox.

COMPONENTI	CARATTERISTICHE		
PLASTICA INFERIORE	h	0,2485	m
	d	0,5700	m
	ABS e metacrilato	1,634	kg
PLASTICA SUPERIORE	h	0,135	m
	d	0,54	m
	ABS e metacrilato	1,380	kg
Vernice calotte		0,2	kg
Trasporto: camion		61,5	km
Viti, rondelle e supporto plastiche	Acciaio inox	0,2106	kg
Trasporto: camion		77	km

Tabella 3.4 - Inventario dei materiali delle calotte

❖ Boustead Model

Per le calotte di copertura si sono considerate le produzioni separate di "*Methyl methacrylate*" e "*ABS*" usando valori di data base medi, derivanti da grandi stabilimenti con fornitura all'ingrosso, mentre la vernice è la stessa considerata per le pale.

Con riferimento alla realtà italiana si è assunto che la miscela composita di ABS e metacrilato verniciata sia utilizzata in un inceneritore per la produzione di energia elettrica: perciò l'80% del materiale è consumato e il restante 20% è considerato come residuo di post-combustione e destinato alla discarica.

L'acciaio inox delle viti necessarie a fissare le calotte, "*Hot rolled coil*" è riciclabile al 100%: si è preferito scegliere un valore percentuale cautelativo e assumerlo riciclabile al 90%, con un 10% di scarto di materiale dovuto alla sua ri-lavorazione. L'elenco completo delle assunzioni usate nel progetto eseguito con Boustead Model è presentato in Tabella 3.5.

Data base	Code	Processo	Peso	Unità
Solid waste	9	Metals (Process)	0,02106	kg
Solid waste	11	Unspecified refuse (Process)	0,2	kg
Solid waste	13	Slags & ash (Process)	0,6028	kg
Solid waste	18	Waste to incinerator (Process)	-2,41	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-0,18954	kg
EU solid waste	193	070213 polymer ind. waste plastic	-2,41	kg
EU solid waste	193	070213 polymer ind. waste plastic	0,6028	kg
EU solid waste	263	080201 waste coating powders	0,2	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	0,02106	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	-0,18954	kg
SA core	30	ABS	2	kg
SA core	33	Methyl methacrylate	1,014	kg
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,33602	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,02757	vehicle-km
Mat. proc. core	3909	Varnish production	0,2	kgdry
Mat. proc. core	4618	Hot rolled coil production	0,2106	kg

Tabella 3.5 - Inventario dei materiali del gruppo calotte in Boustead Model

❖ SimaPro

I data base scelti per le calotte sono " *Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, ABS, at plant/RER*" e " *Methyl methacrylate, at plant/RER*", mentre la vernice rimane la stessa considerata per le pale.

Lo scenario considerato per il loro smaltimento è quello dell'incenerimento che include le emissioni e il consumo di risorse per il trattamento termico dei rifiuti, il controllo degli inquinanti da parte dell'inceneritore, la produzione di energia elettrica e di vapore dal processo. Si tiene conto anche del riutilizzo delle ceneri per il 60% come materiale da costruzione. I valori si basano sulla realtà media europea.

Le viti sono in acciaio inox " *Stainless steel hot rolled coil, annealed & pickled, elec. arc furnace route, prod. mix, grade 304 RER* " e il processo di fabbricazione include già lo scenario di fine vita, con un tasso medio di riciclo dell'80%, che quindi non sarà ripreso nello scenario di fine vita.

3.4.3 Monotirante

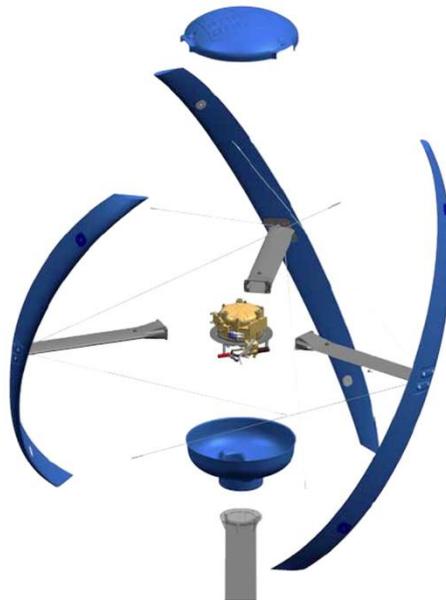


Figura 3.6 - Elementi distintivi della turbina eolica FreeTree; in particolare si distinguono: pale, calotte di copertura, monotiranti, cavi di tenuta, generatore

La turbina eolica è composta tre tiranti lavorati in lega di alluminio, qualificata dalla normativa con la dicitura EN AB 46100 e tre coperchietti di fissaggio che servono per l'aggancio dei tiranti alle pale, anch'essi della stessa lega e provenienti dallo stesso fornitore. I monotiranti uniscono le pale direttamente al generatore il cui attacco è coperto dalle calotte di copertura: si rendono indispensabili per creare un corpo unico e solido. Questi elementi si possono chiaramente distinguere nella Figura 3.6.

I monotiranti sono una parte fondamentale dell'aerodinamica della turbina e una buona progettazione palare non è in realtà sufficiente a garantire una buona efficienza in termini di Potenza. Per ruotare, infatti, le pale devono opporsi ad attriti e resistenze che devono essere diminuite il più possibile affinché la potenza prodotta sia maggiore: gli attriti rappresentano una perdita di energia da parte del sistema.

I monotiranti creano delle resistenze che rallentano la velocità di rotazione diminuendo le prestazioni della turbina, ma ne garantiscono la solidità strutturale: ecco perché c'è la necessità di averne in numero minore possibile, tre, uno per ogni pala, in modo tale che le resistenze di opposizione alla rotazione della turbina siano esigue.

Oltre a questi elementi restano da considerare la vernice che li riveste, le viti, le rondelle di acciaio inox e le boccole filettate che sono invece in acciaio da bonifica 39NiCrMo3.

L'inventario degli elementi è mostrato in Tabella 3.6.

COMPONENTI	CARATTERISTICHE
TIRANTE CAVO NACA0020	h 0,7850 m
	l 0,1408 m
	s 0,0680 m
	Lega alluminio EN AB 46100 12,000 kg
Vernice tirante	0,15 kg
COPERCHIETTI FISSAGGIO PALE	h 0,178 m
	l 0,027 m
	s 0,125 m
	Lega alluminio EN AB 46100 0,600 kg
Trasporto: camion interno	30 km
Viti e rondelle	Acciaio inox 0,2123 kg
Trasporto: camion	77 km
Boccole filettate del coperchietto	h 0,0210 m
	d 0,0185 m
	Acciaio da bonifica 39NiCrMo3 0,144 kg
Trasporto: camion	19 km

Tabella 3.6 - Inventario dei materiali del gruppo monotirante

❖ Boustead Model

Per descriverne il processo di realizzazione dei monotiranti si è ritenuto ammissibile considerare la produzione di un lingotto di alluminio legato, "*Homogenise 5082 aluminium alloy ingot*".

Per le viti, le rondelle e i bulloni si è assunta una "*Hot rolled coil production*", mentre per le boccole filettate, in acciaio da bonifica del tipo 39NiCrMo3 particolarmente adatto per sopportare carichi elevati e resistere a fatica, si è usato "*Produce general steel products*". Il riciclo dell'acciaio rimane invariato, ma viene esteso anche alle boccole e all'alluminio (Tabella 3.7).

Interessante è il risparmio che si ottiene dal riciclo dell'alluminio: grazie al mancato processo di estrazione della bauxite bastano 0,7 kWh invece di 14 kWh per produrne un chilo.

Database	Code	Processo	Peso	Unità
Solid waste	9	Metals (Process)	0,02123	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	1,26	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	0,0144	kg
Solid waste	11	Unspecified refuse (Process)	0,15	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-0,19107	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-11,34	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-0,1296	kg
EU solid waste	263	080201 waste coating powders	0,15	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	-0,19107	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	0,02123	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	-0,1296	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	0,0144	kg
EU solid waste	356	100399 unspecified aluminium waste	-11,34	kg
EU solid waste	356	100399 unspecified aluminium waste	1,26	kg
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,65025	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,02778	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,00465	vehicle-km
Mat. proc. core	3909	Varnish production	0,15	kgdry
Mat. proc. core	4519	Homogenise 5082 aluminium alloy ingot	12,6	kg
Mat. proc. core	4618	Hot rolled coil production	0,2123	kg
Mat. proc. core	4619	Produce general steel products	0,144	kg

Tabella 3.7 - Inventario dei materiali del gruppo monotirante in Boustead Model

❖ SimaPro

Non essendo presente la lega EN AB 46100 all'interno del software, ne è stata usata un'affine considerata riciclabile al 15%, *AlSi8Cu3*, "*G-AlSi8Cu3 (380) I*". Tale lega è composta da Si8%, Cu3%, Zn1,2%, Fe0,8%, Mn0,4%, Mg0,2%, AISI 380 e riporta dati basati su produzione e trasporto a Rotterdam.

La vernice s'ipotizza sia destinata alla discarica, mentre le viti, come prima, contengono già l'ipotesi di riciclo.

La boccola è in acciaio da bonifica "*30CrNiMo8 I*", un acciaio di alta qualità con concentrazione di carbonio superiore allo 0,25%, il cui data base si riferisce a dati medi mondiali; per il fine vita si è optato per un riciclo dell'acciaio al 90%, utilizzando uno scenario che considera gli output del processo di riciclaggio come vantaggio per l'ambiente, ma tiene comunque conto del carico ambientale legato.

3.4.4 Cavi di tenuta

I cavi di tenuta sono cavi di 3 mm di diametro di acciaio inox che collegano i tre assi palari: ogni pala è collegata alla precedente e alla successiva tramite due cavi uscenti dall'attaccatura del tirante. In questo modo:

- Si garantisce la forma progettuale della turbina che le forze centrifughe tenderebbero a modificare;
- Si fornisce un collegamento con la struttura centrale, senza dover aggiungere altri tiranti;
- Si assicura una maggior sicurezza del sistema in caso di rottura.

Oltre a ciò, restano da considerare viti, dadi e boccole filettate (Tabella 3.8).

COMPONENTI	CARATTERISTICHE		
CAVI ACCIAIO 3mm	h	1,798	m
	d	0,003	m
	Acciaio inox	0,72	kg
<i>Trasporto: corriere</i>		156	km
BOCCOLE FILETTATE CAVI	h	0,0415	m
	d	0,0160	m
	Acciaio da bonifica, 39NiCrMo3	0,144	kg
<i>Trasporto: camion</i>		19	km
Viti e dadi	Acciaio inox	0,1584	kg
<i>Trasporto: camion</i>		77	km

Tabella 3.8 - Inventario dei materiali del gruppo cavi

❖ **Boustead Model**

Tutto il materiale utilizzato per la dicitura "Sistema cavi di tenuta" è di acciaio, inox per i cavi stessi e la componentistica delle viti, da bonifica per le boccole, gli stessi utilizzati fino ad ora e con le stesse ipotesi di fine vita (Tabella 3.9).

Data base	Code	Processo	Peso	Unità
Solid waste	9	Metals (Process)	0,072	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	0,0144	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	0,1584	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-0,648	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-0,1296	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-0,14256	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	-0,648	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	0,072	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	-0,1296	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	0,0144	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	-0,14256	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	0,1584	kg
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,19094	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,00465	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,02073	vehicle-km
Mat. proc. core	4618	Hot rolled coil production	0,72	kg
Mat. proc. core	4618	Hot rolled coil production	0,1584	kg
Mat. proc. core	4619	Produce general steel products	0,144	kg

Tabella 3.9 - Inventario dei materiali del gruppo cavi in Boustead Model

❖ **SimaPro**

L'acciaio inox dei cavi di tenuta e quello da bonifica delle boccole sono gli stessi visti in precedenza, con gli scenari di riciclo detti.

3.4.5 Generatore

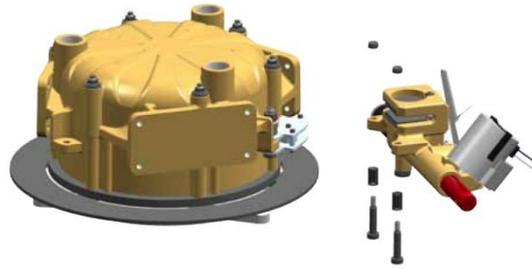


Figura 3.7 - Visione della struttura del generatore

Il generatore, in Figura 3.7, è il fulcro del funzionamento della turbina: senza spazzole, presenta una struttura a magneti permanenti con rotore esterno, dove vengono fissati i tiranti delle pale della turbina eolica. Non vi sono altri organi meccanici né giunti, cosa che assicura un'elevata silenziosità e riduce le perdite meccaniche: in questo modo si possono garantire rendimenti elevati anche a basse velocità.

Come già accennato in precedenza, il generatore presenta una particolare combinazione tra numero di poli e cave di statore che, aggiunta alla particolare forma dei magneti permanenti, permette di abbassare il valore della coppia di spunto facendo sì che la turbina si avvii anche con bassi valori di intensità del vento (vel cut-in = 3,4 m/s).

L'elemento principale del generatore è l'assieme dei magneti permanenti ad alta energia specifica: sono magneti a terre rare del tipo NeFeB. Nella struttura sono in tutto 22 magneti permanenti, 11 orientati Nord-Sud e 11 Sud-Nord a forma di blocchetti di dimensione 25*15*5 mm, per un peso totale di 1,1 kg.

Le terre rare che compongono i magneti risultano avere una potenza elevata, ma una scarsa diffusione; il 97% del monopolio della produzione di terre rare mondiale è detenuto dalla Cina. Per questo motivo è nata la necessità di recuperare e riutilizzare i magneti sottoponendoli a cicli di ri-magnetizzazione.

La campana porta magneti e il supporto del generatore sono in acciaio per 7,492 kg totali, rappresentando la parte più pesante del complesso del generatore.

La campana porta pale è in acciaio da bonifica e pesa 3,079 kg, mentre il mozzo-campana e il tondo sono in alluminio di tipo non specificato, per un peso totale di 3,224 kg. L'elenco dettagliato di pesi e materiali è elencato in Tabella 3.10.

Elementi di minor peso utilizzati nella costruzione del generatore restano viti, anelli, rondelle e dadi di acciaio inox, i tubetti in fibra di vetro che raggruppano i fili di collegamento elettrico in rame riciclabile, rivestiti con struttura in PET riciclabile anch'essa o utilizzabile per la produzione di energia elettrica in termovalorizzatori.

Tutta la componentistica usata nell'assieme del generatore eolico, che comprende cioè generatore, pale, cavi, tiranti ed elementi elettronici - elettrici, risulta conforme alla Direttiva RoHS e perciò non contiene sostanza nocive o pericolose oltre la soglia percentuale prevista dalla direttiva stessa.

COMPONENTI	CARATTERISTICHE		
FILO RAME D. 0,80 mm GRADO 3	Rame	2,000	kg
	Film Poliestere PET	0,044	kg
Fili Radox Vernice isolante	Fibra di vetro	0,166	kg
		0,070	kg
Trasporto: camion		2	km
TONDO50 mm	h	0,169	m
	Alluminio	1,700	kg
MOZZO CAMPANA	Alluminio	1,524	kg
	Trasporto: camion	36	km
CAMPANA PORTA MAGNETI PERMANENTI	h	0,091	m
	d	0,211	m
	Acciaio	4,654	kg
GHIERA ALLINEAMENTO MAGNETI	h	0,6270	m
	l	0,0695	m
	s	0,0015	m
	Lamiera Zincata Acciaio	0,171	kg
SUPPORTO GENERATORE PALO	Acciaio	2,838	kg
Trasporto: camion		20	km
MAGNETI PERMANENTI NORD-SUD/SUD-NORD	h	0,015	m
	l	0,025	m
	s	0,005	m
	NdFeB	1,1	kg
Trasporto: camion		194	km
Viti, anelli, cuscinetti, rondelle, dadi	Acciaio inox	0,8112	kg
Trasporto: camion		77	km
CAMPANA PORTA PALE	h	0,1190	m
	d	0,2984	m
	Lega Alluminio EN AB 46100	3,079	kg
Trasporto: camion		30	km

Tabella 3.10 - Inventario dei materiali del gruppo generatore

❖ Boustead Model

Non è stato possibile includere direttamente nell'analisi eseguita con Boustead Model i magneti a terre rare, così come specificato nelle assunzioni, poiché questo dato non era presente nel software. Di conseguenza si è assunto un materiale non specificato, il "*Raw Material: Unspecified*".

I magneti possono però essere rigenerati e quindi è stato previsto il riciclo del materiale al 90% e una perdita del 10% conseguente ai processi di rigenerazione.

I processi di produzione considerati nel progetto ed elencati in Tabella 3.11, sono stati scelti nello specifico per i seguenti elementi:

- "*Produce general steel products*" per la campana porta magneti e il supporto del generatore;
- "*Cold rolling steel*" per la lamiera zincata della ghiera di allineamento magneti, sempre di acciaio e perciò considerata riciclabile al 90%;
- "*Aluminium, hold/cast*" per il mozzo-campana e il tondo il cui tipo di alluminio non è specificato, considerato riciclabile al 90%;
- "*Homogenise 5082 aluminium alloy ingot*" per la campana porta pale;

- "*Copper wire production*" per i fili di collegamento in treccia di rame zincata con isolamento esterno composto da fibra di vetro, che possono essere spellati a fine utilizzo, in modo da separare i due elementi e smaltire la fibra di vetro in discarica e riciclare il rame. Anche per il rame l'ipotesi fatta è di riciclare il 90% del rame e scartarne, a causa di perdite o altro, il restante 10%.
- "*PET film*" per i tubetti utilizzati nel generatore, smaltibili destinando l'80% del rifiuto al termovalorizzatore e il restante 20% è residuo post combustione destinato alla discarica.

Database	Code	Processo	Peso	Unità
Raw material	1	Unspecified	1,1	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	0,6303	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	0,84742	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	0,21584	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	0,11	kg
Solid waste	11	Unspecified refuse (Process)	0,166	kg
Solid waste	11	Unspecified refuse (Process)	0,07	kg
Solid waste	13	Slags & ash (Process)	0,0088	kg
Solid waste	18	Waste to incinerator (Process)	-0,0352	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-5,6727	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-7,62678	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-1,94256	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-0,99	kg
EU solid waste	193	070213 polymer ind. waste plastic	-0,0352	kg
EU solid waste	193	070213 polymer ind. waste plastic	0,0088	kg
EU solid waste	266	080299 unspecified coating waste	0,07	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	0,84742	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	-7,62678	kg
EU solid waste	356	100399 unspecified aluminium waste	-5,6727	kg
EU solid waste	356	100399 unspecified aluminium waste	0,6303	kg
EU solid waste	385	100699 unspecified copper pr. waste	0,21584	kg
EU solid waste	385	100699 unspecified copper pr. waste	-1,94256	kg
EU solid waste	437	101103 waste glass-based fibres	0,166	kg
EU solid waste	590	160118 non-ferrous metal	0,11	kg
EU solid waste	590	160118 non-ferrous metal	-0,99	kg
SA core	81	PET film	0,044	kg
Fuel prod. core	10597	Electricity use - IT	6,5	MJ
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,00829	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,19731	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,26054	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,36278	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,15703	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,10619	vehicle-km
Mat. proc. core	3909	Varnish production	0,07	kg dry
Mat. proc. core	4484	Hold/cast aluminium	3,224	kg
Mat. proc. core	4519	Homogenise 5082 aluminium alloy ingot	3,079	kg
Mat. proc. core	4618	Hot rolled coil production	0,8112	kg
Mat. proc. core	4619	Produce general steel products	7,492	kg
Mat. proc. core	4625	Cold rolling steel	0,171	kg
Mat. proc. core	4710	Copper wire production	2	kg
Mat. proc. core	4710	Copper wire production	0,1584	kg
Mat. proc. core	4904	Glass fibre production	0,166	kg

Tabella 3.11 - Inventario dei materiali del gruppo generatore in Boustead Model

❖ SimaPro

Gli elementi di acciaio sono composti da differenti tipi di acciaio, con ipotesi di base e di smaltimento differenti:

- *"Galvanized steel sheet, at plant RNA"* è la produzione della lamiera zincata derivante da dati riferiti all'America Settentrionale, mentre si considera avvenga un riciclo del 90% del materiale basandosi sul metodo delle emissioni mancate, le stesse utilizzate nelle boccole;
- *"Steel (sec) I"* è l'acciaio della campana porta magneti, derivante da dati per produzione nei Paesi Bassi di acciaio 100% riciclato, tramite processo *Electrosteel*;
- *"Stainless steel hot rolled coil, annealed & pickled, elec. arc furnace route, prod. mix, grade 304 RER"* rimane il riferimento per le viti e i componenti affini.

L'alluminio utilizzato per il mozzo della campana del generatore e per la struttura tonda centrale è *"Aluminium recycled 100% RTH"* ipotizzato derivare per il 100% da alluminio riciclato includendone già i benefici, il consumo di energia e i dati di produzione con riferimento ad un'industria di alluminio della metà degli anni Novanta. La campana porta pale è invece in lega *"G-AlSi8Cu3 (380) I"*, la stessa del monotirante, perciò riciclabile al 15%.

"Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1 mm² EU-15" è il rame che compone i lamierini e la treccia zincata dei fili di collegamento, recuperabile e riciclabile al 95% secondo stime medie della realtà europea.

Rimangono da considerare il PET *"PET granulate amorph B250"*, i cui dati di produzione riguardano tre società nel periodo 1989 - 1999, mentre l'incenerimento è quello di un impianto di termovalorizzazione secondo le direttive del 2006 della Commissione Europea; la fibra di vetro *"Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulding, at plant, RER"*, non riciclabile è destinata allo smaltimento in discarica con emissioni calcolate in riferimento alla media europea.

Per ultimi restano i magneti permanenti a terre rare *"Rare earth concentrate, 70% REO, from bastnasite, at beneficiation/CN"*, prodotti in Cina e riutilizzabili al momento dello smaltimento della struttura, dopo essere stati rigenerati. In questo caso i data base in SimaPro contengono solo riferimenti al trattamento del fine vita di terre rare in lampade fluorescenti, per cui si è considerato valido tale scenario, anche se non propriamente riferito al caso in esame.

3.4.6 Componenti elettroniche

Sotto questa dicitura sono stati raggruppate tutte le componenti elettroniche presenti nella FreeTree e che comprendono l'inverter, il freno elettrico che include relè e relativo zoccolo, il sistema elettronico di controllo FreeBox.

Per l'inverter è stato scelto di affidarsi ad un produttore specializzato che fornisce un inverter da 1 kW studiato appositamente per il funzionamento delle turbine eoliche. Il peso totale è di circa 16 kg, di cui circa 4,8 kg sono legati alla scheda elettronica e microcomponenti, i restanti sono imputabili alla struttura esterna il lega di alluminio EN AB 46100, la stessa che compone i monotiranti.

L'inverter permette di gestire la logica di controllo del generatore e trasforma la corrente tenendo conto, tramite apposito contatore, dello scambio che intercorre tra la rete

nazionale e l'utente locale. E' dotato di un software con cui è possibile configurare i parametri che garantiscono il corretto funzionamento del sistema.

Il relè e lo zoccolo, sono anch'essi di tipo commerciale: il relè è composto di una scheda elettronica e delle bobine di rame, mentre lo zoccolo è in plastica.

Il sistema elettronico FreeBox è stato studiato e prodotto appositamente per la turbina eolica FreeTree; è composto principalmente da una scheda elettronica di circa 0,8 kg e da una struttura rigida esterna, in alluminio EN AB 46100, dentro cui è posizionato anche il relè di circa 1,06 kg di peso. Il tutto è riassunto in Tabella 3.12.

Il peso totale dell'assieme fin qui descritto (cioè generatore, parti elettroniche, tiranti, cavi, pale e calotte) è approssimativamente di 70 kg.

COMPONENTI	CARATTERISTICHE	
INVERTER 1kW	Componenti elettroniche interne	4,8 kg
Struttura esterna	Lega Alluminio EN AB 46100	11,2 kg
<i>Trasporto: camion</i>		526 km
FRENO ELETTRICO (RELE') E FREEBOX	Componenti elettroniche interne	1,5 kg
Struttura esterna	Lega Alluminio EN AB 46100	2,5 kg
<i>Trasporto: automobile</i>		103 km
<i>Trasporto: automobile</i>		30 km

Tabella 3.12 - Inventario dei materiali del gruppo parti elettroniche

❖ Boustead Model

Come specificato nel paragrafo 3.2.3, al posto dei componenti elettronici e dell'inverter si è preso a riferimento il materiale "*Unspecified*", non avendo dati appropriati a disposizione, mentre si è potuto considerare il rifiuto elettronico destinato alla discarica.

L'alluminio delle strutture di contenimento è la lega "*Homogenise 5082 aluminium alloy ingot*", già utilizzata in precedenza e per la quale rimangono valide le ipotesi precedenti.

La Tabella 3.13 mostra nel dettaglio le assunzioni fatte.

Database	Code	Processo	Peso	Unità
Raw material	1	Unspecified	6,3	kg
Solid waste	9	Metals (Process)	1,37	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-12,33	kg
Solid waste	28	Electronics waste (Process)	6,3	kg
EU solid waste	356	100399 unspecified aluminium waste	-12,33	kg
EU solid waste	356	100399 unspecified aluminium waste	1,37	kg
EU solid waste	599	160212*free asbestos discarded eq.	6,3	kg
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	14,3072	vehicle-km
Mat. proc. core	3550	Private car transport	0,80046	vehicle-km
Mat. proc. core	3550	Private car transport	0,05829	vehicle-km
Mat. proc. core	4519	Homogenise 5082 aluminium alloy ingot	13,7	kg

Tabella 3.13 - Inventario dei materiali del gruppo parti elettroniche in Boustead Model

❖ SimaPro

Per quanto riguarda la componentistica elettronica, per l'inverter di riferimento è quello di un impianto fotovoltaico denominato "*Inverter, 500W, at plant/RER/I*": in relazione alle proporzioni della FreeTree e ai dati in possesso, si sono assunti 3 inverter di questo tipo

per eguagliare quello eolico utilizzato, mentre la struttura esterna di contenimento è in lega di alluminio, la stessa del monotirante centrale, "G-AlSi8Cu3 (380) I". Lo smaltimento della scheda elettronica è già considerato all'interno del materiale e i valori attribuibili alla sua realizzazione derivano da una statistica fatta sulla media europea.

Per il relè di controllo e la FreeBox, di tipo commerciale, è stato considerato del materiale elettronico generico "Electronics for control units/RER" e la stessa lega di alluminio specificata in precedenza per il contenitore esterno; anche qui tutti i processi e la fabbricazione sono inclusi, compresi i fili di collegamento. Al termine dell'utilizzo tali parti elettroniche vanno smaltite in discarica: i dati derivano dalla letteratura.

3.4.7 Palo

Il palo rappresenta il 3/4 del peso totale della FreeTree: 190 kg totali di cui 60 kg Fe360, 70 kg Fe430 e 60 kg Fe510 (Tabella 3.14) che sono acciai strutturali da carpenteria laminati a caldo, specifici per le costruzioni meccaniche, in grado di sostenere i 70 kg della struttura superiore e sopportare le sollecitazioni alle quali la turbina è sottoposta in regimi di vento molto forte. Tali acciai devono essere zincati per essere protetti dagli agenti atmosferici ed evitarne la corrosione.

Linz Electric S.p.A. fornisce tutte le direttive per la realizzazione della struttura portante poiché la fornitura del palo non è tra gli obblighi imposti al cliente dall'Azienda.

Il posizionamento dell'aerogeneratore può essere eseguito in due modi:

- Palo a piombo già sistemato e fissato alla fondazione nel sito, posizionamento del gruppo dopo l'assemblaggio a terra tramite carrello elevatore;
- Palo dotato di sistema d'incernieramento con la base precedentemente fissata alla fondazione sul sito e sollevato tramite gru dopo essere stato in precedenza unito al generatore.

COMPONENTI	CARATTERISTICHE
PALO 6 m Tronco di cono	h 6,0 m
	d _{BASE} 0,2100 m
	d _{APICE} 0,1500 m
	Acciaio strutturale Fe 360 60 kg
	Acciaio strutturale Fe 430 70 kg
	Acciaio strutturale Fe 510 60 kg
Trasporto	170 km

Tabella 3.14 - Inventario dei materiali del gruppo palo

❖ Boustead Model

Non sapendo come identificare il processo di fabbricazione dell'acciaio strutturale scegliendo tra quelli presenti nel software, si è deciso di utilizzare quello dell'acciaio inox "Hot rolled coil production", in realtà non molto differente dagli altri tipi di data base presenti sotto il punto di vista delle emissioni.

L'assunzione di riciclo è rimasta quella canonica al 90%, come mostrato anche in Tabella 3.15.

Data base	Code	Processo	Peso	Unità
Solid waste	9	Metals (Process)	19	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	171	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	171	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	19	kg
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	54,91	vehicle-km
Mat. proc. core	4618	Hot rolled coil production	190	kg

Tabella 3.15 - Inventario dei materiali del gruppo palo in Boustead Model

❖ SimaPro

In questo caso si sono potuti inserire gli acciai da costruzione effettivamente utilizzati per la FreeTree "Fe360 I", "Fe470 I" e "Fe520 I". Per questi materiali il data base di riferimento è *IDEMAT 200*, forse uno tra i più datati presenti nel software, ma l'unico che include questi materiali specifici con la valutazione di tutta LCA riferita alla produzione media mondiale e consegna a Rotterdam (1999). In realtà confrontando i risultati caratteristici di questo data base con altri di materiali simili, si è visto che i consumi non variavano di molto.

3.4.8 Imballaggio

L'imballaggio è composto da un pallet in legno pressato appositamente realizzato per il trasporto della FreeTree, sopra il quale viene posizionato lo scatolone principale contenente a sua volta diversi scatoloni più piccoli che racchiudono gli elementi della turbina eolica.

Il pallet ha dimensioni 1351*1072*464 mm e pesa 15,5 kg: è un po' più piccolo di un Euro-pallet tradizionale. Terminato il trasporto, il pallet è riutilizzabile.

L'imballo fornito da Linz Electric S.p.A. permette di accatastare tre confezioni uguali, per un totale di 450 kg di peso.

L'imballo interno è in cartone a doppia ondulazione, del tipo ksfsk/56265/bc in codice internazionale, con un peso specifico 0,82 kg/m²; il cartone esterno invece è un BIWALL, sempre a doppia ondulazione antiumido, adatto anche al trasporto su nave, leggermente più pesante, 1kg/m²; il peso totale dell'imballo è di circa 12 kg (Tabella 3.16).

Precisiamo che il cartone è un materiale 100% riciclabile, se non contaminato da oli, come in questo caso: i rifiuti prodotti per il 64% vengono riciclati, per il 14% vengono bruciati per produrre energia, il restante 22% è destinato ad altri usi (nei caminetti ad esempio) o alla discarica.

Dal punto di vista economico, il riciclaggio è sicuramente meno oneroso dell'incenerimento: è ovvio però che la carta riciclata non produce un pari peso di carta "nuova" e per fare una tonnellata di carta nuova ci vuole anche una certa percentuale di cellulosa fresca, ed è anche vero che il procedimento ha i propri costi economici, energetici e di inquinamento.

COMPONENTI	CARATTERISTICHE		
PALLET EOLICO	h	1,351	m
	l	1,072	m
	s	0,464	m
	Legno pressato	15,5	kg
<i>Trasporto</i>		18	km
CONTENITORE ESTERNO PARTI EOLICO	"BIWALL"	5	kg
	Ksfsk/56265/bc	7	kg
SCATOLA CARTONE			
<i>Trasporto</i>		67	km

Tabella 3.16 - Inventario dei materiali del gruppo imballaggio

❖ Boustead Model

Per la realizzazione del pallet si è scelto il processo denominato "*Pallet Production*" cui è associato il processo di riciclo "*Wooden pallets (Process)*".

Si è considerata, in quest'analisi, la circostanza più comune e cioè il riciclaggio al 100% del "*Paperboard containers (Process)*", prodotto con il metodo descritto nel data base "*Pack/deliver paperboard*", come si può vedere in Tabella 3.17.

Data base	Code	Processo	Peso	Unità
Solid waste	2	Paperboard containers (Process)	-12	kg
Solid waste	21	Wooden pallets (Process)	-15,5	kg
EU solid waste	76	030308 sorted paper/card for recycling	-12	kg
EU solid waste	80	030399 unsp'd wood/paper waste	-15,5	kg
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	1,3668	vehicle-km
Mat. proc. core	3528	Road transport - rigid < 1 tonne	0,4743	vehicle-km
Mat. proc. core	4371	Pallet production	15,5	kg
Mat. proc. core	4376	Pack/deliver paperboard	12	kg

Tabella 3.17 - Inventario dei materiali del gruppo imballaggio in Boustead Model

❖ SimaPro

L'imballaggio di cartone è del tipo "*Corrugated board base paper, semichemical fluting, at plant/RER*" da dati medi europei, mentre il riciclo deriva da valori ipotizzati sui benefici legati alle mancate emissioni e al risparmio del materiale vergine.

Per il pallet si è assunto il processo "*Wood board ETH*" prodotto in Germania e il riutilizzo dello stesso senza considerare né riciclo, né incenerimento.

E' interessante vedere come lavora il programma soprattutto in questo caso, in cui sono conteggiate le mancate emissioni legate al riciclo e al riutilizzo del pallet. Si riporta di seguito in Figura 3.8 il diagramma di flusso del ciclo di vita dell'imballaggio.

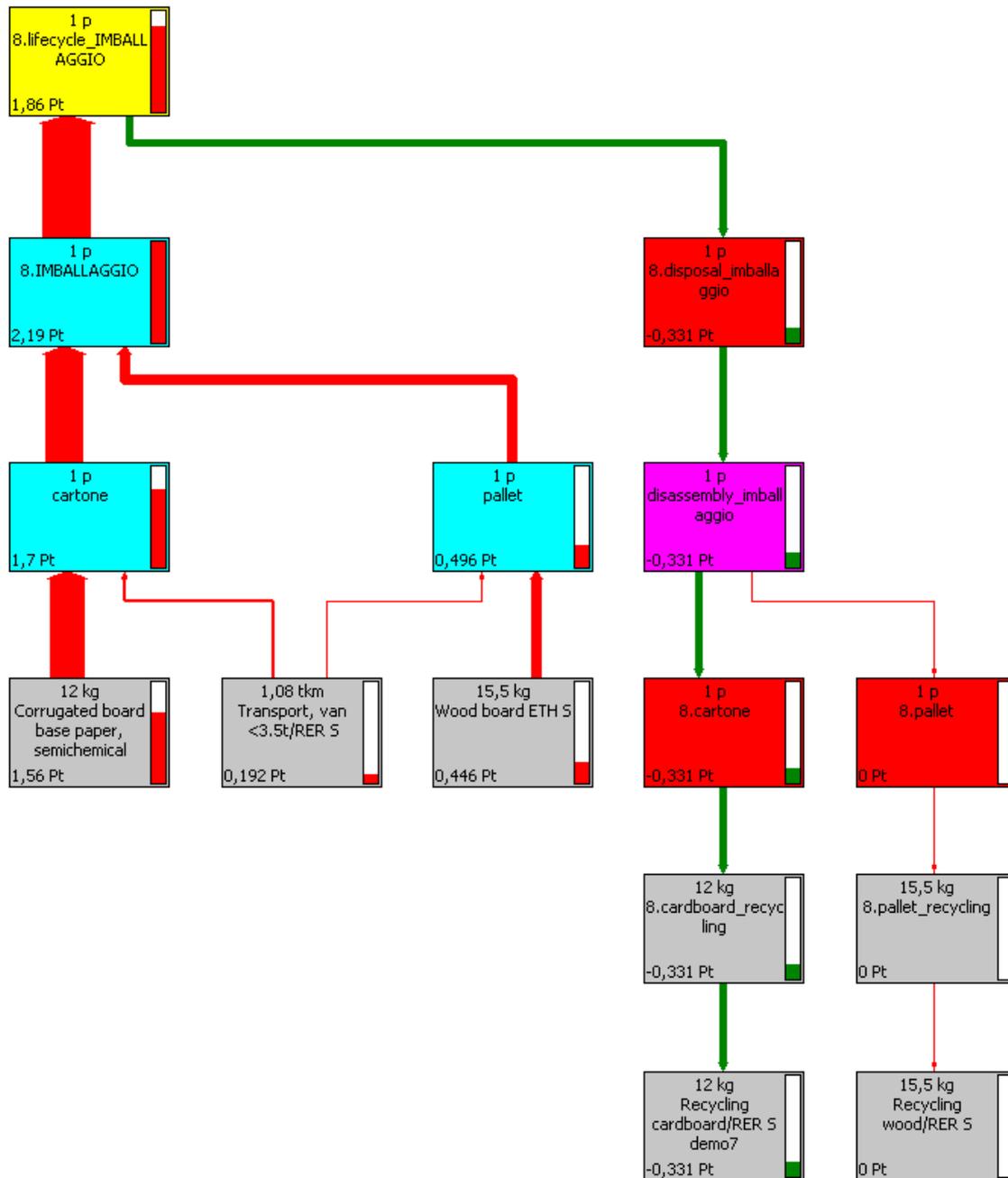


Figura 3.8 - Diagramma di flusso realizzato con SimaPro per la categoria "IMBALLAGGIO"

Il blocco giallo comprende tutto il ciclo di vita del processo considerato con i relativi input e output del sistema: in ingresso (blocchi azzurri chiari) ci sono gli elementi principali creati con l'utilizzo dei data base presenti nel software (blocchi grigi). In uscita in rosso sono evidenziati i blocchi riferiti allo smaltimento e in fuxia si può notare il disassemblaggio della struttura.

Lo spessore delle frecce è proporzionale all'impatto dell'elemento: le frecce rosse indicano impatto ambientale da positivo a nullo, nel caso di quelle più fine; le verdi indicano impatto ambientale negativo, perciò benefico per l'ambiente e in questo caso legato al riciclo del materiale.

Il punteggio espresso in [Pt] identifica la quantità del danno indotto, con riferimento al sistema di normalizzazione specifico del metodo di calcolo utilizzato.

3.4.9 Fondazioni

Le fondazioni su cui collocare l'aerogeneratore, possono essere di due tipi:

1. Fondazioni per installazione del palo di sostegno su terreni con suolo orizzontale e compatto, con caratteristiche fisiche adatte a sopportare il peso del palo, della turbina e degli eventuali pesi aggiuntivi che possono occorrere nel luogo di posizionamento dell'impianto (come neve, raffiche di vento e altri agenti atmosferici). La struttura di supporto è progettata e studiata da Linz Electric S.p.A. in conformità alle norme e leggi locali e alle possibili sollecitazioni che si potrebbero presentare durante il funzionamento; non è escluso che l'utente possa decidere di utilizzare un'altra struttura di sostegno accollandosi la piena responsabilità della costruzione;
2. Fondazioni per installazione su corpi abitativi e/o Aziende: ciò comporta l'ancoraggio dell'aerogeneratore direttamente sulla struttura abitativa. E' però vero che c'è una consistente molteplicità di variabili che condizionano un'installazione di questo tipo: il miglior sistema per l'ancoraggio, in questo caso, è una fondazione a croce di acciaio, realizzato con travi HE saldate al centro e dotate di piastra di appoggio alle quattro estremità. Il collegamento con lo stativo della turbina eolica è realizzabile saldando al centro della croce una flangia identica a quella del terminale della torre tubolare.

La soluzione di cui si tiene conto in questo elaborato è la prima: una colata di calcestruzzo di 3,89 m³ e oltre 194 kg di acciaio di sostegno, come evidenziato in Tabella 3.18.

In ogni caso, queste strutture di sostegno non sono a carico di Linz Electric S.p.A., ma del commerciale - cliente finale che decide d'installare la FreeTree. Per completezza, la fondazione sarà comunque inclusa nell'analisi.

COMPONENTI	CARATTERISTICHE		
FERRI	Acciaio TIPO: B 450	194,810	kg
FONDAZIONI CALCESTRUZZO	h	1,200	m
	l	1,700	m
	s	1,700	m
	Calcestruzzo CLASSE: C 25/30	3,89	m ³
	ps	23	kN/m ³
Trasporto		50	km

Tabella 3.18 - Inventario dei materiali del gruppo fondazioni

❖ Boustead Model

"Structural Concrete" rappresenta il data base scelto per la colata di calcestruzzo, mentre per l'acciaio strutturale della base si è preso a riferimento lo "Steel reinforcing bar".

Rispettando le assunzioni fatte (Tabella 3.19), si è tenuto conto dell'impatto che calcestruzzo e acciaio hanno senza doverli rimuoverli dal terreno.

Data base	Code	Processo	Peso	Unità
Solid waste	9	Metals (Process)	19,481	kg
Solid waste	17	Construction waste (Process)	9128,66	kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-175,329	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	-175,329	kg
EU solid waste	334	100299 unspecified iron/steel waste	19,481	kg
EU solid waste	472	101314 waste concrete/concrete sludge	9128,66	kg
Mat. proc. core	3534	Road transport - rigid 10-12 tonne	64,66	vehicle-km
Mat. proc. core	3534	Road transport - rigid 10-12 tonne	16,55885	vehicle-km
Mat. proc. core	4029	Steel reinforcing bar	194,81	kg
Mat. proc. core	4032	Structural concrete	3,89	cumetre

Tabella 3.19 - Inventario dei materiali del gruppo fondazioni in Boustead Model

❖ SimaPro

Le fondazioni sono in calcestruzzo "*Concrete block, at plant/DE*" secondo produzioni tedesche; la struttura di rinforzo di acciaio è "*Reinforcing steel, at plant/RER*" valutata con le stime del mix di produzione europea.

Per lo smaltimento dell'insieme ci si è affidati allo scenario di smontaggio proposto dal software per il calcestruzzo e il rinforzo d'acciaio: tale scelta è stata fatta nel rispetto del principio precauzionale e cioè nella considerazione che un'ipotesi peggiorativa rispetto alla situazione reale (cioè di non rimuovere l'assieme dal luogo d'installazione), produce un impatto maggiore di quello che effettivamente si verificherà permettendo di restare cautelativi sulla valutazione degli impatti allocabili al kWh prodotto e sull' *Energy Payback Time*.

3.4.10 Manutenzione

Per tutti gli elementi della turbina eolica fino a qui citati, non si è tenuto conto del trasporto fino al luogo d'installazione, ma solo fino alla sede di Linz Electric S.p.A., dove è assemblato il generatore. Infatti, è qui che l'imballaggio è confezionato per essere inviata al luogo di destinazione. E' stato scelto di conteggiare il trasporto dell'assieme, circa 280 kg di peso, per un totale di 200 km dalla sede di Linz Electric S.p.A. fino all'utente, utilizzando un trasporto su gomma.

Sotto questa dicitura è stato incluso anche il cavo di collegamento alla rete elettrica nazionale della lunghezza di 20 m; il peso specifico del cavo è pari a 0,6 kg/m, per un totale di 12 kg, di cui 10 kg di rame e 2 kg di rivestimento in PVC.

La manutenzione vera e propria è di difficile valutazione poiché varia in funzione dei problemi che si possono presentare durante il ciclo di vita, in termini di usura dei componenti o danni conseguenti a situazioni atmosferiche imprevedibili. Solitamente quest'ultimo caso è il meno frequente e da escludere, poiché la normativa vigente prevede che le turbine eoliche siano progettate per sopportare a carichi di forze ben più elevati di quelli realmente riscontrabili in natura.

Non è nemmeno semplice fare una valutazione probabilistica della possibilità di dover sostituire certi componenti meccanici o elettrici.

Per questi motivi si è deciso di tener conto di una manutenzione ordinaria, considerando abbondantemente la distanza percorsa dal manutentore per i controlli: 2300 km nell'arco di vita della FreeTree. Così facendo si considera un cospicuo inquinamento che può

coprire eventuali emissioni legate a interventi straordinari, che prevedono magari l'utilizzo di una gru, ad esempio per la sostituzione di parti non precisate del generatore o il serraggio dei bulloni.

❖ Boustead Model

Per la distanza coperta dal manutentore si è presa a riferimento una "*Private car transport*". Per i cavi di collegamento tra turbina e rete elettrica, si è preso a riferimento il processo "*Copper wire production*" con riciclo del 90% del rame dei fili e dell'80% del PVC (Tabella 3.20).

Data base	Code	Processo	
Solid waste	11	Unspecified refuse (Process)	1 kg
Solid waste	11	Unspecified refuse (Process)	0,4 kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-9 kg
Solid waste	22	Waste to recycling (Process)	-1,6 kg
EU solid waste	385	100699 unspecified copper pr. waste	-9 kg
EU solid waste	385	100699 unspecified copper pr. waste	1 kg
EU solid waste	654	170203 plastic	-1,6 kg
EU solid waste	654	170203 plastic	0,4 kg
Mat. proc. core	3530	Road transport - rigid 3 tonne	31,16864 vehicle-km
Mat. proc. core	3550	Private car transport	400 vehicle-km
Mat. proc. core	4710	Copper wire production	10 kg
Mat. proc. core	5161	PVC pipe fittings (injection mould)	2 kg

Tabella 3.20 - Inventario dei materiali del gruppo manutenzione in Boustead Model

❖ SimaPro

Per il tragitto in auto si è scelto l'utilizzo di un'auto abbastanza recente e quindi meno inquinante rispetto ad altre "*Transport, passenger car, diesel, EURO 4/CH*": era possibile assumere anche un'automobile EURO 5, ma si è preferito rimanere cautelativi. Questo data base alloca le quote di costruzione e la manutenzione della vettura, le la parte di infrastrutture ed il fine vita, tutto in funzione ai chilometri percorsi. Il cavo invece è derivato dal data base "*Copper wire, technology mix, consumption mix, at plant, cross section 1 mm² EU-15*", già usato in precedenza e che già include lo scenario di fine vita.

4. ANALISI DEGLI IMPATTI

4.1 ANALISI DI CONFRONTO DEI SOFTWARE

4.1.1 Comparazione dei risultati degli impatti

Per valutare la rilevanza degli impatti ambientali della turbina eolica nel suo complesso e dei suoi componenti presi singolarmente si sono dapprima confrontati i risultati ottenuti dai due diversi software:

- **Boustead Model** è dotato di un'interfaccia grafica che permette la realizzazione di istogrammi di confronto fra diverse *input table* per un unico tipo di emissione tra quelle proposte dal software, oppure per un'unica *input table* è possibile valutare più emissioni. Inoltre, per quel che riguarda gli indicatori degli impatti, il programma fornisce solo quelli del GWP valutato a 20, 100 o 200 anni per ogni singola *input table*. Gli altri indicatori devono essere calcolati singolarmente, utilizzando i fattori di caratterizzazione corrispondenti a ciascun elemento emesso che concorre a determinare l'impatto, moltiplicandoli per la massa dell'elemento considerato.
- **SimaPro** possiede un'interfaccia grafica e diversi metodi per il calcolo degli impatti, dei consumi di sostanze e dell'energia associati al progetto costruito; si può in questo caso avere, facilmente e nell'immediato, un'idea di massima dell'impatto della FreeTree sotto vari aspetti, sia numerici sia grafici. In questo caso si è usato il metodo di calcolo *EDP (2008)*, *Environmental Product Declarations*.

Per avere una visione d'insieme di partenza, vale la pena valutare le emissioni delle categorie d'impatto obbligatorie applicate all'unità funzionale FreeTree.

L'ordine di grandezza delle emissioni calcolate con i due software, e visibili in Figura 4.1, è lo stesso, com'è ben visibile nel grafico sottostante, anche se nel complesso i risultati presentano delle differenze.

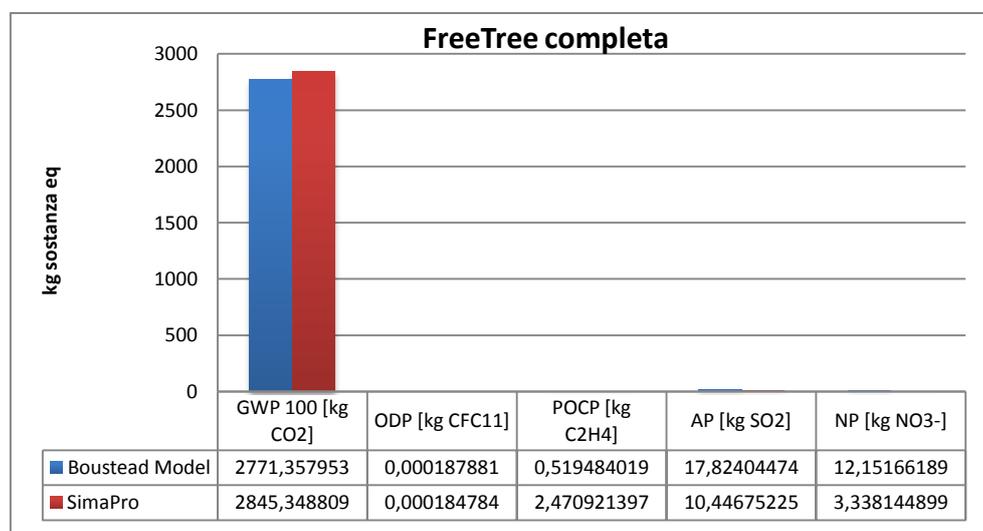


Figura 4.1 - Confronto dell'impatto complessivo della FreeTree calcolato con i due software

L'impatto rilevante, che è anche quello più importante e da tenere in considerazione, è l'emissione di CO₂, calcolata tramite indice GWP (*Global Warming Potential*): più di 2700 kg CO₂ eq sono emessi per la realizzazione dell'intero aerogeneratore.

L'ODP, che concorre alla riduzione della fascia di ozono stratosferico, ha un valore praticamente nullo, così come molto basso è l'effetto della formazione di ossidi fotochimici. Da notare che il valore calcolato con SimaPro è più alto di quello calcolato con Boustead Model, mentre avviene il contrario per l'AP e l'NP.

Importante è rilevare la differenza che esiste nel calcolo dell'NP: SimaPro fornisce il valore in riferimento ai kg PO₄--- eq, mentre in Boustead Model l'NP è stato calcolato in kg NO₃- eq, secondo quanto definito dalla *Danish Technical University* [11].

In ogni caso questi ultimi impatti sono in sostanza trascurabili rispetto all'effetto serra.

Interessante è vedere come i vari pezzi della turbina eolica contribuiscono a ogni singolo impatto in modo differente.

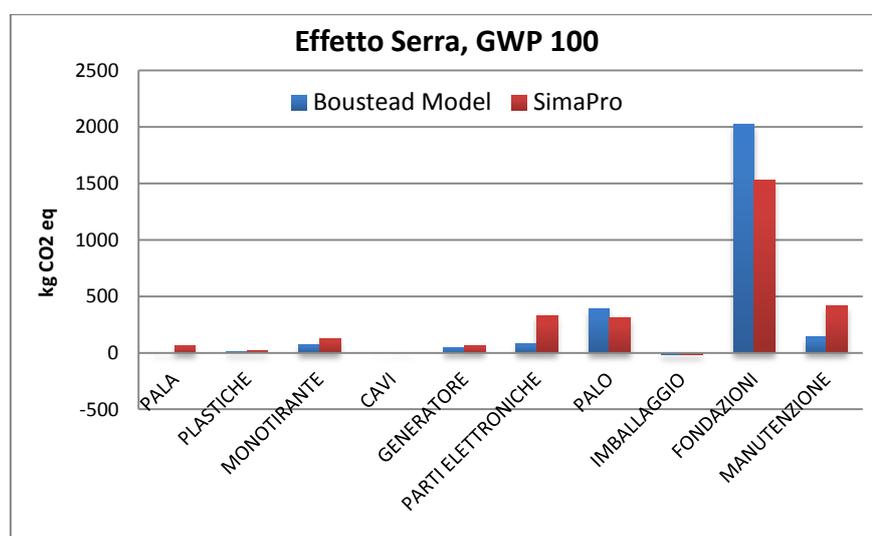


Figura 4.2 - Confronto dell'effetto serra per ogni pezzo della FreeTree

Per quel che riguarda specificatamente il GWP, si può dedurre dalla Figura 4.2 che ciò che contribuisce maggiormente alla sua formazione sono le fondazioni: senza di esse i kg CO₂ eq sarebbero all'incirca un terzo di quelli totali. L'imballaggio ha invece un effetto benefico, questo perché abbiamo considerato di riutilizzare il pallet e riciclare il cartone al 100%: così facendo non è immessa CO₂ in atmosfera, andando a sottrarla dal conteggi finale. Inoltre, il valore del GWP è legato agli anni considerati per il calcolo: in questo caso si è considerato un impatto a 100 anni.

Nelle tabelle seguenti si può notare che per il potenziale di acidificazione, l'AP (*Acidification Potential*) che è il secondo effetto d'impatto considerabile in termini di rilevanza, sia per quello di eutrofizzazione, l'NP (*Nutrification Potential*) che è il terzo, le fondazioni sono ancora quelle che contribuiscono maggiormente.

Un aspetto importante da considerare è che i valori risultano approssimativi, poiché la rilevanza di Acidificazione (Figura 4.3) e anche di Eutrofizzazione (Figura 4.4) dipendono in realtà da fattori locali come le precipitazioni, le caratteristiche del suolo e delle acque, cosa di cui non si è realmente tenuto conto.

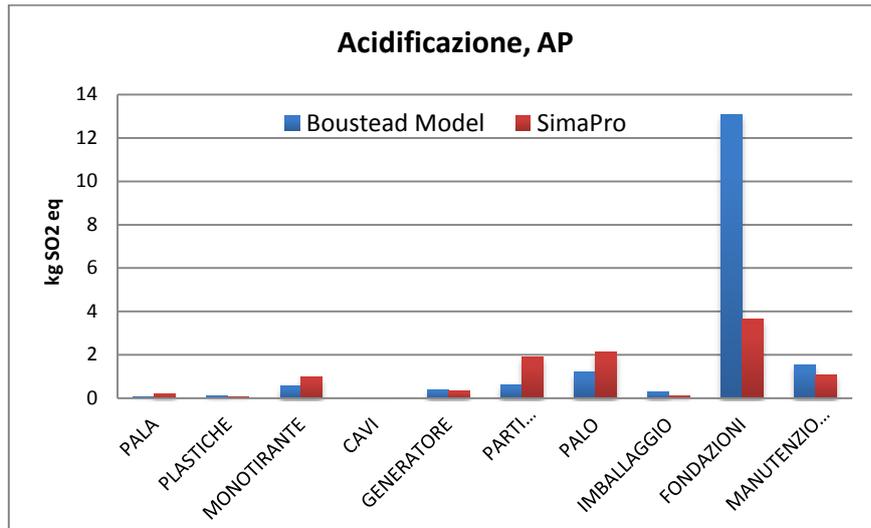


Figura 4.3 - Confronto dell'acidificazione per ogni pezzo della FreeTree

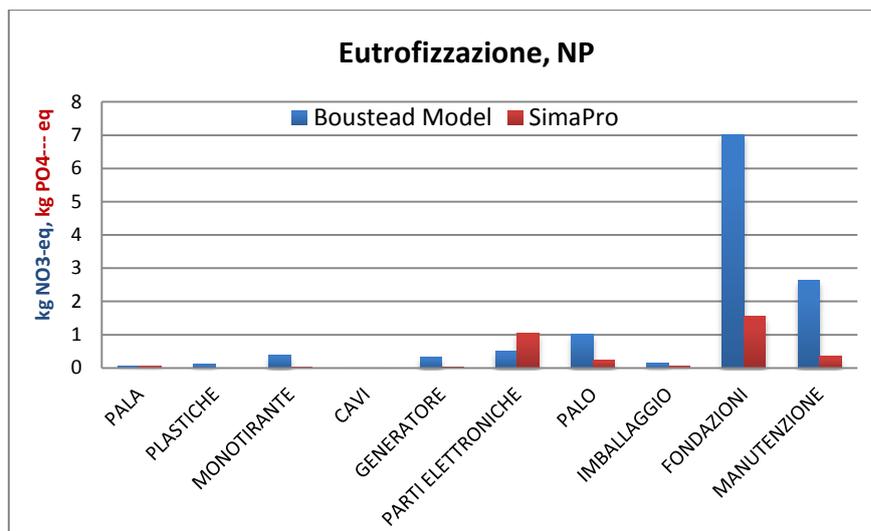


Figura 4.4 - Confronto dell'eutrofizzazione per ogni pezzo della FreeTree

Anche la formazione di ossidi fotochimici, indice POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*), è legata in particolar modo alle fondazioni, ma con valori insignificanti se confrontati con quelli del GWP (Figura 4.5). In questo caso i due software presentano dei risultati molto discrepanti tra di loro, ma ciò è dovuto al fatto che il calcolo di tutti gli impatti in Boustead Model, escluso l'effetto serra, è stato condotto manualmente con alcuni elementi che presentavano un valore indeterminato; inoltre, sono state fatte delle approssimazioni della realtà soprattutto del generatore e delle parti elettroniche.

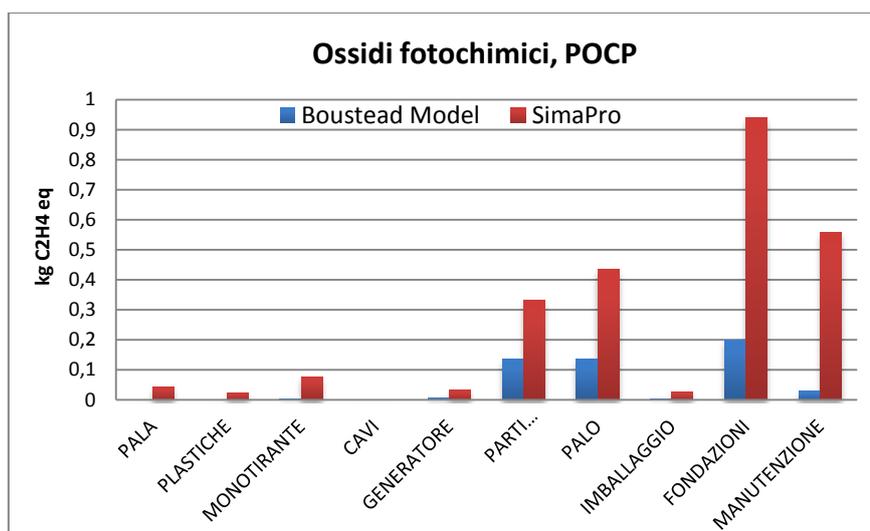


Figura 4.5 - Confronto della produzione di ossidi fotochimici per ogni pezzo della FreeTree

Ancora meno significativo è il contributo fornito all'assottigliamento della fascia di ozono (Figura 4.6).

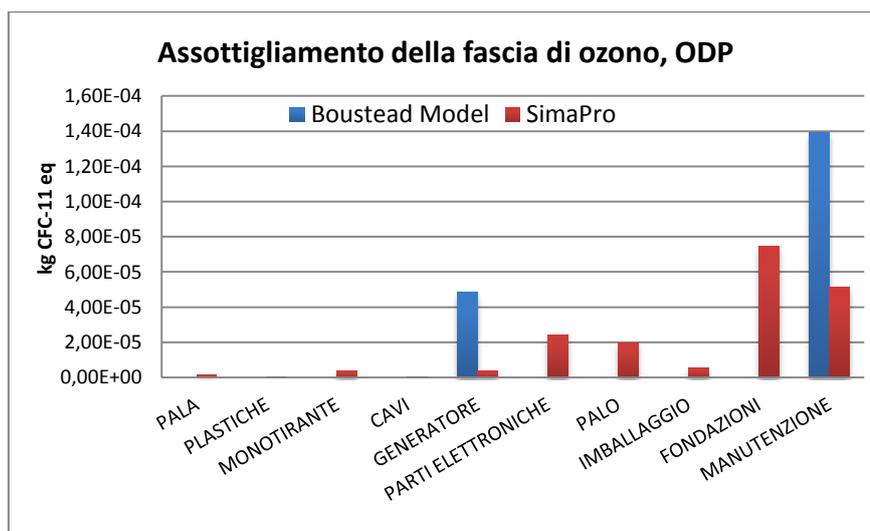


Figura 4.6 - Confronto dell'assottigliamento della fascia di ozono per ogni pezzo della FreeTree

4.1.2 Comparazione dell'analisi energetica

Il metodo di calcolo utilizzato per l'analisi energetica in SimaPro è il *CED*, *Cumulative Energy Demand*, basato sul metodo pubblicato da *Ecoinvent* e ampliato dalla *Pré Consultants*, la cui ultima versione risale ad Agosto 2010.

E' interessante valutare il contributo energetico legato alla realizzazione della FreeTree calcolato con i due software e mostrato in Tabella 4.1.

	Boustead Model[kWh]	SimaPro [kWh]
PALA	31,85995	301,1925
PLASTICHE	96,57703	90,96952
MONOTIRANTE CENTRALE	571,4946	537,5577
CAVI DI TENUTA	6,399358	8,694885
GENERATORE	361,4414	228,0273
PARTI ELETTRONICHE	628,8384	1522,435
PALO	1201,461	1608,718
IMBALLAGGIO	198,8999	122,8361
FONDAZIONI	4108,425	4043,446
MANUTENZIONE	598,3501	2002,081
TOTALE	7803,746	10465,96

Tabella 4.1 - Confronto dell'energia di produzione della FreeTree

Si può notare come anche qui il contributo delle fondazioni sul consumo energetico finale sia preponderante rispetto al resto: è più della metà dell'energia totale necessaria per la realizzazione della turbina eolica in Boustead Model e poco meno della metà in SimaPro.

Per la maggior parte dei sottogruppi in cui è stata divisa la FreeTree, i valori di energia associati alla loro produzione sono simili o comunque dello stesso ordine di grandezza. Ci sono due eccezioni importanti e due poco rilevanti. In ordine d'importanza:

1. *La manutenzione*: in SimaPro la differenza è fatta dal trasporto del manutentore nei dieci anni per 2300 km. Non è chiaro il calcolo che sta alla base del trasporto, ma il data base scelto specifica che è inclusa la realizzazione della vettura, delle infrastrutture, la manutenzione e il fine vita proporzionalmente ai km percorsi.
2. *Le parti elettroniche*: la differenza sta nel fatto che in Boustead Model si è assunta una produzione generica non avendo a disposizione dati adeguati.
3. *Le pale*: il processo scelto in SimaPro prevede che la fibra di vetro sia iniettata in moduli e mescolata a una resina poliammidica per aumentarne la resistenza.
4. *Il palo*: la differenza è dovuta al processo di zincatura del palo, anche qui inserito solo nel progetto realizzato con SimaPro.

4.1.3 Scelta del software di approfondimento

Al fine di eseguire un'analisi degli impatti e un'analisi energetica della turbina FreeTree le più complete e approfondite possibili, si è deciso di porre l'attenzione solamente su uno dei due programmi fin qui usati e considerati.

E' stato deciso di usare il software SimaPro per proseguire con lo studio, in quanto:

1. La versione utilizzata è la più recente, presente nel mercato risalente al 2013, SimaPro 7.3.3;
2. I data base sono stati aggiornati e rivisti di recente. Essendo uno dei programmi più in uso anche da grandi Aziende è frequentemente aggiornato;

3. Definisce sempre dettagliatamente le fonti utilizzate per ogni materiale, l'energia, il trasporto, l'uso e le produzioni a essi legate, i vari processi, il trattamento e lo scenario di fine vita;
4. Vi è un'ampia molteplicità di dati tra i quali scegliere provenienti da varie parti del mondo e da molti campi industriali, ciò permette di creare un elaborato abbastanza fedele della realtà. Si possono comunque aggiungere nuovi elementi conoscendone emissioni e consumi;
5. I metodi di calcolo dei risultati, sia per gli impatti che per l'energia, sono molti e permettono numerose valutazioni e conclusioni sotto più punti di vista;
6. Ha un'interfaccia grafica molto intuitiva e veloce, che fornisce direttamente i risultati o li elabora già sotto forma d'istogramma. Si può eseguire anche un confronto diretto dei sistemi di prodotto creati;
7. Permette di eseguire facilmente l'analisi d'incertezza utilizzando il metodo *Monte Carlo Analysis*.

Si può concludere che SimaPro è un software completo sotto vari aspetti. Ciò non toglie nulla a Boustead Model, che rimane uno dei primi programmi creati per le analisi LCA e il modo migliore di approcciarsi a questa realtà.

4.2 APPROFONDIMENTO DEGLI IMPATTI CON SIMAPRO

Oltre alle tipologie d'impatti standard che devono essere obbligatoriamente presenti in un'analisi LCA, è possibile calcolarne e valutarne molti altri non meno importanti sotto il punto di vista della rilevanza ambientale. Il software SimaPro si presta molto bene a fare questo tipo di approfondimento.

Si è considerato il modello completo che è stato realizzato, comprendente la turbina eolica con relativo palo di supporto, l'imbballaggio e il trasporto fino al luogo d'installazione, le fondazioni cementizie e la manutenzione; si sono quindi utilizzati diversi metodi di calcolo per analizzare vari effetti ambientali.

E' interessante la prospettiva offerta da SimaPro di elaborare i risultati "normalizzandoli", in modo da ottenere indici sintetici con cui valutare complessivamente il sistema.

Ogni metodo di normalizzazione fa riferimento a speciali parametri che rendono possibile l'aggregazione di risultati provenienti da diverse categorie d'impatto: in questo modo si ottengono risultati rapidi che si prestano molto bene al confronto con altri sistemi.

Naturalmente, come accade di frequente in letteratura, numerosi esperti criticano questa manipolazione di dati poiché le considerazioni sulle quali si basano, sono ritenute discutibili e artificiose rendendo azzardato il ridurre l'intero profilo ambientale a un unico parametro.

4.2.1 Eco-Indicator 99 (E)

Per l'analisi degli impatti condotta con il metodo *Eco-Indicator 99*, si è preferito analizzare separatamente le tre categorie di danno cui fanno riferimento tre unità di misura differenti, in modo da poter osservare con più precisione come ogni pezzo della microturbina eolica influenza la salute umana, la qualità dell'ecosistema e l'uso delle risorse.

Per quel che riguarda il danno alla salute umana, in Figura 4.7 sono mostrate le categorie d'impatto che lo determinano. Le categorie "Radiazione", "Strato di ozono" e "Respirazione di sostanze organiche" sono trascurabili, avendo un'incidenza praticamente nulla, dell'ordine di 10^{-7} .

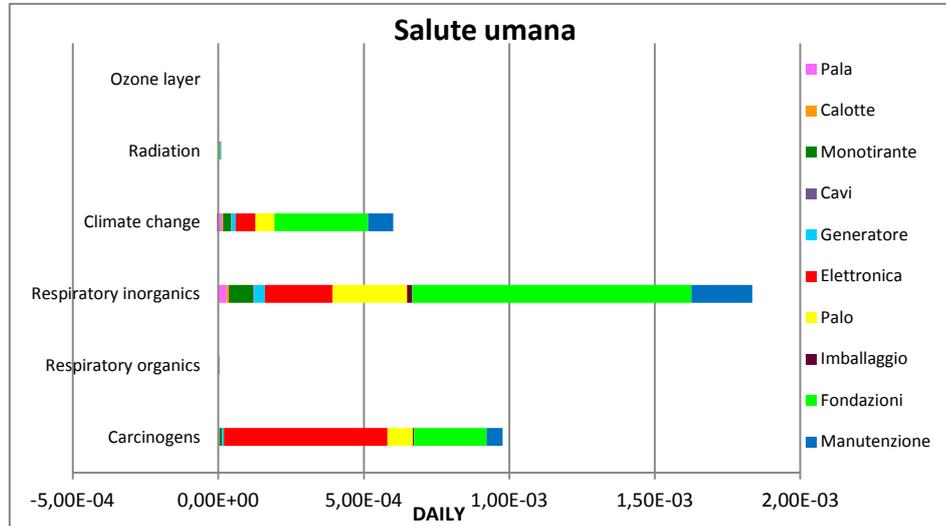


Figura 4.7 - Danni alla salute umana calcolati con il metodo *Eco-Indicator 99*

Più interessanti sono gli altri tre effetti:

- Gli "Agenti cancerogeni" sono legati in particolar modo ai componenti elettronici, che hanno al loro interno una serie di composti che risultano dannosi alla salute, se dispersi nell'ambiente in modo incontrollato. Le schede elettroniche contengono inoltre piombo necessario a garantire la continuità elettrica, ma che non può essere disperso a causa della sua natura cancerogena. L'effetto cancerogeno totale è circa $9,77 \cdot 10^{-4}$ DAILY, di cui il 57,5% è causato alle parti elettroniche. La fondazione, con il 25,5%, è la seconda maggiore causa di cancerogenicità, ma il suo contributo è imputabile alla colata di calcestruzzo, piuttosto che all'acciaio di rinforzo.
- La "Respirazione di sostanze inorganiche", che riguarda soprattutto SO_2 e NO_x , si assesta attorno al valore $1,83 \cdot 10^{-3}$ DAILY e per oltre il 50% dipende ancora dalle fondazioni, a causa dell'impatto della colata di calcestruzzo (oltre 9000 kg) e dei macchinari necessari a realizzarla. Il palo di supporto, il trasporto della FreeTree con relativi controlli e le parti elettroniche sono responsabili ognuno di circa il 12% dell'emissione di sostanze inorganiche, il primo a causa della zincatura, il secondo a causa del combustibile fossile consumato dai veicoli, il terzo a causa dei trattamenti a cui le schede sono sottoposte.
- Anche il "Cambiamento climatico" si lega alla mole delle fondazioni per oltre il 50% del DAILY totale.

In realtà questi valori hanno un'incidenza veramente bassa sulla salute umana, essendo tutti dell'ordine di 10^{-3} . Secondo uno studio pubblicato dalla WHO [14] il DAILY deve essere attualizzato anche in funzione di peso ed età: da qui ne deriva che la morte

durante l'infanzia è associata a DAILY = 33, mentre un decesso in età compresa tra i 5 e i 20 anni, corrisponde a DAILY = 36.

A fronte di questi dati possiamo dedurre che il danno associato alla FreeTree sulla salute umana è irrisorio.

Per la qualità dell'ecosistema si cambia registro: "Acidificazione ed Eutrofizzazione" sono già state analizzate in precedenza, ma non in funzione della frazione potenzialmente interessata dall'emissione di sostanze eco-tossiche per metro quadro per anno (PAF*m2*yr). Per riuscire a rendere graficamente evidenti tutti gli impatti in Figura 4.8, si è diminuita la scala dell'"Eco-tossicità" di un fattore 10.

In questo caso il palo è quello che incide maggiormente: su un totale di circa 2422 PAF*m2*yr, solo 94 PAF*m2*yr sono dovuti ai 190 kg che lo caratterizzano, i restanti dipendono dallo strato di zinco che lo riveste.

Per gli altri due impatti le fondazioni rimangono la causa maggiore di emissione.

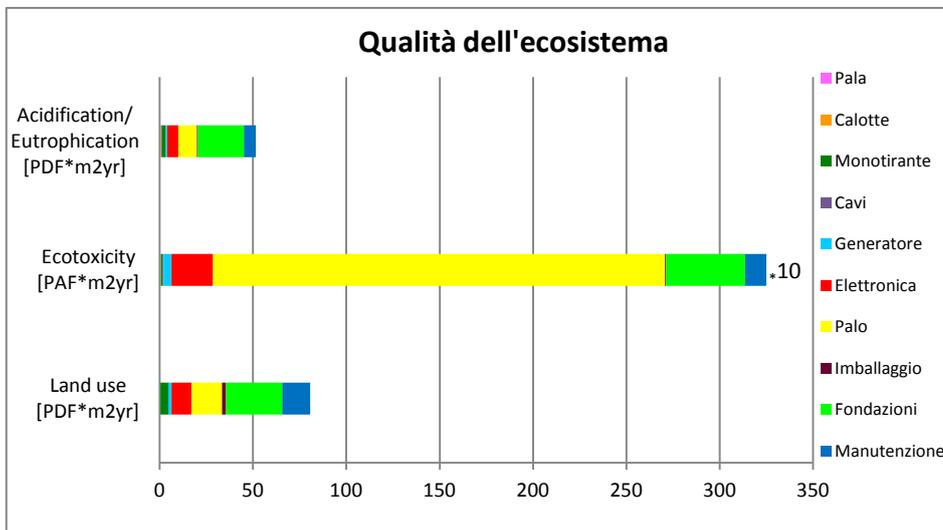


Figura 4.8 - Danni alla qualità dell'ecosistema calcolati con il metodo *Eco-Indicator 99*

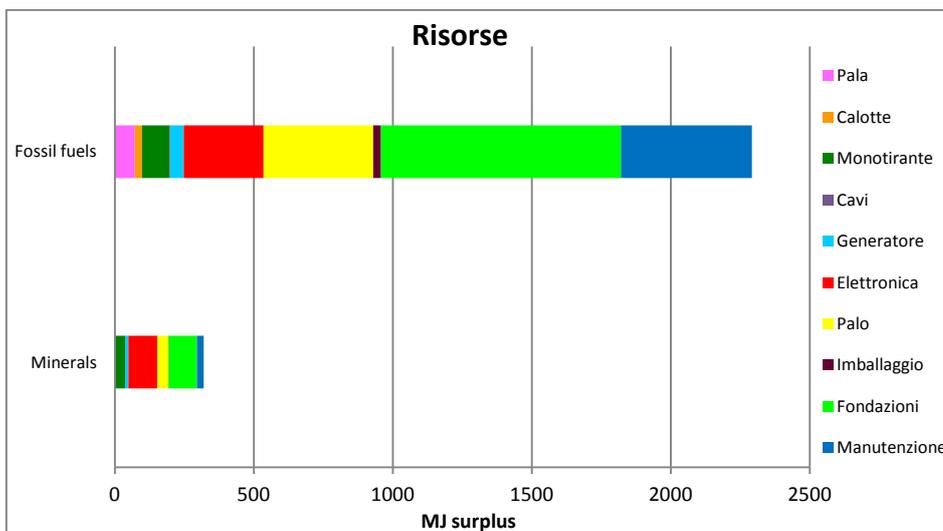


Figura 4.9 - Mancanza di disponibilità di risorse calcolata con il metodo *Eco-Indicator 99*

Per quanto riguarda il consumo di "Risorse fossili" e "Minerali", analizzato in funzione della loro mancanza rispetto alle necessità future, dalla Figura 4.9 è chiaro come nuovamente le fondazioni siano la causa principale di questo eccesso di energia necessario in futuro: il loro contributo è di 863,67 MJ surplus su 2292 MJ surplus totali. In particolare, il consumo di "Risorse fossili" è dovuto all'elevata quantità di combustibile necessaria per il trasporto dei vari elementi della turbina eolica e per la produzione dell'energia elettrica utilizzata per la loro fabbricazione, in funzione al tipo di impianti caratteristici della Nazione di riferimento.

Infine, non bisogna trascurare l'influenza sul consumo di "Risorse Fossili" di:

- *Manutenzione*: l'uso di combustibile per lo spostamento su strada è elevato;
- *Costruzione del palo*: in questo caso il rivestimento di zinco incide solo per l'11,5% su 40 MJ surplus;
- *Elettronica*: la produzione dell'alluminio della scatola di contenimento dei componenti è responsabile del 40% dei 103,7 MJ di risorse fossili e del 50% dei 40 MJ associati alle risorse minerali.

4.2.2 CML 2 baseline 2000 V2.05 / West Europe, 1995

L'elaborazione dei risultati con il metodo *CML 2 baseline* caratterizza tutti i risultati valutandoli con riferimento al medio termine; in ogni caso gli indicatori GWP, ODP, POCP, NP, AP hanno valori compatibili con quelli già visti in precedenza e perciò non verranno rianalizzati.

Gli altri indicatori considerati sono quelli di Figura 4.10.

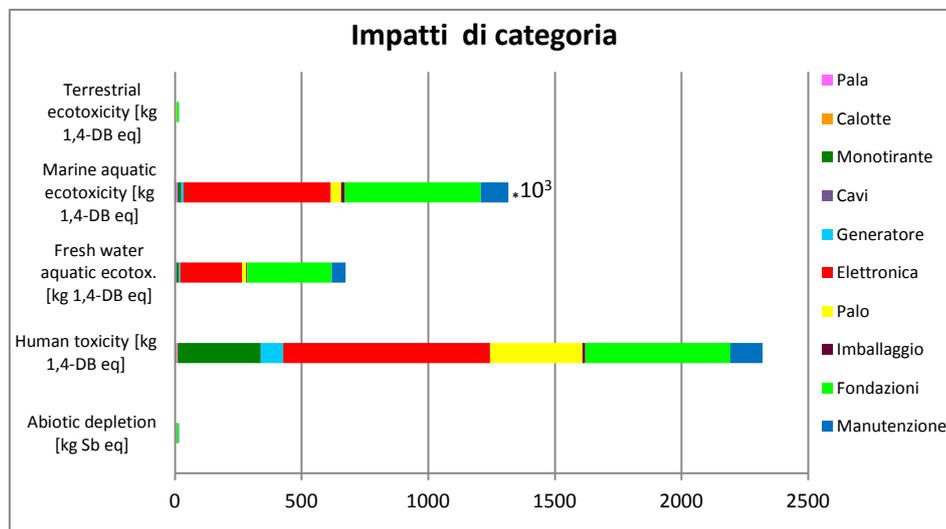


Figura 4.10 - Impatti calcolati con il metodo *CML 2 baseline*

La "Tossicità dell'acqua marina" è il danno più ingente che si può notare: la sua scala di riferimento è stata ridotta di un fattore 10^3 per poterla visualizzare assieme alle altre categorie d'impatto. E' evidente l'incidenza dell'elettronica, $5,81 \cdot 10^5$ kg 1,4-DB_{eq}, dovuta al fatto che, nel processo di fabbricazione dei circuiti stampati, ci sono molti bagni chimici

da effettuare seguiti da operazioni di lavaggio tra un bagno e l'altro che servono a porre termine alle reazioni chimiche e impedire l'inquinamento di successivi bagni. Questo comporta l'uso di grandi quantità d'acqua: si stima l'uso di circa 1.5 m^3 d'acqua per m^2 di bassetta. Per gli stessi motivi l'elettronica incide sull'"Eco-tossicità dell'acqua dolce", 244 kg 1,4-DB_{eq}, e sulla "Tossicità umana", 817 kg 1,4-DB_{eq}, a causa dei suoi elementi che già si è detto, essere dannosi e cancerogeni.

L'impatto della fondazione è ancora innegabile e poco inferiore rispetto a quello dell'elettronica, $5,17 \cdot 10^5$ kg 1,4-DB_{eq}: infatti, per ogni m^3 di calcestruzzo sono necessari dai 100 ai 150 litri d'acqua. Si può capire quindi l'influenza che le fondazioni hanno sulla tossicità dell'acqua.

L'impatto del palo sulla "Tossicità umana" è ancora imputabile alla zincatura per oltre l'85% dei 365 kg 1,4-DB_{eq} caratteristici.

E' infine interessante osservare il contributo di tutti gli impatti considerati dal metodo *CML 2 baseline*, e trasformati tramite i fattori di normalizzazione caratteristici di ogni categoria di danno: in questo modo è possibile comparare unità differenti. La Figura 4.11 evidenzia che la "Tossicità delle acque" è il danno maggiore apportato dalla realizzazione della FreeTree. Naturalmente tutto è legato alle ipotesi di partenza: se ad esempio il montaggio dell'aerogeneratore avvenisse sul tetto di un edificio l'impatto sull'eco-tossicità dell'acqua marina e dell'acqua dolce diminuirebbe di quasi tutto il valore caratterizzante le fondazioni.

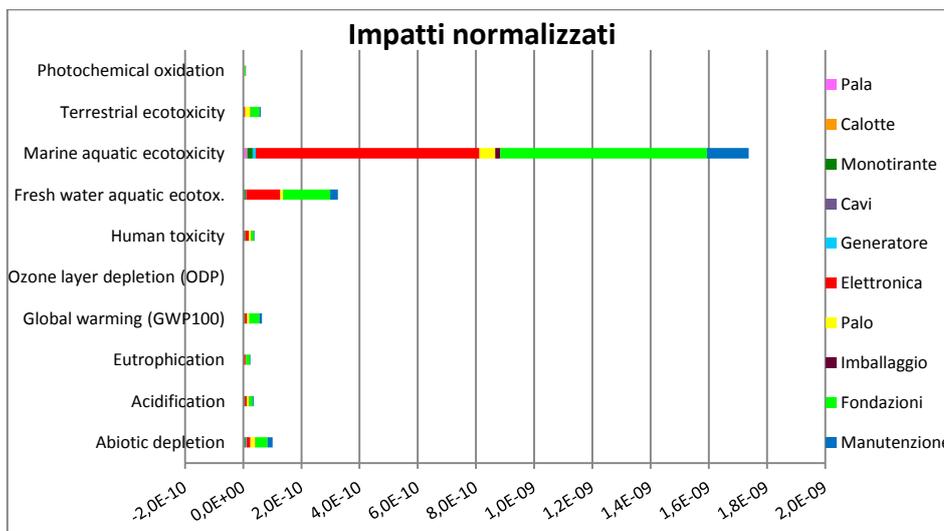


Figura 4.11- Impatti calcolati con il metodo *CML 2 baseline*

4.2.3 Europe ReCiPe H/A, Endpoint method

Per quel che riguarda gli impatti sulla salute umana, non c'è molto da dire, poiché il valore calcolato col metodo ReCiPe è molto simile a quello visto e calcolato con l'*Eco-Indicator 99*.

Per la categoria "Cambiamento Climatico per la salute umana", in Figura 4.12 si può notare come il 50% del danno, circa $2,14 \cdot 10^{-3}$ DAILY, è dovuto alle fondazioni, seguite da manutenzione $5,77 \cdot 10^{-4}$ DAILY, parti elettroniche $4,68 \cdot 10^{-4}$ DAILY e infine palo;

stesse proporzioni sono mantenute anche per le categorie "Formazione di particolato" e "Tossicità umana".

L'imballaggio ha invece un effetto positivo sul cambiamento climatico (cui corrisponde un valore negativo d'impatto), dovuto al riciclo della carta e al riutilizzo del pallet.

Questi dati rispecchiano perfettamente ciò che è stato evidenziato in precedenza con gli altri metodi.

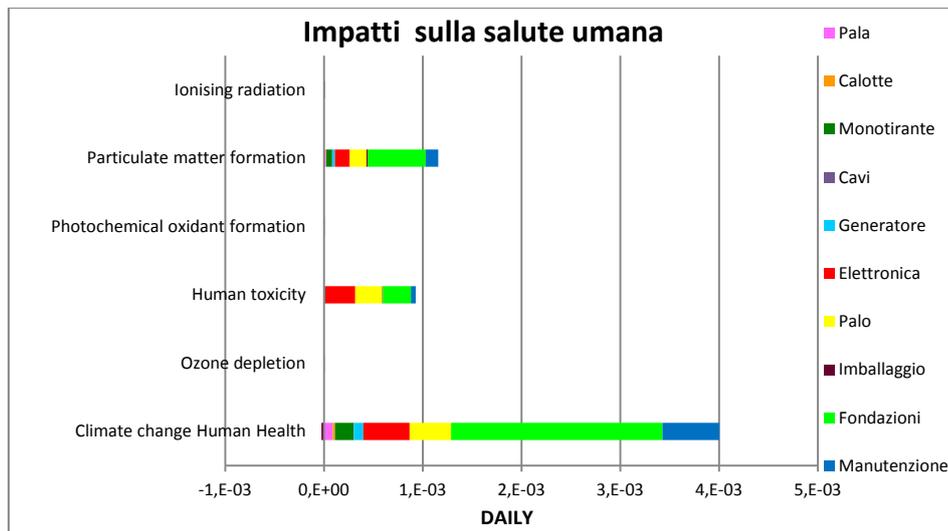


Figura 4.12 - Impatti sulla salute umana calcolati con il metodo *ReCiPe*

Per la diversità dell'ecosistema (Figura 4.13), è di nuovo il "Cambiamento climatico" l'impatto maggiore provocato dalla realizzazione della FreeTree secondo le proporzioni già viste. I livelli di occupazione e uso del suolo sono distribuiti abbastanza equamente tra le varie parti dell'aerogeneratore. L'imballaggio ha anche in questo caso un effetto positivo sia sul "Cambiamento climatico" che sull'"Eco-tossicità umana".

In ogni caso tali fattori hanno un'incidenza molto bassa, dell'ordine di 10^{-7} , 10^{-11} in certi casi e quindi trascurabili.

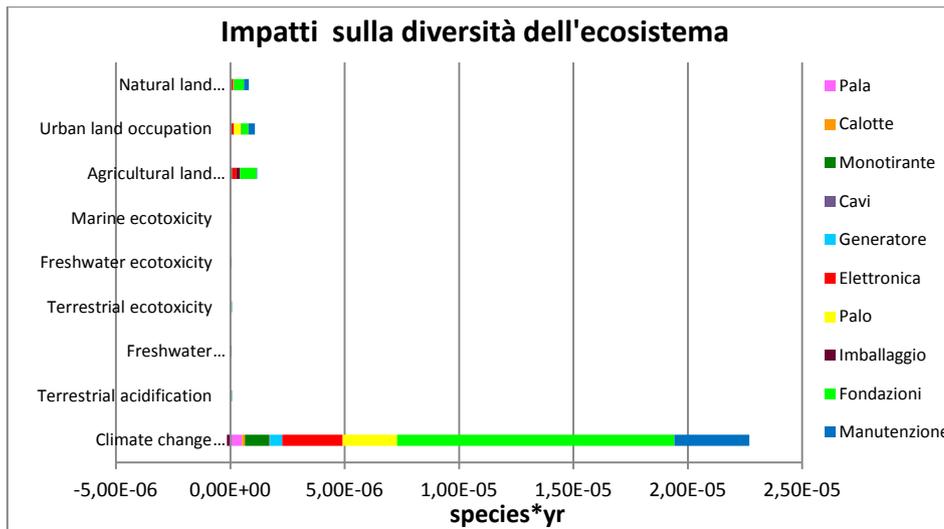


Figura 4.13 - Impatti sulla diversità dell'ecosistema calcolati con il metodo *ReCiPe*

Per quel che riguarda la disponibilità delle risorse (Figura 4.14), è interessante notare la forte incidenza che il progetto ha sull'*esaurimento delle risorse fossili*: tale effetto è già stato analizzato con l'*Eco-Indicator 99*, ma dal punto di vista dell'energia e non dal punto di vista economico. In ogni caso pur cambiando l'unità di riferimento, la "classifica" d'incidenza delle parti dell'aerogeneratore resta immutata: il 40% è dovuto alle fondazioni, il 20% dalla manutenzione, a seguire palo e componenti elettroniche, rappresentando assieme l'88% degli 11620\$ di costo totali.

Sul fronte dell'*esaurimento delle risorse minerali*, le fondazioni e il palo si spartiscono equamente i 2/3 del totale, per una quota di 60,70\$.

Bisogna ricordare che molti dei materiali utilizzati, o ipotizzati in questo progetto, derivano da materiale riciclato e/o prevedono il riciclo a fine vita: questo permette di diminuire il costo associato all'estrazione di nuove materie prime e di avere un risparmio su quelle disponibili in futuro.

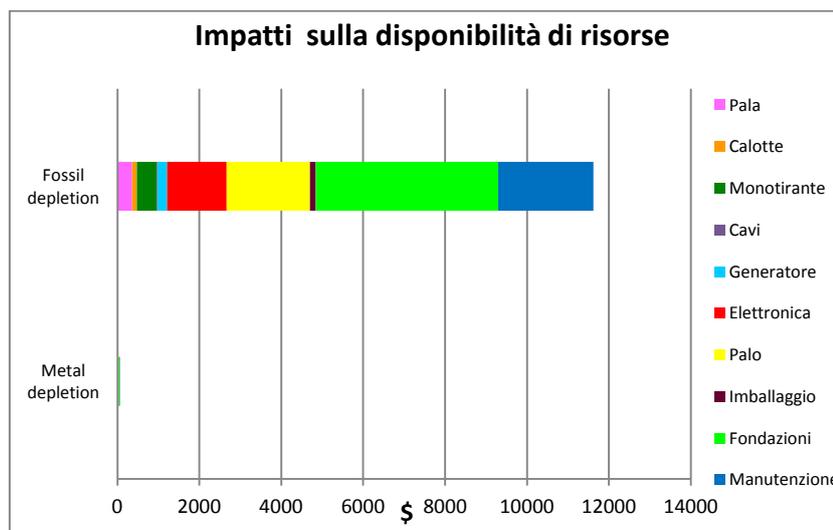


Figura 4.14 - Impatti sulla disponibilità di risorse calcolati con il metodo *ReCiPe*

4.3 IMPATTO AMBIENTALE DEI SITI EOLICI DISPONIBILI

4.3.1 Fonte dei dati utilizzati

Grazie ai dati reali offerti da diverse fonti e risalenti al periodo 2010 - 2011, è stato possibile fornire una visione abbastanza ampia delle condizioni di ventosità che caratterizzano varie località e che devono essere valutate per capire se il sito eolico è idoneo all'installazione della FreeTree.

I dati si riferiscono a 20 località, di cui 19 in Italia e una in Germania: per molte di queste la disponibilità di misurazioni fa riferimento a più anni e/o serie temporali relative a diverse altezze dal suolo.

I dati utilizzati sono stati forniti da varie fonti:

1. I siti eolici della regione Lazio dai ricercatori dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima-(ISAC) CNR sede di Roma;
2. Il sito eolico della regione Basilicata dall'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA) CNR sede di Potenza;
3. I siti eolici delle regioni Sardegna, Lombardia, Veneto e Trentino Alto-Adige (Sito 9 Sito 10): Dati Climatici a cura del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare;
4. Il sito eolico della regione Trentino Alto-Adige (Avio) e il sito eolico in Germania dall'azienda Linz Electric S.p.A..

4.3.2 Determinazione dell'AEP

Da questo momento in poi, l'unità funzionale di riferimento non sarà più la microturbina FreeTree.

Si assume come unità funzionale quella caratteristica delle analisi LCA di questo genere, vale a dire il kg_{eq} / kWh , che dà l'idea dell'impatto associabile al kWh elettrico prodotto dall'aerogeneratore.

L'AEP (*Annual Energy Production*) è la produzione energetica annua riferita ai siti eolici sopra citati ed è stata stimata in un elaborato precedente, al quale si rimanda per ulteriori dettagli in merito alla sua determinazione e ai dati della ventosità. [15]

La stima utilizzata per l'AEP deriva dall'applicazione del metodo probabilistico di Monte Carlo, il quale permette di analizzare un fenomeno stocastico, come il vento, secondo una stima della distribuzione di probabilità che ne approssima l'andamento reale.

Senza dilungarsi troppo sul metodo utilizzato per la determinazione dell'AEP, è doveroso spiegarne i fondamenti di base.

Il valore numerico dell'AEP può essere espresso come somma del suo valore medio e dell'incertezza di caratterizzazione:

$$AEP = \overline{AEP} + \sigma_{\overline{AEP}} \quad (4.1)$$

La sua determinazione si ottiene, in modo molto generico, dalla formula:

$$AEP = \Delta\tau \int_{v_i}^{v_o} P_a(v) \cdot D(v) \quad (4.2)$$

Con

- $D(v)$ [m/s] densità di probabilità associata al verificarsi della velocità v

$$D(v)dv = \frac{d\tau}{\Delta\tau} \quad (4.3)$$

- dv [m/s] porzione elementare di velocità intorno al valore v
- $d\tau$ [h] porzione elementare del tempo $\Delta\tau$ per la quale la velocità ha valore v
- $D(v)dv, \Delta\tau/d\tau$ compresi tra 0 e 1, frequenza e probabilità associata al verificarsi della velocità v

La formula più comunemente usata e conosciuta per le stime di massima dell'AEP è:

$$AEP = \Delta\tau \sum_v P_a(v) \cdot D(v)\Delta v \quad (4.4)$$

I dati di partenza a disposizione erano riferiti a 60 min (1 h) di rilevamento; il processo di determinazione della potenza media dell'aerogeneratore è stato reiterato per J volte, in questo caso pari a 8760, in modo da simulare un intero generico anno di funzionamento e da qui, ripetendo la simulazione per il numero di anni della vita utile della macchina, si ottiene un certo numero di AEP_n che si addensano attorno ad un valor medio, caratterizzato da una certa distribuzione di probabilità.

In accordo con il limite centrale, la distribuzione è di tipo gaussiana con valore medio $AEP_\infty + \sigma_{AEP_\infty}$,

$$AEP_\infty = \lim_{J \rightarrow \infty} AEP_{J \rightarrow \infty} \quad (4.5)$$

Considerando che la vita utile della microturbina eolica è stata ipotizzata essere di dieci anni, moltiplicando l'AEP ottenuto per tale valore, si ottiene il dato riferito all'intero ciclo di vita. Questo valore è quello che è stato utilizzato per ipotizzare la producibilità dell'aerogeneratore.

L'AEP derivante dal metodo numerico - probabilistico sarà quindi:

$$\overline{AEP}_{np} = AEP_\infty = \sum_n \frac{AEP_n}{N} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{\overline{AEP}_{np}} = \sigma_{AEP_\infty} = \sqrt{\frac{\sum_n (\overline{AEP}_{np} - AEP_n)^2}{N - 1}} \quad (4.7)$$

4.3.3 Risultati e caso limite

L'AEP di cui si tiene conto è un valore di convergenza, ottenuto implementando il metodo per gli anni di vita della FreeTree e perciò può essere assunto come valore medio costante nei dieci anni.

Gli impatti associati al kWh di energia prodotta sono calcolati dividendo i kg totali di sostanza impattante emessi nella fase di realizzo della FreeTree per la producibilità energetica associata alla sua vita utile. Ad esempio per il calcolo del GWP, la formula è la seguente:

$$GWP \left[\frac{kgCO_{2eq}}{kWh} \right] = \frac{GWP_{TOT-FreeTree} [kgCO_{2eq}]}{AEP \cdot 10 [kWh]} \quad (4.8)$$

La stessa va applicata alle altre quattro categorie di danno considerate.

Tali valori sono univocamente determinati per ogni sito eolico considerato e dipendono dall'AEP caratteristico della località.

Nella Tabella 4.2 è possibile vedere le emissioni espresse in kg di sostanza equivalente al kWh, calcolate per tutti i siti eolici disponibili e i chilogrammi di sostanza impattante emessi in totale dal processo (evidenziati in rosso).

SITI DISPONIBILI		AEP [kWh]	GWP 100 [kg CO ₂ /kWh]	AP [kg SO ₂ /kWh]	NP [kg PO ₄ -/kWh]	POCP [kg C ₂ H ₄ /kWh]	ODP [kg CFC11/kWh]
Sardegna	Sito 1 2011	2101,50	0,1354	4,97E-04	1,59E-04	1,18E-04	8,79E-09
Sardegna	Sito 2 2011	3828,50	0,0743	2,73E-04	8,72E-05	6,45E-05	4,83E-09
Sardegna	Sito 3 2011	2997,40	0,0949	3,49E-04	1,11E-04	8,24E-05	6,16E-09
Sardegna	Sito 4 2011	1404,90	0,2025	7,44E-04	2,38E-04	1,76E-04	1,32E-08
Sardegna	Sito 5 2011	2089,00	0,1362	5,00E-04	1,60E-04	1,18E-04	8,85E-09
Lombardia	Sito 6 2011	630,60	0,4512	1,66E-03	5,29E-04	3,92E-04	2,93E-08
Lombardia	Sito 7 2011	411,90	0,6908	2,54E-03	8,10E-04	6,00E-04	4,49E-08
Veneto	Sito 8 2011	789,90	0,3602	1,32E-03	4,23E-04	3,13E-04	2,34E-08
Basilicata	Tito Scalo 2011	51,700	5,5036	2,02E-02	6,46E-03	4,78E-03	3,57E-07
Germania	Germania 2011	1313,70	0,2166	7,95E-04	2,54E-04	1,88E-04	1,41E-08
Trentino A. A.	Sito 9 2011	2989,60	0,0952	3,49E-04	1,12E-04	8,27E-05	6,18E-09
Trentino A. A.	Sito 10 2011	612,90	0,4642	1,70E-03	5,45E-04	4,03E-04	3,01E-08
Trentino A. A.	Avio 2010	224,60	1,2669	4,65E-03	1,49E-03	1,10E-03	8,23E-08
Lazio	Castel di Guido 2010	275,60	1,0324	3,79E-03	1,21E-03	8,97E-04	6,70E-08
Lazio	Arpa Lazio 2010	14,70	19,3561	7,11E-02	2,27E-02	1,68E-02	1,26E-06
Lazio	Cavaliere 2010	86,40	3,2932	1,21E-02	3,86E-03	2,86E-03	2,14E-07
Lazio	Tor Vergata 2010	160,80	1,7695	6,50E-03	2,08E-03	1,54E-03	1,15E-07
Lazio	Latina 2010	66,60	4,2723	1,57E-02	5,01E-03	3,71E-03	2,77E-07
Lazio	Frosinone 2010	53,90	5,2786	1,94E-02	6,19E-03	4,58E-03	3,43E-07
Lazio	Viterbo 2010	298,80	0,9523	3,50E-03	1,12E-03	8,27E-04	6,18E-08
TOTALE [kg di sostanza equivalente]			2845,3488	10,4468	3,3381	2,4709	1,85E-04

Tabella 4.2 - Impatti calcolati per i siti eolici a disposizione espressi in kg_{sostanza}/kWh

L'energia elettrica prodotta è molto differente tra le varie località presentate: per esempio l'AEP del Sito 3 è il doppio di quella a Viterbo. E' però vero che si confrontano due

regioni differenti, quindi con condizioni climatiche molto diverse tra di loro, come sono la Sardegna, che è un'isola e perciò già di per sé più ventosa, e il Lazio.

Se invece guardiamo il Sito 9 e Avio, situate entrambe in Trentino Alto Adige, svincolandoci quindi dalla variabile regionale, notiamo che la prima ha una producibilità energetica comunque superiore di ben dieci volte rispetto alla seconda.

Tali differenze incidono sulle emissioni di sostanze impattanti in termini di $\text{kg}_{\text{eq}}/\text{kWh}$, secondo una proporzionalità inversa rispetto alla producibilità: all'aumentare della prima diminuisce la seconda. Naturalmente l'aspetto più interessante rimane la produzione di $\text{CO}_{2\text{eq}}$.

Se confrontiamo i risultati ottenuti con quelli calcolati per altre fonti energetiche, è possibile capire effettivamente l'entità della convenienza ambientale della FreeTree in funzione dei kWh prodotti.

La Figura 4.15 mostra il livello di emissioni associate alla produzione elettrica lorda per la situazione italiana degli ultimi 20 anni. [16]

La CO_2 è calata di oltre 100 g/kWh per ogni tipo di produzione considerata: nel calcolo di questi valori sono incluse anche le perdite di rete, l'energia richiesta dai servizi ausiliari e la quota di energia elettrica importata.

Inoltre è da mettere in luce che la produzione termoelettrica comprende la generazione da biomasse e biogas, mentre nel computo dell'energia elettrica totale è compreso anche il contributo delle fonti rinnovabili: l'aumentare della loro presenza sul territorio e l'evoluzione tecnologica, che ha portato all'aumento dell'efficienza degli impianti, hanno permesso l'abbattimento di circa il 20% della CO_2 negli ultimi 20 anni.

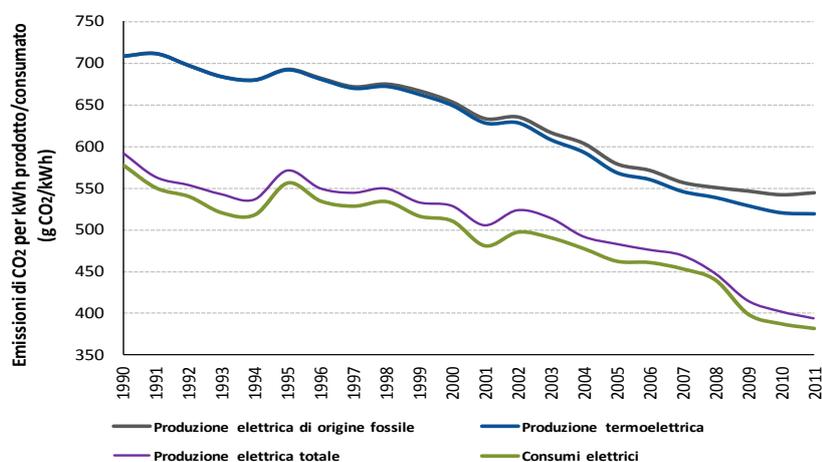


Figura 4.15 - Andamento del fattore di CO_2 (g) per kWh elettrico prodotto (lordo) e consumato

Se invece andiamo a osservare le emissioni di ogni categoria per l'anno 2011 (Tabella 4.3), periodo che coincide perfettamente con le serie temporali dei dati a disposizione e ultimo di riferimento dell'ISPRA, si nota che il conteggio totale comprendente le fonti rinnovabili è più basso di quello dei soli combustibili fossili addirittura del 30%.

COMBUSTIBILI	kg CO ₂ eq/kWh
TOTALE COMBUSTIBILI FOSSILI	0,5449
TOTALE COMBUSTIBILI (+ BIOMASSE)	0,5190
TOTALE TERMOELETTRICO (+VAPORE ENDOGENO E ALTRE FONTI DI CALORE) [1]	0,5047
TOTALE E.E. (+altre FER)[2]	0,3931

[1] Nel totale termoelettrico è considerata l'energia geotermica (vapore) che rappresenta una fonte rinnovabile con bilancio emissivo pari a zero.

[2] Si considera il contributo della fonte idroelettrica, eolica e fotovoltaica.

Tabella 4.3 - Fattori di emissione di anidride carbonica da produzione elettrica lorda

Tornando ai dati della FreeTree che si stanno analizzando, si nota che alcuni siti hanno delle emissioni di kg CO₂eq anche di molto superiori a quelle del termoelettrico prodotto da solo combustibili fossili.

E' quindi interessante esaminare quali sono i limiti minimi affinché la microturbina in analisi sia conveniente rispetto alla produzione elettrica nazionale.

Il GWP in kgCO₂/kWh riferito a una precisa località, avente un determinato AEP caratteristico, è definito come il rapporto tra il $GWP_{TOT-FreeTree}$, che rappresenta l'emissione di anidride carbonica associata alla realizzazione della FreeTree, e l'*AEP* moltiplicata per gli anni di vita utile.

$$GWP \left[\frac{kgCO_{2eq}}{kWh} \right] = \frac{GWP_{TOT-FreeTree} [kgCO_{2eq}]}{AEP \cdot 10 [kWh]} \quad (4.9)$$

Se ipotizziamo di conoscere già l'emissione di CO₂/kWh specifico di una località, ma vogliamo risalire all'AEP caratteristico, possiamo usare la formula inversa e ottenere così il dato necessario.

In seguito si può calcolare il fattore di carico f_c (esprimibile anche come λ) definito come:

$$\lambda = \frac{\text{Energia Prodotta}}{\text{Energia Producibile}} \quad (4.10)$$

L'*energia prodotta* è l'energia che la microturbina eolica produce in un anno con quell'effettiva curva di potenza e densità di probabilità, secondo la formula

$$\text{Energia Prodotta} = \int_{\text{anno}} P_a(v) \cdot D(v) \quad (4.11)$$

L'*energia producibile* è quella che si sarebbe prodotta se la microturbina eolica lavorasse a velocità nominale tutto l'anno.

Considerando che la producibilità massima è riferita al numero di ore che compongono un anno, 8760, e ipotizzando un funzionamento a velocità nominale costante, il fattore di carico può essere espresso anche come:

$$\lambda = \frac{\text{ore di utilizzo in un anno [h]}}{8760 [h]}$$

totale, il sito eolico emetterà una quantità di CO₂/kWh accettabile e sarà ritenuto vantaggioso: in questo caso si potrà parlare d'installazione intelligente e generazione di energia elettrica "pulita". I λ minimi sono pari rispettivamente all'8,26% e al 6%. Nel primo caso solo otto siti sono favorevoli; nel secondo si sale a quota dieci.

Affinché l'installazione della FreeTree sia conveniente, è necessario che il sito ospitante abbia un fattore di carico superiore a quelli appena citati e AEP minimo di 723,823 kWh nel caso più sfavorevole di produzione da sole fonti fossili.

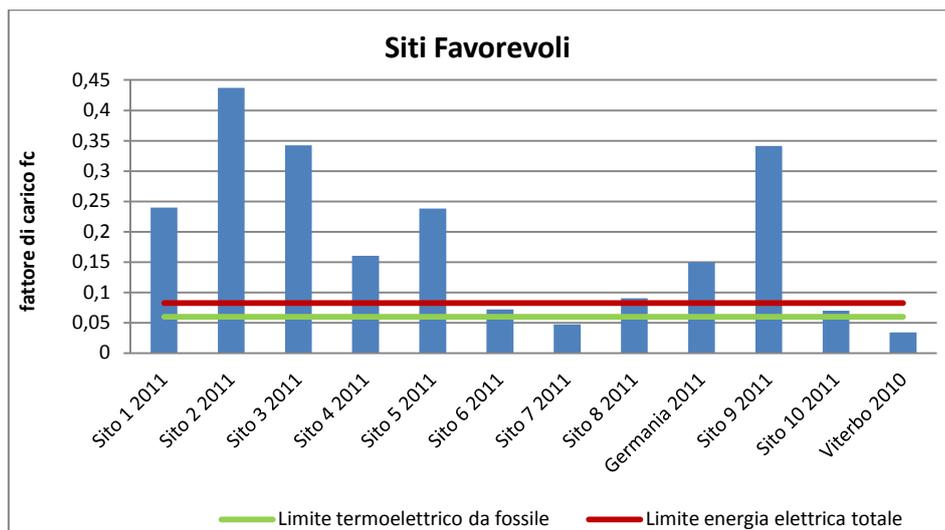


Figura 4.17 - λ caratteristici dei siti eolici e limiti minimi per la convenienza del modello "completo" della FreeTree

Si possono analizzare questi risultati anche sotto un altro punto di vista, calcolando l'entità di chilogrammi di CO₂ evitati utilizzando una fonte energetica alternativa piuttosto che una tradizionale (Tabella 4.5).

Le località che presentano valori d'impatto evitato negativo, sono le stesse che si è visto non essere convenienti all'installazione della FreeTree e perciò più impattanti del termoelettrico da fossile e/o della produzione elettrica tradizionale.

Per le sette località con AEP superiore a 1000 kWh, che sono quelle più interessanti dal punto di vista energetico, il risparmio di anidride carbonica rispetto al termoelettrico ha un valore compreso tra gli 0,33 e 0,47 kgCO₂/kWh, rispetto all'elettrico totale varia invece tra 0,17 e 0,32 kgCO₂/kWh.

	AEP	TERMOELETRICO DA FOSSILE	ENERGIA ELETTRICA TOTALE
	[kWh]	[kg CO ₂ evitati]	[kg CO ₂ evitati]
Sito 1 2011	2101,500	5415,65	8605,72
Sito 2 2011	3828,500	12204,48	18016,15
Sito 3 2011	2997,400	8937,43	13487,48
Sito 4 2011	1404,900	2677,31	4809,95
Sito 5 2011	2089,000	5366,51	8537,61
Sito 6 2011	630,600	-366,46	590,79
Sito 7 2011	411,900	-1226,17	-600,91
Sito 8 2011	789,900	259,75	1458,82
Germania 2011	1313,700	2318,819	4313,00
Sito 9 2011	2989,600	8906,77	13444,98
Sito 10 2011	612,900	-436,04	494,34
Viterbo 2010	298,800	-1670,77	-1217,19

Tabella 4.5 - kgCO₂ evitati in 10 anni dalla FreeTree rispetto alla produzione elettrica tradizionale per il modello "completo"

4.4 CASI DI STUDIO

Come fatto per il caso generale, si possono analizzare i risultati ottenuti apportando delle modifiche al progetto di partenza. Variando ad esempio le ipotesi di trasporto o attribuendo l'onere delle fondazioni all'installatore, si può esaminare la convenienza della FreeTree in circostanze diverse da quella tradizionale, ma che comunque sono realmente verificabili.

L'impatto preponderante è già stato detto essere quello della CO₂, mentre gli altri sono trascurabili. Si è perciò deciso di focalizzare l'attenzione solo sulle emissioni di anidride carbonica in atmosfera, tralasciando gli effetti di eutrofizzazione, acidificazione, smog fotochimico e diminuzione della fascia di ozono stratosferico.

4.4.1 Modello turbina e palo di supporto: fondazioni e manutenzione a carico dell'installatore

Per questo modello l'ipotesi di base è di imputare solo il carico ambientale ed energetico legato alla turbina e al palo di supporto a Linz Electric S.p.A., mentre le fondazioni e la manutenzione considerarli a carico dell'installatore.

Infatti, le fondazioni sono quelle standard definite dall'Azienda, ma la loro realizzazione in realtà non le spetta, come non le spetta la manutenzione: il suo dovere termina con il trasporto e la consegna dell'imballo fino al luogo di montaggio, ipotizzato distare 200 km dalla sede.

Le fondazioni, oltretutto, possono essere diverse da quelle considerate perché la FreeTree potrebbe essere installata sul tetto con una struttura portante e ganci d'acciaio: verrebbe meno quindi una buona parte dell'impatto delle fondazioni, almeno quella legata alla colata di calcestruzzo che, in termini di impatto di CO_{2eq} rappresenta l'80% dei 1534,30 kg totali emessi.

Infine, si non è detto siano necessari tutti i controlli e le manutenzioni che sono effettivamente state ipotizzate per eccesso, in modo da rimanere cautelativi.

Inoltre, potrebbe capitare di rimpiazzare una FreeTree giunta a fine vita con una nuova: in questo caso i kgCO_{2eq} imputabili alla realizzazione delle fondazioni, dovrebbero

essere ammortizzati non più in dieci bensì in vent'anni, comportando una diminuzione delle emissioni rispetto al caso generale.

Nel modello ipotizzato in questo paragrafo, l'emissione di CO_{2eq} totale diminuisce di oltre 2/3 passando da 2845,35 kgCO_{2eq} a 892,12 kgCO_{2eq}: questo è dovuto all'elevato indice impattante che caratterizza le fondazioni e soprattutto all'ingente peso della colata di calcestruzzo, causa del 63,5% dell'impatto.

Se confrontiamo gli impatti associati al kWh elettrico di questo modello con quelli del modello generale (Figura 4.18), si nota che molte località che prima non erano adatte, ora lo diventano: tredici, se consideriamo l'energia elettrica totale, quattordici se consideriamo la produzione termoelettrica da fossile.

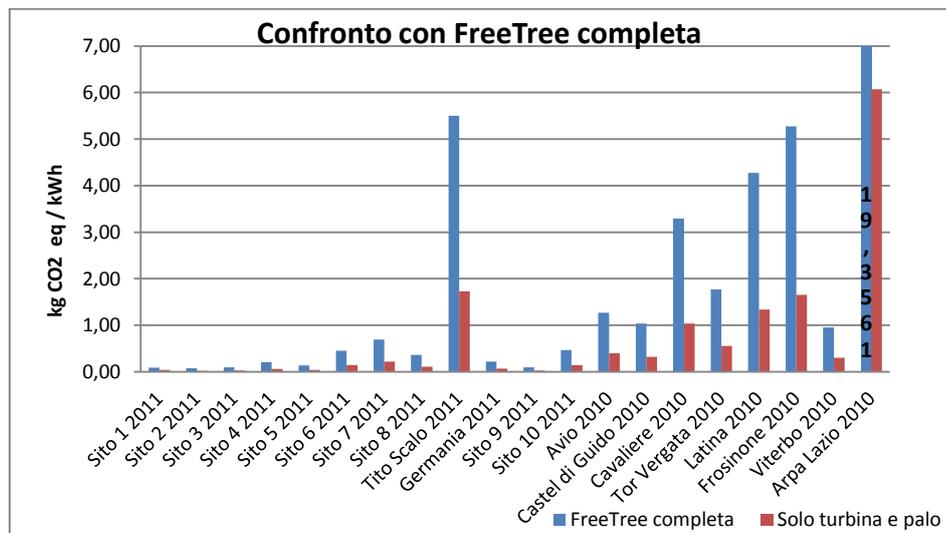


Figura 4.18 - Confronto fra il modello "completo" e quello "solo turbina e palo di supporto"

A questo proposito è utile ricalcolare l'AEP minimo di riferimento per la convenienza dell'aerogeneratore e il fattore di carico a esso associato (Tabella 4.6). Si passa a λ inferiori al 2,6% per la convenienza rispetto alla produzione elettrica totale, all'1,88% per la convenienza rispetto al termoelettrico da fossile: uno scarto minimo tra le due situazioni e valori di fattori di carico davvero irrisori.

	AEP [kWh]	kg CO2/kWh	λ
TOTALE E. E.	226,946	0,3931	0,0259
TOTALE COMBUSTIBILI FOSSILI	163,723	0,5449	0,0187

Tabella 4.6 - AEP caratteristici della produzione elettrica rispetto al modello "solo turbina e palo di supporto"

Applicando il "criterio di *cut-off*", rimangono davvero poche località non convenienti rispetto al termoelettrico e solo Avio rientra nel secondo limite ma non nel primo (Figura 4.19).

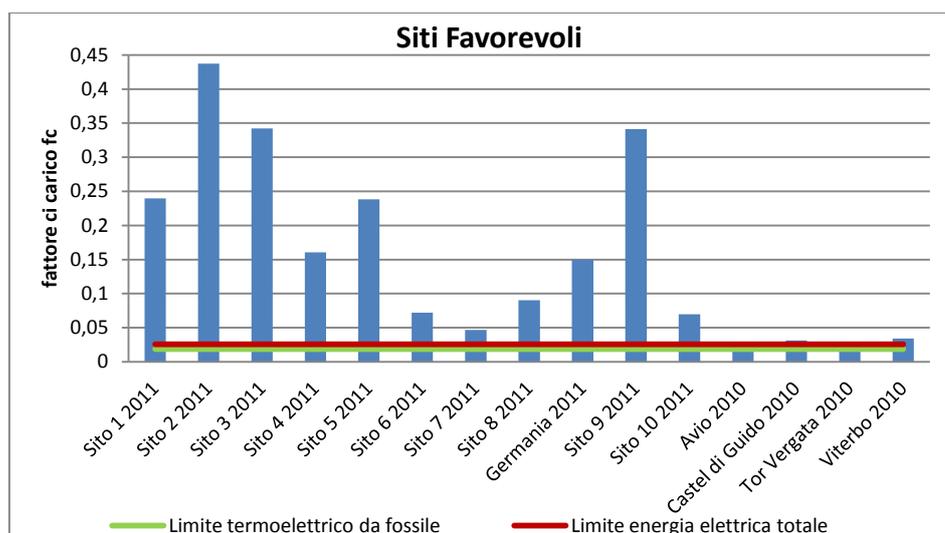


Figura 4.19 - λ caratteristici dei siti eolici e limiti minimi per la convenienza delle FreeTree per il modello "solo turbina e palo di supporto"

Infine è interessante capire l'entità del risparmio di CO_2 al kWh: per le località con AEP superiore a 1000 kWh, rispetto al termoelettrico da fossile si risparmiano all'incirca 0,5 kgCO_2/kWh , mentre rispetto all'elettrico tradizionale circa 0,35 kgCO_2/kWh , per un risparmio in dieci anni superiore a 4500 kg CO_2 nel primo caso e a 3000 kgCO_2 nel secondo.

4.4.2 Risultati - modello solo turbina

Per il modello solo turbina s'intende considerare solo la produzione della parte superiore dell'aerogeneratore e relativo imballaggio, escludendo il trasporto; la realizzazione del palo di supporto, delle fondazioni e la manutenzione, anche in questo caso, sono considerate essere a carico dell'installatore.

Tale ipotesi è reale poiché l'utente finale non è vincolato a comprare il palo da Linz Electric S.p.A., né dall'installatore, ma può rivolgersi a un fornitore esterno.

Quest'analisi coinvolge solo la parte meccanica - aerodinamica superiore, permettendo di avere un'idea dell'impatto dell'elemento principale dell'aerogeneratore effettivamente rilevante per valutazioni interne all'Azienda, svincolandosi ancora di più dagli elementi additivi esterni.

Confrontando questo modello con quello precedente, che escludeva solo le fondazioni e la manutenzione, possiamo notare che il GWP totale è sceso a quota 582,7506 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ con un ammanco di circa 300 $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$ legati al palo e al trasporto dell'assieme.

In Figura 4.20 è presentato il confronto con il modello precedente: si può notare che c'è un abbassamento dell'impatto al kWh di circa 1/3.

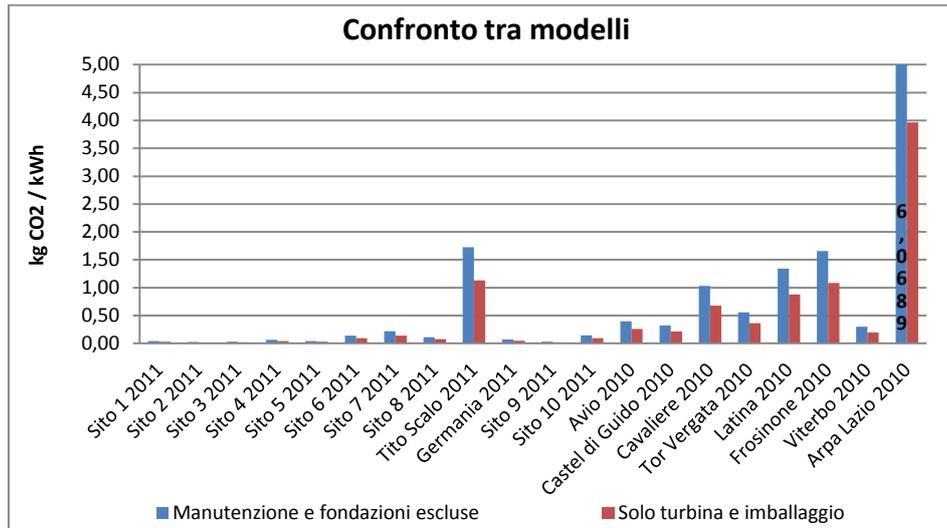


Figura 4.20 - Confronto fra il modello "solo turbina e imballaggio" e quello "senza fondazioni e manutenzione"

Per quel che riguarda il fattore di carico λ per la convenienza dell'installazione della FreeTree, il limite minimo diventa veramente irrisorio e varia tra l'1,22% e l'1,7% come si vede in Tabella 4.7: solo cinque città non soddisfano il criterio d'idoneità del sito. Basta un AEP tra 100 e 150 kWh affinché il sito eolico garantisca la convenienza della FreeTree.

	AEP [kWh]	kg CO2/kWh	λ
TOTALE E. E.	148,245	0,3931	0,0169
TOTALE COMBUSTIBILI FOSSILI	106,946	0,5449	0,0122

Tabella 4.7 - AEP caratteristici della produzione elettrica rispetto al modello "solo turbina"

Tra quelli che invece rientrano nel criterio di *cut-off*, solo Latina resta esclusa (Figura 4.21). In questo caso l'impatto evitato differisce dal modello precedente dei 300 kgCO₂ visti all'inizio, che vanno ammortizzati durante la vita utile dell'aerogeneratore; per cui si risparmiano 3350 kgCO₂ rispetto alla produzione elettrica tradizionale e 5550 kgCO₂ rispetto al termoelettrico da fossile per un AEP = 1000 kWh. Per i siti con producibilità media annua superiore a questo, nel primo caso il risparmio è circa 0,35 - 0,38 kgCO₂/kWh, nel secondo caso 0,50 - 0,53 kgCO₂/kWh.

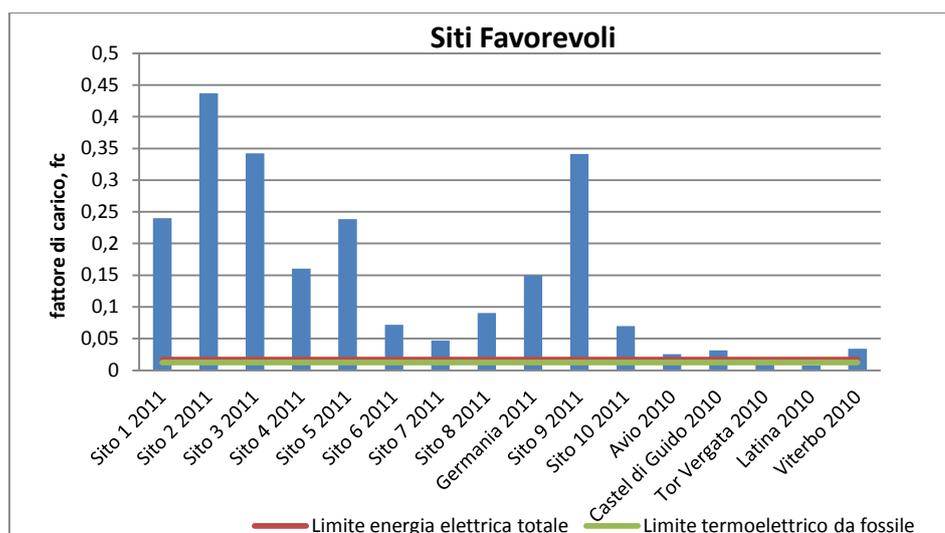


Figura 4.21 - λ caratteristici dei siti eolici e limiti minimi per la convenienza delle FreeTree per il modello "solo turbina"

4.4.3 Risultati - modello solo turbina e trasporto locale, solo turbina e trasporto transoceanico

In questo caso si è rimasti fedeli al modello precedente, realizzazione della sola turbina e relativo imballaggio, ipotizzando però due destinazioni finali diverse:

- 1) 200 km su strada utilizzando un camion;
- 2) 12000 km per spedirla in Cile con un aereo.

Si può così capire come e quanto, tipo e distanza di trasporto incidano sul computo finale dell'impatto. La scelta di analizzare questo modello è stata fatta per rispondere all'esigenza di valutazione della convenienza d'installazione della FreeTree oltreoceano. Naturalmente l'essenza dell'aerogeneratore è proprio la parte della turbina, mentre il supporto può variare ed è acquistabile da produttori locali: è una soluzione economicamente più conveniente rispetto all'acquisto dell'assieme in Italia e conseguente spedizione del tutto.

Confrontando i due scenari è possibile notare la notevole differenza tra i due: analizzando gli effetti impattanti principali, si nota che il trasporto in Cile ha un'emissione di CO₂ addirittura 150 volte superiore rispetto al trasporto locale nonostante la distanza ipotizzata (12000 km) sia solo 60 volte maggiore.

Questo risultato è imputabile al fatto che un aereo di linea consuma all'incirca 10 l/km di kerosene per un volo transoceanico, considerando che 1/8 del consumo si registra nella fase di decollo e atterraggio. Non si dimentichi che a livello mondiale il traffico aereo incide per il 10% sull'effetto serra globale.

In misura minore la differenza d'impatto tra il trasporto aereo e quello su strada, rimane legata al fatto che SimaPro considera tutta la LCA associata al viaggio in aereo con efficienza di carico del 53%, mentre al trasporto locale alloca i consumi della sua costruzione, manutenzione, dismissione e infrastrutture in modo proporzionale al tragitto considerato. Per questo motivo, essendo il camion, un mezzo che viaggia su strada, di

dimensioni inferiori rispetto all'aereo e con consumi più contenuti, il suo impatto sarà minore anche a parità di chilometri.

Per capire meglio la differenza tra i due, è opportuno osservare gli impatti dei viaggi, espressi in valore percentuale, con il 100% assegnato di volta in volta al dato maggiore di ogni effetto.

In Figura 4.22 si nota che il trasporto aereo è quello maggioritario in tutte le categorie d'impatto considerate, mentre il trasporto su strada in confronto rappresenta solo una percentuale irrisoria.

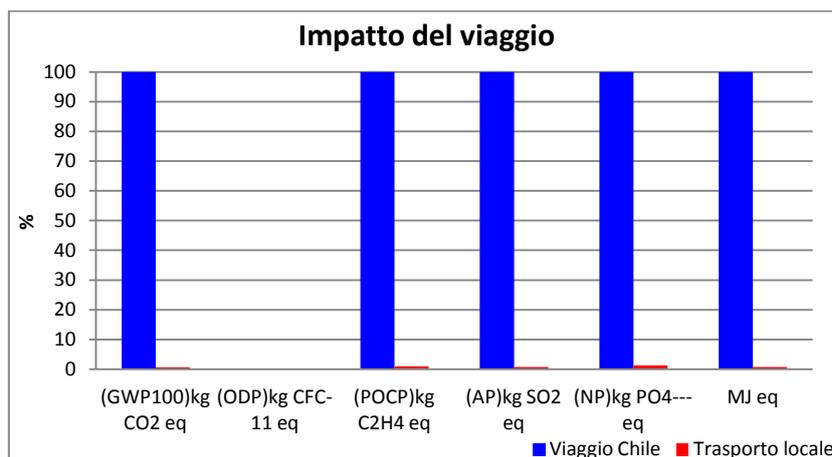


Figura 4.22 - Impatti associati ai trasporti

Come si può notare in Tabella 4.8, l'ODP associato al trasporto locale non è propriamente nullo, ma può essere considerato tale poiché è irrisorio e il valore che lo caratterizza potrebbe essere dovuto a un errore di approssimazione compiuto da SimaPro.

Unità	Trasporto Chile	Trasporto locale
(GWP100)kg CO2 eq	1321,011	8,4900568
(ODP)kg CFC-11 eq	0	1,14E-06
(POCP)kg C2H4 eq	0,888985	0,008827212
(AP)kg SO2 eq	3,547511	0,02878369
(NP)kg PO4--- eq	0,643768	0,008591966

Tabella 4.8 - Impatti associati al trasporto della FreeTree nei due casi considerati

Ritornando all'analisi complessiva, è opportuno precisare la differenza d'impatto finale che incide sulle emissioni dell'unità di energia elettrica prodotta dalla turbina eolica: per il modello di trasporto locale si conteggiano 591,24 kgCO_{2eq} emessi, mentre per il secondo modello il totale sale a quota 1903,76 kgCO_{2eq}.

In Figura 4.23 è visibile il confronto fra i due casi ipotizzati, per quel che riguarda le emissioni di kgCO₂/kWh per i vari siti eolici.

Si nota come, per numerose località, le emissioni al kWh nel caso di trasporto transoceanico siano davvero ingenti, addirittura superiori a 2 kgCO₂/kWh.

La località di Arpa Lazio, che ha l'AEP più basso tra tutte quelle considerate, ha un impatto superiore ai 4 kgCO₂/kWh in entrambi gli scenari.

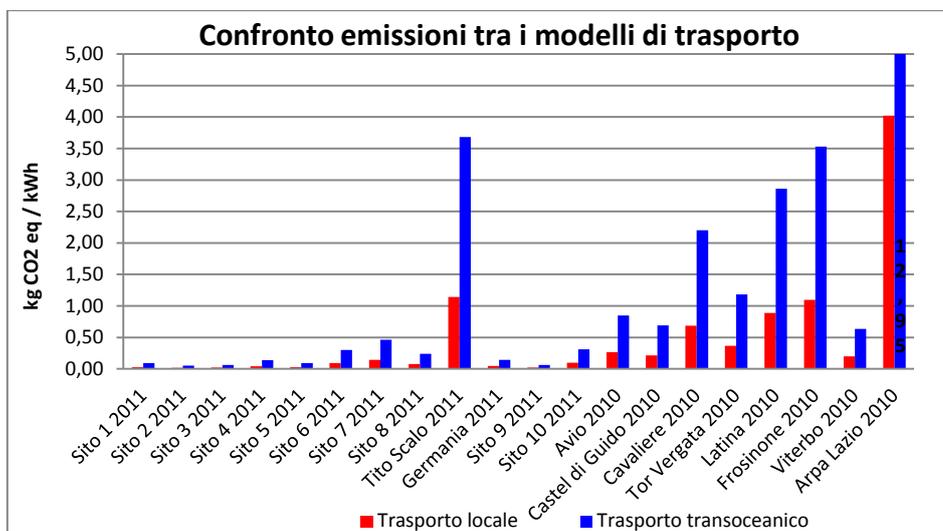


Figura 4.23 - Confronto fra il modello "trasporto locale" e "trasporto transoceanico"

Se si calcolano i fattori di carico minimi per la convenienza dei siti eolici presentati (Tabella 4.9), sia rispetto all'elettrico totale sia rispetto al termoelettrico da combustibile fossile, si nota che c'è una notevole differenza:

- Per il trasporto locale il λ minimo varia tra 1,72% e 1,24% (Figura 4.24), valori di carico davvero irrisori da dover rispettare;
- Per il trasporto transoceanico, invece, il limite quasi si triplica raggiungendo il 5,5% in un caso e il 3,39% nell'altro (Figura 4.25).

	kg CO ₂ /kWh	Trasporto locale		Trasporto Chile	
		AEP [kWh]	λ	AEP [kWh]	λ
TOTALE E. E.	0,3931	150,405	0,0172	484,294	0,0553
TOTALE COMBUSTIBILI FOSSILI	0,5449	108,504	0,0124	349,378	0,0399

Tabella 4.9 - AEP caratteristici della produzione elettrica rispetto al modello "trasporto transoceanico"

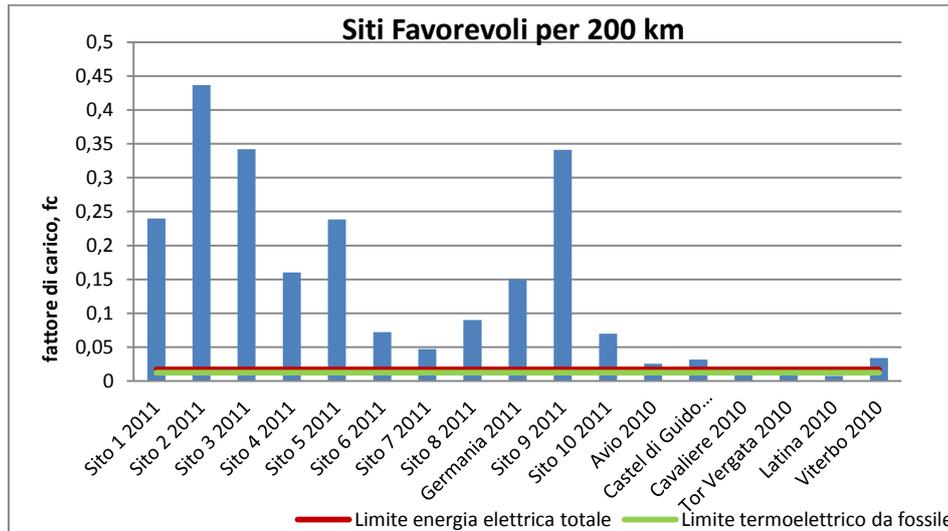


Figura 4.24 - λ caratteristici dei siti eolici e limiti minimi per la convenienza delle FreeTree per il modello "trasporto locale"

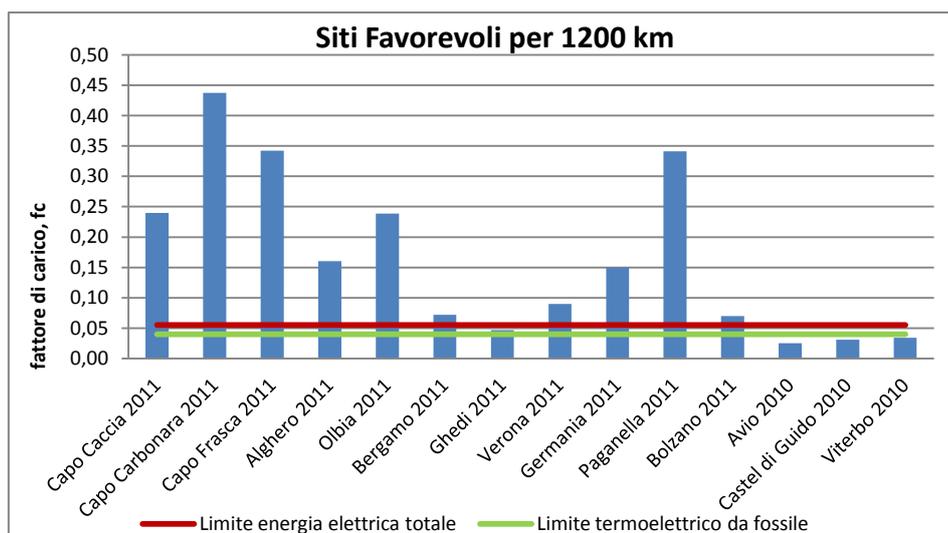


Figura 4.25 - λ caratteristici dei siti eolici e limiti minimi per la convenienza delle FreeTree per il modello "trasporto transoceanico"

Può essere interessante anche in questo caso calcolare i kgCO_2 evitati nei due casi:

1) per il trasporto su strada di 200 km la CO_2 evitata varia molto poco rispetto al modello precedente e si possono assumere validi i risultati già presentati;

2) per il viaggio in aereo di 12000 km, l'impatto evitato diminuisce: per AEP = 1000 kWh si parte da 2000 kgCO_2 rispetto all'elettrico totale, da 3500 kgCO_2 rispetto al termoelettrico da fossile; con riferimento ai dati delle località in possesso, corrispondono risparmi tra 0,25 - 0,34 kgCO_2/kWh nel primo caso e tra 0,40 - 0,49 kgCO_2/kWh nel secondo caso.

4.4.4 Conclusioni sulla convenienza

Secondo quanto analizzato e ipotizzato in questi precedenti paragrafi, è chiaro che la variazione di cosa includere o escludere nell'analisi del modello incide fortemente nella determinazione del fattore di carico minimo per la convenienza dell'installazione della FreeTree.

I siti eolici di Arpa Lazio, Frosinone, Latina e Tito Scalo, non sono luoghi adatti all'impianto per nessuno dei modelli considerati.

Ciò ci permette di concludere che località aventi AEP inferiori a 100 kWh (a cui corrisponde un fattore di carico di circa $\lambda = 1,15\%$) sono da escludere a priori e da non tenere in considerazione per la valutazione dell'idoneità del sito. Per AEP superiori a questo valore, è necessario valutare i singoli modelli per capire in quale caso il sito eolico è adatto.

La durata di vita dell'aerogeneratore incide fortemente sulla quota di emissioni di anidride carbonica. Riferendoci al modello completo della FreeTree, in Tabella 4.10 è visibile la variazione dell'impatto della CO₂ al kWh qualora la vita utile passasse da 10 a 15 anni.

Il consumo di energia primaria rimane quello calcolato durante l'analisi LCA: 2845,3488 kgCO₂; l'emissione dell'energia elettrica totale di confronto è 0,3931 kgCO₂/kWh, quella del termoelettrico da fossile è 0,5449 kgCO₂/kWh.

Si nota che l'impatto al kWh si abbassa, rendendo idonei all'installazione alcuni siti eolici che prima non lo erano (evidenziati in questo caso in giallo) e caratterizzati da fattori di carico anche inferiori al 7%, almeno rispetto al termoelettrico da fonte fossile.

SITI DISPONIBILI		AEP [kWh]	GWP 100 [kgCO ₂ /kWh] 15 anni	GWP 100 [kgCO ₂ /kWh] 10 anni	λ	ENERGIA ELETTRICA TOTALE	ENERGIA TERMOELETTRICA DA FOSSILE
Sardegna	Sito 1 2011	2101,50	0,0903	0,1354	0,2399	FAV.	FAV.
Sardegna	Sito 2 2011	3828,50	0,0495	0,0743	0,4370	FAV.	FAV.
Sardegna	Sito 3 2011	2997,40	0,0633	0,0949	0,3422	FAV.	FAV.
Sardegna	Sito 4 2011	1404,90	0,1350	0,2025	0,1604	FAV.	FAV.
Sardegna	Sito 5 2011	2089,00	0,0908	0,1362	0,2385	FAV.	FAV.
Lombardia	Sito 6 2011	630,60	0,3008	0,4512	0,0720	FAV.	FAV.
Lombardia	Sito 7 2011	411,90	0,4605	0,6908	0,0470	NO	FAV.
Veneto	Sito 8 2011	789,90	0,2401	0,3602	0,0902	FAV.	FAV.
Basilicata	Tito Scalo 2011	51,70	3,6691	5,5036	0,0059	NO	NO
Germania	Germania 2011	1313,70	0,1444	0,2166	0,1500	FAV.	FAV.
Trentino A. A.	Sito 9 2011	2989,60	0,0634	0,0952	0,3413	FAV.	FAV.
Trentino A. A.	Sito 10 2011	612,90	0,3095	0,4642	0,0700	FAV.	FAV.
Trentino A. A.	Avio 2010	224,60	0,8446	1,2669	0,0256	NO	NO
Lazio	Castel di Guido 2010	275,60	0,6883	1,0324	0,0315	NO	NO
Lazio	Cavaliere 2010	86,40	2,1955	3,2932	0,0099	NO	NO
Lazio	Tor Vergata 2010	160,80	1,1797	1,7695	0,0184	NO	NO
Lazio	Latina 2010	66,60	2,8482	4,2723	0,0076	NO	NO
Lazio	Frosinone 2010	53,90	3,5191	5,2786	0,0062	NO	NO
Lazio	Viterbo 2010	298,80	0,6348	0,9523	0,0341	NO	NO
Lazio	Arpa Lazio 2010	14,70	12,9041	19,3561	0,0017	NO	NO

Tabella 4.10 - Confronto delle emissioni dei kgCO₂/kWh per 10 e 15 anni di durata di vita del modello completo della FreeTree

E' importante sottolineare infine che la convenienza d'installazione calcolata, è comparata alle emissioni di CO₂/kWh stimate per la produzione elettrica del 2011. Pertanto, i fattori di carico individuati come i minimi per garantire l'idoneità del sito eolico, non è detto siano accettabili dal punto di vista della produzione energetica.

In questi calcoli non si è tenuto conto della convenienza dell'installazione della FreeTree dal punto di vista energetico: sarà obiettivo del prossimo capitolo identificare i siti eolici che permettono all'aerogeneratore il recupero del debito energetico legato alla sua produzione. Ciò è indipendente da quello che è stato fatto e dalle conclusioni tratte fino ad ora.

5. ANALISI DEL TEMPO DI RITORNO ENERGETICO t_{payback}

L'intensità energetica associata alla costruzione di un impianto dipende dalla fase di realizzazione, dalla scelta dei materiali da costruzione, dalla manutenzione, revisione e dal fine vita. Tale debito energetico richiesto per la sua realizzazione dovrà essere riscattato dall'impianto nel corso della sua vita operativa attraverso la produzione di energia elettrica.

Un'installazione risulta quindi energeticamente sostenibile solo se l'energia prodotta durante il suo funzionamento è tale da compensare, nell'arco della vita operativa prevista, i costi energetici complessivamente sostenuti e valutati mediante la metodologia LCA.

Applicando questo concetto a elementi d'impianti adibiti alla produzione di energia elettrica, si giunge a definire l'*Energy Pay Back Time* (nel seguito indicato per brevità con l'acronimo EPBT) o tempo di ritorno energetico, che in analogia con la pratica delle analisi economiche, può essere impiegato in politiche di pianificazione per la valutazione della sostenibilità di un prodotto, del cambio di sorgente e degli scenari di crescita di produzione.

Lo scopo di questo capitolo è quello di definire un criterio che permetta di stabilire la convenienza energetica della FreeTree per i siti eolici considerati.

Per questo tipo di analisi ci si è affidati ad uno studio condotto da M. Lenzen.

5.1 DESCRIZIONE TEORICA DEL METODO

Per calcolare il tempo di ritorno energetico caratteristico dei vari siti eolici della FreeTree sono state utilizzate due metodologie differenti applicabili a qualsiasi tipo di aerogeneratore, essendo di carattere generale.

Si sono utilizzati due metodi differenti di approccio al problema:

- 1) *Metodo diretto*: è il metodo più diretto che considera il rapporto tra l'energia spesa per la realizzazione, manutenzione e dismissione dell'aerogeneratore E e l'energia elettrica primaria prodotta dallo stesso in un anno, l'AEP per l'appunto. L'EPBT é:

$$t_{\text{payback}1} = \frac{E}{AEP} \quad (5.1)$$

- 2) *Metodo localizzato*: Il secondo metodo tiene conto del fatto che la produzione di energia elettrica da turbina eolica permette di evitare la produzione di una medesima quantità di energia da impianto tradizionale il cui consumo di energia primaria cambia a seconda del rendimento di conversione del sistema di produzione nazionale considerato, variando quindi da Stato a Stato. Utilizzare tale rendimento permette di stimare il tempo di ritorno considerando anche la convenienza della sostituzione dei kWh immessi in rete dall'aerogeneratore rispetto quelli derivanti da fonti energetiche tradizionali. Trattandosi di kWh prodotti senza bruciare combustibili fossili, ne consegue un risparmio di energia primaria.

Per questo motivo il tempo di ritorno è riportato al valore di rendimento medio di conversione delle centrali termoelettriche del Paese in cui l'analisi è effettuata. L'EPBT può essere espresso come:

$$t_{\text{payback}2} = \eta_{\text{norm}} \cdot T \cdot \varepsilon_{\text{fossil}} \quad (5.2)$$

T [y] = tempo di vita utile dell'aerogeneratore

$\varepsilon_{\text{fossil}}$ = rendimento di conversione delle centrali termoelettriche tradizionali; considerando un caso generico può essere assunto pari a 35%

η_{norm} = intensità energetica o rendimento energetico normalizzato, esprimibile come:

$$\eta_{\text{norm}} = \frac{E}{P \cdot h \cdot \lambda \cdot T} \quad (5.3)$$

P [kW] = potenza nominale dell'aerogeneratore

λ [adim] = fattore di carico o fattore di capacità; si può assumere il 25% come valore minimo accettabile per la generazione eolica

h = 8760 ore massime di funzionamento dell'aerogeneratore in un anno

T [y] = tempo di vita utile dell'aerogeneratore (stimabile attorno ai 20 anni)

E [kWh] = energia necessaria alla costruzione, manutenzione e dismissione dell'aerogeneratore

Queste formule si prestano bene ad analizzare un caso generico: le assunzioni suddette per il fattore di carico λ e per il tempo di vita utile T , permettono di ottenere una normalizzazione dei calcoli non incidendo sul η_{norm} senza comportare una diminuzione dell'intensità energetica. Bisogna infine precisare che il secondo metodo analizzato è valido solo per aerogeneratori di tipo *grid - connected*.

5.2 TEMPO DI RITORNO ENERGETICO PER IL MODELLO COMPLETO DELLA FREETREE

5.2.1 Dati in ingresso per la FreeTree

Per quel che riguarda il caso specifico della FreeTree, i parametri di assunzione sono differenti da quelli esposti. Infatti, collocando la realizzazione dell'aerogeneratore nel contesto specifico dell'Italia, il rendimento medio di conversione di produzione elettrica, necessario per valutare l'energia primaria risparmiata a partire dall'energia elettrica prodotta, è prossimo al 46%, di ben nove punti superiore a quello sopra citato.

Questo valore è fissato per tutte le località analizzate, anche per il sito eolico situato in Germania di cui si dispone dei dati di produzione e per il quale il rendimento medio di conversione dovrebbe essere differente, poiché è univocamente definito per ogni Paese. Per quel che riguarda il fattore di carico, i valori sono tendenzialmente accettabili se compresi tra il 25% e il 45%, secondo una stima generale della produzione eolica europea.

Il fattore di carico del parco eolico italiano si assesta invece in media attorno al 17%, un valore non molto elevato, anzi uno tra i più bassi in Europa. Naturalmente, nei calcoli si terrà conto di volta in volta del λ caratteristico del sito eolico in analisi.

Il consumo totale di energia stimata nella LCA della FreeTree è $E = 10465,96 \text{ kWh}$, secondo quanto visto già nel Capitolo 4 e calcolato con il metodo *CED*, *Cumulative Energy Demand* presente in SimaPro, che precisa anche le quote di energia divise per singola fonte produttiva, secondo quanto esposto nella Tabella 5.1.

IMPACT CATEGORY	MJ	kWh
Non renewable, fossil	30409,34	8446,80
Non renewable, nuclear	5122,45	1422,86
Non renewable, biomass	0,26	0,07
Renewable, biomass	504,86	140,23
Renewable, wind, solar, geoth.	41,17	11,43
Renewable, water	1600,44	444,55
TOTALE	37678,50	10465,96

Tabella 5.1 - Consumi energetici della FreeTree divisi per tipo di fonte

La potenza nominale e gli anni di vita utili sono quelli assunti in precedenza, rispettivamente $P = 1 \text{ kW}$ e $T = 10 \text{ y}$.

Riassumendo, avremo come dati in ingresso:

$$E = 10465,96 \text{ kWh}$$

$$\varepsilon_{fossil} = 46\%$$

$$P = 1 \text{ kW}$$

$$T = 10 \text{ y}$$

$$\lambda = \frac{AEP}{8760}$$

$AEP [kWh]$ valore stimato per ogni sito eolico considerato

5.2.2 Il modello eolico italiano

Per rendersi effettivamente conto dei margini di producibilità legati alla FreeTree e ai siti eolici analizzati, è interessante esaminare la producibilità legata al parco eolico italiano.

Il "Rapporto statistico eolico" pubblicato dal GSE, mostra la variazione del *fattore di utilizzazione* degli impianti eolici nel corso degli ultimi anni, esprimendolo come rapporto tra la produzione annua degli impianti e la potenza installata.

Per valutare correttamente le ore di utilizzo medie annue, il GSE esclude gli impianti entrati in esercizio durante l'anno considerato, in quanto risulterebbero avere un numero di ore di utilizzazione (energia prodotta/potenza installata) ridotto rispetto a uno rimasto in esercizio nell'arco di tutto l'anno solare.

Il *fattore di carico* in questo caso è calcolato come rapporto fra il fattore di utilizzazione e il numero di ore massime di producibilità eolica totale.

ANNO	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Fattore di utilizzazione [h]	1633	1430	1557	1486	1374	1573	1748	1536
Fattore di carico	0,1864	0,1632	0,1777	0,1696	0,1568	0,1796	0,1995	0,1753

Tabella 5.2 - Fattore di utilizzazione degli impianti eolici italiani negli ultimi anni

Come si può vedere in Tabella 5.2 l'anno 2011 è risultato un anno un po' particolare per la produzione eolica: non è stato rispettato il trend di crescita che l'ha caratterizzata negli ultimi anni e addirittura è risultata in calo rispetto al 2010.

La producibilità si sa essere strettamente collegata alla disponibilità della risorsa ventosa nel sito dove vengono collocati gli impianti e varia molto tra le diverse nazioni europee; si sono quindi aggiunte ai dati del GSE alcune valutazioni su tale fronte.

Si può confrontare l'utilizzazione media nel 2011 degli impianti eolici italiani con quella degli impianti eolici installati in altri Paesi europei (Tabella 5.3).

	Fattore di utilizzazione [h]	En. eolica prodotta nel 2011 [GWh]	Fattore di carico
Italia	1421	9856	0,162215
Germania	1600	46500	0,182648
Danimarca	2525	9774	0,288242
Spagna	1955	42374	0,223174
UK	2374	15525	0,271005
Francia	1799	12235	0,205365

Tabella 5.3 - Caratteristiche della produzione di energia eolica nel 2011 per alcuni Paesi europei

Le ore equivalenti di funzionamento sono calcolate come rapporto tra la produzione elettrica del 2011 e la potenza installata a fine 2011: i valori risultanti sono pertanto da ritenersi puramente indicativi. Infatti, sono influenzati non solo da eventi climatologici e tecnici, come ad esempio la mancata produzione degli impianti eolici per problemi di dispacciamento della rete, ma soprattutto da valori ridotti della produzione elettrica attribuibile agli impianti che sono entrati in esercizio durante l'anno.

Per quanto riguarda la fonte eolica, l'Italia si pone purtroppo in una fascia bassa di producibilità: le condizioni climatiche del nostro Paese comportano velocità medie del vento inferiori a quelle che si registrano ad esempio nei paesi del nord Europa.

5.2.3 Tempo di ritorno per la produzione energetica dei siti eolici disponibili

Per quel che riguarda le producibilità energetiche annue dei venti siti eolici che sono stati presi a riferimento, si è già osservato che alcuni di essi sono caratterizzati da AEP davvero irrisori, inferiori addirittura a 100 kWh annui, cui corrisponde un fattore di carico appena superiore all'1%.

Si è deciso di usare questo limite come *criterio di cut-off* per individuare i siti che permettono alla FreeTree di ripagare il debito energetico della sua produzione. Tale

scelta non è stata fatta casualmente: un fattore di carico dell'1% per un aerogeneratore è inammissibile, poiché l'energia di realizzo non sarà mai recuperabile negli anni di vita ipotizzati; inoltre si è deciso di attuare delle limitazioni a posteriori eliminando i siti eolici che sono risultati non idonei in nessuno dei casi analizzati.

Ad esempio, per il modello completo, i tempi di recupero si assestano in questo caso attorno ai valori:

$$t_{payback1} = 104 \text{ anni } 7 \text{ mesi } 28 \text{ giorni}$$

$$t_{payback2} = 48 \text{ anni } 1 \text{ mese } 21 \text{ giorni}$$

Per il modello energeticamente meno dispendioso tra quelli analizzati che comprende solo la turbina e il palo, escludendo tutto il resto dall'analisi, i tempi di recupero sono:

$$t_{payback1} = 28 \text{ anni } 1 \text{ mese } 12 \text{ giorni}$$

$$t_{payback2} = 12 \text{ anni } 11 \text{ mesi } 5 \text{ giorni}$$

Si può capire molto bene quanto siano inutilizzabili questi dati.

Per questo motivo sono stati estromessi dalle successive considerazioni e analisi, i siti eolici di Arpa Lazio, Frosinone, Latina, Cavaliere e Tito Scalo.

In Figura 5.1 è visibile l'EPBT calcolato con i due diversi metodi per i casi di studio disponibili; la retta trasversale (linea verde) rappresenta la vita utile della FreeTree. Solo sette siti rispondono all'esigenza di recuperare il proprio debito energetico in dieci anni e sono quindi favorevoli all'installazione, secondo entrambi i metodi di calcolo.

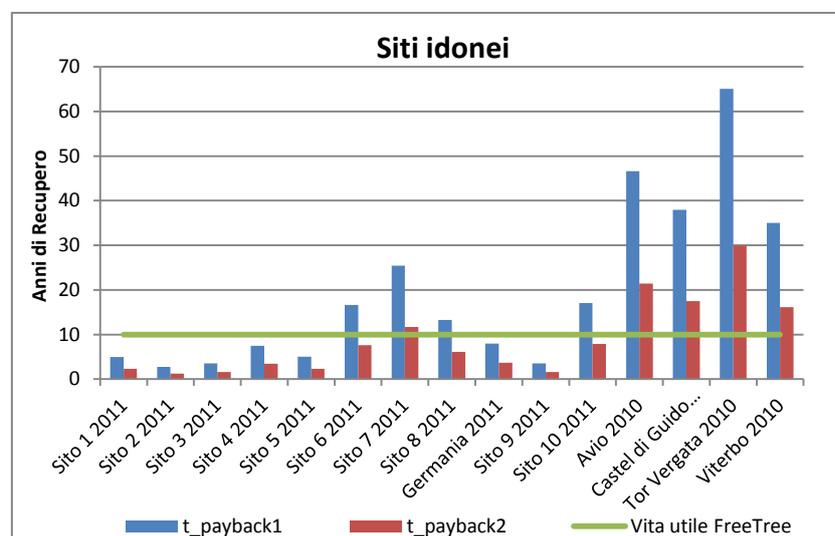


Figura 5.1 - Andamento dei tempi di recupero per i siti eolici disponibili per il modello completo della FreeTree

Se è vero che questo grafico è molto intuitivo, è altrettanto vero che non si riesce a cogliere precisamente l'entità temporale nella quale l'aerogeneratore salda il suo debito. E' perciò più appropriato riportare i tempi di recupero espressi in anni, mesi e giorni per le varie località.

❖ t_{payback1}

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	λ	t_{payback1}		
Sito 1 2011	2101,50	0,2399	4 anni	11 mesi	23 giorni
Sito 2 2011	3828,50	0,4370	2 anni	8 mesi	24 giorni
Sito 3 2011	2997,40	0,3422	3 anni	5 mesi	27 giorni
Sito 4 2011	1404,90	0,1604	7 anni	5 mesi	12 giorni
Sito 5 2011	2089,00	0,2385	5 anni	0 mesi	3 giorni
Sito 6 2011	630,60	0,0720	16 anni	7 mesi	5 giorni
Sito 7 2011	411,90	0,0470	25 anni	4 mesi	27 giorni
Sito 8 2011	789,90	0,0902	13 anni	2 mesi	30 giorni
Germania 2011	1313,70	0,1500	7 anni	11 mesi	18 giorni
Sito 9 2011	2989,60	0,3413	3 anni	6 mesi	0 giorni
Sito 10 2011	612,90	0,0700	17 anni	0 mesi	27 giorni
Avio 2010	224,60	0,0256	46 anni	7 mesi	5 giorni
Castel di Guido 2010	275,60	0,0315	37 anni	11 mesi	21 giorni
Tor Vergata 2010	160,80	0,0184	65 anni	1 mese	1 giorno
Viterbo 2010	298,80	0,0341	35 anni	0 mesi	9 giorni

Tabella 5.4 - t_{payback1} per il modello completo della FreeTree

Secondo il metodo diretto, la FreeTree riesce a ripagare la sua spesa energetica solo in sette casi analizzati (Tabella 5.4): l'AEP deve essere parecchio alto affinché la spesa energetica sia sopperita, già con un AEP = 1313,70 kWh ($\lambda = 15\%$) sono necessari quasi 8 anni per recuperare l'energia di produzione e la convenienza di un'installazione in un caso di questo tipo inizia a essere dubbia. Infatti, avendo considerato la vita utile pari a dieci anni, ne resterebbero solo due per la produzione di energia elettrica pulita. E' però vero che si è preferito sottostimare questo valore: se gli anni di funzionamento fossero superiori a quelli ipotizzati, il periodo d'immissione di energia in rete diventerebbe sicuramente più significativo.

Si nota, invece, come ci sia una forte differenza tra gli anni di recupero delle località analizzate, ma questo dipende dai dati utilizzati: tra quelli a nostra disposizione non ci sono situazioni di recupero intermedie tra gli 8 e i 17 anni.

I siti eolici non idonei sono caratterizzati da fattori di carico che variano tra l'1,8% e il 9%, mentre per i siti inclusi, λ varia tra il 15% e il 43,7% rispettando il *range* di producibilità media caratteristico della situazione italiana per la convenienza dell'installazione eolica.

❖ t_{payback2}

Per quel che riguarda EPBT calcolato con il secondo metodo, si nota come gli anni di recupero diminuiscono del 46% rispetto al primo metodo, il valore del fattore caratterizzante la conversione elettrica da fossile in Italia.

Le località favorevoli passano a quota dieci, comprendendo fattori di carico tra il 43,7% e il 7% (Tabella 5.5); anche il sito situato in Germania, di cui si dubitava la convenienza energetica secondo il metodo precedente, recupera il suo debito in poco più di tre anni e mezzo: perciò il periodo di produzione di energia elettrica pulita diventa rilevante e l'installazione favorevole.

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	λ	t_{payback2}
Sito 1 2011	2101,50	0,2399	2 anni 3 mesi 14 giorni
Sito 2 2011	3828,50	0,4370	1 anni 3 mesi 2 giorni
Sito 3 2011	2997,40	0,3422	1 anni 7 mesi 8 giorni
Sito 4 2011	1404,90	0,1604	3 anni 5 mesi 3 giorni
Sito 5 2011	2089,00	0,2385	2 anni 3 mesi 19 giorni
Sito 6 2011	630,60	0,0720	7 anni 7 mesi 18 giorni
Sito 7 2011	411,90	0,0470	11 anni 8 mesi 7 giorni
Sito 8 2011	789,90	0,0902	6 anni 1 mesi 4 giorni
Germania 2011	1313,70	0,1500	3 anni 7 mesi 29 giorni
Sito 9 2011	2989,60	0,3413	1 anni 7 mesi 9 giorni
Sito 10 2011	612,90	0,0700	7 anni 10 mesi 8 giorni
Avio 2010	224,60	0,0256	21 anni 5 mesi 6 giorni
Castel di Guido 2010	275,60	0,0315	17 anni 5 mesi 19 giorni
Tor Vergata 2010	160,80	0,0184	29 anni 11 mesi 8 giorni
Viterbo 2010	298,80	0,0341	16 anni 1 mesi 10 giorni

Tabella 5.5 - t_{payback2} per il modello completo della FreeTree

Nonostante in questo primo modello si sia tenuto conto del carico energetico totale associabile al ciclo di vita della FreeTree e quindi anche della quota cospicua di energia legata alla realizzazione delle fondazioni (il 40% del consumo totale), si nota che già con $\lambda = 15\%$ il recupero è inferiore ai quattro anni e per $\lambda = 43,7\%$, il massimo riscontrato tra questi siti eolici, il recupero avviene in poco più di un anno.

Tale considerazione è importante nella consapevolezza che questo sia il modello di FreeTree completo e il più energivoro che è stato considerato.

5.2.3 Tempi di ritorno: limite minimo di accettabilità

Affinché la FreeTree possa essere definita una fonte energetica conveniente, deve immettere nell'arco della sua vita utile una certa quantità di "energia pulita".

Per rispondere a questa esigenza la microturbina eolica deve essere in grado di ripagarsi nei 10 anni di vita ipotizzati a cui corrispondono AEP minimi, diversi secondo il metodo di calcolo utilizzato. Se la produzione energetica annua supera tale limite, vuol dire che la FreeTree ha raggiunto il suo scopo. Naturalmente il superamento di questo valore non basta a garantire la convenienza dell'aerogeneratore: deve essere valutata anche la producibilità effettivamente realizzabile e perciò la quantità di energia pulita immessa in rete.

Se la FreeTree si ripaga esattamente in 10 anni è sicuramente considerabile ad "impatto zero", ma non risponde all'esigenza di convenienza rispetto alla fonte tradizionale e alla necessità di essere una fonte di "energia pulita".

Bisogna distinguere i limiti secondo i due casi di EPBT considerati:

❖ t_{payback1}

L'AEP minimo da rispettare è pari a 1046,6 kWh, cui corrisponde un fattore di carico pari al 12%. Se si osservano i valori dei λ di Tabella 5.6, quello medio del parco eolico italiano o quelli medi della realtà europea, si nota come per la realtà italiana ci siano solo tre anni di produzione di surplus, mentre siano poco più di sette per il fattore di carico ottimale.

λ	AEP [kWh]	t_{payback1}		
0,45	3942,00	2 anni	7 mesi	26 giorni
0,25	2190,00	4 anni	9 mesi	10 giorni
0,17	1489,20	7 anni	0 mesi	10 giorni

Tabella 5.6 - t_{payback1} dei fattori di carico caratteristici per il modello completo❖ t_{payback2}

L'AEP in questo caso scende a quota 481,4 kWh, cui corrisponde un $\lambda = 5,5\%$. Basta quindi un fattore di carico molto basso affinché la FreeTree produca l'energia necessaria a tutto il suo ciclo di vita: da questo livello in poi l'eolico risulta conveniente rispetto alla produzione di energia primaria. Anche per un $\lambda = 17\%$ (Tabella 5.7) il margine di produzione elettrica è molto buono, quasi 7 anni destinati all'immissione in rete di energia elettrica, e l'installazione vantaggiosa per la realtà italiana.

λ	AEP [kWh]	t_{payback2}		
0,45	3942,00	2 anni	2 mesi	11 giorni
0,25	2190,00	1 anni	2 mesi	19 giorni
0,17	1489,20	3 anni	2 mesi	24 giorni

Tabella 5.7 - t_{payback2} dei fattori di carico caratteristici per il modello completo

5.3 APPLICAZIONE AI CASI DI STUDIO

5.3.1 Risultati - modello turbina e palo di supporto: fondazioni e manutenzione a carico dell'installatore

Per il primo modello considerato, l'eliminazione delle fondazioni e della manutenzione abbate notevolmente il costo energetico associato alla FreeTree crollando di oltre il 57% e scendendo a quota 4442,70 kWh. Di conseguenza anche i tempi di recupero associati crollano. Rispetto al caso precedente si nota in Figura 5.2, una diminuzione considerevole dell'EPBT: per il modello completo comparivano dei siti eolici che, secondo il calcolo del t_{payback1} , impiegavano oltre trent'anni per ripagare il loro debito energetico.

In questo caso invece sono davvero poche le località che vanno ritenute inadeguate al posizionamento della FreeTree: cinque secondo il criterio del t_{payback1} , una sola applicando il criterio del t_{payback2} , mentre alcune rientrano nei dieci anni, ma non di molto.

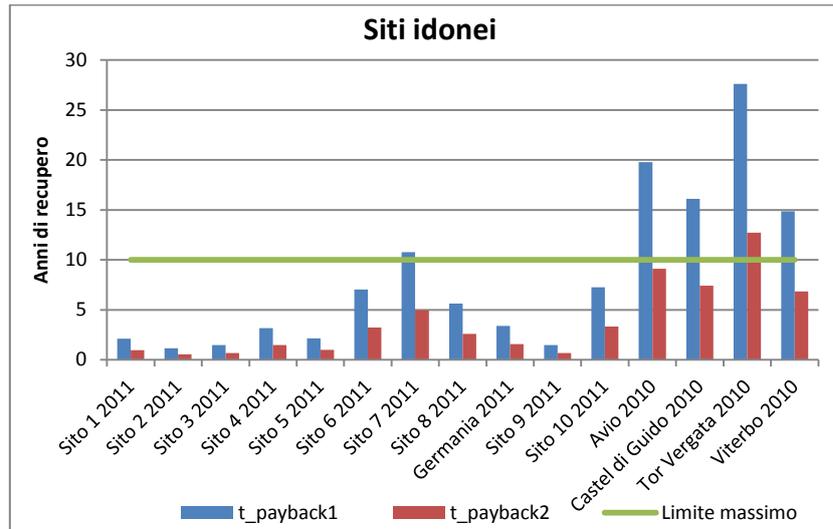


Figura 5.2 - Andamento dei tempi di recupero per i siti eolici disponibili per il modello "solo turbina e palo di supporto"

❖ t_{payback1}

Per quel che riguarda il t_{payback1} si può notare in Tabella 5.8 come dieci siti eolici sono adatti al recupero energetico della spesa, tre in più del caso precedente; in più il Sito 7 salda il suo debito in 10 anni e 9 mesi e può essere assunta come undicesima località favorevole, se si accetta la possibilità che la vita utile sia superiore a quella ipotizzata e non si conteggia l'entità della positività in termini di produzione energetica.

Per capire meglio la differenza col modello completo si possono osservare i tempi di recupero del Sito 6 e 10: prima si attestavano entrambi tra i 16 anni e mezzo e i 17, adesso bastano poco più di 7 anni. Tor Vergata, che è la peggiore situazione tra quelle considerate, passa da 65 a poco meno di 28 anni.

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	λ	t_{payback1}		
Sito 1 2011	2101,50	0,2399	2 anni	1 mesi	11 giorni
Sito 2 2011	3828,50	0,4370	1 anni	1 mesi	28 giorni
Sito 3 2011	2997,40	0,3422	1 anni	5 mesi	23 giorni
Sito 4 2011	1404,90	0,1604	3 anni	1 mesi	28 giorni
Sito 5 2011	2089,00	0,2385	2 anni	1 mesi	15 giorni
Sito 6 2011	630,60	0,0720	7 anni	0 mesi	16 giorni
Sito 7 2011	411,90	0,0470	10 anni	9 mesi	13 giorni
Sito 8 2011	789,90	0,0902	5 anni	7 mesi	15 giorni
Germania 2011	1313,70	0,1500	3 anni	4 mesi	17 giorni
Sito 9 2011	2989,60	0,3413	1 anni	5 mesi	25 giorni
Sito 10 2011	612,90	0,0700	7 anni	2 mesi	29 giorni
Avio 2010	224,60	0,0256	19 anni	9 mesi	11 giorni
Castel di Guido 2010	275,60	0,0315	16 anni	1 mesi	13 giorni
Tor Vergata 2010	160,80	0,0184	27 anni	7 mesi	16 giorni
Viterbo 2010	298,80	0,0341	14 anni	10 mesi	13 giorni

Tabella 5.8 - t_{payback1} per il modello "solo turbina a palo di supporto"

Affinché il recupero energetico sia esattamente di 10 anni, l'AEP minimo è stimato a 444,27 kWh, con $\lambda = 5,1\%$, mentre per i λ eolici caratteristici (Tabella 5.9), i tempi di recupero sono inferiori ai tre anni.

λ	AEP [kWh]	t_{payback1}		
0,45	3942,00	1 anni	1 mesi	15 giorni
0,25	2190,00	2 anni	0 mesi	10 giorni
0,17	1489,20	2 anni	11 mesi	24 giorni

Tabella 5.9 - t_{payback1} dei fattori di carico caratteristici per il modello "solo turbina e palo di supporto"

❖ t_{payback2}

Utilizzando il t_{payback2} la situazione migliora ancora (Tabella 5.10). In questo caso solo Tor Vergata ha un tempo di recupero superiore ai 10 anni: nel modello completo erano quattro i siti esclusi. Castel di Guido in misura minore, Avio sicuramente, si presentano come località al limite della convenienza di producibilità per la sostituzione dell'energia primaria.

Per avere un ottimo rendiconto energetico, basta un $\lambda = 23,4\%$ e AEP superiore a 2000 kWh e la FreeTree arriva a ripagarsi in meno di un anno.

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	λ	t_{payback2}		
Sito 1 2011	2101,50	0,2399	0 anni	11 mesi	20 giorni
Sito 2 2011	3828,50	0,4370	0 anni	6 mesi	12 giorni
Sito 3 2011	2997,40	0,3422	0 anni	8 mesi	5 giorni
Sito 4 2011	1404,90	0,1604	1 anni	5 mesi	13 giorni
Sito 5 2011	2089,00	0,2385	0 anni	11 mesi	22 giorni
Sito 6 2011	630,60	0,0720	3 anni	2 mesi	27 giorni
Sito 7 2011	411,90	0,0470	4 anni	11 mesi	16 giorni
Sito 8 2011	789,90	0,0902	2 anni	7 mesi	1 giorni
Germania 2011	1313,70	0,1500	1 anni	6 mesi	20 giorni
Sito 9 2011	2989,60	0,3413	0 anni	8 mesi	6 giorni
Sito 10 2011	612,90	0,0700	3 anni	4 mesi	0 giorni
Avio 2010	224,60	0,0256	9 anni	1 mesi	5 giorni
Castel di Guido 2010	275,60	0,0315	7 anni	4 mesi	29 giorni
Tor Vergata 2010	160,80	0,0184	12 anni	8 mesi	15 giorni
Viterbo 2010	298,80	0,0341	6 anni	10 mesi	2 giorni

Tabella 5.10 - t_{payback2} per il modello "solo turbina e palo di supporto" t_{payback2}

Affinché l'aerogeneratore sia a impatto energetico nullo, è sufficiente un AEP pari a 204,36 kWh e λ appena del 2,3%.

Se facciamo riferimento al fattore di carico del parco eolico italiano (Tabella 5.11), il recupero avviene in meno di un anno e mezzo, sei mesi per $\lambda = 45\%$.

λ	AEP [kWh]	t_{payback2}		
0,45	3942,00	0 anni	6 mesi	6 giorni
0,25	2190,00	0 anni	11 mesi	6 giorni
0,17	1489,20	1 anni	4 mesi	14 giorni

Tabella 5.11 - t_{payback2} dei fattori di carico caratteristici per il modello "solo turbina e palo di supporto"

5.3.2 Risultati - modello solo turbina

Nel modello solo turbina anche l'impatto energetico del palo è eliminato e l'energia utilizzata scende a quota 2811,71 kWh: cala di ben il 36,7% rispetto al modello che escludeva già fondazioni e manutenzione.

E' interessante osservare che considerando l'intera realizzazione della FreeTree al palo è imputabile solo il 15,6% del consumo totale di energia, mentre alla parte della turbina il 26,9%, sebbene questa pesi meno della metà del palo (circa 70 kg contro i 190 kg del palo). Il peso, infatti, incide solo relativamente sul consumo di energia: i piccoli pezzi della turbina, le loro molteplici lavorazioni e le diverse distanze di percorrenza per il trasporto, sono la vera causa di tale consistente differenza.

Abbattendo notevolmente il consumo di energia che deve essere recuperata dal funzionamento dell'impianto, è logico che i siti eolici diventino sempre più favorevoli e anche l'energia "pulita" aumenti.

In Figura 5.3 si nota immediatamente che solo per il metodo del t_{payback1} ci sono siti eolici che devono essere scartati e uno che rientra nella fascia di dubbia convenienza, mentre secondo il calcolo del t_{payback2} solo Tor Vergata è di utilità incerta.

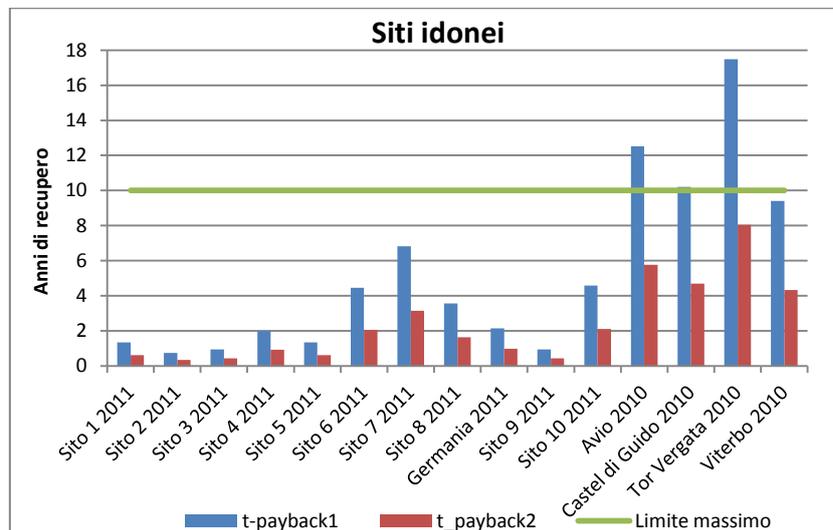


Figura 5.3 - Andamento dei tempi di recupero per i siti eolici disponibili per il modello "solo turbina"

❖ t_{payback1}

In questo caso Viterbo, Castel di Guido, Avio e Tor Vergata, vanno esclusi della convenienza energetica, anche se per l'ultimo il recupero è di 9 anni 4 mesi e 28 giorni, ancora entro i limiti e adeguato se aumentasse la vita utile della FreeTree (Tabella 5.12). Per AEP = 1000 kWh il recupero avviene in meno di tre anni: per $\lambda = 11,5\%$ la situazione è già più che soddisfacente.

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	λ	t_{payback1}		
Sito 1 2011	2101,50	0,2399	1 anni	4 mesi	1 giorni
Sito 2 2011	3828,50	0,4370	0 anni	8 mesi	24 giorni
Sito 3 2011	2997,40	0,3422	0 anni	11 mesi	7 giorni
Sito 4 2011	1404,90	0,1604	2 anni	0 mesi	0 giorni
Sito 5 2011	2089,00	0,2385	1 anni	4 mesi	4 giorni
Sito 6 2011	630,60	0,0720	4 anni	5 mesi	15 giorni
Sito 7 2011	411,90	0,0470	6 anni	9 mesi	27 giorni
Sito 8 2011	789,90	0,0902	3 anni	6 mesi	21 giorni
Germania 2011	1313,70	0,1500	2 anni	1 mesi	20 giorni
Sito 9 2011	2989,60	0,3413	0 anni	11 mesi	8 giorni
Sito 10 2011	612,90	0,0700	4 anni	7 mesi	1 giorni
Avio 2010	224,60	0,0256	12 anni	6 mesi	6 giorni
Castel di Guido 2010	275,60	0,0315	10 anni	2 mesi	12 giorni
Tor Vergata 2010	160,80	0,0184	17 anni	5 mesi	25 giorni
Viterbo 2010	298,80	0,0341	9 anni	4 mesi	28 giorni

Tabella 5.12 - t_{payback1} per il modello "solo turbina"

Basterebbe un AEP di 281,17 kWh e $\lambda = 3,2\%$ affinché fosse realizzato il saldo energetico. Per quanto espresso in Tabella 5.13, già per il fattore di carico più basso del parco eolico italiano il recupero è molto buono, inferiore ai due anni.

λ	AEP [kWh]	t_{payback1}		
0,45	3942,00	0 anni	8 mesi	17 giorni
0,25	2190,00	1 anni	3 mesi	12 giorni
0,17	1489,20	1 anni	10 mesi	20 giorni

Tabella 5.13 - t_{payback1} dei fattori di carico caratteristici per il modello "solo turbina"❖ t_{payback2}

Per la valutazione fatta con il secondo metodo, AEP = 130 kWh e $\lambda = 1,47\%$ sono sufficienti ad avere impatto nullo. Tra i siti eolici analizzati, mostrati in Tabella 5.14, quelli con AEP superiore a 1000 kWh recuperano il loro debito energetico in meno di un anno: il sito in Germania ha fattore di carico del 15%, inferiore alla media italiana, eppure recupera il suo debito in 11 mesi e 24 giorni, fornendo alla rete per i restanti nove anni all'incirca 130 MW.

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	λ	$t_{payback2}$
Sito 1 2011	2101,50	0,2399	0 anni 7 mesi 11 giorni
Sito 2 2011	3828,50	0,4370	0 anni 4 mesi 1 giorni
Sito 3 2011	2997,40	0,3422	0 anni 5 mesi 5 giorni
Sito 4 2011	1404,90	0,1604	0 anni 11 mesi 1 giorni
Sito 5 2011	2089,00	0,2385	0 anni 7 mesi 13 giorni
Sito 6 2011	630,60	0,0720	2 anni 0 mesi 18 giorni
Sito 7 2011	411,90	0,0470	3 anni 1 mesi 20 giorni
Sito 8 2011	789,90	0,0902	1 anni 7 mesi 19 giorni
Germania 2011	1313,70	0,1500	0 anni 11 mesi 24 giorni
Sito 9 2011	2989,60	0,3413	0 anni 5 mesi 5 giorni
Sito 10 2011	612,90	0,0700	2 anni 1 mesi 9 giorni
Avio 2010	224,60	0,0256	5 anni 9 mesi 3 giorni
Castel di Guido 2010	275,60	0,0315	4 anni 8 mesi 9 giorni
Tor Vergata 2010	160,80	0,0184	8 anni 0 mesi 15 giorni
Viterbo 2010	298,80	0,0341	4 anni 3 mesi 28 giorni

Tabella 5.14 - $t_{payback2}$ per il modello "solo turbina"

Restando fedeli a quanto detto prima, possiamo vedere dalla Tabella 5.15 che già con il λ caratteristico del parco eolico italiano, la situazione è ottimale; se consideriamo nel migliore dei casi un $\lambda = 45\%$, il recupero avviene addirittura in 3 mesi e 28 giorni.

λ	AEP [kWh]	$t_{payback2}$
0,45	3942,00	0 anni 3 mesi 28 giorni
0,25	2190,00	0 anni 7 mesi 2 giorni
0,17	1489,20	0 anni 10 mesi 13 giorni

Tabella 5.15 - $t_{payback2}$ dei fattori di carico caratteristici per il modello "solo turbina"

5.3.3 Risultati - modello solo turbina e trasporto locale, solo turbina e trasporto transoceanico

Il modello "solo turbina e trasporto locale" differisce molto poco dal precedente: la quota di energia di produzione aumenta di appena 50 kWh, neanche dell'1,5%. Ciò influisce in modo proporzionale all'AEP sul calcolo dell'EPBT, per cui la differenza è irrisoria: sono necessari pochi giorni in più per i siti eolici che prima recuperavano il proprio debito in meno di tre anni, all'incirca un mese in più per i siti meno produttivi. L'ordine di grandezza temporale rimane comunque lo stesso.

Le località escludibili e di convenienza energetica dubbia sono le stesse del caso precedente, come visibile in Figura 5.4.

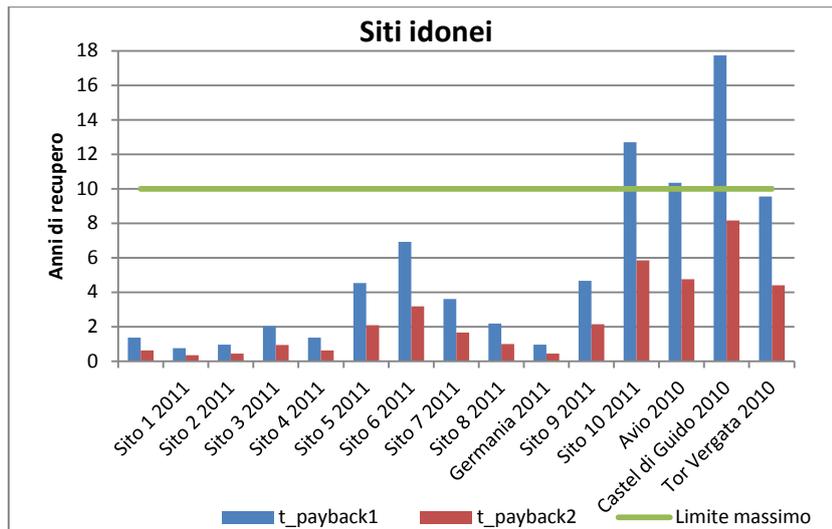


Figura 5.4 - Andamento dei tempi di recupero per i siti eolici disponibili per il modello "solo turbina e 200 km"

Interessante è piuttosto il confronto che si può fare con il modello "trasporto transoceanico" avente come destinazione finale della turbina il Cile per una distanza totale percorsa pari a 12000 km.

In Figura 5.5 si può vedere chiaramente la differenza dell'utilizzo dell'energia associato ai due modelli diviso tra le varie fonti energetiche. La differenza sostanziale consiste nel consumo di risorse fossili: quest'aspetto è legato all'ingente quantità di kerosene necessaria a un viaggio aereo, il cui consumo incide fortemente sul computo dell'energia utilizzata. Per le altre fonti considerate, l'energia associata è poco diversa tra i due scenari presentati.

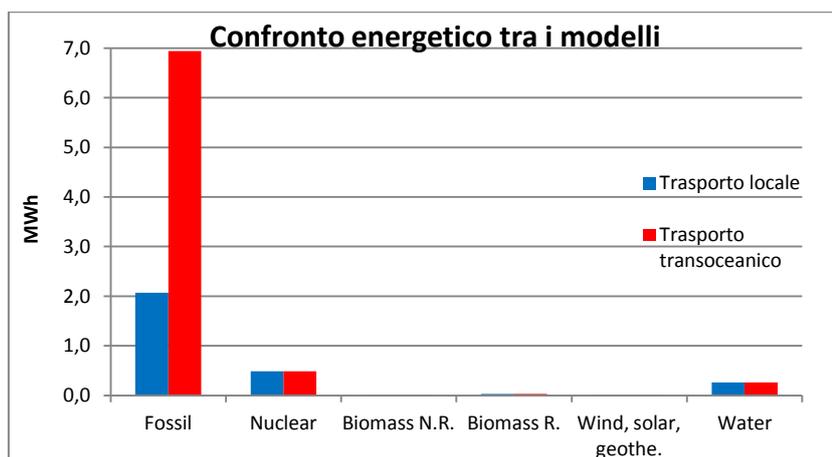


Figura 5.5 - Confronto del consumo energetico per il trasporto locale e transoceanico

Considerando il viaggio in Cile, l'energia consumata sale a 7721,5 kWh contro i 2852 kWh del trasporto locale, più di due volte superiore. Questo incide fortemente sull'analisi d'idoneità energetica dei siti: il trasporto transoceanico si avvicina molto, dal punto di vista energetico, al modello completo della FreeTree al quale era associato un consumo

di 10465,96 kWh e questo si può notare anche in Figura 5.6. L'EPBT, per entrambi i metodi di calcolo torna ad aumentare considerevolmente.

E' opportuno far notare che questi sono calcoli di massima che permettono di farsi un'idea delle condizioni favorevoli all'installazione della FreeTree utilizzando dati reali, ma in questo caso, in cui si considera di inviare la turbina in Cile per un'installazione locale, i siti eolici saranno probabilmente diversi, così come il fattore di conversione delle fonti primarie e il fattore di carico medio caratteristico.

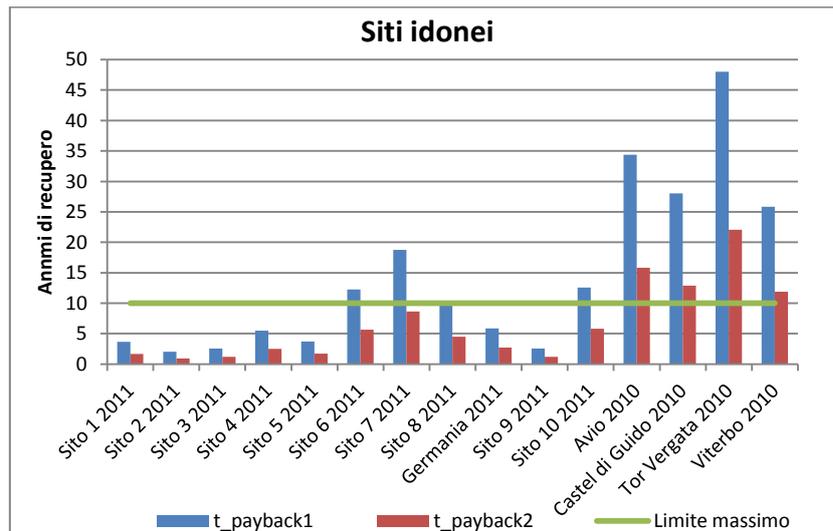


Figura 5.6 - Andamento dei tempi di recupero per i siti eolici disponibili per il modello "solo turbina e 12000 km"

❖ t_{payback1}

Valutando l'EPBT con il primo metodo, si può vedere in Tabella 5.16 che tutti i siti eolici con producibilità inferiore ai 630 kWh non recuperano l'energia di produzione in un tempo adeguato e il Sito 8 risulta un caso limite: recupera la sua spesa energetica, ma in 9 anni 9 mesi e 9 giorni, non lasciando un adeguato margine di profitto energetico.

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	λ	t_{payback1}		
Sito 1 2011	2101,50	0,2399	3 anni	8 mesi	2 giorni
Sito 2 2011	3828,50	0,4370	2 anni	0 mesi	6 giorni
Sito 3 2011	2997,40	0,3422	2 anni	6 mesi	27 giorni
Sito 4 2011	1404,90	0,1604	5 anni	5 mesi	29 giorni
Sito 5 2011	2089,00	0,2385	3 anni	8 mesi	10 giorni
Sito 6 2011	630,60	0,0720	12 anni	2 mesi	28 giorni
Sito 7 2011	411,90	0,0470	18 anni	8 mesi	29 giorni
Sito 8 2011	789,90	0,0902	9 anni	9 mesi	9 giorni
Germania 2011	1313,70	0,1500	5 anni	10 mesi	16 giorni
Sito 9 2011	2989,60	0,3413	2 anni	6 mesi	30 giorni
Sito 10 2011	612,90	0,0700	12 anni	7 mesi	5 giorni
Avio 2010	224,60	0,0256	34 anni	4 mesi	16 giorni
Castel di Guido 2010	275,60	0,0315	28 anni	0 mesi	6 giorni
Tor Vergata 2010	160,80	0,0184	48 anni	0 mesi	7 giorni
Viterbo 2010	298,80	0,0341	25 anni	10 mesi	3 giorni

Tabella 5.16 - t_{payback1} per il modello "solo turbina e trasporto transoceanico "

L'AEP minimo per ottenere il pareggio di bilancio energetico è 772,15 kWh, cui corrisponde $\lambda = 8,8\%$, a dire il vero un valore non molto elevato e abbastanza inferiore al fattore di carico del parco eolico italiano, per rispettare il quale la produzione deve essere almeno di 1489,20 kWh: in questo caso il recupero avverrebbe in un tempo di poco superiore a 5 anni (Tabella 5.17), con un buon margine di producibilità.

Se comunque analizziamo il $\lambda = 45\%$, il tempo di recupero necessario è all'incirca di due anni.

λ	AEP [kWh]	t_{payback1}		
0,45	3942,00	1 anni	11 mesi	15 giorni
0,25	2190,00	3 anni	6 mesi	9 giorni
0,17	1489,20	5 anni	2 mesi	6 giorni

Tabella 5.17 - t_{payback1} dei fattori di carico caratteristici per il modello "solo turbina e trasporto transoceanico"❖ t_{payback2}

Valutando l'EPBT con il secondo metodo, in Tabella 5.18 si nota ancora che Avio, Castel di Guido, Tor Vergata e Viterbo non sono situazioni favorevoli all'installazione, mentre il Sito 7 recupera in 8 anni 7 mesi e 14 giorni lasciando un margine produttivo di nuovo piuttosto basso. Per i siti eolici con AEP superiori ai 1000 kWh il saldo avviene al massimo i tre anni: la situazione più favorevole è quella del Sito 2, $\lambda = 43,7\%$, che permette il pareggio energetico in 11 mesi e 4 giorni.

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	λ	t_{payback2}
Sito 1 2011	2101,50	0,2399	1 anni 8 mesi 8 giorni
Sito 2 2011	3828,50	0,4370	0 anni 11 mesi 4 giorni
Sito 3 2011	2997,40	0,3422	1 anni 2 mesi 6 giorni
Sito 4 2011	1404,90	0,1604	2 anni 6 mesi 10 giorni
Sito 5 2011	2089,00	0,2385	1 anni 8 mesi 12 giorni
Sito 6 2011	630,60	0,0720	5 anni 7 mesi 18 giorni
Sito 7 2011	411,90	0,0470	8 anni 7 mesi 14 giorni
Sito 8 2011	789,90	0,0902	4 anni 5 mesi 29 giorni
Germania 2011	1313,70	0,1500	2 anni 8 mesi 13 giorni
Sito 9 2011	2989,60	0,3413	1 anni 2 mesi 7 giorni
Sito 10 2011	612,90	0,0700	5 anni 9 mesi 16 giorni
Avio 2010	224,60	0,0256	15 anni 9 mesi 23 giorni
Castel di Guido 2010	275,60	0,0315	12 anni 10 mesi 20 giorni
Tor Vergata 2010	160,80	0,0184	22 anni 1 mese 2 giorni
Viterbo 2010	298,80	0,0341	11 anni 10 mesi 19 giorni

Tabella 5.18 - t_{payback2} per il modello "solo turbina e trasporto transoceanico "

Il pareggio di bilancio avviene per $AEP = 355,18$ kWh e $\lambda = 4,05\%$, valori davvero molto bassi. Per il resto (Tabella 5.19) già per $\lambda = 17\%$ si può rimanere soddisfatti del recupero in 2 anni 4 mesi e 18 giorni.

λ	AEP [kWh]	t_{payback2}
0,45	3942,00	0 anni 10 mesi 24 giorni
0,25	2190,00	1 anni 7 mesi 14 giorni
0,17	1489,20	2 anni 4 mesi 18 giorni

Tabella 5.19 - t_{payback2} dei fattori di carico caratteristici per il modello "solo turbina e trasporto transoceanico"

5.3.3 Conclusioni sulla convenienza energetica

Facendo riferimento a quanto calcolato e detto fino a ora, il tempo di recupero del debito energetico da parte della FreeTree ha dei margini molto incerti poiché è da valutare la tipologia d'impianto scelta, vale a dire la variazione delle condizioni d'esclusione di alcune parti rispetto al modello completo. Infatti, anche per poterla confrontare con realtà simili, bisogna capire quali parti sono incluse nelle valutazioni e quali no: la differenza tra il considerare le fondazioni e la manutenzione, oppure escluderle è ingente, 6023 kWh su un totale di 10465,96 kWh. Perciò bisogna fare attenzione a cosa è considerato allocabile al costo energetico dell'aerogeneratore e cosa invece no.

Le località con $AEP = 100$ kWh e $\lambda = 1,15\%$, sono già state escluse a priori da questa trattazione perché energeticamente non convenienti e lo stesso limite di esclusione era stato riscontrato nell'analisi degli impatti: zone con producibilità così basse come quelle caratteristiche delle località di Arpa Lazio, Frosinone, Latina e Tito Scalo sono sconvenienti e del tutto inadeguate sotto tutti i punti di vista studiati fino ad ora.

Per quanto riguarda la convenienza totale della FreeTree è importante notare che se c'è un vantaggio energetico, non è detto ci sia rispetto alle emissioni di anidride carbonica.

A questo proposito è interessante vedere la Tabella 5.20 che mostra i risultati del modello completo, ottenuti sotto il profilo energetico e della CO_2 emessa.

Innanzitutto è necessario distinguere tra i due tipi di EPBT calcolati:

- 1) Se il sito eolico è vantaggioso all'installazione secondo il $t_{payback1}$, lo è anche secondo il profilo impattante, sia se l'emissione è confrontata con il termoelettrico da fossile, sia con la produzione elettrica complessiva;
- 2) Se il sito è vantaggioso secondo il $t_{payback2}$, lo è anche per le emissioni rispetto al termoelettrico da fossile, ma non è detto lo sia rispetto all'elettrico totale.

Infatti, il Sito 6 è favorevole secondo il $t_{payback2}$ poiché recupera il suo debito in 7 anni 7 mesi e 18 giorni, ma emette 0,058 kgCO₂/kWh in più rispetto all'elettrico totale e perciò deve essere esclusa dalle località adatte all'installazione della FreeTree perché non conveniente dal punto di vista delle emissioni.

Questo ci dice che la bontà di un sito deve essere valutata secondo entrambi gli aspetti considerati, quello dell'impatto e quello energetico, altrimenti si rischia di trarre conclusioni parziali e scorrette. I risultati ottenuti dai due tipi di analisi devono essere combinate per poter dare un giudizio definitivo sull'adeguatezza della localizzazione dell'impianto.

SITI DISPONIBILI	AEP [kWh]	GWP 100 [kg CO2]	λ	$t_{payback1}$	$t_{payback2}$	TOTALE E. E.	TOTALE COMBUSTIBILI FOSSILI
Sito 1 2011	2101,50	0,1354	0,2399	FAV.	FAV.	FAV.	FAV.
Sito 2 2011	3828,50	0,0743	0,4370	FAV.	FAV.	FAV.	FAV.
Sito 3 2011	2997,40	0,0949	0,3422	FAV.	FAV.	FAV.	FAV.
Sito 4 2011	1404,90	0,2025	0,1604	FAV.	FAV.	FAV.	FAV.
Sito 5 2011	2089,00	0,1362	0,2385	FAV.	FAV.	FAV.	FAV.
Sito 6 2011	630,60	0,4512	0,0720	NO	FAV.	NO	FAV.
Sito 7 2011	411,90	0,6908	0,0470	NO	NO	NO	NO
Sito 8 2011	789,90	0,3602	0,0902	NO	FAV.	FAV.	FAV.
Germania 2011	1313,70	0,2166	0,1500	FAV.	FAV.	FAV.	FAV.
Sito 9 2011	2989,60	0,0952	0,3413	FAV.	FAV.	FAV.	FAV.
Sito 10 2011	612,90	0,4642	0,0700	NO	FAV.	NO	FAV.
Avio 2010	224,60	1,2669	0,0256	NO	NO	NO	NO
Castel di Guido 2010	275,60	1,0324	0,0315	NO	NO	NO	NO
Cavaliere 2010	86,40	3,2932	0,0099	NO	NO	NO	NO
Tor Vergata 2010	160,80	1,7695	0,0184	NO	NO	NO	NO
Viterbo 2010	298,80	0,9523	0,0341	NO	NO	NO	NO

Tabella 5.20 - Confronto d'idoneità tra valutazione energetica e d'impatto ambientale

6. ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI

L'analisi LCA effettuata ha permesso di avere un quadro concettuale completo della FreeTree per fare valutazioni dettagliate ed esaurienti sugli impatti e sulla producibilità energetica. Si sono potuti osservare gli oneri ambientali e i requisiti di risorse associati all'intero ciclo di vita dell'aerogeneratore. Inoltre, si sono approfondite le emissioni di anidride carbonica espresse in kgCO_2/kWh per varie condizioni produttive, di cui si possedevano dati appropriati e per le quali si è valutato il tempo di ritorno energetico.

E' infine interessante rapportare i risultati ottenuti con quelli di altre tipologie di impianti di produzione di energia elettrica rinnovabile come un pannello fotovoltaico oppure un'altra turbina eolica: in questo modo è possibile valutare la bontà del progetto sia dal punto di vista della convenienza energetica, sia dal punto di vista dell'impatto ambientale.

E' vero che ogni analisi LCA, anche riferita allo stesso settore produttivo quale appunto può essere l'eolico, si basa su ipotesi e metodologie di valutazione molto diverse, generando sostanziali differenze nei risultati. Tuttavia, il confronto con altre fonti energetiche è in grado di fornire un quadro chiaro circa le prestazioni ambientali del processo produttivo in esame.

Non è obiettivo di quest'analisi giudicare o confrontare impianti differenti per individuare quello più vantaggioso: le tecnologie che sfruttano fonti rinnovabili sono comunque preferibili rispetto al termoelettrico da fossile, la scelta della tipologia di installazione da effettuare è legata a fattori prettamente ambientali e climatici, che non sono stati affrontati in questo elaborato.

6.1 CONFRONTO CON ALTRI IMPIANTI EOLICI

6.1.1 Turbina eolica da 2 MW

La realizzazione di un aerogeneratore ad asse orizzontale (HAWT) è sicuramente differente da quella di uno ad asse verticale (VAWT) e non solo dal punto di vista delle dimensioni e dei pesi, ma anche dal punto di vista strutturale e dei materiali.

Rimane comunque interessante la possibilità di confrontare due impianti che sfruttano il fenomeno ventoso interagendo con l'ambiente esterno, sotto il punto di vista dell'impatto, in modi diversi.

Si è presa a riferimento una turbina eolica ad asse orizzontale con potenza nominale di 2 MW prodotta dalla Gamesa, la G8X, installata in un parco eolico vicino a La Rioja, Spagna. L'installazione è di tipo *on-shore* a un'altitudine di 1200 m, per un'altezza finale della turbina eolica di 70 m. E' composta da tre pale in fibra di vetro di 39 m di lunghezza agganciate al mozzo, navicella contenente l'inverter, generatore e trasformatore, torre in acciaio e fondazioni di calcestruzzo. I pesi associati a tale produzione e la spesa energetica calcolata nell'analisi LCA condotta da Martínez [17] sono visibili in Tabella 6.1.

Component	Sub-component	Weight	Materials	Energy
Rotor	Three blades	19.5 t	11.7 t resin 7.8 t fibre glass	20, 15 MWh
	Blade hub	14 t	14 t cast iron	12 MWh
	Nose-cone	310 kg	0.124 t fibre glass 0.186 t resin	0.95 MWh
Foundation	Footing	725 t	700 t concrete 25 t iron	0.4 MWh
	Ferrule	15 t	15 t steel	17,000 MJ
Tower	Three sections	143 t	143 t steel	170,000 MJ
Nacelle	Bed frame	10.5 t	10.5 t iron	9 MWh
	Main shaft	6.1 t	6.1 t steel	5.3 MWh
	Transformer	5 t	0.149 t silica 1.5 t copper 3.3 t steel	200,000 MJ
		Generator	6.5 t	0.195 t silica 2 t copper 4.29 t steel
	Gearbox	16 t	8 t iron 8 t steel	495,000 MJ
		Nacelle cover	2 t	0.8 t fibre glass 1.2 t resin

Tabella 6.1 - Parametri chiave dell'inventario del ciclo di vita per la produzione della G8X

In questo studio l'autore tiene conto dell'estrazione delle materie prime, della realizzazione dei pezzi dell'aerogeneratore, incluse torre e fondazioni, del trasporto, dell'installazione, dei consumi legati alla manutenzione e al funzionamento, della dismissione e del fine vita con relative ipotesi di riciclo.

Ci sono alcune differenze importanti di cui tener conto nel confrontare la FreeTree con la G8X.

Nello studio LCA della G8X:

1. Non è considerato l'imballaggio, giacché l'aerogeneratore è caricato già montato su un mezzo adatto ai trasporti eccezionali e issato tramite l'utilizzo di una gru;
2. Non è specificata l'entità del trasporto finale che s'ipotizza essere stata suddivisa proporzionalmente tra le quattro categorie di componenti indicate in Tabella 6.1;
3. Il generatore è di tipo asincrono, senza i magneti permanenti;
4. La fase identificata con la dicitura *Total use* include sia la manutenzione dell'aerogeneratore sia l'energia necessaria al suo avviamento, con relativo consumo ed emissioni non presenti invece nel caso della FreeTree, essendo questa di tipo auto-avviante;
5. Le fondazioni non vengono rimosse, ma ricoperte da uno strato di terreno.

Per confrontare adeguatamente i consumi dei due aerogeneratori e non potendo manipolare i risultati della G8X, si è deciso di usare le quattro categorie principali in cui è stata suddivisa quest'ultima per catalogare le parti della FreeTree.

In Tabella 6.2 si possono vedere le corrispondenze assunte.

COMPONENTE	G8X	FREETREE
Rotor	Three blades Blade Hub Nose - cone	Pale Monotirante Cavi di tenuta Manutenzione - trasporto finale Imballaggio
Foundation	Footing Ferrule	Fondazioni
Tower	Three sections	Palo di supporto
Nacelle	Bed frame Main shaft Transformer Generator GearBox Nacelle cover	Generatore Componenti elettroniche Calotte copertura

Tabella 6.2 - Corrispondenza di composizione tra la G8X e la FreeTree delle quattro categorie principali definite nella fase di inventario

Gli impatti sono stati calcolati con il metodo *Eco-Indicator 99*, ed espressi in *Eco-points* [Pt] secondo la normalizzazione compiuta dal software SimaPro.

Naturalmente l'impatto della G8X sarà superiore a quello della FreeTree, giacché si stanno confrontando carichi molto diversi tra loro: circa 962,91 t della prima contro le 9,48 t della seconda.

E' interessante osservare come e quale campo impatta maggiormente nei due casi.

Per semplificare la lettura dei grafici e rimanere fedeli all'analisi della G8X, gli effetti impattanti considerati, sono stati abbreviati con le seguenti sigle: *Carcinogens* (C), *Organic Respiration* (OR), *Inorganic Respiration* (IR), *Global Warming* o *Climate Change* (GWP), *Radiation* (R), *Depletion of the stratospheric zone* (ODP), *Ecotoxicity* (ET), *Acidification and Eutrophication* (Acid/Eut), *Land Use* (LU), *Minerals* (M) e *Fossil Fuel* (F).

Confrontando le Figure 6.1, 6.2 e 6.3, si possono fare le seguenti considerazioni:

- **FreeTree:** *Inorganic Respiration* e *Fossil Fuel* sono le maggiori cause d'impatto legate soprattutto alla realizzazione del cemento e al trasporto. All'interno della dicitura *Rotor* di Figura 6.1, si sono inclusi l'imballaggio, la manutenzione e il trasporto finale; per questo motivo l'impatto del *fuel* è elevato. In Figura 6.2, dove queste dicitura sono state escluse dai calcoli, l'impatto crolla. L'imballaggio, in realtà, incide solo di 1 Pt sul totale del *Rotor*. La *Tower* è caratterizzata da un alto livello di GWP causato principalmente dalla zincatura, mentre in *Nacelle* la concerogenità è dovuta al materiale elettronico.

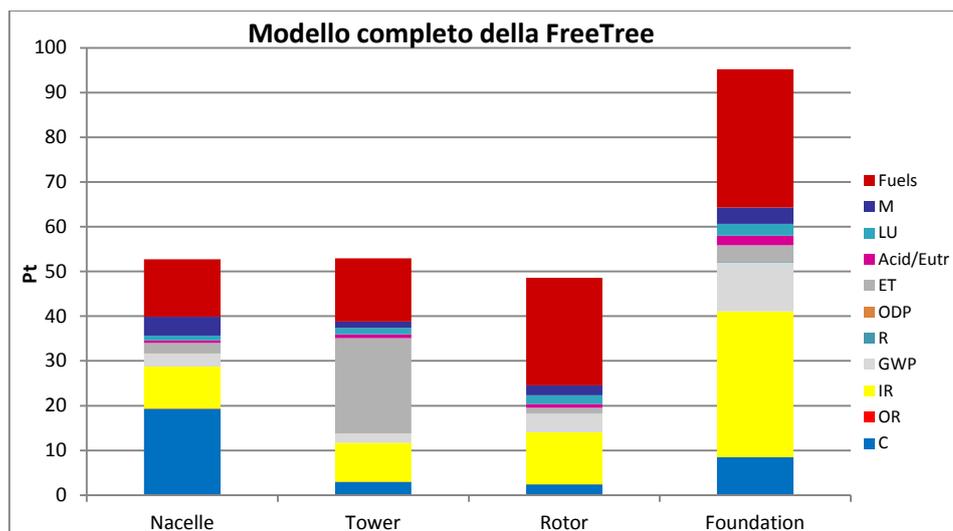


Figura 6.1 - Eco-profile dei quattro componenti in cui è stato diviso il modello completo della FreeTree, analizzati con Eco-Indicator 99, espressi in Eco-Points [Pt]

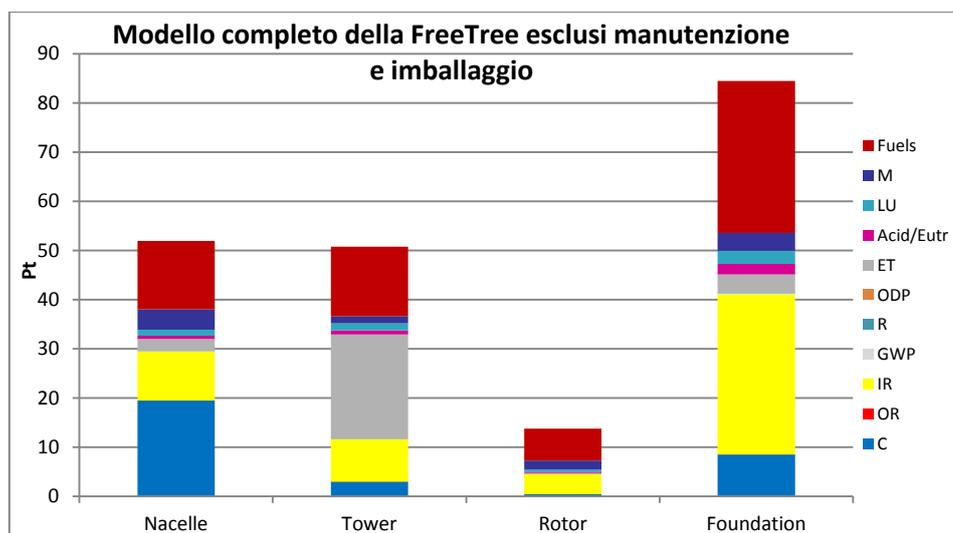


Figura 6.2 - Eco-profile dei quattro componenti in cui è stato diviso il modello completo della FreeTree, escludendo manutenzione, trasporto finale e imballaggio, analizzati con Eco-Indicator 99, espressi in Eco-Points [Pt]

- G8X: Inorganic Respiration e Fossil Fuel** sono anche qui le maggiori cause d'impatto per tutte e quattro le categorie; in particolare preponderante su tutte è la *IR* delle fondazioni, dovuta al processo di creazione del cemento. I *Fuels* causano il 40% dell'impatto del *Rotor* in quanto le pale, che costituiscono oltre il 50% del peso totale del rotore, sono composte da materiale preimpregnato, rilevante sotto il profilo ambientale. Trasformatore e inverter sicuramente hanno un impatto cancerogeno, così come si è visto nell'analisi della FreeTree, ma non è ben visibile nel grafico di Figura 6.3, essendo la scala espressa in kPt ed essendo essi caratterizzati da un peso minimo rispetto al totale dell'aerogeneratore.

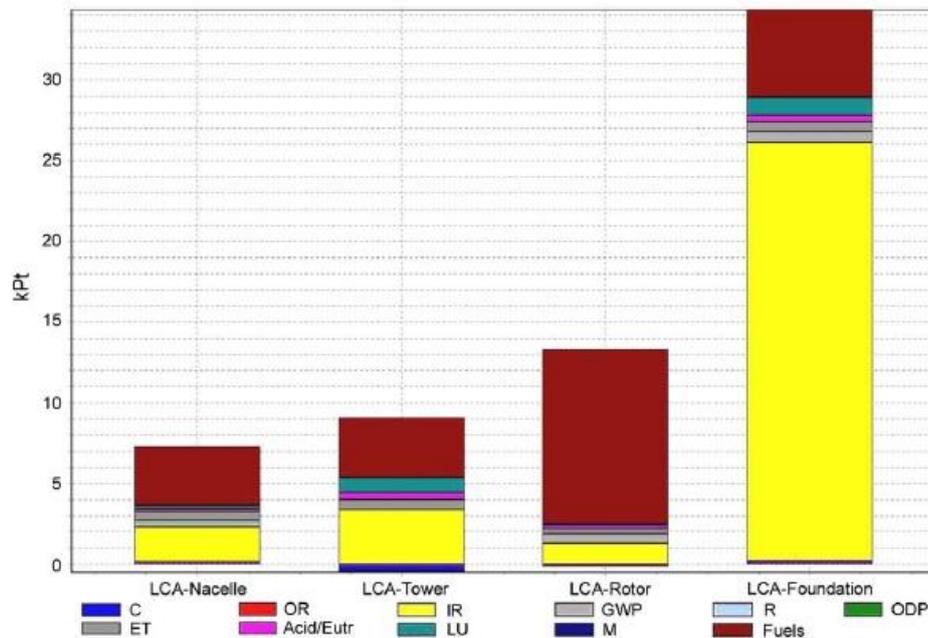


Figura 6.3 - Eco-profile dei quattro componenti analizzati della G8X analizzati con Eco-Indicator 99, espressi in kilo-Eco-Points [kPt]

- Per entrambi gli aerogeneratori alle *Foundation* spetta l'impatto ambientale maggiore, mentre *Nacelle* e *Tower* hanno un'incidenza molto simile. *Fuel* e *IR* sono le principali cause di danno.

Quest'analisi può essere condotta anche valutando gli aerogeneratori in funzione delle fasi del loro ciclo di vita, divisibili in:

1. *Total manufacture*, cui corrisponde la fase di costruzione;
2. *Total transport*, cui corrisponde la fase di trasporto dei singoli pezzi fino al luogo di assemblaggio e poi alla destinazione finale;
3. *Use stage*, comprende l'utilizzo effettivo dell'aerogeneratore e la manutenzione durante la vita utile;
4. *Disposal stage*, considera il disassemblaggio, lo smaltimento e l'eventuale riciclo.

In questo caso bisogna tener presente che, per com'è stato realizzato il modello della FreeTree in SimaPro, molti materiali in ingresso includono già materiale riciclato: in questo modo i benefici legati al riciclo sono presenti in *input* al sistema e non risultano negli *output*, eliminando così l'incidenza con segno negativo alla quale corrisponderebbe un beneficio di riciclo. A causa di questo il *Total Disposal* della FreeTree non è caratterizzato da fattori negativi, se non in minima parte e ha un'incidenza comunque trascurabile, come si può vedere in Figura 6.4.

La Figura 6.5, che mostra l'impatto della G8X, è invece caratterizzata da un *Total Disposal* completamente negativo, poiché i benefici del materiale sono stati inseriti tutti come *output* del sistema.

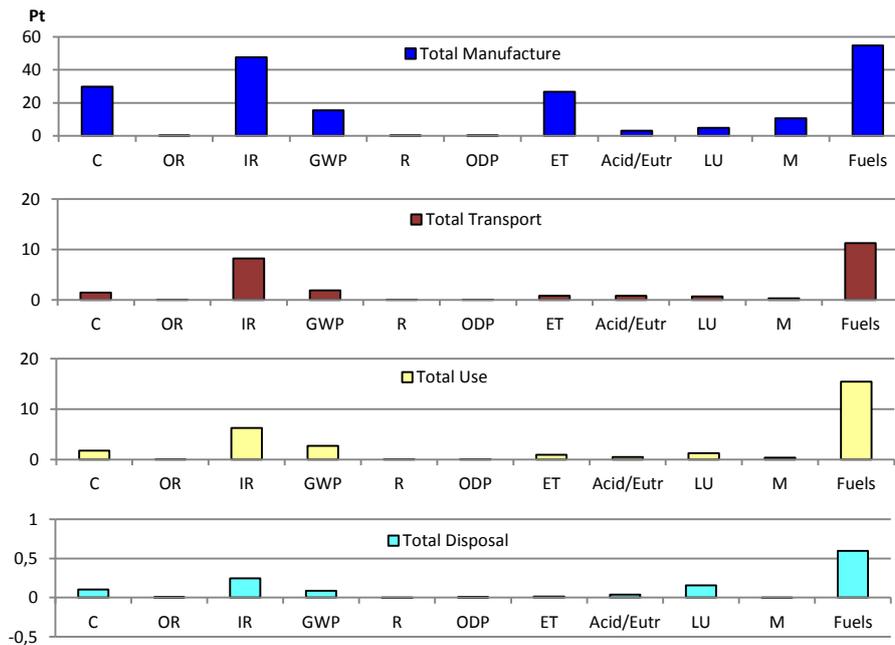


Figura 6.4 - Eco-profile delle quattro fasi del ciclo di vita della FreeTree analizzati con Eco-Indicator 99, espressi in Eco-Points [Pt]

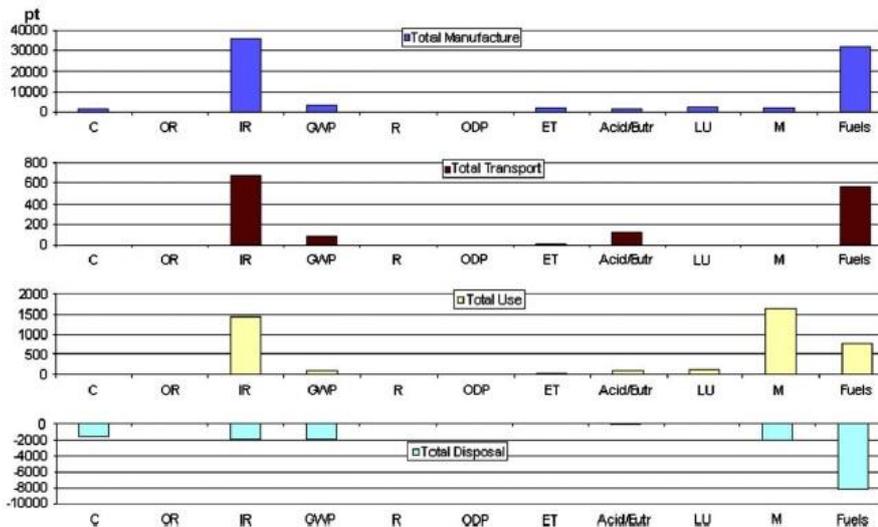


Figura 6.5 - Eco-profile delle quattro fasi del ciclo di vita della G8X analizzati con Eco-Indicator 99, espressi in Eco-Points [pt]

Anche da questi grafici è evidente che *Fuels* e *IR* sono i fattori maggiormente impattanti per entrambe le turbine eoliche: nello specifico è soprattutto alla fase di *Total Manufacture* che dobbiamo l'impatto maggiore. Questo risultato era scontato poiché è questa la fase che include le lavorazioni dei materiali e tutto l'onere della realizzazione dell'impianto.

Per quel che riguarda infine l'*Energy Pay Back Time* della G8X, il calcolo è stato eseguito tenendo conto delle seguenti caratteristiche:

1. Consumo di energia primaria per la realizzazione e la dismissione di 5782,25 GJ;
2. Fattore di utilizzazione di 2000 h di funzionamento a pieno carico per una produzione energetica annua di 4 GWh;
3. Vita utile di 20 anni.

Con queste ipotesi di funzionamento Martinez, utilizzando il metodo di calcolo definito in questo elaborato come t_{payback2} , stima che servono 0,4 anni (quasi 5 mesi) per pareggiare il bilancio energetico di produzione.

Per avere un altro termine di paragone, si può considerare lo studio LCA di un parco eolico da 100 MW, composto da 33 turbine eoliche di modello V112 da 3 MW ognuna, condotto da Vestas. [18]

In questo caso l'energia di realizzazione calcolata per ogni singolo aerogeneratore è di 253,695 MWh e la produzione annua pari a 376,061 MWh/y per condizioni del vento medio basse, comprese tra 6,5 e 8,5 m/s. In tali condizioni, il tempo di recupero secondo il metodo del t_{payback1} è di circa 8 mesi; se invece si relaziona il tutto al mix di produzione elettrica europea il t_{payback2} è di 2,4 - 3,5 mesi.

Le emissioni di anidride carbonica sono stimate attorno a 7 gCO₂/kWh.

Ruben Laleman in un suo elaborato [19], riporta il GWP calcolato da vari autori per 1 kWh di elettricità prodotta da fonte eolica:

- 11 gCO₂/kWh stimati da Raugei;
- 21 gCO₂/kWh stimati da Varun;
- 20 gCO₂/kWh da assumere come valore medio.

Naturalmente tutti questi valori possono essere ritenuti validi poiché la produzione energetica annua dipende fortemente dalle condizioni ambientali e climatiche; non bisogna trascurare l'influenza del tipo d'installazione, se *on-shore* o *off-shore*, alle quali è legata una diversa disponibilità della risorsa ventosa: l'*off-shore* è favorito dal punto di vista della produzione elettrica, poiché le zone marine in cui viene localizzato sono solitamente contraddistinte da una ventosità piuttosto costante, è d'altro canto vero che il costo ambientale di questo tipo di impianto è maggiore.

6.1.2 Microturbina eolica

Gli aerogeneratori con potenze di 2 - 3 MW solitamente sono installati in siti eolici adeguati alla realizzazione di una *wind farm*, con lo scopo di produrre energia rinnovabile su larga scala per l'immissione in rete.

La FreeTree è una microturbina eolica, caratterizzata da dimensioni notevolmente inferiori rispetto agli aerogeneratori da 2 - 3 MW appena visti ed è destinata a installazioni civili per l'utilizzo domestico dell'energia. Studi riferiti a queste tipologie d'impianti ce ne sono davvero pochi.

Interessante è quello compiuto da Celik e Muneer [20], i quali hanno analizzato un sistema di micro generazione eolica da installare in zone urbane e progettato per uso domestico.

Il sistema è composto dal generatore della turbina eolica come fonte principale di alimentazione, dalle batterie al piombo-acido come mezzo di stoccaggio di energia elettrica e da altri dispositivi essenziali come l'inverter.

Ipotizzando una produzione media giornaliera di 9 kWh e installazione in Turchia, l'EPBT calcolato con riferimento al mix energetico europeo (il $t_{\text{payback}2}$), è di 1,4 anni (1 anno 4 mesi e 24 giorni); le emissioni di anidride carbonica sono all'incirca di 20,5 gCO₂/kWh per una durata di vita ipotizzata di 25 anni.

Se applichiamo le stesse ipotesi alla FreeTree, considerando AEP = 3285 kWh (9 kWh prodotti per 365 giorni), il $t_{\text{payback}2}$ è 1,466 (1 anno 5 mesi e 17 giorni) e le emissioni arrivano a 86 gCO₂/kWh considerando una durata di vita di 10 anni; se la ampliamo a 25, in modo da farla coincidere con quella dei dati trovati, l'impatto scende a 30,4 gCO₂/kWh.

Inoltre bisogna precisare che non è chiaro se l'analisi della microturbina eolica compiuta da Celik e Muneer comprenda le fondazioni oppure no. Escludendo le fondazioni dalla LCA della FreeTree, infatti, le emissioni di anidride carbonica scenderebbero a 27 gCO₂/kWh per un *life time* di 10 anni, a 10,9 gCO₂/kWh per 25 anni. L'EPBT sarebbe di 0,622 anni (7 mesi 14 giorni) secondo il $t_{\text{payback}2}$, 1 anno 4 mesi e 6 giorni secondo il $t_{\text{payback}1}$.

6.1.3 $t_{\text{payback}2}$ della FreeTree rapportato ai risultati ottenuti da Lenzen

Lenzen, nel suo studio di analisi del ciclo di vita delle turbine eoliche [21] ha analizzato una serie di aerogeneratori sotto il profilo delle emissioni di CO₂ e del tempo di recupero energetico (identificato con la dicitura $t_{\text{payback}2}$ in questo elaborato).

Il *range* di potenze considerate è compreso tra 0,3 e 3000 kW. Per rendere compatibili fra loro i dati di questi aerogeneratori è partito da delle assunzioni di base comuni; questo si è reso necessario in quanto ci sono molti fattori che influenzano la risorsa ventosa e moltissime variabili:

1. *L'energia di produzione [E]* che deve essere recuperata dall'aerogeneratore dipende dal tipo di tecnologia usata, dalle materie prime e dai combustibili fossili impiegati nelle fasi del ciclo di vita;
2. *La potenza nominale [P]* dell'impianto influenza la producibilità media annua;
3. *Il fattore di carico [λ]* dipende dal sito d'installazione e dalla producibilità media annua realizzata dall'aerogeneratore;
4. *La durata di vita [T]* incide sulla quantità di energia "pulita" prodotta dall'impianto e sulle emissioni di CO₂/kWh;
5. *Il fattore di conversione [ϵ_{fossil}]* delle centrali termoelettriche tradizionali dipende dal mix energetico della Nazione di riferimento.

Per rendere omogenei i calcoli, Lenzen ha fissato

$$\lambda = 25\%$$

$$T = 20y$$

$$\varepsilon_{fossil} = 35\%$$

$$h = 8760h/y$$

e lasciato variabili, in funzione delle caratteristiche dell'aerogeneratore,

$$E [kWh]$$

$$P [kW]$$

Ha potuto così confrontare le varie turbine eoliche.

Per il calcolo del $t_{payback2}$ le formule utilizzate sono la 5.3 e la 5.2 di pagina 90.

Inserendo i risultati così ottenuti nel grafico di Figura 6.6, avente in ascisse le potenze nominali e in ordinata da una parte il rendimento normale e dall'altra il corrispettivo tempo di ritorno, si nota che proporzionalmente all'aumento della potenza nominale, il $t_{payback}$ diminuisce.

All'interno di questo grafico sono stati inseriti i risultati ottenuti per la FreeTree.

Per la determinazione dell'energia di produzione, l'articolo specifica che sono state considerate le fasi di costruzione, funzionamento e smaltimento delle turbine eoliche, ma non è chiaro se le fondazioni rientrano in tali criteri. Perciò si sono calcolati due tempi di ritorno per la FreeTree:

1. Considerando tutto il processo produttivo, inclusa la realizzazione delle fondazioni; il punto trovato con i fattori fissati da Lenzen, si colloca in corrispondenza di $P = 1$ kW, $\eta_{norm} = 0,239$ e $t_{payback} = 20$ mesi, non visibile nel grafico;
2. Escludono le fondazioni, il punto si colloca a $\eta_{norm} = 0,146$ e $t_{payback} = 12$ mesi (punto rosso), rispettando perfettamente i risultati ottenuti dall'autore.

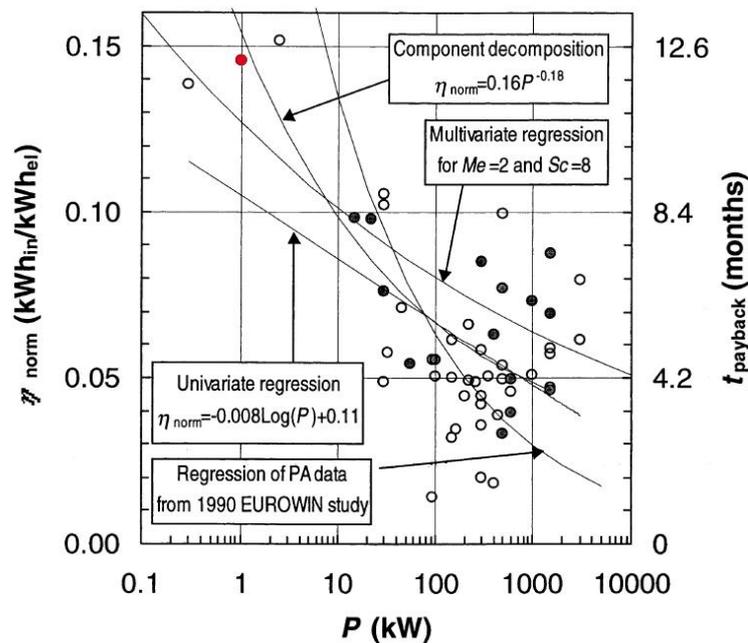


Figura 6.6 - Intensità energetica normalizzata in funzione del η_{norm} per varie turbine eoliche di potenze differenti

Per quel che riguarda l'*impatto*, le emissioni di anidride carbonica sono comprese tra 7,9 e 123,7 gCO₂/kWh per il *range* di potenze al quale ha fatto riferimento l'autore.

Nel nostro caso:

1. Includendo le fondazioni, per i siti eolici più redditizi (con AEP minimo pari a 1000 kWh) le emissioni sono comprese tra 215 e 74 gCO₂/kWh;
2. Escludendo dal conteggio le fondazioni, per gli stessi siti le emissioni scendono a valori compresi tra 100 e 34 gCO₂/kWh.

6.2 CONFRONTO CON IMPIANTI FOTOVOLTAICI

A livello di produzione energetica su piccola scala, atta all'uso civile e abitativo, il termine di paragone più diretto e diffuso è il pannello fotovoltaico. Il principio di funzionamento è sicuramente diverso da quello di una turbina eolica, ma entrambi sono sistemi di sfruttamento di risorse gratuite e dipendenti da fattori variabili durante la giornata e l'anno. Permettono inoltre di produrre energia elettrica per auto-consumo senza immettere in atmosfera sostanze impattanti durante il loro utilizzo.

L'impatto generato è, in entrambi i casi, imputabile alla realizzazione dell'impianto, l'installazione, il disassemblaggio e lo smaltimento con eventuale riciclo.

Gli impianti fotovoltaici sono una tecnologia convalidata, per questo motivo è facile reperire dati in letteratura da poter utilizzare come termini di paragone per i risultati della FreeTree.

Ruben Laleman [19] ha analizzato vari tipi di pannelli fotovoltaici adatti all'uso residenziale e caratterizzati da bassa irradiazione; per ognuna delle tipologia studiate ha analizzato i consumi energetici, l'impatto ambientale e le emissioni.

In Figura 6.7 è mostrata la *Cumulative Energy Demand* caratteristica di pannelli fotovoltaici di vario tipo: Silicio monocristallino, Silicio multicristallino, Cadmio - Tellurio, Rame - Indio - Selenio e Silicio a film sottile. Tali valori si riferiscono alla richiesta energetica per kWp [CED/kWp] per un sistema fotovoltaico di potenza massima 3 kWp. La domanda energetica varia tra 30.000 e oltre i 37.000 MJ.

I $t_{payback2}$ di questi sistemi sono inferiori a cinque anni; in funzione del coefficiente di conversione della Nazione di riferimento variano tra 4 - 5 anni per la Gran Bretagna e il Belgio, 3 - 4 anni per la Svizzera, 2 - 3 anni per la Spagna nel caso di pannelli di Silicio mono e multi cristallino; per le altre tipologie di fotovoltaico il tempo di recupero si abbassa di circa un anno in condizioni di bassa irradiazione.

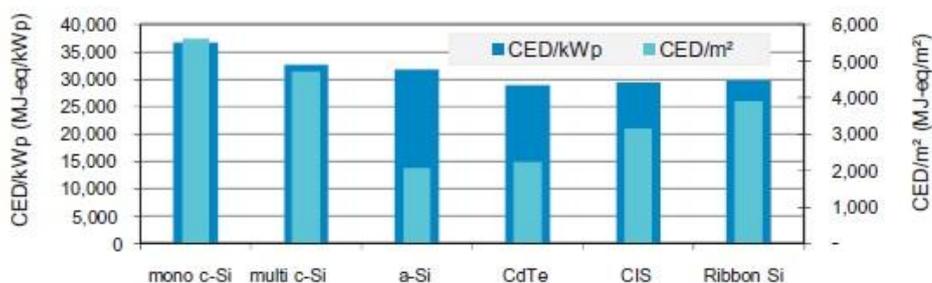


Figura 6.7 - CED/kWp e CED/m² per vari tipi di installazioni fotovoltaiche di 3 kWp

Per quel che riguarda l'impatto, calcolato con l'uso del metodo *Eco-Indicator 99*, in Figura 6.8 si nota che i maggiori impatti sono dovuti all'uso di combustibili, *fossil fuels*, alla respirazione di sostanze organiche e inorganiche, *respiratory effects* e in misura minore all'eco-tossicità, *ecotoxicity*. Naturalmente nella realizzazione dei pannelli fotovoltaici incide anche l'estrazione di minerali, *mineral extraction*, necessari alla superficie atta alla ricezione dei fotoni della luce. L'impatto espresso in Eco-points varia tra i 317 pt del pannello CIS e i 450 pt del CdTe.

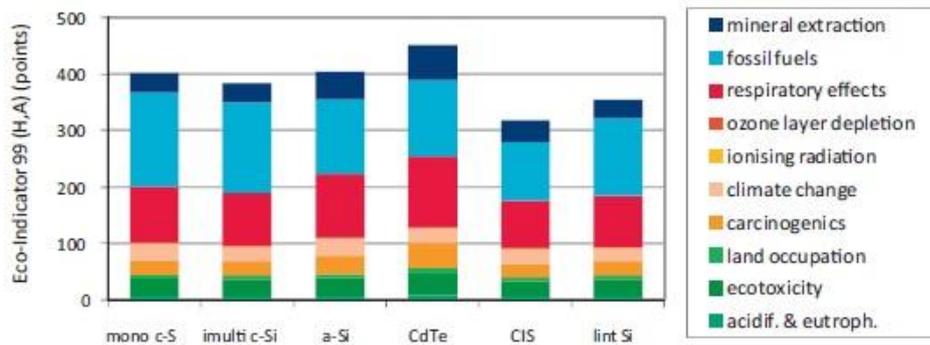


Figura 6.8 - Risultati dello studio compiuto con Eco-Indicator 99 per vari tipi di sistemi fotovoltaici con potenza di 3 kWp

Infine in Figura 6.9 si osservano le emissioni di CO₂ calcolate ipotizzando due tempi di durata di vita differenti: si nota come, per una vita utile di 30 le emissioni siano di 0,08 kgCO₂/kWh, mentre per una durata di vent'anni arrivano a 0,12 - 0,13 kgCO₂/kWh.

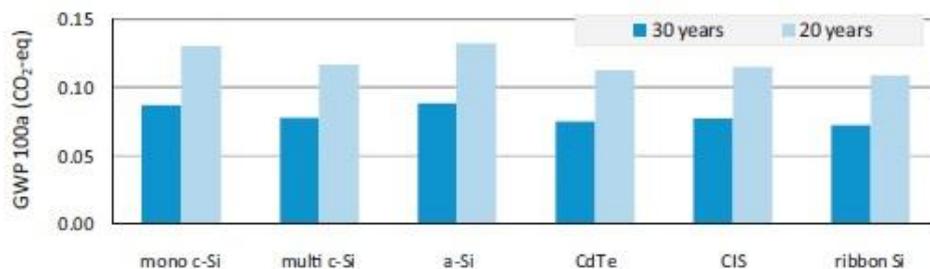


Figura 6.9 - Influenza del tempo di vita sulle emissioni di anidride carbonica di 1 kWh di energia elettrica prodotta da vari tipi di sistemi fotovoltaici con potenza di 3 kWp

I risultati di quest'analisi rispecchiano quanto visto fino ad ora anche per il modello completo della FreeTree:

- 37.678 MJ sono necessari alla realizzazione della microturbina eolica, che diminuiscono se invece di scegliere l'installazione su terreno si opta per l'installazione su edificio;
- Tempo di recupero inferiore a 5 anni per AEP = 1000 kWh ($\lambda = 11,42$);

- 249,5 pt è l'impatto totale dell'impianto calcolato con l'*Eco-Indicator 99* (Figura 6.1) e percentualmente diviso tra le varie categorie di danno nello stesso modo del caso fotovoltaico, ad esclusione dell'estrazione di risorse minerali;
- 0,28 kgCO₂/kWh per AEP = 1000 kWh considerando tempo di vita di 10 anni;
0,19 kgCO₂/kWh considerando 15 anni;
0,14 kgCO₂/kWh considerando 20 anni.

6.3 CONCLUSIONI DI CONFRONTO

Oltre al differente metodo di analisi, campo di applicazione e dello sviluppo tecnologico, il consumo energetico per la realizzazione di un aerogeneratore è legato al tipo di crescita economica di un Paese, in conformità al suo sviluppo economico e alla produzione elettrica che lo caratterizzano. Inoltre sul tempo di recupero energetico e sugli impatti incidono il fattore di carico e il tempo di vita utile.

Trovare in letteratura riferimenti diretti con le ipotesi e le correlazioni utilizzate per l'analisi della FreeTree è molto difficile, soprattutto perché il microeolico non è una realtà ancora molto diffusa.

Si è potuto comunque osservare che i calcoli effettuati sono in linea con i dati recuperati in letteratura per questi tipi d'impianti e per lo più basati su considerazioni e valutazioni di carattere generale.

Differenze consistenti, che avrebbero fatto pensare a errori di fondo e inadeguatezza delle assunzioni nell'analisi LCA, non sono state rilevate.

Inoltre, le caratteristiche della FreeTree non si distanziano di molto neanche dalla realtà fotovoltaica.

7. CONCLUSIONI

7.1 RISULTATI OTTENUTI

Il presente lavoro di Tesi riguarda l'analisi della microturbina eolica ad asse verticale FreeTree, applicando la metodologia LCA (Life Cycle Assessment).

Per lo svolgimento dello studio si sono seguite le indicazioni fornite dalle norme della serie ISO 14040 e 14044, riguardanti la valutazione del ciclo di vita.

I dati dei pesi e della struttura della microturbina eolica sono stati forniti direttamente dalla ditta produttrice, la Linz Electric S.p.A, e risalgono a fine 2012; quelli riferiti alle produzioni energetiche annue dei vari siti eolici analizzati derivano da uno studio precedente nel quale sono stati elaborati, sulla base dei dati di ventosità registrati nell'anno 2011.

La modellazione del sistema è stata effettuata *in primis* con il software *Boustead Model* e successivamente con *SimaPro 7.3.3*.

Per la *valutazione degli impatti* è stato prima presentato un confronto dei risultati tra i due software implementati: l'ordine di grandezza dei risultati ottenuti è lo stesso, l'impatto è leggermente superiore per il modello implementato con SimaPro che è anche più dettagliato. La causa maggiore d'impatto è la produzione di CO₂: circa 2845 kgCO_{2eq} emessi dall'intero ciclo di vita della FreeTree, in particolar modo associate alle fondazioni. Eliminando l'impatto a esse legato, il conteggio scende a 1311 kgCO_{2eq}: ciò significa che l'impatto totale è causato per circa il 50% dalle fondazioni.

Analizzando poi il progetto con alcuni metodi di calcolo presenti in SimaPro, *Eco-Indicator 99*, *CML2 baseline 2000* e *ReCiPe*, è emerso che gli effetti principali sono quelli cancerogeni e legati alla respirazione di sostanze inorganiche; in secondo piano si colloca il cambiamento climatico, almeno per quel che riguarda l'effetto sulla salute umana. La causa dominante sono le fondazioni, la zincatura del palo interagisce con la respirazione di sostanze inorganiche e la componentistica elettronica ha un effetto cancerogeno.

Sulla qualità dell'eco sistema sono sempre questi tre gli effetti principali che incidono in particolar modo sull'eco-tossicità, mentre pesa maggiormente il consumo di risorse fossili dovuto in particolar modo alla manutenzione e alla fase di trasporto finale, piuttosto che il consumo di minerali grazie al buon riciclo di materie prime (rame, ferro - acciaio, alluminio) che si riesce a eseguire. Oltre a questo, il metodo CML evidenzia un forte impatto sull'eco-tossicità acquatica dovuta al processo di stampaggio delle schede elettroniche e all'impasto del cemento.

Il forte danno legato alle fondazioni si dimostra elevato anche nella realizzazione di una macro-turbina eolica, soprattutto per quel che riguarda la respirazione di sostanze inorganiche; la seconda causa d'impatto sono anche in questo caso i combustibili.

Per la valutazione delle categorie di base presenti in un'analisi LCA (GWP, AP, NP, ODP, POCP) si è usato il metodo EDP(2008), che ha permesso di stimare gli impatti in termini di emissione dei kg di sostanza equivalente specifica per ogni categoria.

Concentrandoci sul GWP si sono calcolate le emissioni di kgCO₂/kWh per le varie località analizzate, potendo definire la convenienza della FreeTree rispetto alla

produzione termoelettrica da fossile e a quell'elettrica totale nazionale. Si sono perciò studiati diversi modelli, analizzando le modifiche degli impatti in funzione alla variazione delle ipotesi di partenza.

Dai calcoli è emerso che, per il caso della FreeTree completa, siti eolici con producibilità annue inferiori a 723,82 kWh non sono adatti all'installazione di questo impianto, poiché le emissioni di anidride carbonica per unità di energia prodotta sono equivalenti a quelle della produzione elettrica italiana. Per siti eolici con producibilità annue superiori a 1000 kWh, cui corrisponde un fattore di carico dell'11%, il risparmio di CO₂ è di 0,10 - 0,26 kgCO₂/kWh, rispetto alla produzione elettrica totale e al termoelettrico da fossile

L'impatto varia tra 0,074 kgCO₂/kWh, per la condizione migliore di ventosità analizzata (AEP = 3828,50 kWh), e valori inaccettabili anche superiori a 1kgCO₂/kWh per AEP = 280 kWh e inferiori.

Diminuendo il carico associato alla produzione della FreeTree, eliminando ad esempio la fondazione, la manutenzione o il palo di supporto, gli impatti diminuiscono notevolmente. Interessante è notare come le emissioni legate all'ipotesi di compiere un trasporto transoceanico siano circa 150 volte superiori a quelle di un trasporto locale (1903,76 kgCO₂ contro 591,24 kgCO₂): in ogni caso già con AEP = 600 kWh il sito eolico risulta idoneo.

Con l'ipotesi di durata di vita di 10 anni l'impatto è di 0,28 kgCO₂/kWh per AEP = 1000 kWh, maggiore rispetto a quello definito in letteratura per un pannello fotovoltaico (0,13 - 0,08 kgCO₂/kWh a seconda che la vita utile sia di 25 o 30 anni); ampliando la vita utile a 15 anni scenderebbe a 0,19 kgCO₂/kWh.

Infine per il calcolo dell'energia di produzione si è utilizzato il metodo *CED (Cumulative Energy Demand)*: il carico energetico totale è di quasi 10466 kWh, di cui 4043 kWh imputabili alle fondazioni (circa il 38% del totale).

Il tempo di ritorno energetico, EPBT, è stato calcolato in due modi:

- Come rapporto tra l'energia totale consumata e l'energia prodotta annualmente della turbina eolica;
- In funzione della producibilità media annua, dell'energia di produzione e del fattore di conversione caratteristico della realtà italiana, in modo da raffrontarlo con la produzione elettrica locale.

Facendo riferimento al secondo metodo di calcolo, che è quello maggiormente diffuso in letteratura, per il modello completo della FreeTree che è anche il modello più dispendioso in termini energetici, l'*impatto zero* è ottenuto per AEP = 481,4 kWh, mentre già con fattore di carico del 17% (AEP = 1489,20 kWh) rimangono 7 anni disponibili all'immissioni in rete di energia elettrica pulita.

Per scendere a tempi di recupero di circa un anno bisogna salire ad una produzione annua di oltre 4000 kWh,.

Questi risultati sono in linea con i dati recuperati in letteratura per una microturbina eolica installata in Turchia.

Concludendo, l'impatto elevato delle fondazioni e il suo carattere energivoro, confermati anche dal confronto col megaeolico, non sono direttamente imputabili alla realizzazione della FreeTree, anche perché l'installazione potrebbe avvenire sul tetto di un edificio, eliminando il carico ambientale legato alla gettata di cemento. Inoltre, esse potrebbero essere utilizzate per una seconda installazione, dimezzando così il loro impatto.

Infine, è importante ricordare il tempo di vita assunto per la microturbina è cautelativo: se questo aumentasse, migliorerebbero le emissioni al kWh e diminuirebbero anche i tempi di recupero del debito energetico di produzione con conseguente aumento della resa energetica. L'effettiva durata di vita non è stata ancora comprovata, poiché non esistono installazioni così datate: sarà solo il tempo a convalidare i risultati ottenuti, oppure a smentirli qualora la FreeTree durasse più di 10 anni.

Il progetto appare dunque coerente con i risultati recuperati da varie fonti su altri impianti per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili che possono essere situati in zone urbane.

7.2 EVOLUZIONI FUTURE

Il luogo di fabbricazione dell'impianto è una variabile che incide sul calcolo dell'energia di produzione, sulle valutazioni di convenienza energetica e rispetto ad altri tipi di produzioni elettriche; anche il livello tecnologico di un Paese e le possibilità di riciclo di particolari materiali, incidono sull'analisi finale.

Variabili di questo tipo ce ne sono molte e ognuna di queste rende il modello creato unico: la presentazione dettagliata e approfondita del lavoro svolto rende l'elaborato, un riferimento di base per successivi studi sul microeolico.

E' infatti vero che questo è un argomento progettualmente giovane, in fase di miglioramento tecnologico e non ancora molto diffuso: per questi motivi la reperibilità di informazioni dettagliate riguardanti il microeolico, è scarsa.

Questa tesi si presenta come un'analisi della FreeTree che permetterà alla Linz Electric S.p.A. di rendersi conto degli aspetti più impattanti dal punto di vista ambientale ed energeticamente dispendiosi, di lavorare sul fronte del miglioramento della produzione, magari rivedendo l'aspetto legato al trasporto dei singoli componenti fino alla sede della ditta e il successivo invio dell'assieme al luogo di installazione, e ragionare su come poter abbattere l'impatto legato alle schede elettroniche che non vengono riciclate.

Dal punto di vista dell'utilità per un cliente interessato all'installazione della FreeTree, grazie all'analisi effettuata sarà possibile:

- Identificare e scartare le località caratterizzate da producibilità energetiche annue troppo basse che non garantiscono un vantaggio all'installazione;
- Dare un'idea del tempo necessario a ripagare energeticamente la costruzione dell'aerogeneratore, facendosi un'idea degli anni che effettivamente contribuiscono a produrre energia pulita;
- Dare un'idea della convenienza dell'impatto ambientale rispetto alle produzioni elettriche tradizionali;
- Relazionare e valutare il tutto con modelli simili di turbine eoliche.

Assieme all'elaborato precedente (citazione) questa tesi diventa un progetto completo dell'analisi del prodotto, sotto il punto di vista della producibilità elettrica e del guadagno economico ottenibile in funzione degli incentivi statali, della convenienza energetica e dell'impatto ambientale evitato.

Eventuali sviluppi futuri potrebbero riguardare:

- La geolocalizzazione e delocalizzazione delle produzioni industriali, per ottenere l'abbattimento degli impatti causati dal trasporto dei pezzi prodotti;

- Il valore energetico e la sostenibilità ambientale che un prodotto può assumere se rispondente alle caratteristiche del "*made in*";
- La definizione di procedure ecologiche per garantire una distribuzione del prodotto conveniente e una produzione industriale a basso impatto ambientale;
- Lo studio della convenienza del tipo di trasporto per la commercializzazione locale e a lungo raggio.

Infine, si possono identificare delle opportunità di sviluppo del progetto interne all'Azienda, quali:

- L'approfondimento del presente studio LCA, utilizzando le emissioni e i consumi specifici delle fabbricazioni dei pezzi della microturbina eolica, in modo da svincolarsi dall'utilizzo di data base. Questa è una strada difficile da intraprendere perché è vincolata dalla possibilità di ottenere i dati di produzione dai fornitori;
- L'unificazione del progetto con il precedente [15] per realizzare un software unico e completo che permetta l'analisi della FreeTree per varie condizioni progettuali e di localizzazione.

Bibliografia

- [1] ENEA, «Quaderno energia eolica,» Laboratorio tecnografico ENEA, Frascati, 2011.
- [2] Ministro dello Sviluppo Economico, *Criteri e modalità per la fornitura ai clienti finali delle informazioni sulla composizione del mix energetico utilizzato per la produzione dell'energia elettrica fornita, nonché sull'impatto ambientale della produzione*, A. p. l. e. e. i. gas, A cura di, 2009.
- [3] Ministro dello Sviluppo Economico, *Determinazione delle modalità e delle condizioni delle importazioni e delle esportazioni di energia elettrica per l'anno 2013*, Autorità per l'energia elettrica e il gas, 2013.
- [4] EWEA, J. Wilkes e J. Moccia, *Wind in Power 2012 European statistics*, EWEA, 2010.
- [5] GSE, *Rapporto statistico 2011 - Impianti a fonti rinnovabili*, GSE, 2011.
- [6] G. L. Baldo, M. Marino e S. Rossi, *Analisi del ciclo di vita LCA*, Città di Castello (Pg): Edizioni Ambiente Srl, 2008.
- [7] SETAC, *Global guidance principles for life cycle assessment databases: a basis for greener processes and products*, Guido Sonnemann (UNEP) and Bruce Vigon (SETAC), 2011.
- [8] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *UNI EN ISO 14040: Environmental management, LIFE CYCLE ASSESSMENT, Principales and guideline*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2006.
- [9] Ente Nazionale Italiano di Unificazione, *UNI EN ISO 14044: Environmental management, LIFE CYCLE ASSESSMENT, Requirements and guideline*, Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2006.
- [10] IPCC, W. J. McG. Tegart, G. W. Sheldon e D. C. Griffiths, *Report prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change*, Camberra, Australia: Australian Government Publishing Service, 1995.
- [11] H. Wenzel, M. Z. Hauschild e L. Alting, *Environmental Assessment of Products; Volume 1: Methodology, Tools and Case Studies in Product Development*, Danimarca: Kluwer academic publishers, 1997.
- [12] FIVRA, «Conferimento in discarica delle lane minerali o fibre artificiali vetrose (FAV),» 2012.

- [13] I. Ambiente, «www.impreseambiente.it/eolico/smaltimento-pale-eoliche.html,» 25 10 2010. [Online].
- [14] W. H. Organization, GLOBAL HEALTH RISKS, Mortality and burden of disease attributable to selected major risks, WHO Library Cataloguing - in - Publication Data, 2009.
- [15] G. Zamboni, A. Stoppato e D. Biondani, *Estensione temporale della ventosità di un sito eolico mediante Variance Ratio Method e simulazione Monte Carlo della producibilità energetica annua*, Università degli Studi di Padova: Dipartimento di Ingegneria Industriale, 2012.
- [16] ISPRA, *Produzione termoelettrica ed emissioni di CO2, Fonti rinnovabili e impianti soggetti a ETS*, ISPRA, 2011.
- [17] E. Martinez, «Life Cycle Assessment of a multi-megawatt wind turbine,» *Elsevier*, vol. Applied Energy, n. 34, pp. 2293-2300, 2010.
- [18] N. D'Souza, E. Gbgbaje-Das e P. Dr. Shonfield, «Life Cycle Assessment of Electricity production from a V112 Turbine Wind Plant,» Vestas Wind System A/S, Randers, 2011.
- [19] R. Laleman, J. Albrecht e J. Dewulf, «Life Cycle Analysis to estimate the environmental impact of residential photovoltaic system in regions with low solar irradiation,» *Elsevier*, vol. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 15, pp. 267-281, 2011.
- [20] A. N. Celik, T. Muneer e P. Clarke, «An investigation into micro wind energy system for their utilization in urban areas and their life cycle assessment,» 2011, p. ABSTRACT.
- [21] M. Lenzen e J. Munksgaard, «Energy and CO2 life-cycle analyses of wind turbines - review and applications,» *Renewable Energy*, pp. 339-362, 2002.
- [22] I. Boustead e G. F. Hancock, *Handbook of Industrial Energy Analysis*, New York: EllisHorwood, 1979.
- [23] M. Geodkoop, A. De Schryver e M. Oele, *Introduction to LCA with SimaPro*, Pré Consultants, 2010.
- [24] M. Geodkoop, S. Effting e M. Collignon, *The Eco-indicator 99, A damage oriented method for Life Cycle Assessment*, Pré Consultants, 2000.
- [25] M. Goedkoop, R. Heijungs e M. Huijbregts, *ReCipe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises category indicators at the midpoint and the endpoint level*, Pré Consultants, 2009.

- [26] F. Cappellaro e S. Scalbi, «La rete italiana LCA: prospettive e sviluppi del Life Cycle Assessment in Italia,» ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, Roma, 2011.
- [27] Linz Electric S.p.A., *Istruzioni per l'installazione Turbina Eolica <<Free Tree>>*, Arcole (VR), 2012.
- [28] A. Cavallini, *Appunti del corso di Energetica*, Università degli Studi di Padova: Dipartimento di Ingegneria Meccanica, 2008 - 2009.
- [29] A. Stoppato, *LCA - Life Cycle Assessment, Breve introduzione*, Università degli Studi di Padova: Dipartimento di Ingegneria Meccanica, A.A. 2008 - 2009.
- [30] A. Ballin e A. Stoppato, *Analisi di un sistema eolico secondo la metodologia LCA*, Università degli Studi di Padova: Dipartimento di Ingegneria Meccanica, 2007.
- [31] C. Alberto, *Appunti del corso di Energie Rinnovabili*, Università degli Studi di Padova: Dipartimento di Ingegneria Industriale, 2011 - 2012.
- [32] P. Giorgio, *Appunti del corso di Macchine per l'utilizzo di fonti rinnovabili*, Università degli Studi di Padova: Dipartimento di Ingegneria Meccanica, 2011 - 2012.
- [33] O. Joliett, M. Margni e R. Charles, «IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology,» Industrial Ecology & Life Cycle System Group GECOS, Losanna, Svizzera, 2003.
- [34] F. ASSCO, *Codice internazionale per gli imballaggi di cartone*, 2011.
- [35] P. T. LaPuma, *A Life Cycle assessment and Economic Analysis of Wind Turbine Using Monte Carlo Simulation*, 2009.
- [36] O. Perpignan, E. Lorenzo e M. A. Castro, «Energy Pay Back Time of Grid Connected PV System: Comparison Between Tracking and Fixed System,» *Interscience*, n. 17, pp. 137-147, 2009.
- [37] E. Martinez, «LCA sensitivity of a multi-megawatt wind turbine,» *Elsevier*, vol. Renewable Energy, n. 34, pp. 667-673, 2009.
- [38] M. Pehnt, «Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies,» *Elsevier*, vol. Renewable Energy, n. 31, pp. 55-71, 2006.
- [39] A. A. Bayod-Rujula, A. M. Lorente-Lafuente e F. Cirez-Oto, «Environmental assessment of grid connected photovoltaic plants with 2-axis tracking versus fixed modules system,» *Elsevier*, vol. Energy, n. 36, pp. 3148-3158, 2011.

- [40] B. Batumbya Nalokowe, L. Liu e D. Wiedmar, *Life Cycle Assessment of a Wind Turbine*, 2006.
- [41] K. Soon-Duck, «Uncertainty analysis of wind energy potential assessment,» *Elsevier*, vol. *Applied Energy*, n. 87, pp. 856-865, 2010.
- [42] GSE, *Eolico - Rapporto statistico*, GSE, 2009.
- [43] ANEV, *Brochure Eolico 2013*, ANEV, 2013.

Bibliografia siti internet

- [44] www.autorita.energia.it
- [45] www.ecosmes.net
- [46] www.elsevier.com
- [47] www.enea.it
- [48] www.federacciai.it
- [49] www.free-tree.com
- [50] www.gestione-rifiuti.it
- [51] www.gse.it
- [52] www.ipcc.ch
- [53] www.isprambiente.it
- [54] www.pre-sustainability.com
- [55] www.renewableenergyworld.com
- [56] www.rinnovabili.it
- [57] www.sciencedirect.com
- [58] www.setac.org
- [59] www.terna.it
- [60] www.treehugger.com
- [61] www.wind-energy-the-facts.org
- [62] www.who.net