



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 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].

È in corso lo sfruttamento delle 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.

È quindi necessario esprimere i risultati in modo da rendere confrontabili gli impatti di tutti i siti presi in esame.

- < Esprimere i risultati utilizzando come unità di misura il kg_{eq}/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 $t_{pay-back}$ che si basa sul calcolo degli anni in cui la turbina ripaga i consumi energetici della sua fabbricazione. È quindi possibile determinare il numero 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. *Ö* *ã* *Á* } [c ^ ç [| ^ *Á* *ã* } c ^ | ^ • • ^ *Á* ~ *Mbbil* } [*Á* * | *ã* Chemical Company | *ã* * *æ* | *ã* *comp* *at* *il* *ta* *de* i 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

] | [& ^ • • [*Á* [*Á* ~ } q æ c c *ã* ç *ã* c e *Ê* *Á* ^ ~ ~ ^ c c ~ æ c [*Á* æ c c | æ ç ^ | • [

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 freamework* 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" [1]. È un processo che consiste nel tracciare i 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.

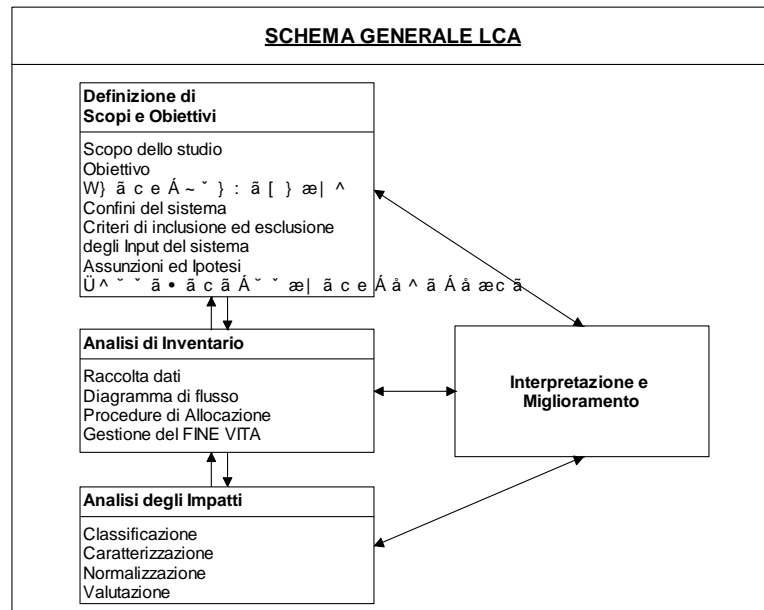


Figura 2.1 - Struttura generale di una LCA

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 [$\sum_{i=1}^n \text{GER}_i$], l'energia impiegata nei trasporti, energia *feedstock*.

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. È 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 & [; ; ã •] [} á ^ Á ~ } æ Á á ã ç ^ 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 (H₂O), l'anidride carbonica (CO₂), l'ozono (O₃) e il metano (CH₄), l'ossido nitrico (N₂O) 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 CO₂ cui è attribuito valore unitario (GWP = 1). Ogni sostanza è esprimibile in termini di kg di CO₂ 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	R t q v q u u k f	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 (NH₃).

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	D k q u u k f q " :	0,70
NO	O q p q u u k f q ' :	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 & ^ | c ã Á] ^ | ã [ã ã Á ã ^ | | q æ } } [durante il traffico intenso (mattino, ^ Á ã } Á ^ 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 a ^ | | q è mantenuto la & [} & ^ } c | æ: ã [] ^ Á ã ã Á ~ ~ ^ • c q ~ | c ã { [Á grazie ad un ã ç ^ | | [A equilibrio dinamico. Il ciclo fotostazionario avviene solamente alla presenza della luce del • [| ^ K Á ã ã Á } [c , 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

comparsa, la visibilità e i 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 i 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.

La rilevanza globale di una sostanza è determinata dalla sua concentrazione in atmosfera, 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.

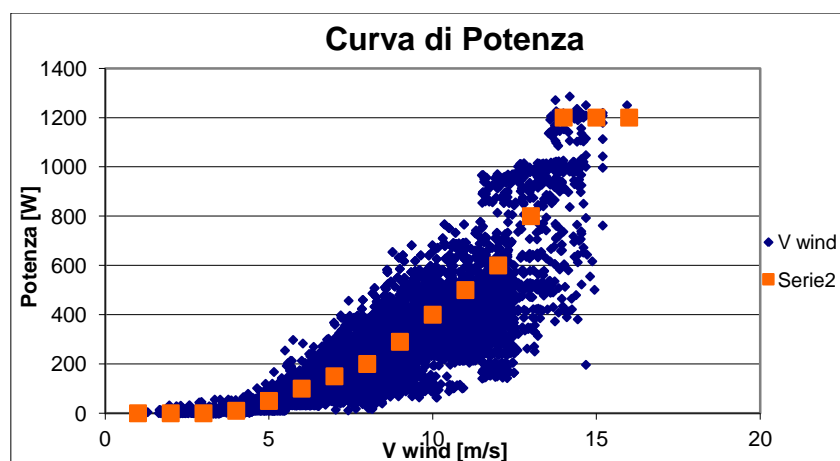


Figura 3.2 - Curva di Potenza della FreeTree

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.

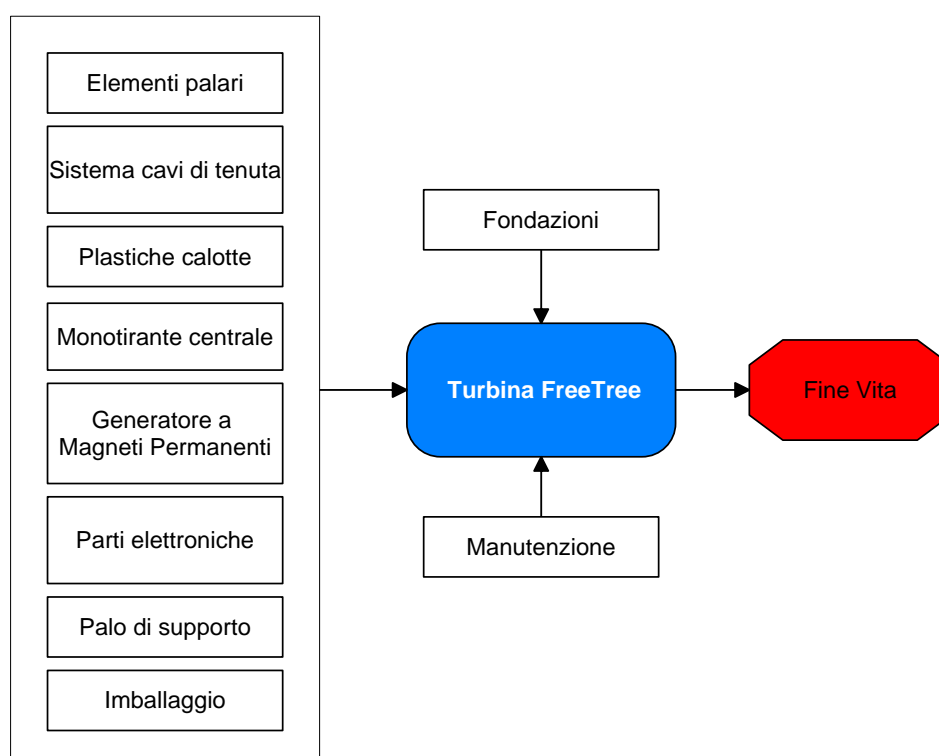


Figura 3.3 - Diagramma di flusso su cui si basa l'LCA della FreeTree

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 giorno uno dei software più diffusi per effettuare analisi LCA. E' 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.

E' 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)

È 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 con $\frac{1}{100}$ (80 anni per gli uomini; 82,5 per le donne)

$\frac{1}{100}$ fattore di gravità della malattia, compreso tra 0 (completa salute) e 1 (morto) 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 baseline2000

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 *midpoint* è formato da tre categorie:

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

$$\frac{D}{C} = \text{fattore di caratterizzazione di endpoint per i danni all'ecosistema}$$

$$D = \text{fattore di caratterizzazione in } PDF \cdot m^2 \cdot yr \text{ e fattore di densità di specie per i sistemi terrestri in } species/m^2$$

$$D = \text{fattore di caratterizzazione in } PDF \cdot m^3 \cdot yr \text{ e fattore di densità di specie per i sistemi di acqua dolce in } species/m^3$$

$$D = \text{fattore di caratterizzazione in } PDF \cdot m^3 \cdot yr \text{ e fattore di densità di specie per i sistemi di acqua marina, in } species/m^3.$$

- ◁ *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 ^{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 insieme al generatore, che risulta essere l'unico pezzo assemblato nella sede CE:Innereità della 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 [Applicazione della turbina eolica sui tetti di condomini e scelta, recentemente, sta andando per la maggiore vista la caratteristica del vento a essere più costante ad altezze maggiori da terra. È un fatto che il coefficiente di resistenza al vento è 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'incarica dello 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 le manutenzioni straordinarie 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 discarica per altri ancora o la termovalorizzazione con relativa discarica 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.

³ 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 macchina 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.

3 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. *Ò C Á • c æ c [Á] [• • ã à ã | ^ Á ã } • ^ | ã ! ^ Á ã | Á] ; [& ^Zinc [Á à ã Á : ã } 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:

³ 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

³ 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 vetrc	3,39 kg
	Vernice	0,162 kg
		3,63
Semipale Inferiori GOE386D	Fibra vetrc	0,294 kg
	Vernice	3,39 kg
<i>Trasporto: locale</i>		<i>103 km</i>

Tabella 3.2 Inventario dei materiali del gruppo pala

3 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 glassed fibres	7,02	kg
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	1,31062	vehiclekm
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

3 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 } [} Á & ã Á • [} [Á : ã ~ ^ i n t r a m b i m a t e r i a l i s o n o s t a t i d e s t i n a t i 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.

3.42 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 metacrilat 1,634 kg
PLASTICA SUPERIORE	h 0,135 m
	d 0,54 m
	ABS e metacrilat 1,380 kg
Vernice calotte	0,2 kg
<i>Trasporto: camion</i>	<i>61,5 km</i>
Viti, rondelle e supporto plastiche	Acciaio inox 0,2106 kg
<i>Trasporto: camion</i>	<i>77 km</i>

Tabella 3.4 - Inventario dei materiali delle calotte

³ 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 incineration (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 transportigid < 1 tonne	0,33607	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,02757	vehiclekm
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

3 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.

3.43 Monotiranti

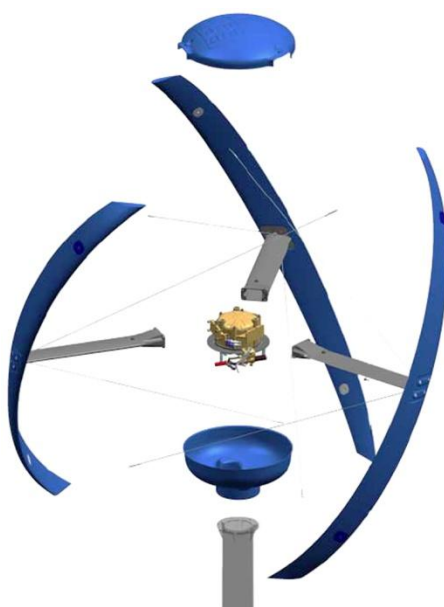


Figura 3.6 - Elementi distintivi della turbina eolica FreeTree; in particolare si distinguono: pale, calotte di copertura, monotiranti, cavi di tenuta, generatore

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 0,785C m l 0,1408 m s 0,068C m Lega alluminio EN AB 46 12,00C 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 46 0,600 kg
<i>Trasporto: camion interno</i>	<i>30 km</i>
Viti e rondelle	Acciaio inox 0,2123 kg
<i>Trasporto: camion</i>	<i>77 km</i>
Boccole filettate del coperchietto	h 0,021C m d 0,0185 m Acciaio da bonifica 39NiCrMo3 0,144 kg
<i>Trasporto: camion</i>	<i>19 km</i>

Tabella 3.6 - Inventario dei materiali del gruppo monotirante

³ 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 transportigid < 1 tonne	0,6502	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,0277	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,0046	vehiclekm
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

3 SimaPro

Non essendo presente la lega EN AB 46100 all'interno del software, ne è stata usata un'affine considerata riciclabile al 15%, AISi8Cu3, "G-AISi8Cu3 (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, 39NiCr 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

³ 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 transportigid < 1 tonne	0,19092	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,00468	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,02076	vehiclekm
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

³ 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

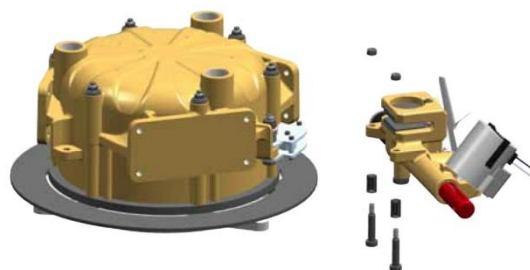


Figura 3.7 - Visione della struttura del generatore

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 PI	0,044 kg
Fili Radox	Fibra di vetro	0,166 kg
Vernice isolante		0,070 kg
<i>Trasporto: camion</i>		<i>2 km</i>
TONDO50mm	h	0,169 m
	Alluminio	1,700 kg
MOZZO CAMPANA	Alluminio	1,524 kg
<i>Trasporto: camion</i>		<i>36 km</i>
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
<i>Trasporto: camion</i>		<i>20 km</i>
MAGNETI PERMANENTI NORD/SUD	h	0,015 m
	l	0,025 m
	s	0,005 m
	NdFeB	1,1 kg
<i>Trasporto: camion</i>		<i>194 km</i>
Viti, anelli, cuscinetti, rondelle, dadi	Acciaio inossidabile	0,8112 kg
<i>Trasporto: camion</i>		<i>77 km</i>
CAMPANA PORTA PALE	h	0,1190 m
	d	0,2984 m
	Lega Alluminio EN AB 46	3,079 kg
<i>Trasporto: camion</i>		<i>30 km</i>

Tabella 3.10 - Inventario dei materiali del gruppo generatore

³ 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)	0,8474	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	0,8474	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 glassed 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	6,5	MJ
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,0082	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,19731	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,26054	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,36278	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,15703	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,10619	vehiclekm
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

3 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

3 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	vehiclekm
Mat. proc. core	3550	Private car transport	0,8004	vehiclekm
Mat. proc. core	3550	Private car transport	0,0582	vehiclekm
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

3 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] [ã & @...Á | æÁ ~ [! } ã c ~ ! æÁ à ^ | Á] æ| [Á } [} Á —Á c ! æÁ * | ã Á [à à 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	h 6,0 m
Tronco di cono	d _{BASE} 0,210C m
	d _{APICE} 0,150C m
	Acciaio strutturale Fe : 60 kg
	Acciaio strutturale Fe 43C 70 kg
	Acciaio strutturale Fe ! 60 kg
Trasporto	170 km

Tabella 3.14 - Inventario dei materiali del gruppo palo

3 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	Metal(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 transportigid < 1 tonne	54,91	vehiclekm
Mat. proc. core	4618	Hot rolled coil production	190	kg

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

3 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 pressat 15,5 kg
<i>Trasporto</i>	<i>18 km</i>
CONTENITORE ESTERNO PARTI EOLICO	"BIWALL" 5 kg
	SCATOLA CARTONE Ksfsk/56265/ 7 kg
<i>Trasporto</i>	<i>67 km</i>

Tabella 3.16 - Inventario dei materiali del gruppo imballaggio

3 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	Woodenpallets (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 transportigid < 1 tonne	1,3668	vehiclekm
Mat. proc. core	3528	Road transportigid < 1 tonne	0,4743	vehiclekm
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

3 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 4!	194,81C kg
FONDAZIONI CALCESTRUZZO	h	1,200 m
	l	1,700 m
	s	1,700 m
	Calcestruzzo CLASSE: C 2.	3,89 m ³
	ps	23 kN/m ³
<i>Trasporto</i>		<i>50 km</i>

Tabella 3.18 - Inventario dei materiali del gruppo fondazioni

³ 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)	9128,6€	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	9128,6€	kg
Mat. proc. core	3534	Road transportigid 1012 tonne	64,66	vehiclekm
Mat. proc. core	3534	Road transportigid 1012 tonne	16,5588€	vehiclekm
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

3 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.

³ 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 transportigid 3 tonne	31,16864 vehiclekm
Mat. proc. core	3550	Private car transport	400 vehiclekm
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

³ 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.

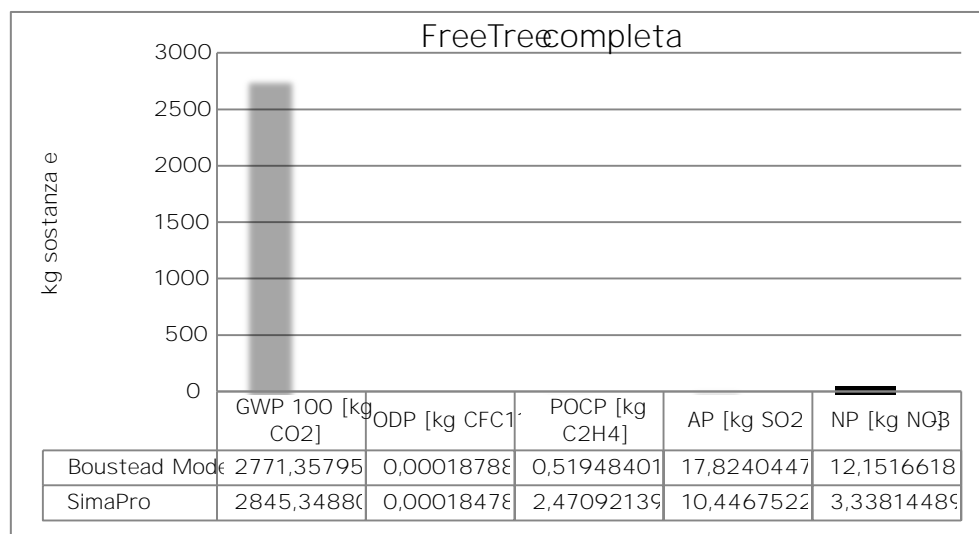


Figura 4.1 - Confronto dell'impatto complessivo della FreeTree calcolato con i due software

