



**Dipartimento di scienze e tecnologia per l'Agricoltura, le Foreste, la
Natura e l'Energia.**

Dottorato di Ricerca in Scienze e tecnologie per la gestione
forestale e ambientale (XXIV CICLO).

Tesi di Dottorato di Ricerca

**Impianti di medio piccola scala per la conversione
termotecnica delle biomasse agro forestali, impiego della
metodologia LCA
(AGR/06)**

COORDINATORE

Prof. Rosanna Bellarosa

TUTORE:

Dott. Rodolfo Picchio

DOTTORANDO:

Dott. Alessandro Sirna

COTUTORE CRA:

Dott. Luigi Pari

Anno accademico 2011/2012

Summary

LCA methodology in two self-consumption wood energy chains

The heating energy production, can be achieved by taking multiple technical and technology solutions. In order to promote energy efficiency and environmental sustainability can be used woody biomass fuel. For the biomass energetic systems, with the present study were highlighted the environmental, the social and the economic impact. In this study the comparison was done between different systems and methods of analysis.

We analyzed two case studies:

1. An installation capable of delivering a heating power output of 650 kW, for a rural farm with a rural hotel and swimming pool;
2. An installation capable of delivering a heating power output of 61 kW for a rural house and services.

To evaluate the energy and environmental effects of proposed energy chain in the present study was chosen the LCA (Life Cycle Assessment) methodology.

The two cases subject to detailed analysis in the course of research were assessed using the LCA methodology by the GEMIS software, to compare the environmental impacts of the woody biomass fuel in comparison at the use of GPL fuel.

The results show the benefits of using a renewable energy source in terms of air emissions and sustainability which the chain of self consumption.

Keywords: microchain, LCA, biofuels, biomass, emissions.

Riassunto

Impianti di medio piccola scala per la conversione termotecnica delle biomasse agro forestali, impiego della metodologia LCA

La produzione di energia termica, può essere realizzata adottando molteplici soluzioni tecniche/tecnologiche. Al fine di promuovere la sostenibilità energetica ed ambientale può essere utilizzato combustibile originato da biomassa legnosa.

Nell'ambito degli impianti a biomassa, col presente elaborato si mette in evidenza l'impatto ambientale, sociale ed economico, attraverso il confronto tra impianti e metodologie di analisi differenti.

Sono stati analizzati nel dettaglio due casi studio :

1. Impianto a sminuzzato in grado di erogare una potenza utile di 650 kW, per il fabbisogno termico e di acqua calda sanitaria di un'azienda agricola con annesso albergo e piscina;
2. impianto a sminuzzato in grado di erogare una potenza utile di 61 kW per il fabbisogno termico e di acqua calda sanitaria di un'azienda agricola.

Per valutare gli aspetti energetici e gli effetti ambientali della filiera energetica proposta nel presente studio è stata scelta la metodologia LCA (Life Cycle Assessment).

Le due filiere oggetto di dettagliate analisi nel corso della ricerca, sono state quindi valutate utilizzando la metodologia LCA, applicata tramite il software GEMIS, al fine di confrontare l'impatto ambientale della filiera Legno-Energia rispetto all'uso del GPL, combustibile precedentemente utilizzato nelle aziende e l'unica vera alternativa nei contesti di studio. I risultati mostrano i benefici dell'utilizzo di una fonte energetica rinnovabile in termini di emissioni atmosferiche e sostenibilità della filiera di autoconsumo.

Parole chiave: microfiliera, LCA, biocombustibili, biomassa, emissioni.

SOMMARIO

INTRODUZIONE	1
GENERALITA' SULLA BIOMASSA LIGNO-CELLULOSICA.....	4
DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELLE BIOMASSE	4
BIOMASSE LIGNO CELLULOSICHE.....	5
<i>LEGNA DA ARDERE</i>	8
<i>SMINUZZATO</i>	8
<i>PELLETS E BRIQUETTES</i>	9
CARATTERISTICHE TECNICHE E TECNOLOGICHE DELLE BIOMASSE LIGNO-CELLULOSICHE	10
<i>LE CARATTERISTICHE CHIMICHE</i>	10
<i>LE CARATTERISTICHE FISICHE</i>	12
<i>LE CARATTERISTICHE ENERGETICHE</i>	13
UTILIZZO ENERGETICO DEI BIOCOMBUSTIBILI LEGNOSI.....	14
<i>SISTEMI DI COMBUSTIONE</i>	16
MATERIALI E METODI.....	19
I CASI DI STUDIO.....	19
<i>TIPOLOGIA PICCOLA</i>	19
<i>TIPOLOGIA MEDIA</i>	20
LCA (Life Cycle Assessment or Analysis).....	21
<i>LA METODOLOGIA LCA</i>	24
<i>LIMITAZIONI</i>	24
<i>LE FASI DI UNA LCA</i>	25
<i>DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI E DEI CONFINI DI SISTEMA</i>	26
<i>RACCOLTA DATI (FASE DI INVENTARIO)</i>	30
<i>VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE</i>	31
<i>INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA</i>	37

IL DATABASE GEMIS	37
<i>CALCOLO DELLE EMISSIONI EQUIVALENTI</i>	41
<i>CALCOLO DEI COSTI</i>	42
SOFTWARE SIMAPRO 6.0	42
<i>ASSEMBLY</i>	44
<i>DISPOSAL SCENARIO</i>	44
<i>LIFE CYCLE</i>	45
<i>I DATABASE</i>	45
<i>MATERIALI</i>	45
<i>PROCESSI</i>	45
<i>TRASPORTI</i>	45
<i>ENERGIA</i>	45
<i>IL CALCOLO</i>	45
I DATI RILEVATI	46
<i>SUPERFICI</i>	46
<i>QUANTIFICAZIONE DELLA BIOMASSA LEGNOSA</i>	46
<i>BOSCO CEDUO A PREVALENZA CERRO E FILARI A PREVALENZA DI ROBINIA</i>	46
<i>VIGNETO E ULIVETO</i>	47
<i>MASSA VOLUMICA</i>	48
<i>UMIDITÀ</i>	48
<i>CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA</i>	49
<i>DENSITÀ BULK DELLO SMINUZZATO</i>	49
<i>POTERE CALORIFICO</i>	49
<i>ANALISI ULTIMA E ANALISI PROSSIMA</i>	51
<i>EMISSIONI GASSOSE DALL'UNITÀ TERMICA</i>	51
<i>LOGISTICA DI APPROVVIGIONAMENTO TIPOLOGIA MEDIA</i>	52
<i>LOGISTICA DI APPROVVIGIONAMENTO TIPOLOGIA PICCOLA</i>	54

<i>TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ</i>	55
<i>INPUT ENERGETICI</i>	55
<i>COSTI DELLA FILIERA</i>	56
ANALISI STATISTICA.....	56
<i>TEST T DI STUDENT</i>	57
<i>ANOVA PER RANGHI DI KRUSKAL-WALLIS</i>	57
<i>ANALISI DELLA VARIANZA (ANOVA) ED ASSUNTI</i>	57
<i>COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE DI SPEARMAN</i>	58
RISULTATI E COMMENTI	60
PRIME PROVE DELLA METODOLOGIA LCA CON GEMIS: LA MICROFILIERA TERMICA DI AUTOCONSUMO DEL CRA-ING DI MONTEROTONDO.....	60
<i>IL CASO STUDIO: DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA E DEGLI OBIETTIVI</i>	60
<i>CO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	62
<i>SO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	62
<i>NO_x EMESSI DALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	63
<i>HCL EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	64
<i>PARTICOLATO EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	64
<i>CUMULATED ENERGY REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	65
<i>CUMULATED MATERIAL REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	65
<i>ALTRI RISULTATI</i>	66
<i>PRIME CONSIDERAZIONI</i>	68
<i>IL PERCHÉ DELL'ABBANDONO DELL'IDEA PROGETTUALE</i>	71
L'IMPIEGO DI SIMAPRO.....	71
<i>IL PERCHÉ DELL'ABBANDONO DELL'IDEA PROGETTUALE</i>	72
IL SECONDO CASO DI STUDIO "TIPOLOGIA PICCOLA"	72
<i>SUPERFICI</i>	72
<i>QUANTIFICAZIONE DELLA BIOMASSA LEGNOSA</i>	73

<i>VIGNETO.....</i>	<i>73</i>
<i>BOSCO CEDUO A PREVALENZA DI ROBINIA</i>	<i>73</i>
<i>MASSA VOLUMICA E UMIDITÀ</i>	<i>77</i>
<i>CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA.....</i>	<i>78</i>
<i>DENSITÀ BULK DELLO SMINUZZATO</i>	<i>78</i>
<i>POTERE CALORIFICO.....</i>	<i>79</i>
<i>ANALISI ULTIMA E ANALISI PROSSIMA.....</i>	<i>80</i>
<i>EMISSIONI GASSOSE DALL'UNITÀ TERMICA</i>	<i>81</i>
<i>LOGISTICA DI APPROVVIGIONAMENTO TIPOLOGIA PICCOLA.....</i>	<i>82</i>
<i>TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ FASCE BOScate DI ROBINIA.....</i>	<i>83</i>
<i>ABBATTIMENTO E ALLESTIMENTO.....</i>	<i>83</i>
<i>CONCENTRAMENTO-ESBOSCO.....</i>	<i>86</i>
<i>SMINUZZATURA</i>	<i>88</i>
<i>TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ SARMENTI DI VITE.....</i>	<i>90</i>
<i>ROTOIMBALLATURA.....</i>	<i>90</i>
<i>TRASPORTO ROTOBALLE</i>	<i>91</i>
<i>SMINUZZATURA</i>	<i>93</i>
<i>INPUT ENERGETICI</i>	<i>94</i>
<i>FASCE BOScate DI ROBINIA.....</i>	<i>94</i>
<i>RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI SARMENTI DI VITE.....</i>	<i>95</i>
<i>COSTI DELLA FILIERA.....</i>	<i>96</i>
<i>FASCE BOScate DI ROBINIA.....</i>	<i>96</i>
<i>RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI SARMENTI DI VITE.....</i>	<i>99</i>
<i>IL TERZO CASO DI STUDIO "TIPOLOGIA MEDIA"</i>	<i>101</i>
<i>SUPERFICI.....</i>	<i>101</i>
<i>QUANTIFICAZIONE DELLA BIOMASSA LEGNOSA</i>	<i>102</i>
<i>BOSCO CEDUO A PREVALENZA DI CERRO</i>	<i>102</i>

<i>VIGNETO</i>	105
<i>OLIVETO</i>	106
<i>MASSA VOLUMICA E UMIDITÀ</i>	107
<i>CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA</i>	109
<i>DENSITÀ BULK DELLO SMINUZZATO</i>	109
<i>POTERE CALORIFICO</i>	110
<i>ANALISI ULTIMA E ANALISI PROSSIMA</i>	111
<i>EMISSIONI GASSOSE DALL'UNITÀ TERMICA</i>	114
<i>LOGISTICA DI APPROVVIGIONAMENTO TIPOLOGIA MEDIA</i>	114
<i>TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITA' DEL BOSCO CEDUO DI CERRO</i>	115
Abbattimento.....	115
Concentramento-Esbosco	118
Sminuzzatura e depezzatura	120
<i>TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ SARMENTI DI VITE</i>	121
ROTOIMBALLATURA.....	121
<i>TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ NELLA RACCOLTA DEI RESIDUI DI POTATURE IN OLIVETO</i>	123
ROTOIMBALLATURA.....	123
TRASPORTO ROTOBALLE	124
<i>TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ NELLA SMINUZZATURA DELLE ROTOBALLE DII RESIDUI DI POTATURE DI VIGNETO ED OLIVETO</i>	126
TRASPORTO ROTOBALLE	128
<i>INPUT ENERGETICI</i>	129
<i>BOSCO CEDUO DI CERRO</i>	129
<i>RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI SARMENTI DI VITE</i>	130
<i>RACCOLTA E SMINUZZATURA DELLE POTATURE DI OLIVO</i>	130
<i>COSTI DELLA FILIERA</i>	131
<i>CEDUO A PREVALENZA DI CERRO</i>	131

RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI SARMENTI DI VITE.....	134
RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI RESIDUI DI POTATURA DEGLI OLIVETI	136
APPLICAZIONE DELLA LCA AI DUE CASI DI STUDIO	139
<i>IL CASO DI STUDIO PIÙ GRANDE LA “TIPOLOGIA MEDIA”: DESCRIZIONE DELL’AZIENDA AGRICOLA.....</i>	<i>139</i>
<i>STRUTTURA DELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA</i>	<i>139</i>
<i>DISPONIBILITÀ DI BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA</i>	<i>140</i>
<i>IL CASO STUDIO: DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA E DEGLI OBIETTIVI...</i>	<i>142</i>
<i>DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA</i>	<i>143</i>
<i>DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI PRINCIPALI.....</i>	<i>144</i>
<i>DEFINIZIONE DELL’UNITÀ FUNZIONALE.....</i>	<i>145</i>
<i>DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI QUALITÀ DEI DATI.....</i>	<i>145</i>
<i>APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA LEGNO-ENERGIA.....</i>	<i>146</i>
<i>BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA QUALE FONTE ENERGETICA</i>	<i>150</i>
<i>UTILIZZO DI GASOLIO AGRICOLO NELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA.....</i>	<i>150</i>
<i>CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA NELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA</i>	<i>150</i>
<i>TRASPORTO DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA</i>	<i>150</i>
<i>CIPPATURA DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA</i>	<i>151</i>
<i>CONVERSIONE ENERGETICA DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA.....</i>	<i>152</i>
<i>APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA GPL-ENERGIA</i>	<i>154</i>
<i>IL CASO STUDIO: VALUTAZIONE DELL’IMPATTO AMBIENTALE.....</i>	<i>157</i>
<i>CO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	<i>157</i>
<i>SO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	<i>159</i>
<i>NO_x EMESSI DALLE FILIERE ENERGETICHE.....</i>	<i>161</i>
<i>HCL EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE</i>	<i>163</i>
<i>PARTICOLATO EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE.....</i>	<i>164</i>
<i>CUMULATED ENERGY REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE.....</i>	<i>166</i>

CUMULATED MATERIAL REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE	167
IL CASO STUDIO: INTERPRETAZIONE E MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA	168
IL CASO DI STUDIO PIÙ PICCOLO LA “TIPOLOGIA PICCOLA”: DESCRIZIONE DELL’AZIENDA AGRICOLA.....	171
STRUTTURA DELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA	171
DISPONIBILITÀ DI BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA	172
IL CASO STUDIO: DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA E DEGLI OBIETTIVI...	174
DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA	175
DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI PRINCIPALI.....	175
DEFINIZIONE DELL’UNITÀ FUNZIONALE.....	177
DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI QUALITÀ DEI DATI.....	177
APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA LEGNO-ENERGIA.....	178
BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA QUALE FONTE ENERGETICA	182
UTILIZZO DI GASOLIO AGRICOLO NELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA.....	182
CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA NELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA	182
TRASPORTO DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA	183
CIPPATURA DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA	183
CONVERSIONE ENERGETICA DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA.....	185
APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA GPL-ENERGIA	186
IL CASO STUDIO: VALUTAZIONE DELL’IMPATTO AMBIENTALE.....	189
CO ₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE	189
SO ₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE	191
NO _x EMESSI DALLE FILIERE ENERGETICHE	194
HCL EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE	195
PARTICOLATO EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE.....	196
CUMULATED ENERGY REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE.....	198
CUMULATED MATERIAL REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE	200

<i>IL CASO STUDIO: INTERPRETAZIONE E MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA</i>	201
CONCLUSIONI E IPOTESI DI ANALISI RIVOLTA AD UN CONTESTO TERRITORIALE SU SCALA REGIONALE	207
IPOTESI DI ANALISI RIVOLTA AD UN CONTESTO TERRITORIALE SU SCALA REGIONALE	203
BIBLIOGRAFIA.....	209

INTRODUZIONE

Le attuali politiche nazionali ed internazionali danno una forte spinta all'impiego delle fonti energetiche rinnovabili e delle bioenergie. I motivi sono diversi quali mitigazione dei cambiamenti climatici, diversificazione delle fonti di approvvigionamento energetico, diminuzione degli inquinanti ecc. In Italia la situazione attuale è molto diversificata a livello locale, in particolare lungo o in prossimità dell'arco alpino dove le bioenergie e le energie alternative hanno avuto e stanno avendo un massiccio sviluppo, supportate non solo dagli enti locali ma anche dalla consapevolezza dei singoli. Nel resto della Nazione esistono numerose iniziative attivate per la maggior parte con finanziamenti pubblici, ma tali iniziative non sono ancora in grado di sensibilizzare l'opinione pubblica in modo massiccio per renderla consapevole delle effettive potenzialità delle energie rinnovabili. Si tratta infatti di realtà non sempre pienamente funzionanti o difficilmente in grado di funzionare a pieno regime. Inoltre spesso manca lo scambio di informazioni sia tecniche sia scientifiche in grado di migliorarne la funzionalità e risolverne i problemi.

Tra le varie fonti di energia rinnovabile un posto di rilievo è ricoperto dalla biomassa legnosa, prelevabile dai boschi, esistenti oppure da piantagioni appositamente realizzate o dai residui delle comuni pratiche agricole. Il ruolo attuale dell'energia derivante dalle biomasse e, in particolare, della dendro-energia (l'energia che deriva dalle biomasse ligno-cellulosiche) nel soddisfacimento della domanda complessiva di energia è un tema entrato nel dibattito politico ed economico internazionale, investendo questioni ambientali e sociali oltre che economiche. Le politiche energetiche tendono, in genere, a stimolare l'impiego di risorse rinnovabili, decentrate e con impatti ambientali non negativi e le biomasse legnose rispondono pienamente a questi requisiti; le politiche ambientali riconoscono la funzione di sostituzione di combustibili fossili che le biomasse possono assumere, con la conseguente riduzione delle emissioni in atmosfera di carbonio di origine fossile (Marland e Schlamadinger, 1997; Hall e Scarse, 1998).

Il progressivo aumento del prezzo del petrolio e del metano e la loro difficoltà di approvvigionamento che potrebbe verificarsi in futuro; gli impegni internazionali assunti (protocollo di Kyoto); i cambiamenti della politica agricola comunitaria (PAC) che determinano sempre minori finanziamenti alle colture tradizionali e gli incentivi finanziari per l'acquisto di generatori di energia di grandi e piccole dimensioni, sono alcuni dei fattori che hanno favorito l'utilizzo della biomassa legnosa e che concretamente si sono tradotti nella

costruzione di grandi centrali termoelettriche e di piccoli e medi impianti di teleriscaldamento per produzione di calore.

In pratica si sono costituite due filiere Legno - Energia: la prima che necessita di grandi quantità di materia prima, molto spesso importata anche da grandi distanze con conseguenze negative per il bilancio energetico ed ambientale (grandi quantità di CO₂ ed altri inquinanti immessi nell'atmosfera) e la seconda, la filiera corta che ha come presupposto base il reperimento e lo sfruttamento di biomassa reperibile da distanze non superiori a 70 km (Verani et al., 2008).

All'interno delle filiere corte si inseriscono le microfiliere di autoconsumo per la produzione di energia termica e acqua sanitaria destinata al fabbisogno di locali con volumetrie ridotte. Questa tipologia di filiera ben si adatta alle necessità di aziende agrarie, zootecniche o a vocazione serricola. In sintesi il modello di microfiliera è applicabile in una qualsiasi azienda agroforestale che possa garantire il reperimento di biomassa da boschi esistenti o abbia disponibilità di terreni idonei per la costituzione di piantagioni dedicate. Naturalmente la filiera può essere alimentata anche da scarti di potature di aziende vicine, o da scarti di segherie, sempre che si trovino nelle vicinanze.

La presente tesi si pone l'obiettivo di analizzare le tecnologie energetiche da fonte rinnovabile, in particolare l'energia da biomassa. La trattazione è nata da una collaborazione tra Università della Tuscia e CRA-ING di Monterotondo. Nell'ambito degli impianti a biomassa, col presente elaborato si vorrà mettere in evidenza l'impatto ambientale, sociale ed economico che comportano, attraverso il confronto tra impianti e metodologie di analisi differenti.

Verranno analizzati nel dettaglio due casi studio :

3. Impianto a sminuzzato in grado di erogare una potenza utile di 650 kW, per il fabbisogno termico e di acqua calda sanitaria di un'azienda agricola con annesso albergo e piscina;
4. impianto a sminuzzato in grado di erogare una potenza utile di 61 kW per il fabbisogno termico e di acqua calda sanitaria di un'azienda agricola.

Per valutare gli aspetti energetici e gli effetti ambientali della filiera energetica proposta nel presente studio è stata scelta la metodologia LCA (Life Cycle Assessment). Questa metodologia è regolamentata dalla normativa tecnica internazionale (ISO, 2006a,b). Esistono numerosi metodi (Valutazione dell'impatto ambientale, Analisi energetica ecc.) per valutare gli impatti ambientali come suggerito da Finnveden and Moberg (2005). Tuttavia la metodologia LCA sembra essere lo strumento più adatto alla finalità di questo studio. Gli elementi chiave

della LCA come definito da Glavic and Lukman (2007) sono i seguenti: identificazione e quantificazione dei carichi ambientali, valutazione delle potenzialità di questi carichi e proposte per la riduzione degli impatti. Le emissioni di gas climalteranti sono state calcolate per ogni singolo step. Tuttavia come generalmente la metodologia scientifica attuale consiglia (Valente et al. 2011), ci siamo focalizzati partendo solo dalla materia prima legno vivo, mentre il carbonio accumulato nel suolo non è stato preso in considerazione.

Questa metodologia ha un approccio così detto “dalla culla alla tomba”. Ciò significa che la produzione di un determinato bene viene valutata a partire dall'estrazione delle materie prime necessarie, fino alla dismissione e smaltimento degli stessi componenti. Il termine “ciclo di vita”, infatti, si riferisce ai processi che coinvolgono un prodotto, a partire dalla produzione, uso, manutenzione fino ad arrivare al riciclo/recupero/smaltimento finale, includendo i processi relativi alla produzione delle materie prime necessarie.

Il risultato finale del presente elaborato sarà dunque una valutazione dell'impatto ambientale complessivo dei casi studio analizzati, secondo la metodologia di analisi sopra citata e una loro valutazione economica, sociale, progettuale, di controllo.

GENERALITA' SULLA BIOMASSA LIGNO-CELLULOSICA

DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE DELLE BIOMASSE

A livello normativo in Italia, la definizione di biomassa ai sensi del DLgs 387/2003, è stata ampliata dal recente DLgs 28/2011 recante “Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE”. L'art. 2, lettera e), definisce la biomassa come “la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.”

Legna da ardere e altre biomasse combustibili

Vengono definite la provenienza e le condizioni di utilizzo (allegato X, parte II, sezione 4), e cioè:

Tipologia e provenienza

- a) Materiale vegetale prodotto da coltivazioni dedicate;
- b) Materiale vegetale prodotto da trattamento esclusivamente meccanico di coltivazioni agricole non dedicate;
- c) Materiale vegetale prodotto da interventi selvicolturali, da manutenzione forestale e da potatura;
- d) Materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di legno vergine e costituito da cortecce, segatura, trucioli, chips, refili e tondelli di legno vergine, granulati e cascami di legno vergine, granulati e cascami di sughero vergine, tondelli, non contaminati da inquinanti, aventi le caratteristiche previste per la commercializzazione e l'impiego ;
- e) Materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di prodotti agricoli;
- f) Sansa di oliva disoleata [...];
- g) Liquor nero ottenuto nelle cartiere [...].

Condizioni di utilizzo

La conversione energetica di tali biomasse può essere effettuata attraverso la combustione diretta, ovvero previa pirolisi o gassificazione.

Comunemente per biomassa ligno-cellulosica si intende un materiale organico di natura vegetale; la biomassa rappresenta la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare (fotosintesi), energia che consente alle piante di convertire la CO₂ atmosferica in materia organica durante la loro crescita. Inoltre, la biomassa è considerata una risorsa rinnovabile, ovvero inesauribile nel tempo nel caso in cui non venga impiegata ad un ritmo superiore alle capacità di rinnovamento biologico. Il grande interesse per la biomassa è dato dal fatto che, oltre a contribuire alla soluzione dei deficit energetici, essa rappresenta una grossa risorsa per l'ambiente. Per questo il conteggio della quantità di biomasse comprende sia le masse in piedi degli alberi in foresta, sia il legno di estrazione forestale nelle sue varie forme di utilizzazioni industriali e civili, sia i prodotti ed i residui dell'agricoltura e delle lavorazioni agro-alimentari. Fanno parte delle biomasse anche i residui costituiti da ramaglie o il legno proveniente dal circuito dell'uso ottenuto in seguito alla raccolta differenziata e alle successive operazioni di separazione, nonché le colture dedicate SRF, MRF (*Medium rotation forestry*) e piantagioni da legno.

BIOMASSE LIGNO CELLULOSICHE

Le biomasse ligno-cellulosiche, che vengono definite come “sostanza organica prodotta dalla fotosintesi”, sono materiali caratterizzati da contenuti idrici relativamente bassi ($U < 35\%$) e rapporti C/N elevati. Vengono pertanto utilizzati soprattutto nei processi termo-chimici di conversione energetica (“via secca”) per produzione di energia elettrica e termica.

Queste biomasse sono caratterizzate da un'estrema eterogeneità per composizione, misura e forma: si passa, infatti, dalla polvere di legno alla segatura, dai trucioli alle scaglie, fino ai tronchi interi (vedi tabelle 1 e 2).

Tab. 1: Classificazione dei biocombustibili solidi in base a natura e provenienza: biomassa legnosa (CTI, 2003).

Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4
Biomassa Legnosa	1. Biomassa legnosa da arboricoltura e silvicoltura	1.1. Alberi e arbusti interi	1.1.1. Legno di latifoglie 1.1.2. Legno di conifere 1.1.3. Ceduo a turno di rotazione breve 1.1.4. Arbusti
		1.2. Tronchi	1.2.1. Latifoglie 1.2.2. Conifere 1.2.3. Miscele e miscugli
		1.3. Residui di potatura	1.3.1. Fresco/verde (incluse foglie e aghi) 1.3.2. Secco 1.3.3. Miscele e miscugli
		1.4. Ceppaie	1.4.1. Latifoglie 1.4.2. Conifere 1.4.3. Ceduo a turno breve 1.4.4. Arbusti
		1.5 Corteccia da scortecciatura preindustriale	
		1.6 Biomassa legnosa da gestione del territorio	
	2. Sottoprodotti e residui dell'industria di lavorazione del legno	2.1 Residui di legno non trattato	2.1.1. Legno privo di corteccia 2.1.2. Corteccia (da operazioni industriali) 2.1.3. Miscele e miscugli
		2.2. Residui di legno trattato	2.2.1. Legno privo di corteccia 2.2.2. Corteccia (da operazioni industriali) 2.2.3. Miscele e miscugli
		2.3. Scarti fibrosi dell'industria della carta e della cellulosa	

	3. Legno post-consumo	3.1 Legno non trattato	3.1.1. Legno privo di corteccia 3.1.2. Corteccia (da operazioni industriali) 3.1.3. Miscele e miscugli
		3.2 Legno trattato	3.1.1. Legno privo di corteccia 3.1.2. Corteccia (da operazioni industriali) 3.1.3. Miscele e miscugli
		3.3. Miscele e miscugli	
	4. Miscele e miscugli		

Tab. 2: Classificazione dei biocombustibili solidi in base a natura e provenienza: frutti e semi (CTI, 2003)

Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4
Frutti e semi	1. Frutti da frutticoltura e orticoltura	1.1. Bacche e affini	1.1.1. Bacche intere 1.1.2. Polpa 1.1.3. Semi 1.1.4. Miscele e miscugli
		1.2. Drupe e affini	1.2.1. Bacche intere 1.2.2. Polpa 1.2.3. Noccioli 1.2.4. Miscele e miscugli
		1.3. Noci, nocule e acheni (frutta secca)	1.3.1. Frutto intero 1.3.2. Gusci, tegumenti 1.3.3. Noccioli 1.3.4. Miscele e miscugli
	2. Residui e sottoprodotti dell'industria di lavorazione di frutti	2.1. Residui di frutti non trattati	2.1.1. Bacche e affini 2.1.2. Drupe e affini 2.1.3. Noci, nocule e acheni 2.1.4. Sansa di olive vergine
		2.2. Residui di frutti	2.2.1. Bacche a affini

		trattati	2.2.2. Drupe e affini 2.2.3. Noci, nocule e acheni 2.2.4. Sansa di olive esausta
	3. Miscele e miscugli		

Le biomasse ligno-cellulosiche, solitamente vengono immesse sul mercato dopo avere subito un processo di trasformazione più o meno complesso, volto a conferire caratteristiche fisiche ed energetiche idonee a essere utilizzate nei più comuni impianti energetici. Le più comuni forme reperibili in commercio per tale categoria di biomasse sono: legna da ardere, sminuzzato, pellet e bricchetti.

LEGNA DA ARDERE

La legna corta o tronchetto è la tradizionale legna da ardere che tutti conosciamo, deriva direttamente dai tronchi, tagliati a misure standard di circa 30 - 50 cm di lunghezza.

Tra i biocombustibili solidi sono compresi anche i pezzi o ciocchi di legno che sono prodotti utilizzando scarti industriali e residui agricoli e boschivi.

La legna va utilizzata dopo esser stata stagionata: in questo modo il contenuto idrico del legno passerà dal 50 - 60% al 15 - 30%, aumentando la resa in calore al momento della combustione.

Generalmente viene utilizzata a livello domestico in impianti alimentati manualmente. Le caldaie a legna, infatti non offrono possibilità di automazione.

SMINUZZATO

Lo sminuzzato è un biocombustibile legnoso che si ricava dal processo di sminuzzatura delle biomasse legnose. La sminuzzatura consiste nella riduzione del legno in frammenti irregolari, detti chips o scaglie, lunghi dagli 8 ai 60 mm (Spinelli, 2000) ad opera di una macchina sminuzzatrice (cippatrice). Il materiale destinato alla sminuzzatura è solitamente legname di poco pregio o non commerciabile, legname che può essere ricavato dalle cure colturali (diradamenti), dalle normali pratiche agronomiche (potature di oliveti e vigneti), da scarti di utilizzazioni (ramaglie e cimali), da scarti di segheria (refili e sciaveri). La sminuzzatura

permette quindi di utilizzare come combustibile materiale legnoso di nullo o scarso valore, che altrimenti andrebbe conferito in discarica.

PELLETS E BRIQUETTES

I pellets e le briquettes costituiscono un'alternativa alle scaglie di legno. Si tratta di biocombustibili densificati - di forma cilindrica nel caso dei pellets o anche parallelepipedo nel caso delle briquettes - ottenuti comprimendo della biomassa polverizzata con o senza l'ausilio di additivi di pressatura. La distinzione tra i due si basa sulle dimensioni delle polveri e dei residui con cui vengono realizzati, ma soprattutto sulle dimensioni, le briquettes hanno lunghezze di 15-30 cm e larghezze di 5-10 cm, mentre i pellets hanno dimensioni che vanno da 1,5 a 2 cm per la lunghezza, e da 6 a 8 mm per il diametro. Le briquettes sono un agglomerato di particelle più grossolane e quindi meno maneggevoli per l'alimentazione automatica delle caldaie. I pellets sembrano invece un'ottima soluzione per i processi di alimentazione automatica delle caldaie. Il loro utilizzo è andato diffondendosi sempre più nel corso degli ultimi anni per i numerosi vantaggi che presentano nei confronti delle scaglie, che continuano comunque ad avere un proprio mercato sviluppato. Le principali differenze tra pellets e scaglie sono sintetizzate nella tabella 3.

Le caratteristiche che più di tutte le altre portano a considerare i pellets combustibili più all'avanguardia sono principalmente due: la bassa umidità del materiale, inferiore al 12% e l'omogeneità delle dimensioni. Il potere calorifico si attesta mediamente intorno alle 4.000 kcal/kg.

Esiste per i pellets una precisa certificazione che ne chiarisce le caratteristiche fisiche, chimiche ed energetiche. Il presupposto per l'utilizzo di questo prodotto è l'impiego di legname vergine, non trattato con corrosivi, colle o vernici, i quali causerebbero, in impianti sprovvisti di appositi filtri, emissioni di gas nocivi all'ambiente durante la combustione.

Tab. 3: Pro e contro nell'impiego di scaglie o pellets.

Scaglie			Pellets	
Pro				
1	Reperibili localmente	+	1	Omogenei e standardizzati
2	Stimolano l'occupazione locale		2	Facilità di gestione e manutenzione dell'impianto

3	Più economiche		3	Minor volume di stoccaggio
			4	Minore umidità
Contro				
1	Mancanza di uniformità nelle dimensioni		1	Minori benefici per l'economia locale
2	Maggiori costi per la gestione e la manutenzione dell'impianto	-	2	Più costosi
3	Richiedono un volume di stoccaggio maggiore			
4	Minore densità			

CARATTERISTICHE TECNICHE E TECNOLOGICHE DELLE BIOMASSE LIGNO-CELLULOSICHE

LE CARATTERISTICHE CHIMICHE

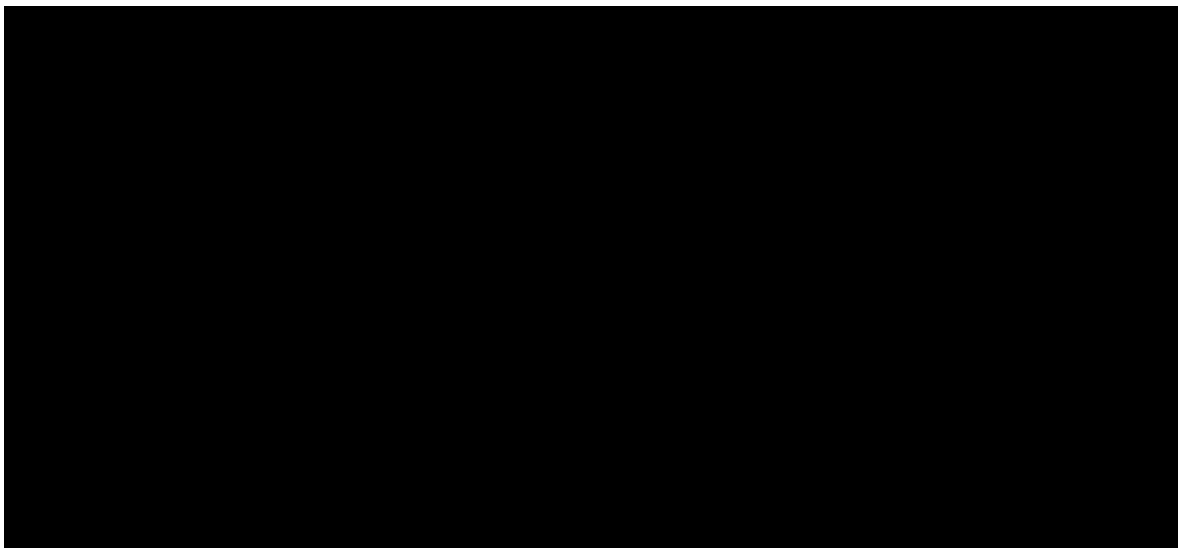
Dal punto di vista energetico, le biomasse ligno-cellulosiche possono essere considerate come energia radiante, trasformata dalle piante in energia chimica e stoccata sotto forma di molecole complesse (polimeri) ad alto contenuto energetico, grazie al processo di fotosintesi.

I principali polimeri delle biomasse forestali sono la cellulosa, l'emicellulosa e la lignina. La cellulosa è il principale componente del legno, di cui costituisce circa il 50% del peso secco. In forma di microfibrille, essa è costituita da una catena lineare di monomeri (molecole di glucosio) con un elevato grado di polimerizzazione. Presente nella parete cellulare primaria e, soprattutto, secondaria, conferisce resistenza al legno ed è particolarmente resistente agli agenti chimici (Browning, 1967; Timmell, 1986). L'emicellulosa (costituente dal 10 al 30% del legno) è un polisaccaride a basso peso molecolare, presente nella parete cellulare delle piante, negli spazi lasciati liberi dalla cellulosa. Per idrolisi acida libera i suoi costituenti: esosi (glucosio, galattosio e mannosio) e pentosi (xilosio e arabinosio) insieme a acido glucuronico. L'emicellulosa, come la cellulosa, è insolubile in acqua, ma al contrario di essa è solubile in soluzione acquosa alcalina (Browning, 1967). La lignina è il costituente che differenzia il legno dagli altri materiali vegetali. Essa è costituita da una miscela di polimeri fenolici a basso peso molecolare, la cui unità è il fenil-propano. Presente in percentuali che variano dal 20 al 30%

del peso secco del legno, la lignina è presente nella lamella mediana e nella parete cellulare, conferendo rigidità alla pianta. La lignina si caratterizza per una bassa igroscopicità e per una suscettibilità agli agenti ossidanti (Robert, 1984; Sarkanen e Ludwig, 1971).

Oltre ai tre componenti principali, nel legno sono presenti numerosi altri composti organici, localizzati nel lume e nella parete cellulare: terpeni, resine, grassi, gomme, zuccheri non-strutturali, tannini, alcaloidi, cere, ecc. Alcune di queste sostanze possono essere separate, attraverso l'impiego di mezzi chimici e fisici, e vanno sotto il nome di estrattivi (Hakkila, 1989). Una frazione importante del legno è costituita dai composti inorganici (sali di calcio, magnesio, sodio, potassio, silicio, ecc.), che solitamente si ritrovano, in seguito alla combustione, nelle ceneri. La percentuale dei composti inorganici varia in funzione di diversi fattori (terreno, specie arborea, organo della pianta, ecc.). Si passa dallo 0,4% della base del tronco al 7% delle foglie e 10% della corteccia (Hakkila, 1989). Riguardo alla sua composizione elementare (Tabella 4), il legno – anche se vi sono variazioni tra i diversi tipi – è composto quasi interamente da tre elementi: carbonio (49-51%), ossigeno (41-45%), idrogeno (5-7%). A differenza di altri combustibili (quali, ad esempio, il carbone), esso contiene relativamente basse quantità d'azoto, tracce di zolfo ed altri elementi minerali che vanno a costituire le ceneri (0,5-1,5%).

Tab. 4: Composizione elementare di alcune biomasse vegetali e loro confronto con alcuni combustibili di natura fossile (AIEL 2009).



Il rapporto percentuale tra i principali elementi (in particolare, i rapporti H/C e O/C) influiscono in maniera determinante sul valore del legno come combustibile: un alto contenuto di carbonio e idrogeno determina un più alto potere calorifico, mentre elevate presenze di ossigeno, azoto e ceneri hanno un effetto opposto.

Un altro parametro di interesse per il valore combustibile del legno, direttamente correlato alla composizione chimica e alle modalità dei legami tra atomi e molecole del legno, è la volatilità, data dalla quantità di materiale volatile presente nel legno, espressa in percentuale sul peso secco. Rispetto agli altri combustibili, la volatilità del legno è molto elevata (dal 75% all'87%).

LE CARATTERISTICHE FISICHE

Le caratteristiche fisiche del legno che svolgono una certa influenza sui processi di conversione energetica sono l'umidità e il peso specifico. L'umidità assume una significativa importanza perché, oltre ad agire sui meccanismi di combustione, ha un'influenza sulle caratteristiche chimiche del legno e sul suo peso specifico. La quantità d'acqua nel legno è estremamente variabile: al momento del taglio può assumere valori diversi in funzione della specie, dell'età, della diversa parte della pianta, della stagione. In genere si hanno valori più bassi di umidità nelle latifoglie rispetto alle conifere, nelle parti basse rispetto alle parti alte della pianta, in estate rispetto all'inverno. L'umidità esprime la quantità di acqua (libera e legata) presente nel legno, espressa come percentuale sia sul peso secco sia sul peso fresco del legno; nel primo caso si guarda al tenore in acqua in valore assoluto e in rapporto alla sua massa anidra:

$$W(\%) = (M_i - M_a) / M_a \times 100;$$

nel secondo caso, invece, si valuta il tenore in acqua in rapporto al peso tal quale:

$$w(\%) = (M_i - M_a) / M_i \times 100;$$

dove: M_i = massa del legno tal quale, M_a = massa del legno allo stato secco.

Quest'ultimo è, in genere, il metodo più frequentemente utilizzato.

Il potere calorifico del legno è direttamente proporzionale al contenuto di acqua.

La densità è la massa per unità di volume e si misura in kg/m^3 ; la densità basale si esprime in tonnellate al metro cubo e indica il rapporto tra la massa del legno secco e il volume del legno con umidità > 30%.

La densità basale del legno varia da 0,3 a 0,7 kg/m³ in funzione delle condizioni stazionali, della specie, dell'età, della parte della pianta, della forma di governo boschivo e gestione e di altri fattori ancora (Akkila, 1979; Brown, 1997).

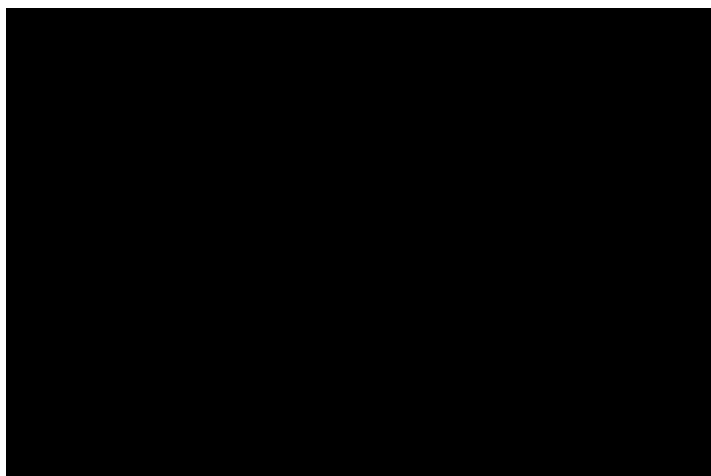
LE CARATTERISTICHE ENERGETICHE

Un indicatore efficace del valore combustibile di un vettore energetico è rappresentato dal potere calorifico, che si definisce come la quantità di calore prodotta dalla combustione completa di un'unità di peso di un materiale energetico. In genere si usa esprimere tale valore in kcal/kg oppure in kJ/kg. Nel caso dei combustibili liquidi e solidi, il contenuto energetico può essere espresso in relazione al volume (kcal/l oppure kcal/m³): dalla conoscenza del peso specifico o della massa volumica apparente (kg/m³) si può risalire al potere calorifico.

La determinazione del potere calorifico avviene a volume costante, all'interno di una bomba calorimetrica (Potere Calorifico Superiore, PCS); nella pratica, avvenendo la combustione a pressione costante, il vapor d'acqua proveniente dalla combustione dell'idrogeno e dell'acqua contenuta nel combustibile non è condensato e, di conseguenza, il calore di condensazione non è recuperato. Il numero delle calorie risultante dalla combustione del legno è inferiore rispetto alla determinazione precedente di circa 300 kcal/kg (Potere Calorifico Inferiore, PCI).

Il poter calorifico delle biomasse forestali varia notevolmente in funzione delle caratteristiche fisiche e della composizione chimica del materiale. A parità di massa, il legno di conifere ha un potere calorifico maggiore rispetto a quello delle latifoglie: ciò è dovuto alla presenza di resine e a più elevate quantità di lignina. Infatti, mentre per le conifere si può raggiungere un PCI di 5000 kcal/kg (legno di pino), per le latifoglie il PCI non supera 4500 kcal/kg. Nella tabella 5 sono presentati valori approssimativi del potere calorifico delle due grandi categorie legnose (conifere e latifoglie) con 2 diversi valori di umidità e, per confronto, quelli di altre fonti energetiche.

Tab. 5: Potere calorifico inferiore di alcuni combustibili (AIEL 2009).



Ovviamente, una comparazione tra il valore di riscaldamento del legno e quello di altri combustibili non può basarsi solo sul potere calorifico, ma deve tener conto anche dell'efficienza di bruciatura, la quale è una misura della quantità di energia prodotta rispetto a quella consumata. Infatti, i processi di trasformazione da una forma di energia ad altre forme sono accompagnati da perdita di energia, la cui entità varia con il tipo di risorsa energetica, il tipo di conversione e le condizioni operative. Con i moderni sistemi a carbone e legno l'efficienza di produzione di calore varia dal 60 all'80% del potere calorifico, in relazione ad una serie di fattori, tra cui la misura e l'efficienza della caldaia. Per quelli a gas e petrolio è appena più alta, mentre per quelli a elettricità è superiore al 90%.

UTILIZZO ENERGETICO DEI BIOCOMBUSTIBILI LEGNOSI

Gli impianti di conversione termica si basano sul processo di combustione, reazione di ossidoriduzione, esotermica, consistente in una serie di reazioni fisiche e chimiche, nel corso della quale il carbone e l'idrogeno del combustibile reagiscono con l'ossigeno (comburente) per formare CO_2 e H_2O (prodotti di reazione) e liberare calore. La combustione a carico dei materiali ligno-cellulosici risulta estremamente complessa e i meccanismi di reazione non sono peraltro completamente noti. La combustione comporta schematicamente tre stadi:

1. Riscaldamento ed essiccazione del materiale. In questa fase l'umidità del materiale legnoso è convertita in vapore e la temperatura sale a circa 200°C . Le reazioni fisiche prevalgono su quelle chimiche e la percentuale di umidità gioca un ruolo importante in

termini energetici: il calore richiesto in questa fase aumenta all'aumentare della percentuale di umidità del materiale, tuttavia, in una certa misura, l'umidità favorisce la conducibilità termica dall'esterno al centro del combustibile solido (Tillmann, 1981).

2. Distillazione. Una volta che la temperatura ha raggiunto valori superiori a 200°C inizia la pirolisi a carico dell'emicellulosa e successivamente (325-375°C) della cellulosa; la pirolisi della lignina prende avvio a temperature variabili da 250 a 500°C. In questa fase assume rilevanza la dimensione del materiale, in quanto da esso dipende la ripartizione finale di gas, di carbone e di catrame. In genere piccole pezzature portate a temperature elevate in breve tempo danno origine ad alte percentuali di prodotti volatili; al contrario più grosse dimensioni del combustibile, temperature più basse e tempi più lunghi favoriscono la formazione del carbone (Wenzl, 1970). I composti volatili, principalmente composti organici assai complessi, sono liberati sotto forma di gas. Se è presente una sufficiente quantità di ossigeno, i composti volatili si combinano con esso, bruciano a 630°C e formano CO₂. In questo stadio un'insufficiente quantità di aria riduce l'energia calorica e produce fuliggine, che brucia più tardi, oppure, se la temperatura è inferiore a 100°C, è depositata come catrame o causa emissioni di inquinanti e polveri sottili nell'aria.
3. Reazioni della fase gassosa e reazioni di ossidazione del carbonio. Attraverso innumerevoli reazioni di propagazione, con la formazione intermedia di radicali ossidrilici estremamente reattivi, il carbonio è fissato e rimosso come monossido di carbonio, bruciando con ossigeno per formare anidride carbonica. Parte di questa all'aumentare della temperatura, reagisce con il carbonio per dare ancora monossido di carbonio. Trattandosi di una serie di reazioni soprattutto chimiche si intuisce l'importanza della temperatura, del tempo e della turbolenza.

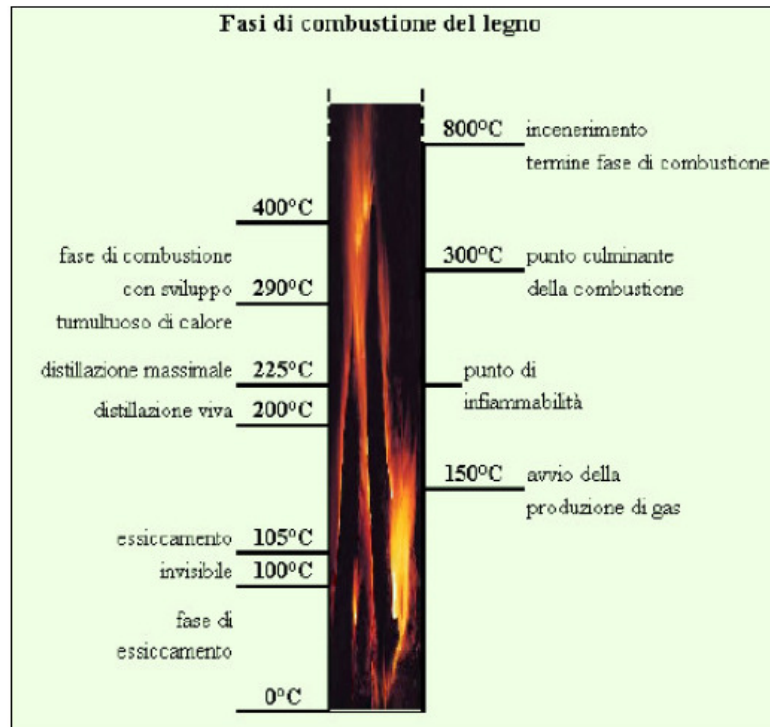


Fig. 1: Fasi della combustione alle diverse temperature.

SISTEMI DI COMBUSTIONE

Il sistema di combustione più diffuso adottato sia negli impianti di basse che di alte potenze è la combustione a griglia. L'elemento principale è rappresentato dalla griglia: posta sul fondo della camera di combustione, la sua funzione principale è quella di separare la camera di combustione dal combustibile da bruciare, dal cinerario in cui viene raccolta la cenere. Essa è costituita da barre in acciaio (soprattutto cromo-nichel) o ghisa, piene di aria o acqua, fisse o svuotabili; in alcuni casi per facilitare le operazioni di pulizia e sostituzione, la griglia è costituita da elementi singoli interscambiabili. La griglia, impiegata in impianti ad alimentazione sia continua sia discontinua, è piana negli impianti di piccola potenza, e fissa o, in alcuni casi, dotata di mobilità manuale per scuotere la cenere; essa è composta da elementi modulari, vuoti o riempiti d'acqua.

Per gli impianti di media/elevata potenza, le griglie risultano mobili e assicurano la combustione completa del legname con lo spostamento del combustibile dalla parte alta al fondo della griglia. Ciò avviene grazie alla presenza di barre alternativamente fisse o mobili funzionanti con movimento alternativo e azionate da dispositivi meccanici, pneumatici o

idraulici. Nel complesso gli impianti che adottano questi sistemi di combustione sono caratterizzati dalla possibilità di utilizzare combustibili con elevata umidità e disomogenei; di fornire una buona qualità di combustione grazie all'avanzamento continuo del combustibile, a una buona aerazione del letto di combustione e alla mancata formazione di agglomerazione dello stesso.



Foto. 1: Caldaia a griglia fissa.

Inoltre, in relazione alla modalità di immissione dell'aria primaria di combustione, può verificarsi una combustione ascendente o inversa. Nel primo caso l'aria primaria investe la griglia dal basso, passa attraverso la legna e ne determina la combustione. La combustione a fiamma inversa è senz'altro il sistema di combustione più interessante per gli impianti ad uso domestico: la fiamma, a differenza dei metodi tradizionali, si sviluppa verso il basso, essendo alimentata da un flusso d'aria prodotto da un elettroventilatore opportunamente incanalato in direzione verticale discendente. In questo caso la funzione della griglia, oltre a quella descritta in precedenza, è anche quella di separare la camera superiore in cui è allocato il combustibile dalla camera di combustione vera e propria inferiore in cui il gas viene bruciato attraverso la griglia. I vantaggi che ne derivano sono la mancata formazione di catrame sulle pareti della camera superiore, minori rischi di surriscaldamento della griglia ed un effettivo aumento del rendimento.

Le ditte produttrici sostengono che le caldaie a fiamma inversa raggiungono rendimenti termodinamici prossimi al 90%. Ciò è dovuto a una riduzione dei consumi in quanto brucia

solo il materiale strettamente necessario al mantenimento della combustione, senza intaccare la scorta di legna sovrastante, e in secondo luogo ha un preriscaldamento della stessa. I rendimenti degli impianti di combustione variano entro limiti abbastanza ampi.

I piccoli dispositivi ad alimentazione manuale e discontinua posseggono rendimenti non elevati anche inferiori al 50% e al massimo del 70% nel caso di soluzioni tecniche innovative relative alla combustione o alla fase di scambio.

Gli impianti automatici raggiungono invece valori più elevati e in qualche caso prossimi a quelli raggiunti da caldaie alimentate con combustibili fossili, anche superiori all'80%. Le ceneri rappresentano il residuo solido della combustione, in cui sono presenti sia sostanze minerali incombustibili sia, in relazione alla qualità della combustione stessa, residui incombusti.

Per gli impianti di piccole dimensioni soluzioni di estrazione automatica delle ceneri non sono giustificate economicamente; pertanto è necessario ricorrere ad un cassetto posto al di sotto della griglia estraibile che raccoglie le ceneri prodotte da rimuovere poi manualmente.

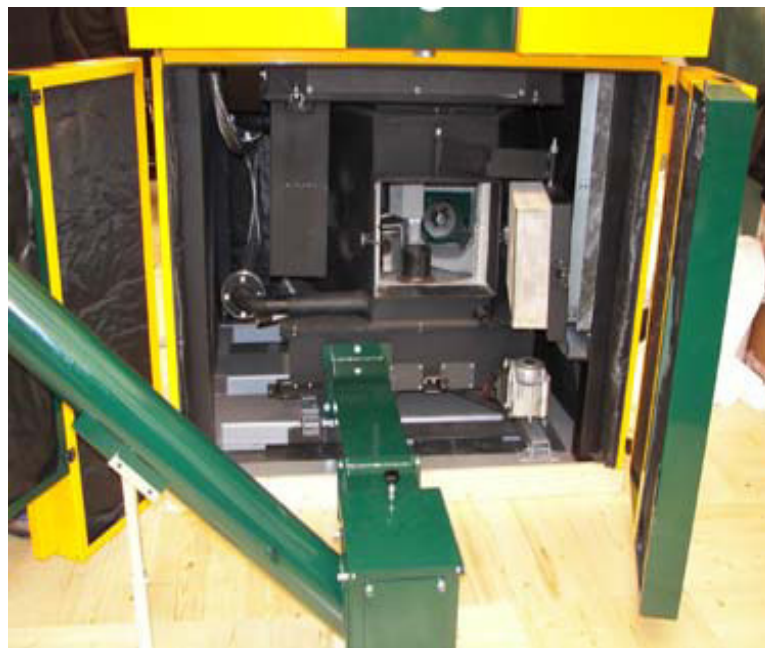


Foto. 2: Caldaia a griglia mobile.

MATERIALI E METODI

I CASI DI STUDIO

TIPOLOGIA PICCOLA

L'azienda si estende nel nord del Lazio lungo la valle del Tevere, in una delle zone italiane a più alta vocazione vinicola. Il settore vitivinicolo occupa nel territorio il primo posto insieme alla coltura dell'olivo. Dal punto di vista geomorfologico, la zona si presenta con altimetrie diverse. L'origine vulcanica dei terreni genera una predominanza sull'intera zona delle piroclastiti rendendo così il suolo che ne deriva di elevata fertilità. Nel complesso i terreni sono dotati di buona fertilità ed in particolare alcune caratteristiche del suolo quale la composizione granulometrica, la capacità di ritenzione idrica, le riserve minerali e la reazione, insieme ai fattori pedogenetici (clima, esposizione, altitudine, ecc.) confermano la vocazione agricola del territorio. Il clima è temperato con precipitazioni intorno ai 900 mm annui distribuiti prevalentemente nel periodo primaverile-autunnale. L'area ricade all'interno della regione temperata ed in particolare della 6° sub regione geografica del Lazio (6° unità fitoclimatica) secondo la classificazione fitoclimatica del Blasi (1994). La regione fitoclimatica di appartenenza è rappresentata da un termotipo collinare inferiore/superiore, ombrotipo subumido superiore/umido inferiore e regione mesaxerica (sottoregione ipomesaxerica). Le precipitazioni annuali sono di entità medio-elevata (954-1166 mm) con episodi solitamente compresi tra 100-160 mm. Il clima tipico dell'area presenta aridità estiva poco pronunciata durante mesi di luglio e agosto, mentre il freddo invernale si prolunga da ottobre a maggio. Le temperature medie annuali si aggirano intorno ai 13°C, con valore medio delle massime di 19°C e valore medio delle minime di 7°C. la temperatura media delle minime del mese più freddo è leggermente inferiore a 0°C. Nel complesso il paesaggio somiglia a quello umbro caratterizzato da abbondante verde, costituito sia dai boschi che dalle colture arboree molto estese, soprattutto oliveti e vigneti. La superficie aziendale è di circa 15 ettari, compresi siepi e filari, piccoli boschi posti marginalmente ai campi e circa tre km di fossi all'interno dell'azienda; 10 ha sono di vigneti composti da uve rosse e bianche.

L'Azienda Agroforestale è riuscita a dotarsi negli anni di una piccola microfiliera di autoconsumo per il riscaldamento dell'unità abitativa. Le biomasse impiegabili a fini energetici derivano:

- da siepi, filari e piccoli boschi posti marginalmente ai campi;

- da potature di vigneti.

La biomassa viene raccolta nel corso delle comuni pratiche agronomiche che fanno parte del processo produttivo dell'azienda, gran parte del materiale recuperato normalmente avrebbe costituito dei residui da conferire in discarica. Per la sminuzzatura attualmente la ditta si affida ad un contoterzista, attualmente la fase più delicata è proprio l'essiccazione che ha presentato più volte problematiche che talvolta hanno comportato anche la perdita di notevoli quantità di sostanza secca. Il materiale una volta a tenore di umidità ottimale (circa 30% riferito al peso umido) viene immesso nel silos della caldaia, dove attraverso una coclea, alimenta automaticamente la caldaia stessa, che è del tipo a griglia fissa e dotata di boiler supplementare per l'acqua calda.

TIPOLOGIA MEDIA

L'azienda si estende nella bassa Toscana nella maremma interna, in una delle zone italiane a vocazione agrituristica molto spinta. Integrato al settore turistico il settore agricolo si sviluppa in piena sinergia. Dal punto di vista geomorfologico, la zona si presenta con altimetrie diverse e pendenze moderate. L'origine vulcanica dei terreni genera una predominanza sull'intera zona delle piroclastiti rendendo così il suolo che ne deriva di elevata fertilità. Nel complesso i terreni sono dotati di buona fertilità ed in particolare alcune caratteristiche del suolo quale la composizione granulometrica, la capacità di ritenzione idrica, le riserve minerali e la reazione, insieme ai fattori pedogenetici (clima, esposizione, altitudine, ecc.) confermano la vocazione agricola del territorio. Il climadiagramma indica che la piovosità media annua è compresa in 86 giorni tra 870 e 930 mm, gli abbassamenti termici inferiori allo zero si distribuiscono da novembre a marzo. La regione fitoclimatica di appartenenza è rappresentata da un termotipo collinare inferiore/superiore, ombrotipo subumido superiore/umido inferiore e regione mesaxerica (sottoregione ipomesaxerica). Le temperature medie annuali si aggirano intorno ai 14°C, con valore medio delle massime di 23°C e valore medio delle minime di 7°C. La temperatura media delle minime del mese più freddo è leggermente inferiore a 0°C. Nel complesso il paesaggio somiglia a quello umbro caratterizzato da abbondante verde, costituito sia dai boschi che dalle colture arboree molto estese, soprattutto oliveti e vigneti. La superficie aziendale è di circa 370 ettari, compresi siepi e filari; 90 ha sono di vigneti composti da uve rosse e bianche, 50 ha sono di uliveto e 225 ha sono di bosco ceduo misto a prevalenza di cerro.

L'Azienda Agrituristica è riuscita a dotarsi negli anni di una microfiliera di autoconsumo di medie dimensioni per il teleriscaldamento delle unità abitative e delle attività ludiche (piscina ed annessi). Le biomasse impiegabili a fini energetici derivano:

- da attività forestale di utilizzazione dei cedui;
- da potature di uliveti;
- da potature di vigneti.

La biomassa viene raccolta nel corso delle comuni pratiche agronomiche che fanno parte del processo produttivo dell'azienda, gran parte del materiale recuperato normalmente avrebbe costituito dei residui da conferire in discarica. Per la sminuzzatura l'azienda si è dotata di una sminuzzatrice con motore autonomo. La delicata fase di essiccazione viene espletata stoccando il materiale in rotoballe o tronchi e poi sminuzzato all'occorrenza. Il materiale una volta a tenore di umidità ottimale viene sminuzzato e immesso nel silos della caldaia, dove attraverso una coclea, alimenta automaticamente la caldaia stessa, che è del tipo a griglia fissa e dotata di boiler supplementare per l'acqua calda.

LCA (Life Cycle Assessment or Analysis)

Risalgono alla fine degli anni sessanta i primi studi riguardanti gli aspetti del ciclo di vita (Life Cycle) di materiali e prodotti.

Si tratta di una tecnica di valutazione degli aspetti ambientali e dei potenziali impatti associati ad un prodotto (o di un servizio), tutto il ciclo di vita viene differenziato dall'ecobilancio di un singolo processo e anzi lo fa diventare come un grande insieme di ecobilanci tutti opportunamente collegati tra loro. In Europa questo procedimento di valutazione fa riferimento alle metodologie di analisi energetica, sorte nella seconda metà degli anni '70 quando, in seguito alla crisi energetica del '73, si affrontarono per la prima volta problemi come il risparmio energetico, lo smaltimento dei rifiuti, la limitatezza delle risorse e l'incremento dei fattori di inquinamento (Allione 2008).

Nel 1972, nel Regno Unito, Ian Boustead calcolava l'energia totale utilizzata nella produzione di vari tipi di contenitori di bevande, inclusi vetro, plastica ed alluminio. Nei successivi anni, Boustead consolidava la sua metodologia per renderla applicabile a vari materiali, e nel 1979, veniva pubblicato il "Manuale di Analisi Energetica Industriale" (Boustead Consulting Ltd, 1997). Inizialmente, l'uso dell'energia era considerato più rilevante rispetto alle emissioni e alla produzione di rifiuti. Perciò si creò una distinzione tra lo sviluppo della fase di inventario (risorse impiegate per ottenere un prodotto), e l'interpretazione degli impatti totali associati.

Mentre l'interesse per l'LCA continuava, i progressi nel definirne la metodologia proseguivano più lentamente.

Fu verso la fine degli anni ottanta e gli inizi degli anni novanta che un reale interesse nell'LCA si diffuse in un numero sempre maggiore di industrie e studi di design e progettazione (Arnold S.F., 1993). Il termine LCA (che indica indifferentemente Life Cycle Analysis o Life Cycle Assessment) venne coniato durante il congresso della SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) di Smuggler Notch (Vermont – USA) nel 1990, per meglio caratterizzare l'obiettivo delle analisi fino ad allora svolte sotto il nome di REPA, Resource and Environmental Profile Analysis, ovvero analisi ambientali che avevano come obiettivo la caratterizzazione del ciclo di vita di alcuni materiali impiegati da importanti industrie statunitensi. Da questo momento in poi, la messa a punto della metodologia LCA ricevette una grande spinta propulsiva in quanto apparve chiaro come l'approccio di tipo REPA o analisi energetica, con le dovute integrazioni e miglioramenti, fosse quello che meglio si prestava a supportare le attività produttive nella nuova visione di sviluppo.

Questo impegno generale si concretizzò nei primi anni novanta con l'uscita di alcuni manuali e di strumenti di calcolo per un suo impiego pratico, oggi ampiamente diffusi ed utilizzati. L'attuale impegno in ambito ISO per la standardizzazione della metodologia, trova la prima attuazione nell'emanazione dei progetti delle norme ISO 14000 e, in particolare, delle ISO 14040/41/42/43, ulteriore approfondimento alle linee guida proposte dalla SETAC (Boustead Consulting Ltd, 1997).

La LCA, secondo queste definizioni (ISO 14040), è una tecnica per valutare gli aspetti ambientali e i potenziali impatti lungo tutto il ciclo di vita di un prodotto o di un processo o di un servizio attraverso:

- la compilazione e l'inventario dei significativi input ed output del sistema;
- la valutazione dei potenziali impatti associati a questi input ed output;
- l'interpretazione dei risultati delle fasi di inventario e valutazione, in relazione agli obiettivi dello studio.

L'organizzazione originaria di una LCA comprendeva tre fasi principali da attuare successivamente e ciclicamente; tale organizzazione, che costituisce anche la struttura fondamentale dell'attuale metodologia LCA, è composta da una prima fase di inventario, in cui le informazioni e i dati raccolti vengono organizzati per fornire una descrizione completa delle caratteristiche fisiche del sistema industriale oggetto dello studio; una successiva fase di interpretazione, dove i dati fisici dell'inventario sono correlati a problemi osservabili di

carattere ambientale (effetto serra, riduzione della fascia di ozono, etc.) e infine da una fase di miglioramento in cui il sistema viene modificato per migliorarne l'eco-efficienza.

La diffusione della metodologia LCA in molti ambienti e settori, da quello accademico a quello delle istituzioni pubbliche, fino a quello produttivo, affermando questa nuova metodologia di analisi come un importante supporto per le decisioni di politica ambientale e per quelle più prettamente tecniche. Per l'industria, l'uso principale di questo strumento consiste nell'analizzare le caratteristiche delle proprie attività operative nell'ottica del loro adeguamento alle norme di legge e agli standard di riferimento mondiali. Una serie di analisi LCA redatte con continuità da una qualsiasi impresa per alcuni anni, consente di fissare in maniera completa le procedure operative dell'azienda, il trend della produzione e tutta una serie di parametri di riferimento utili alla migliore gestione della stessa. I recenti sviluppi di progetti di simbiosi industriale (industrial symbiosis) rappresentano un altro settore applicativo della LCA a livello industriale.

Si tratta in pratica di un'applicazione dell'ecologia industriale che mira all'ottimizzazione dell'efficienza dell'utilizzo dei materiali e dell'energia: un gruppo di industrie operanti nella medesima regione decidono di interagire creando un network in cui un opportuno scambio di sottoprodotti, scarti ed energia, è in grado di migliorare l'efficienza globale del sistema (Boustead Consulting Ltd, 1997). La nuova politica dell'Unione Europea in materia ambientale ha peraltro introdotto e proposto ufficialmente, sia tramite i nuovi Regolamenti su Eco-Management and Audit-Scheme, sia con le proposte relative alla creazione di una norma di riferimento per le etichette ecologiche (Ecolabel), la metodologia LCA come strumento di supporto per la redazione di report energetico-ambientali.

Questa attenzione degli operatori industriali e dei legislatori verso le problematiche ambientali, di risparmio di energia e di materiali costituisce certamente un nuovo modo di pensare la produzione e quindi di progettare i prodotti. Numerose sono le industrie che investono proprie energie nello sviluppo e nell'applicazione di questa nuova filosofia di produzione. Il passaggio da una situazione di comando e controllo (command and control), in cui le aziende adeguavano il proprio sistema alle sempre più severe normative ambientali, ad una situazione in cui volontariamente le imprese si impegnano ad applicare concretamente politiche ambientali sostenibili, indica come questo cambiamento venga interpretato come una probabile fonte di nuovi guadagni (Vigon B.W. et al., 1993). In Italia l'applicazione della metodologia LCA nel prossimo futuro è subordinata alla realizzazione di una banca dati riferiti alla realtà nazionale,

poiché i pur numerosi software (Simapro, Team-deam, LCA inventory Tool, GEMIS) e relative banche dati presenti sul mercato spesso si riferiscono a realtà diverse dalla nostra.

LA METODOLOGIA LCA

Da un punto di vista metodologico, la definizione di LCA proposta dalla SETAC è la seguente: “La valutazione del ciclo di vita è un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un’attività, effettuato attraverso l’identificazione dell’energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell’ambiente. La valutazione include l’intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l’estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riutilizzo, il riciclo e lo smaltimento finale”. La valutazione include il completo ciclo di vita del sistema-prodotto, dalla culla alla tomba (from cradle to grave), partendo dall’estrazione e dal trattamento delle materie prime, attraverso la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l’uso, il riuso, la manutenzione, il riciclo, fino al loro smaltimento finale.

La terminologia delle norme ISO fa riferimento, quale oggetto di uno studio di LCA, ad un *sistema di prodotti*, definito come insieme elementare di unità di processo connesse tra loro per quanto riguarda materia ed energia, che perseguono una o più funzioni definite. Il termine “prodotto” è usato in senso generico: infatti, sebbene la LCA sia sorta essenzialmente come supporto alle decisioni in ambito industriale e quindi produttivo, essa riveste un notevole interesse anche per il settore dei servizi.

Per questa sua flessibilità, la procedura è oggi applicata in svariati ambiti e con diversi scopi e ancora il suo campo d’applicazione non è stato circoscritto. Tra le applicazioni più importanti si segnalano le seguenti:

- confronto fra sistemi alternativi di prodotti che abbiano la medesima funzione;
- comparazione dell’impatto ambientale di un prodotto con uno standard di riferimento (per esempio nell’assegnazione di un Ecolabel);
- identificazione degli stadi del ciclo di vita che presentino l’impatto ambientale predominante;
- progettazione di nuovi prodotti e di nuovi processi produttivi.

LIMITAZIONI

La LCA può presentare limiti dovuti a scarsa qualità dei dati d’input, ipotesi soggettive, metodologie e interpretazioni non accettate dalla comunità scientifica.

L'accuratezza dei risultati dipende fortemente dalla disponibilità di dati in ingresso e dalla loro qualità: un'analisi di sensibilità può, a questo scopo, essere utile a valutare il peso delle incertezze dei dati in input e delle assunzioni fatte.

La natura delle scelte e delle assunzioni fatte in uno studio di LCA è spesso soggettiva: ad esempio, la scelta dei confini del sistema è spesso risultato di un compromesso tra affidabilità e dettaglio dei risultati e complessità dello studio da intraprendere.

I modelli impiegati per analizzare e valutare gli impatti sono, in quanto tali, limitati: diversi modelli di uno stesso impatto, ad esempio, possono non essere adatti ad ogni applicazione.

Uno degli attuali limiti della LCA è l'incapacità di integrare la complessa gamma d'impatti ambientali che risultano dall'attività industriale: poter sintetizzare, ad esempio, in un unico valore numerico l'entità degli impatti passa necessariamente per delle scelte soggettive di valore dei singoli impatti. Non esistono basi scientifiche per ridurre i risultati di una LCA ad un risultato numerico o ad un punteggio globale, come si vedrà analizzando i metodi di valutazione d'impatto del ciclo di vita.

La LCA è inoltre maggiormente applicabile ad indicatori d'impatti su scala globale (ad esempio, cambiamenti climatici) e meno agli impatti locali come lo smog, dove i fattori temporali e spaziali delle emissioni hanno più rilevanza. Spesso, inoltre, è riduttivo riportare i risultati ottenuti a partire da un'ottica globale alle realtà locali. Da questo punto di vista, la procedura di LCA, si contrappone a quelle di VIA, aventi un approccio espressamente locale.

L'assenza delle dimensioni spaziali e temporali nei dati raccolti per lo studio introduce un'ulteriore incertezza nei risultati: questa varia secondo le categorie spaziali e temporali di ciascun impatto. Si vedrà successivamente, ad esempio, come la scelta dell'orizzonte temporale potrà pesare sulla valutazione delle emissioni di una discarica controllata e come tale scelta avrà ripercussioni sull'analisi di un sistema globale di gestione integrata dei rifiuti.

Infine, diversamente da altre procedure di valutazione, la LCA non comprende gli impatti economici e sociali di un sistema di prodotti. Questi, ad esempio, sono oggetto di studio delle valutazioni d'impatto ambientale (VIA).

LE FASI DI UNA LCA

La procedura di valutazione di LCA, secondo quanto stabilito a livello normativo (UNI EN ISO 14040, 14041, 14042 e 14043), può essere distinta quattro momenti principali, così come riportato nello schema (Fig. 2):

- definizione degli obiettivi (*Goal Definition and Scoping*);

- analisi di inventario (*Inventory Analysis o anche detta, Life Cycle Inventory Analysis LCI*);
- analisi degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment - LCIA*);
- individuazione delle aree di miglioramento (*Life Cycle Interpretation*).

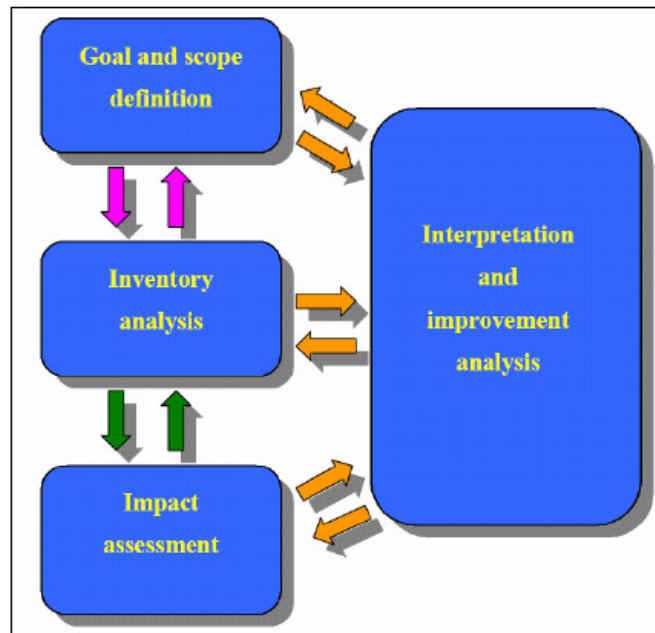


Fig. 2: Fasi principali di una Life Cycle Assessment (EN ISO, 1997).

La doppia freccia tra le fasi sta ad indicare la natura interattiva e iterativa della LCA, che può essere spiegata considerando che una volta fatta la valutazione di impatto può essere chiaro che alcune informazioni della fase di inventario devono essere migliorate, oppure che l'interpretazione dei risultati ed il miglioramento potrebbero essere insufficienti a soddisfare i requisiti richiesti, il che significa che gli obiettivi e i limiti potranno essere successivamente rivisti e modificati.

DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI E DEI CONFINI DI SISTEMA

Una LCA deve essere preceduta da un'esplicita dichiarazione degli obiettivi e delle finalità dello studio, e tale fase costituisce un importante momento di pianificazione.

La norma ISO 14040 introduce così l'argomento : “Gli obiettivi e gli scopi dello studio di una LCA devono essere definiti con chiarezza ed essere coerenti con l'applicazione. L'obiettivo di

una LCA deve stabilire senza ambiguità quali siano l'applicazione prevista, le motivazioni che inducono a realizzare lo studio e il tipo di pubblico a cui è destinato, cioè a quali persone si intendono comunicare i risultati dello studio”.

La definizione degli obiettivi è una fase importante nella Life Cycle Assessment ai fini di un suo corretto svolgimento ed utilizzo. In questa fase gli obiettivi devono essere definiti chiaramente si deve definire l'uso che si vuole fare dei dati, a chi ci si sta rivolgendo e gli utilizzatori ultimi dei risultati. Per raggiungere l'obiettivo, bisogna capire lo scopo in modo chiaro per prendere le decisioni appropriate dall'inizio alla fine dello studio.

La fase preliminare di definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione rappresenta uno stadio rilevante nello sviluppo di uno studio chiarendo la ragione principale per la quale si esegue l'LCA, comprendendo anche l'utilizzazione dei risultati, descrivendo il sistema oggetto dello studio e i suoi confini, elencando le categorie dei dati da sottoporre allo studio ed individuando il livello di dettaglio che si intende raggiungere. Fornisce, in sintesi, la pianificazione iniziale per effettuare uno studio di LCA.

Essendo una fase fondamentale, essa possiede una struttura molto articolata entro la quale è necessario definire:

1. *Obiettivo dello studio*, in esso sono contenute: le motivazioni che hanno portato ad eseguire lo studio, le applicazioni previste e i destinatari dello studio, cioè gli utilizzatori interni o esterni dei risultati ottenuti.
2. *Campo di applicazione dello studio*, esso deve essere definito in maniera opportuna, al fine di assicurare che l'ampiezza, la profondità e il dettaglio dello studio siano compatibili con l'obiettivo stabilito e adeguati per conseguirlo.

Nella norma ISO 14040 viene riportato quanto segue: “Nella definizione dei limiti di una LCA, dovranno essere definiti e descritti i seguenti punti:

- funzioni del sistema, o dei sistemi nel caso di studi comparativi;
- unità funzionali;
- limiti fisici del sistema;
- procedure di attribuzione di un impatto ad uno specifico prodotto, servizio e processo produttivo;
- tipi di impatto e metodologie di valutazione di impatto e seguente interpretazione;
- dati richiesti;
- ipotesi;
- limitazioni;

- qualità dei dati;
- analisi critica;
- il tipo di rapporto o relazione richiesta per lo studio”.

Generalmente (Vigon B.W., 1993; Arnold S.F., 1993) questi punti vengono raggruppati in cinque punti principali:

1. definizione dell’unità funzionale;
2. definizione dei confini del sistema;
3. definizione della qualità dei dati;
4. definizione delle categorie di impatto e metodologia per definire l’impatto;
5. analisi critica.

La definizione dell’unità funzionale è il fondamento di una LCA perché si stabilisce un unità di misura di riferimento, il metro di paragone fra due o più prodotti/sistemi così come il miglioramento di un solo prodotto/sistema.

“L’unità funzionale costituisce una misura della prestazione del flusso in uscita. Il suo scopo principale è di fornire un riferimento a cui legare i flussi in entrata e in uscita. Tale riferimento è necessario per consentire la comparabilità dei risultati di una LCA. Tale comparabilità è particolarmente critica quando si valutano sistemi differenti, perché ci si deve assicurare che i confronti siano fatti su una base analoga. Un sistema può avere un gran numero di funzioni possibili e la funzione scelta per lo studio dipende dall’obiettivo e dal campo di applicazione. La corrispondente unità di misura deve essere definita e misurabile” (ISO 14040).

La scelta di tale unità è arbitraria e dipende essenzialmente dallo scopo per cui i sottosistemi e il sistema globale sono stati progettati, e può essere intesa come un indice delle prestazioni svolte dal sistema. La sua definizione risulta quindi fondamentale per la buona riuscita dello studio.

Tutti i dati raccolti nella fase di inventario saranno riferiti all’unità funzionale (ad esempio chilometri percorsi da un autoveicolo con un treno di gomme, 1 kWh di elettricità). Si devono prendere in considerazione tre aspetti nella definizione dell’unità funzionale:

- l’efficienza del prodotto;
- la durata del prodotto;
- le performance di qualità standard.

Particolare attenzione bisogna porre nel caso di sistemi multi-funzionali, cioè quei sistemi che accanto ai prodotti principali hanno anche dei sottoprodotti. Un esempio può essere un sistema di trattamento dei rifiuti, in cui i prodotti possono essere energia e fertilizzanti.

I limiti del sistema definiscono i processi e le operazioni, gli input ed output da prendere in considerazione nell'LCA.

Gli input possono essere gli input totali ad un ciclo produttivo oppure quelli ad un singolo processo, analogamente per gli output. La definizione dei confini del sistema è una operazione del tutto soggettiva ed include i seguenti punti: limiti geografici, limiti del ciclo di vita e limiti tra la tecnosfera (o sfera tecnologica) e la biosfera (risorse naturali) (Arnold S.F., 1993). Un problema nasce nel momento in cui si deve considerare il flusso di energia e materiali dei sottoprocessi, perché l'analisi potrebbe diventare infinita se non sono segnati i limiti per mettere in evidenza gli impatti ambientali più importanti.

Generalmente, gli impatti dei sottoprocessi diventano meno significativi quanto più ci si allontana dal processo iniziale, una tale situazione si verifica oltre il terzo livello di sottoprocessi considerati. Molto spesso, la determinazione dei confini del sistema si basa sulla disponibilità di dati o sulla loro attendibilità.

La qualità dei dati raccolti ed usati nella fase di inventario si riflette, ovviamente, nella qualità dell'LCA finale. È importante che la qualità dei dati sia descritta e valutata in modo sistematico in modo da aiutare altri a capire e controllare.

Nella raccolta dati dovrebbero essere prese in considerazione un gran numero di fonti, ad esempio banche dati nazionali ed internazionali, altri studi LCA, letteratura, proceedings di congressi e convegni, informazioni disponibili in internet. Negli inventari sono spesso usate diverse categorie di dati, in modo aggregato o meno:

- *Processo/servizio singolo*: dati da una operazione particolare in un dato impianto che non è collegata in alcun modo con altri processi;
- *Composti*: dati della stessa operazione o attività in siti diversi;
- *Aggregati*: dati dalla combinazione di più di un'operazione di processo;
- *Dati medi industriali*: dati derivati da un campione rappresentativo di impianti che descrivono statisticamente le operazioni tipiche di determinate tecnologie;
- *Generici*: dati la cui rappresentatività può non essere nota ma che descrivono qualitativamente un processo o una tecnologia.

La qualità iniziale dei dati dovrebbe essere comunque sufficiente a stabilire i seguenti parametri: l'intervallo temporale di riferimento (ad es. negli ultimi 5 anni) e la minima

lunghezza di validità (ad es. annuale); il riferimento geografico, ovvero l'area geografica rispetto alla quale i dati riferiti ai singoli processi dovrebbero essere raccolti, per soddisfare gli obiettivi dello studio (ad es. locale, regionale, nazionale, continentale, globale); la tecnologia di riferimento, ovvero le caratteristiche del mix tecnologico (ad es. media pesata del mix di processi reali, della migliore tecnologia disponibile o della peggiore).

RACCOLTA DATI (FASE DI INVENTARIO)

La raccolta dati (Inventory Analysis) è la seconda fase in una LCA, costituita dai seguenti passi principali (Vigon B.W., 1993):

1. raccolta e verifica dei dati;
2. ridefinizione precisa dei confini del sistema;
3. definizione delle categorie di impatto e classificazione delle emissioni;
4. allocazione degli input ed output.

La verifica dei dati deve essere fatta contemporaneamente alla raccolta per migliorare la qualità totale dei dati. Una verifica sistematica dei dati può evidenziare quelle aree in cui la qualità dei dati deve essere migliorata o che i dati devono essere ricercati in processi simili. Una metodologia in uso attualmente nelle LCA (Mann M.K. e Spath P.L., 1997) per verificare o quantomeno minimizzare l'effetto di dati sbagliati sulle conclusioni è l'analisi di sensitività. L'analisi di sensitività è utile anche per definire i confini del sistema, perché in base ai risultati si può decidere se includere o meno nel ciclo di vita un determinato processo.

Nello studio del ciclo di vita di un sistema complesso, potrebbe non essere possibile gestire tutti gli impatti e gli output all'interno dei confini del sistema stesso. Questo problema può essere risolto sia espandendo i confini del sistema per includere tutti gli input ed output, sia assegnando gli impatti ambientali rilevanti al sistema studiato. Quando viene espanso il sistema, è possibile correre il rischio di rendere il sistema troppo complesso; inoltre, anche la raccolta dati, la valutazione di impatto e l'interpretazione diventerebbero troppo costose ed irrealistiche sia in termini di tempo che di investimenti finanziari.

Pertanto, è in generale preferibile utilizzare l'allocazione che consiste nella definizione dei flussi di materia entranti ed uscenti dal sistema e degli impatti ad essi correlati. L'allocazione essendo abbastanza generale e completa, può essere utilizzata per co-prodotti (processi multi-output), servizi (trasporti, trattamento rifiuti), riciclaggio (soprattutto nel caso di riciclaggio open-loop, quando cioè un materiale attraversa i confini del sistema ed è usato come materia

prima in un altro sistema). Ovviamente, il dettaglio e la complessità delle procedure di allocazione dipende dal livello scelto dell'analisi del ciclo di vita.

VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

La norma ISO definisce “impatto ambientale una qualsiasi modificazione causata da un dato aspetto ambientale, ossia da qualsiasi elemento che può interagire con l'ambiente”. Un impatto è associato a uno o più effetti ambientali : per esempio la CO₂ emessa durante la combustione di una certa quantità di carbone provoca un impatto che contribuisce all'effetto serra. Poiché non è possibile correlare inequivocabilmente uno specifico impatto ai suoi effetti ambientali, ci si deve limitare ad affermare che l'impatto è ciò che prelude a un effetto, senza pretendere di poter quantificare rigorosamente il secondo sulla base del primo. Mentre possiamo ottenere il valore numerico degli impatti dai risultati della fase di analisi di inventario, i corrispondenti effetti ambientali potranno essere stimati sulla base di ipotesi e convenzioni. Gli effetti dovuti alle sostanze rilasciate nell'ambiente si verificano nelle immediate vicinanze del punto di emissione oppure possono avere una ricaduta su tutto il pianeta. Quindi, gli effetti ambientali si suddividono in effetti globali, regionali o locali. Prendendo sempre ad esempio le emissioni di CO₂ responsabili dell'effetto serra: analizzandone il tempo di permanenza in atmosfera è possibile classificare l'effetto serra come un effetto a scala globale in quanto è stato appurato che l'emissione di gas serra in un punto contribuisce all'effetto su tutto il pianeta; per le emissioni di rumore invece è chiaro che queste debbano essere considerate solo a scala locale. E' quindi opportuno evidenziare che un eventuale giudizio di valore sul significato ambientale degli impatti può riguardare solo gli effetti globali, intendendo quelli che si manifestano a scala planetaria o regionale. Il peso globale di un determinato inquinante è infatti il risultato di numerosi contributi spesso provenienti da diverse aree geografiche della terra, e gli output riferiti a diversi periodi di tempo. Dunque i risultati di un'analisi di inventario possono essere utilizzati per la valutazione di effetti su scala globale. Inoltre le sostanze emesse durante la trasmissione possono subire trasformazioni chimiche, fisiche o biologiche dando origine ad altri composti. Per esempio la formazione di ossidanti fotochimici derivanti dall'interazione che la luce del sole ha con gli idrocarburi emessi in atmosfera, portando alla formazione di molecole di ozono; oppure se considero il totale delle emissioni di SO₂ provenienti dai risultati di inventario, le piogge acide, l'acidificazione conseguente e l'eventuale perdita di biodiversità in un lago sono le conseguenze ipotizzabili immediatamente. Comprendere i fenomeni di interazione dell'attività antropica con l'ambiente costituisce un obiettivo importante per

promuovere in ambito industriale la nuova cultura della produzione basata sul concetto di sviluppo sostenibile. L'obiettivo sarà anche di scoprire, nell'ambito del sistema in esame, dove e come intervenire per ottenere una minimizzazione dell'impatto dovuto a tali processi analizzati. La valutazione di impatto del ciclo di vita consiste in un processo tecnico-quantitativo e/o qualitativo per la caratterizzazione e la valutazione degli impatti ambientali delle sostanze identificate nella fase di inventario. In questo step sono valutati gli effetti sulla salute e sull'ambiente, indotti dal processo o dal prodotto durante il corso del suo ciclo di vita. La struttura concettuale della Valutazione di Impatto fa riferimento alla norma ISO 14042 che la definisce e la standardizza nelle fasi descritte di seguito:

Selezione e definizione delle categorie di impatto: in questa prima fase sono identificate le categorie d'impatto prodotte dal sistema in esame. Per la definizione di queste categorie occorre rispettare tre caratteristiche:

1. completezza: comprendere tutte le categorie, a breve e a lungo termine, su cui il sistema potrebbe influire;
2. indipendenza: evitare intersezioni tra le categorie, che comporterebbero conteggi multipli;
3. praticità: la lista formulata non dovrà spingersi ad un dettaglio elevato, contemplando un numero eccessivo di categorie.

Per la scelta delle categorie può essere utile consultare il Working Group on LCIA della SETAC, all'interno della quale sono proposte e descritte numerose tipologie di impatto, come:

1. estrazione di risorse abiotiche, al cui interno sono incluse tre differenti tipologie di elementi naturali: i depositi di combustibili fossili e minerali, considerati risorse limitate in quanto non rinnovabili nel breve periodo; le risorse, quali acque sotterranee, sabbia e ghiaia; le risorse rinnovabili come le acque superficiali, l'energia solare, il vento, le correnti oceaniche; estrazione di risorse biotiche, cioè tipologie specifiche di biomassa raccolte sia in maniera sostenibile, sia in maniera non sostenibile;
2. uso del territorio, la cui gestione errata porta ad una riduzione del numero di specie animali e vegetali presenti, rispetto alle condizioni naturali;
3. effetto serra, che comporta un aumento della temperatura nella bassa atmosfera conseguenza della presenza di alcuni gas, quali l'anidride carbonica, il metano, il biossido di azoto, che intrappolano le radiazioni infrarosse;

4. ecotossicità, provocata dalle emissioni dirette di sostanze tossiche, come metalli pesanti, idrocarburi, pesticidi e sostanze liberate nel corso della degradazione dei prodotti, che danno luogo ad impatti sulle specie e sugli ecosistemi;
5. smog fotochimico, in cui si considerano tutti gli impatti derivanti dalla formazione di ozono troposferico, causata dalle reazioni di componenti organici (VOC) in presenza di luce e di ossidi di azoto (NO_x);
6. tossicità umana, imputabile alla presenza di sostanze chimiche e biologiche, e dipendente sia dal tipo di esposizione, sia dalla metodologia attraverso la quale avvengono le emissioni nell'ambiente;
7. acidificazione, causata dal rilascio di protoni negli ecosistemi acquatici e terrestri, principalmente attraverso la pioggia; gli effetti sono evidenti nelle foreste di legno dolce, dove si manifestano in termini di crescita insufficiente: fenomeno particolarmente presente nella penisola scandinava e nelle regioni dell'Europa centro orientale. Negli ecosistemi acquatici si ha un abbassamento del pH delle acque, situazione deleteria per lo sviluppo della vita. Le conseguenze dell'acidificazione si rendono evidenti, inoltre, negli edifici, nelle opere d'arte e in tutte le costruzioni in genere attraverso l'erosione delle pietre calcaree;
8. arricchimento in nutrienti, causato da un eccesso di nitrati, fosfati, sostanze organiche degradabili e di tutti quegli elementi nutritivi che portano ad un incremento nella produzione di plancton, alghe e piante acquatiche in genere.

Classificazione: è la fase di assegnazione dei dati raccolti nell'inventario ad una o più categorie di impatto ambientale (impact categories), noti gli effetti e i danni potenziali delle emissioni alla salute umana, all'ambiente, all'impoverimento delle risorse, ecc. Alla fine di questa fase, all'interno di ciascuna categoria di impatto, saranno contenuti tutti gli input e output del ciclo di vita che contribuiscono allo sviluppo dei diversi problemi ambientali. La stessa sostanza o materiale potrebbe essere contenuta all'interno di più categorie di impatto.

Caratterizzazione: essa si affianca alla fase della classificazione ed ha lo scopo di quantificare l'impatto generato. Essa trasforma, attraverso una serie di calcoli, le sostanze presenti nell'inventario, e precedentemente classificate, in indicatori di carattere numerico, attraverso la definizione del contributo relativo di ogni singola sostanza emessa o risorsa usata. L'operazione viene effettuata moltiplicando i pesi delle sostanze emesse, o consumate nel processo, per i relativi fattori di caratterizzazione (weight factors), propri di ogni categoria di impatto. In sintesi, il fattore di caratterizzazione misura l'intensità dell'effetto della sostanza

sul problema ambientale considerato, ed è stabilito da un'Authority sulla base di considerazioni di carattere prettamente scientifico.

Di seguito sono elencati i fattori peso per le varie categorie di impatto proposti da CML, nell'ottobre 1992:

Per la categoria estrazione di risorse abiotiche, il rapporto utilizzo/riserva W_j , espresso dalla relazione: $W_j = G_j/R_j$

dove:

G_j è il consumo corrente globale del minerale j ;

R_j è la riserva del minerale j .

Per la categoria estrazione di risorse biotiche, non è ancora stata realizzata una determinazione attendibile: si potrebbe definire un indicatore basato sulla rarità e sul tasso di rigenerazione della risorsa.

Per l'effetto serra viene usato il parametro Potenziale di Riscaldamento Globale (Global Warming Potential, GWP), che definisce la potenziale influenza di una sostanza, valutata in termini relativi rispetto alla CO_2 , secondo orizzonti temporali di 20, 100 e 500 anni; questo per tenere conto del fatto che le varie sostanze si decompongono e inattivano solo in periodi di tempo molto lunghi.

Per l'impovertimento dell'ozono è stato introdotto il parametro Potenziale di Riduzione dell'Ozono stratosferico (Ozone Depletion Potential, ODP): la sostanza di confronto rispetto alla quale si valuta l'effetto delle altre è il CFC11.

Per l'effetto dell'ecotossicità sono stati introdotti i seguenti parametri:

1. ECA (Aquatic Ecotoxicity) [m^3/kg], per la valutazione della tossicità delle acque;
2. ECT (Terrestrial Ecotoxicity) [m^3/kg], per la valutazione della tossicità del terreno.

Per la tossicità umana sono stati ideati gli indici:

1. HCA (Human-toxicological Classification value for Air), indice di classificazione per le sostanze emesse in aria;
2. HCW (Human-toxicological Classification value for Water), indice di classificazione per le sostanze emesse in acqua;
3. HCS (Human-toxicological Classification value for Soil), indice di classificazione per le sostanze emesse nel terreno.

Essi forniscono un'indicazione di massima e non hanno la pretesa di essere del tutto precisi e affidabili.

Per lo smog fotochimico si usa il parametro Potenziale di Creazione di Ozono Fotochimico (Photochemical Ozone creation potentials, POCP), per i componenti organici. Tale parametro è espresso per le diverse sostanze in termini di equivalenza con l'etilene (C_2H_4).

Per la categoria acidificazione è usato il fattore Potenziale di Acidificazione (Acidification Potential, AP), stimato per ogni sostanza in termini di SO_2 oppure in termini di mole di H^+ .

Per l'eutrofizzazione si usa il Potenziale di Eutrofizzazione (Eutrophication Potential, EP) espresso in termini di impoverimento in O_2 , oppure in PO_4 .

Gli indicatori citati, sono, per la maggior parte, gli stessi utilizzati all'interno del metodo degli Eco-indicator 99, presente all'interno del codice di calcolo Sima Pro 6.0, utilizzato nello studio. Il risultato della fase di caratterizzazione è il profilo ambientale, costituito da una serie di punteggi di impatto ambientale relativi a ciascuna categoria, ottenuti sommando tra loro tutti i singoli contributi precedentemente calcolati. Solitamente viene rappresentato graficamente attraverso una serie di istogrammi oppure attraverso un network con frecce di diverso spessore a indicare quale attività comporta l'impatto maggiore.

Normalizzazione: in questa fase i valori ottenuti dalla caratterizzazione vengono normalizzati, cioè divisi per un "valore di riferimento" o "effetto normale" rappresentato generalmente da dati medi su scala mondiale, europea o regionale, riferiti ad un determinato intervallo di tempo. Attraverso la normalizzazione si può stabilire la magnitudo, ossia l'entità dell'impatto ambientale del sistema studiato rispetto a quello prodotto nell'area geografica prescelta come riferimento. Nella tabella sottostante sono riportati i valori relativi ad un anno di produzione industriale mondiale. La normalizzazione avviene, ad esempio, dividendo i risultati dell'operazione di caratterizzazione con quelli qui di seguito riportati.

I dati riportati in tabella 6 sono del tutto generali, pertanto per un'analisi più dettagliata necessario utilizzare indici relativi alle diverse aree geografiche in cui avviene la produzione in esame. Secondo le norme ISO la fase di normalizzazione non è obbligatoria per un LCA completa.

Valutazione: l'obiettivo della fase di valutazione è quello di poter esprimere, attraverso un indice finale, l'impatto ambientale associato al prodotto nell'arco del suo ciclo di vita. I valori degli effetti normalizzati vengono perciò moltiplicati per i "fattori di peso" della valutazione, relativi alle varie categorie di danno, spesso riportati in guide tecniche, che esprimono l'importanza intesa come criticità, attribuita a ciascun problema ambientale.

Tab. 6: Dati generici di alcuni parametri inquinanti stimati a livello mondiale.

TEMI AMBIENTALI	UNITA'	VALORI MONDIALI
Esaurimento fonti energetiche	$\text{GJ} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	235
Effetto serra	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^{12}$	37.7
Ossidanti fotochimici	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	3.74
Acidificazione	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	286
Tossicità umana	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	576
Ecotossicità dell'acqua	$\text{m}^3 \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^{12}$	1160
Ecotossicità del suolo	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^{12}$	1160
Eutrofizzazione	$\text{kg} \cdot (\text{anno}^{-1}) \cdot 10^9$	74.8

Alla base del calcolo di tali fattori vi è il principio della “distanza dallo scopo”: essa afferma che quanto più è grande il divario tra lo stato attuale e quello ideale cui si tende, tanto maggiore risulta la gravità di un effetto. È evidente quanto sia soggettivo tale giudizio, che può variare per aree geografiche, sensibilità e scuole di pensiero differenti. In alcuni casi si utilizzano fattori di peso tutti uguali tra loro, in alternativa si assumono quelli forniti da alcune banche dati. Sommando i valori degli effetti così ottenuti si ottiene un unico valore adimensionale, l'indice ambientale finale, detto ecoindicatore, che quantifica l'impatto ambientale associato al prodotto. La fase di Valutazione d'Impatto, a differenza della fase di Inventario che ha raggiunto un buon grado di standardizzazione, è ancora caratterizzata da aspetti controversi che necessitano di ulteriori approfondimenti scientifici. Inoltre la soggettività legata alla scelta dei metodi di Valutazione d'Impatto difficilmente consentirà di raggiungere un consenso internazionale. Un tentativo di rispondere alle esigenze di standardizzazione e di uniformazione dei contenuti degli studi di LCA è stato realizzato da ANPA in un documento in cui sono descritti i requisiti necessari all'esecuzione di tutte le fasi di una valutazione del ciclo di vita e identificate una serie di categorie d'impatto predeterminate.

INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI E MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA

L'interpretazione è la quarta fase della LCA, contenente i seguenti passi principali (ISO 14040, 1997):

- identificazione dei problemi ambientali significativi;
- valutazione;
- conclusioni e raccomandazioni.

L'interpretazione è svolta interagendo con le altre tre fasi dell'LCA con un processo iterativo di miglioramento fino a quando non si sono raggiunti gli obiettivi prefissati. Il primo passo include la strutturazione e presentazione dei risultati: risultati delle diverse fasi (ad es. presentazione dei dati della fase di inventario in tabelle, figure o diagrammi, o presentazione dei risultati della fase di valutazione di impatto); scelte metodologiche; metodi di valutazione usati; ruolo e responsabilità delle diverse parti interessate.

A seconda della complessità dello studio di LCA i problemi ambientali significativi del sistema considerato possono essere ad es. la CO₂, l'NO_x, oppure il riscaldamento globale, la riduzione della fascia di ozono ecc. Il secondo passo viene condotto in tre fasi distinte: controllo completo; analisi di sensitività; coerenza dei dati. La prima fase è una procedura qualitativa che punta l'obiettivo sui dati raccolti nella fase di inventario per decidere se e dove è necessario intervenire per completare eventuali mancanze, anche in qualità. Può, quindi essere migliorato l'inventario o rivista la fase di definizione dei confini e degli obiettivi. La seconda fase è una procedura sistematica per stimare l'effetto della variazione di alcuni parametri sui risultati, con lo scopo di stabilire un giusto grado di confidenza nei risultati relativamente agli obiettivi prefissati. La terza ed ultima fase è anche questa una procedura qualitativa ed è molto importante nelle analisi in cui si paragonano più alternative. Il passo finale della fase di interpretazione deve essere più o meno simile alle tradizionali conclusioni e raccomandazioni di una valutazione scientifica e tecnica. Molto importante per migliorare la presentazione è la trasparenza dello studio.

IL DATABASE GEMIS

Dal punto di vista operativo, per effettuare l'analisi LCA è stato utilizzato il modello GEMIS (Global Emission Model Integration System) che è stato elaborato presso l'Öko-Institute in Germania. Il software consente di valutare le emissioni atmosferiche e climalteranti, nonché ulteriori possibili impatti ambientali derivanti da conversioni energetiche, considerando l'intero ciclo dei combustibili dall'estrazione alla lavorazione e al trasporto (metodologia LCA – Life

Cycle Assessment). Il software permette anche di stimare i costi della filiera energetica analizzata. Nell'anno 1997 l'Öko-Insitute ha presentato e reso disponibile online la versione 3.0 di GEMIS. Il presente lavoro, invece, ha potuto usufruire dell'ultima versione 4.2, realizzata a partire dalle precedenti e arricchita con integrazioni relative alle banche dati di prodotti e processi.

GEMIS consente di calcolare sia le emissioni dirette che quelle indirette legate ad alcune migliaia (in totale sono 7.124) di processi e/o trasformazioni delle fonti di energia. Per effettuare queste elaborazioni il programma impiega informazioni sulle composizioni chimiche dei combustibili, sulle caratteristiche delle varie lavorazioni che subiscono, sui materiali che sono utilizzati e sulle modalità di trasporto.

La complessità delle diverse catene di processo è spesso elevata: tipicamente si utilizzano per ogni processo input di energia e/o materiali e output di prodotti, oltre che di emissioni e residui.

Le banche dati più importanti contenute all'interno del programma sono quella relative ai combustibili, dove sono inseriti dati relativi alla composizione chimica e al potere calorifico, e quella relativa ai processi, che contiene le informazioni sui trattamenti dei combustibili dall'estrazione fino al loro utilizzo finale.

I processi a loro volta, vengono connessi in catene sequenziali. Così, per esempio, il petrolio che arriva dai paesi dell'OPEC viene prima estratto, poi trasportato con petroliere fino alle raffinerie e qui lavorato per essere poi trasportato ai distributori finali: per ciascuna di queste fasi sono calcolati i consumi energetici e le emissioni connesse.

Il software, inoltre, non si limita ad effettuare il bilancio delle emissioni, ma può consentire di paragonare scenari diversi di riduzione delle emissioni.

La definizione degli scenari costituisce, infatti, la parte creativa dell'impiego del programma consentendo di confrontare varie opzioni praticabili per soddisfare determinati servizi energetici, calcolando i consumi energetici e le relative emissioni.

Nel programma vanno inseriti i dati relativi ai tipi di trasformazione, ai consumi di energia, ed infine alla tecnologia che viene sfruttata per ottenere l'output richiesto. GEMIS può essere utilizzato anche per la comparazione di tecnologie avanzate di conversione energetica.

Il suo impiego risulta interessante in tutti i casi in cui si vuole accertare l'efficacia (dal punto di vista della riduzione dei gas climalteranti) derivante dall'introduzione di alcune soluzioni particolari.

Tuttavia, per valutare correttamente le emissioni legate all'intero ciclo di vita dei diversi combustibili, il modello deve essere adattato allo specifico contesto nazionale e, in relazione agli obiettivi di utilizzo, a quello regionale e locale.

Sulla base di questa riflessione nel presente studio i dati di processo presenti in GEMIS e i database associati alla filiera energetica presa in esame sono stati adattati mediante integrazioni e/o modifiche.

Come prima operazione, per avviare il programma è necessario caricare l'intera banca dati in esso presente. La figura 3 rappresenta la prima schermata del software, in cui possono essere individuati i tre ambienti principali di lavoro di GEMIS:

- Prodotti;
- Processi;
- Scenari.

La sezione “Prodotti” del software contiene tutti i prodotti, co-prodotti e prodotti intermedi che possono essere output o input di un processo. Nella parte sinistra della maschera del programma compare l'elenco di tutti i prodotti inventariati. Per ogni prodotto è riportata una scheda tecnica che identifica i parametri più importanti per l'analisi di una LCA, come:

- la fonte bibliografica, ovvero la fonte che garantisce il dato;
- la qualità del dato (stimato, derivato o misurato);
- la data dell'ultimo aggiornamento e il nome del soggetto che ha fornito il dato.

Per alcuni i prodotti, come ad esempio il legno, oltre alla descrizione riportata sopra si aggiungono altri dati come la composizione chimica, il peso specifico, il PCI etc..

GEMIS fornisce anche la rappresentazione grafica della filiera a monte del prodotto. La metodologia utilizzata per la valutazione energetica e ambientale di un prodotto considera il ciclo di vita di ogni processo energetico che è coinvolto nella filiera a monte, analizzando tutte le fasi che concorrono all'estrazione, produzione e distribuzione del prodotto stesso. Ad ogni processo energetico vengono associati dei valori specifici di emissione complessivi; i valori di emissioni associati al prodotto sono la sommatoria dei contributi alle emissioni di tutti processi energetici coinvolti nella filiera a monte del prodotto stesso. Questi dati sono consultabili aprendo l'edit del prodotto.

La sezione “Processi” è una parte fondamentale del programma perché è in grado di attingere direttamente alle informazioni dei prodotti. In questa sezione sono forniti i valori delle emissioni in atmosfera, le quantità di rifiuti e i costi associati al processo. GEMIS segnala anche se, per esempio, sono stati esclusi determinati parametri nei calcoli relativi al processo

mediante alcune annotazioni nella parte informativa. La finestra dei processi è rappresentata dalla figura 4.

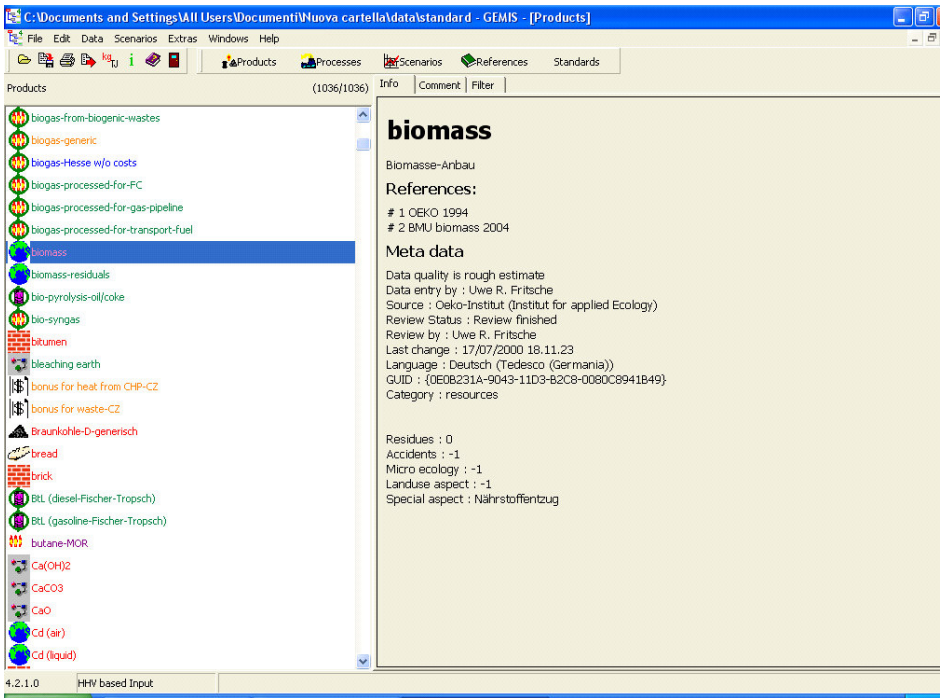


Fig. 3: Finestra di lavoro di GEMIS una volta effettuato il caricamento di tutti i dati di inventario.

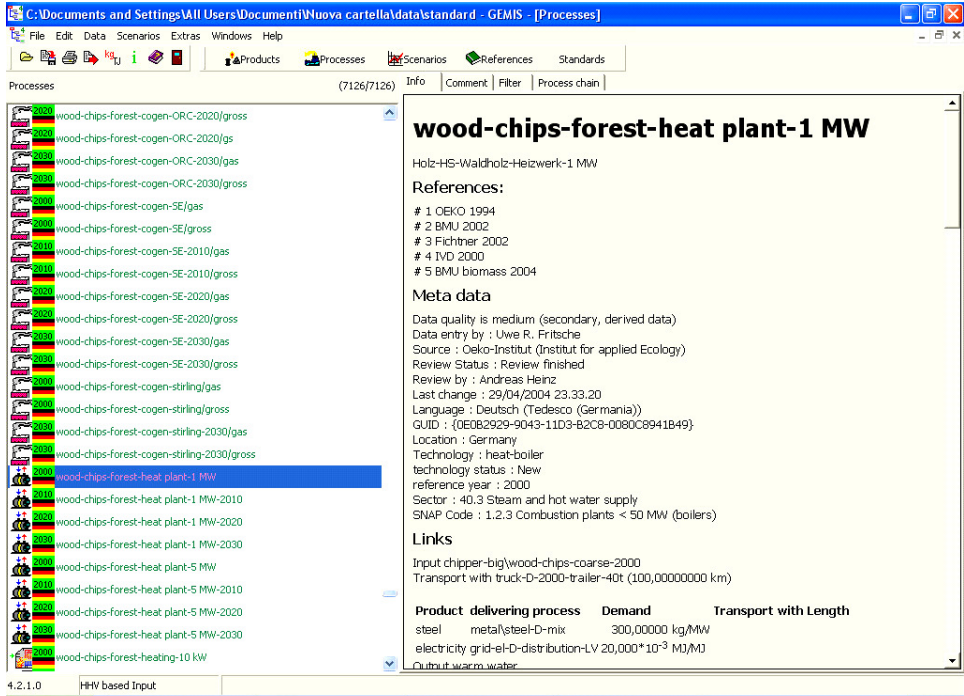


Fig. 4: Finestra di lavoro della sezione “Processi” di GEMIS.

In GEMIS l'analisi delle emissioni da fonti energetiche si basa essenzialmente sulla suddivisione del ciclo di vita di ogni fonte in due parti:

- 1) produzione e distribuzione;
- 2) consumo.

Questa suddivisione rispecchia da un lato la ripartizione tra offerta e domanda di energia, dall'altro la distinzione delle competenze nel caso di interventi di sostenibilità ambientale finalizzati alla ricerca di fonti energetiche alternative oppure ad una politica di riduzione dei consumi.

Il punto 1) si sviluppa sull'analisi dei processi di produzione e distribuzione, intendendo per "processo" un insieme di passi tecnologici che concorrono alla formazione di un prodotto fino al punto in cui viene utilizzato per soddisfare il fabbisogno finale.

Il punto 2) si sviluppa sull'analisi dei dispositivi di consumo di un prodotto all'interno del territorio in esame, intendendo per "dispositivo" un qualsiasi attrezzatura/apparato in grado di trasformare il prodotto nell'output desiderato. Per esempio nel presente lavoro "dispositivo" è rappresentato dalla caldaia che brucia il "prodotto" cippato che fornisce l'output "acqua calda".

Nella sezione "Processi" di GEMIS è quindi possibile fare una distinzione fra i processi veri e propri e i dispositivi.

Ognuna di queste categorie può essere suddivisa in due sottocategorie: la prima (di tipo energetico) contiene tutti quei passi connessi direttamente alle conversioni dei prodotti energetici, mentre la seconda (di tipo materiale) contiene tutti quei passi connessi alla costruzione delle tecnologie usate per le conversioni energetiche e di supporto alla distribuzione dell'output.

La sezione "Scenari" viene utilizzata per confrontare fra loro diversi prodotti o diversi processi che sono accomunati dallo stesso obiettivo funzionale. Sulla base di questo confronto l'utente è in grado di comparare i diversi impatti ambientali conseguenti da ciascuna soluzione imposta.

CALCOLO DELLE EMISSIONI EQUIVALENTI

GEMIS permette di aggregare i risultati relativi alle emissioni atmosferiche in 3 diverse tipologie di emissioni equivalenti, ovvero:

- Tropospheric Ozone Precursor Potential (TOPP) equivalente;
- SO₂ equivalente;
- CO₂ equivalente.

Il calcolo del parametro TOPP equivalente viene effettuato secondo quanto riportato nel documento “Environmental signals 2000 - regular indicator report, Copenhagen 2000” dell’EEA (European Environment Agency), ovvero considerando i contributi e i relativi pesi (non modificabili dall’utente) dei composti chimici di seguito elencati:

- NO_x con peso 1,220;
- NMVOC con peso 1,000;
- CO con peso 0,110;
- CH₄ con peso 0,014.

Il calcolo di SO₂ equivalente viene effettuato considerando i contributi e i relativi pesi (non modificabili dall’utente) dei composti chimici di seguito elencati:

- NO_x con peso 0,696;
- HF con peso 1,601;
- HCl con peso 0,878;
- H₂S con peso 0,983;
- NH₃ con peso 3,762.

Il calcolo di CO₂ equivalente viene effettuato considerando i contributi e i relativi pesi (modificabili dall’utente) di CO₂, CH₄ e N₂O.

CALCOLO DEI COSTI

GEMIS calcola i costi annuali fissi dei processi basandosi sui costi iniziali di investimento e moltiplicando poi per un fattore di annualità stimato nel seguente modo:

$$f = z \cdot (1 + z)^t / [(1 + z)^t - 1]$$

in cui z è il rateo di sconto e t è il tempo di ammortamento in anni. I costi variabili non dovuti al consumo di combustibile sono calcolati moltiplicando gli specifici valori con la potenzialità del processo e il tempo annuale di funzionamento. I costi dovuti al consumo di combustibile o dei prodotti di input sono calcolati moltiplicando il consumo di combustibile annuale (stimato tenendo conto dell’efficienza e del tempo annuale di funzionamento) per il costo specifico del combustibile o del prodotto di input.

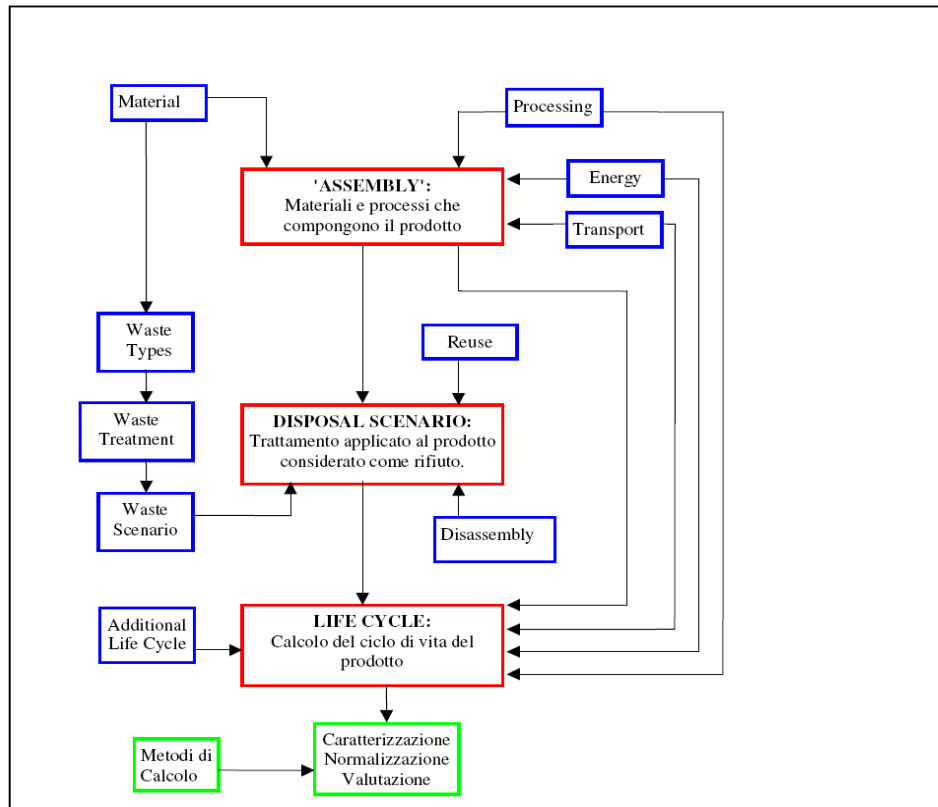
SOFTWARE SIMAPRO 6.0

SimaPro è un codice di calcolo basato sul metodo LCA per la valutazione del ciclo di vita dei prodotti e processi in relazione al loro impatto ambientale.

Nella figura 5 è riportato lo schema di calcolo utilizzato dal metodo; nella figura i vari blocchi sono stati rappresentati con colori diversi, in tal modo si è voluto mettere in evidenza la differenza tra i boxes rossi impiegati per la raccolta dei dati e riservati al prodotto e a ciascuno dei suoi componenti, tra quelli blu, relativi ai dati contenuti nel database, e quelli verdi inerenti il calcolo e la valutazione. Nel momento in cui ci si appresta a realizzare l'LCA di un qualsiasi prodotto è necessario poter disporre di informazioni dettagliate riguardo a ciascuno dei suoi componenti, tali informazioni riguardano essenzialmente:

- i materiali di cui sono realizzati e il loro peso;
- i processi di lavorazione;
- i trasporti;
- l'energia che, nei diversi momenti della produzione concorre alla realizzazione del prodotto.

La LCA è un metodo di indagine iterativo, che permette di compiere valutazioni anche solo parziali e di poter completare l'inserimento dei dati in qualsiasi momento; anche il SimaPro possiede questa caratteristica, di conseguenza i confini dello studio possono essere ampliati a piacere quando lo si ritenga necessario o qualora si abbiano a disposizione informazioni maggiormente adeguate. Per ogni componente del prodotto in esame è necessario creare un *'Assembly'* (in cui vengono assemblate le diverse fasi create), un *'Disposal Scenario'* (in cui si realizza lo scenario dei residui del processo) e un *'Life Cycle'* (in cui sono state inserite tutte le fasi); i dati che sono inseriti appartengono al database del metodo, che può essere implementato o modificato a seconda dell'esigenza dell'utente.



Lo schema a blocchi del codice SimaPro 6.0.

Fig. 5: schema di calcolo utilizzato dal sistema SIMAPRO.

ASSEMBLY

Il primo passo da compiere per la realizzazione dello studio consiste nel definire l' "Assembly" dei vari componenti. Al suo completamento concorrono i dati relativi ai materiali, alle lavorazioni (*Processing*), all'energia impiegata, nonché le informazioni relative ai trasporti. Come si evince dalla figura è solo in questo momento che è possibile prendere in considerazione i materiali.

DISPOSAL SCENARIO

Il "Disposal Scenario" deve far riferimento ad un determinato "Assembly"; in seguito si sceglie il tipo di smaltimento che si ritiene più verosimile, scegliendo tra il "Reuse", il "Disassembly" o tra una serie di "Waste Scenario" riportati dal codice (*Incineration, Landfill, Recycling etc.*).

LIFE CYCLE

Il “*Life Cycle*” permette di prendere in considerazione tutti gli aspetti legati all’utilizzo del prodotto o del componente (eventuali altri processing, “*Energy*”, “*Transport*”), in particolare può fare riferimento ad un “*Assembly*”, ma anche ad “*Additional Life Cycle*”, ovvero a “*Life Cycle*” di componenti che considerati in maniera globale concorrono alla valutazione dell’LCA del prodotto in esame.

I DATABASE

Per quanto riguarda i dati del Database sono organizzati come segue:

MATERIALI

I “*material*” sono suddivisi in categorie (*Building material, Chemical, Ferro metal, Fuels, Non ferro metals, etc.*) e per ciascuno di questi è indicata la “*Waste Fraction*”, che servirà per attribuire a ciascun componente il trattamento adeguato (“*Waste Treatment*”), e lo scenario adeguato (“*Waste Scenario*”). Nel caso in cui non sia indicato, è necessario sapere che il codice non prevede di considerare tale materiale come rifiuto all’atto della dismissione.

PROCESSI

I “*Processing*” sono anch’essi suddivisi in categorie che raccolgono lavorazioni relative ad un certo tipo di materiale.

TRASPORTI

I Trasporti sono suddivisi in base al tipo (strada, ferrovia, acqua, aria) e per ciascuno di essi si riportano i possibili mezzi di trasporto.

ENERGIA

L’“*Energy*” permette di valutare il tipo di energia utilizzata nelle fasi di produzione ed eventualmente in quelle di utilizzo del prodotto.

IL CALCOLO

Il calcolo vero e proprio riguarda la caratterizzazione, la normalizzazione e la valutazione.

Dopo avere effettuato delle prove preliminari, per il calcolo della LCA, con il software SIMAPRO 6.0, si è deciso di non impiegare tale software poiché dopo avere effettuato le prime prove, sono state riscontrate problematiche e lacune per impianti di piccola taglia come quelli oggetto della tesi.

I DATI RILEVATI

SUPERFICI

Le superfici degli edifici interessati dai sistemi di riscaldamento sono state ottenute dalle mappe catastali dei fabbricati.

Oltre alla superficie calpestabile dell'edificio (ST), misurata in m² è stata misurata anche la volumetria (V) misurata in m³ ottenuta tenendo conto dell'altezza media dell'edificio (hm):

$$V = ST \times hm$$

Le superfici dei terreni necessari al fabbisogno di approvvigionamento delle filiere sono state individuate sulle mappe catastali dei terreni, quindi si è proceduto al rilievo in campo con GPS e successivo riporto su ortofoto a colori.

QUANTIFICAZIONE DELLA BIOMASSA LEGNOSA

Per entrambe le aziende, e per ogni tipologia di biomassa disponibile, sono stati effettuati rilievi per il calcolo della biomassa disponibile. Nello specifico si illustra di seguito la metodologia seguita.

BOSCO CEDUO A PREVALENZA CERRO E FILARI A PREVALENZA DI ROBINIA

Per la quantificazione e qualificazione della biomassa ricavabile da questa tipologia si è proceduto come di seguito descritto. Sono state effettuate 20 aree di saggio circolari con un raggio di 30 m. Le aree di saggio circolari hanno il vantaggio di presentare la minima probabilità di alberi sul bordo, essendo il cerchio la figura geometrica con il minimo perimetro a parità di superficie. All'interno delle aree di saggio, si è effettuato un rilievo totale dei diametri di tutte le piante presenti, prendendo come soglia di cavallettamento le piante con un diametro superiore a 5 cm, e un numero di altezze campione (30% sul totale delle piante). I rilievi sono stati eseguiti con l'ausilio di un "cavalletto dendrometrico" per i diametri, mentre

per la stima dell'altezza sono stati utilizzati un "clisimetro" e un "vertex". La scelta delle aree campione è stata effettuata attraverso un campionamento di tipo soggettivo in cui le unità campionarie sono state scelte arbitrariamente dall'operatore, così come la scelta delle piante su cui stimare l'altezza, dove sono state considerate quelle rappresentative del popolamento.

Una volta stimati i volumi ad ettaro attraverso le tavole di cubatura (Castellani, 1982) per il passaggio alla massa disponibile si è dovuta determinare la massa volumica. La massa volumica fresca è stata ricavata attraverso il prelievo di 3 campioni per ogni singola pianta selezionata, asportandoli in modo soggettivo lungo il fusto della pianta stessa, prendendo in considerazione almeno 5 piante per ogni area di saggio rilevata. I campioni sono stati depositati in busta di plastica ermetica e trasportati in laboratorio per le analisi quali-quantitative.

VIGNETO E ULIVETO

Per ogni tipologia, sono state effettuate 20 aree di saggio quadrate 20x20, con una superficie di 400 m². I rilievi sono stati effettuati immediatamente dopo la potatura.

Il comparto agricolo è in grado di fornire diverse tipologie di biomasse, ed una fetta importante è rappresentato dai residui di potatura che molto spesso gli agricoltori considerano un problema smaltirli. La stima della quantità di residui derivanti dal comparto agricolo è piuttosto complessa. La quantità di residui agricoli può essere determinata semplicemente moltiplicando la Superficie Agricola Utilizzata (SAU) per un coefficiente che descrive la produttività di residui in t/ha. Questo coefficiente varia in base al tipo di coltura ed alla zona geografica. E' stato determinato dal CESTAAT (Centro Studi sull'Agricoltura, l'Ambiente ed il Territorio) e confermato dal SESIRCA (Servizio e Sperimentazione, Innovazione e Ricerca sull'Agricoltura) un coefficiente che indica la produzione media di residui (t/ha) ed il rapporto residuo/prodotto sul territorio nazionale, in questo caso specifico sono state svolte ricerche appropriate ed approfondite. Per la determinazione è stato utilizzato il procedimento che rileva la reale presenza in situ. Il procedimento che è stato eseguito è il seguente:

1. Prelievo di campioni per la determinazione dell'umidità e della massa volumica fresca e secca. Sono stati prelevati 90 campioni tra i residui presenti. Tali campioni sono stati immediatamente inseriti in dei sacchetti ermetici in modo da non avere perdite di umidità ed in giornata sono stati portati in laboratorio per le analisi quali-quantitative;
2. Determinazione della massa fresca. Per ogni area di saggio è stata effettuata la pesatura delle masse di residui attraverso un dinamometro digitale da campo. Estrapolando il

dato dalle aree di saggio è stata determinata la quantità di biomassa fresca ad ettaro presente all'interno dell'azienda per la tipologia residui.

MASSA VOLUMICA

La massa volumica (ρ) (UNI ISO 3131, 1985) è definita come la massa nell'unità di volume:

$$\rho = m/v \quad [\text{kg/m}^3]$$

con: m massa del provino espressa in kg;

v volume del provino espresso in m^3

La massa volumica è una proprietà di grande interesse e di rilevanza tale da condizionare le caratteristiche fisico-meccaniche, come le variazioni dimensionali e la resistenza alle diverse sollecitazioni, e influenzare quindi la qualità degli assortimenti legnosi e fisico-chimiche come il potere calorifico.

La massa volumica è una caratteristica del legno tanto importante quanto variabile, essa può variare a seconda del contenuto di umidità, poiché essa induce variazioni significative sia sulla massa che sul volume. Per questa ragione quando si parla di massa volumica del legno è necessario precisare a quale umidità essa viene riferita.

Per la misurazione della massa volumica, si è proceduto con la misurazione tramite calibro digitale (precisione di 1/20 mm) dello spessore e del diametro dei campioni, il secondo ottenuto dalla media di due misurazioni opposte effettuate sulla stessa sezione (prelevando la seconda misura formando un angolo di 90° gradi dalla prima). I pesi sono stati rilevati mediante bilancia elettronica (precisione di g/1000). Tutte le operazioni sono state eseguite sui campioni prima allo stato fresco, successivamente dopo essiccazione in stufa ventilata per 48 ore a 103 °C per ottenere il legno anidro.

UMIDITÀ

Per il calcolo dell'umidità è stato utilizzato il metodo della doppia pesata (EN 14774-1,2,3:2009). La pesatura è stata effettuata con una bilancia di laboratorio della precisione di g 1/1000. Per portare i campioni di biomassa allo stato anidro è stato impiegato il metodo della essiccazione in stufa a circa 103°C.

Il metodo della doppia pesata ha richiesto alcune ore per la sua esecuzione, dato che occorre tenere i campioni per 24 h in stufa a circa 103°C. I campioni sono stati prima pesati allo stato fresco e una volta essiccati fino allo stato anidro in stufa, i campioni, sono stati nuovamente pesati; si è assunto che la differenza tra le due pesate corrispondesse alla quantità di acqua

evaporata. Per accertarsi del raggiungimento dello stato anidro dopo le 24 h in stufa e la successiva pesata i campioni sono stati reimmessi in stufa per ulteriori 2 h ed una volta estratti, ed effettuato il peso nuovamente si è riscontrata una variazione di peso inferiore all'1% e a questo punto è stato considerato raggiunto lo stato di peso costante perfettamente anidro.

$$U(\%) = (P_u - P_0) / P_0 \times 100$$

E' un metodo valido per qualsiasi valore di umidità, la sua precisione può risultare ridotta qualora la biomassa contenga notevoli quantità di resine o di altri estrattivi; in tal caso conviene eseguire l'essiccazione con particolari attrezzature o accorgimenti.

CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA

La caratterizzazione energetica, è stata effettuata su campioni di materiale cippato prelevato in entrambe le aziende oggetto di analisi. I campioni di biomassa prelevati sono stati portati presso i laboratori. Inizialmente si è provveduto al calcolo della densità bulk e del potere calorifico.

DENSITÀ BULK DELLO SMINUZZATO

La densità di bulk (EN 15103:2009; CEN/TC 335, 2005) dello sminuzzato raccolto è un parametro che rappresenta il rapporto tra la massa ed il volume di un campione di sminuzzato non soggetto a compressione o assestamento di alcun genere. Sia la massa sia il volume sono sempre riferiti allo stesso contenuto di umidità. Valore espresso in kg/m³ anche se è bene chiarire che si tratta di un volume sterico composto da spazi vuoti e pieni.

$$D = m/v$$

$$D = \text{densità di bulk (kg/m}^3\text{)}$$

$$m = \text{massa del solido (kg)}$$

$$v = \text{volume del solido (m}^3\text{)}$$

POTERE CALORIFICO

Il potere calorifico (CEN/TS 14918, 2011) del legno, indica la quantità di energia, che può essere ricavata dalla combustione completa di un'unità di peso di materiale utile. Il potere calorifico del legno è influenzato dal contenuto idrico. Si calcola in MJ/kg.

Si distinguono:

1) potere calorifico inferiore (PCI): dove l'acqua liberata è considerata allo stato di vapore, ovvero è stata sottratta l'energia termica necessaria all'evaporazione dell'acqua (calore latente di vaporizzazione dell'acqua a 25 °C).

2) potere calorifico superiore (PCS): nel prodotto della combustione si considera l'acqua allo stato liquido.

Quando non precisato, per “potere calorifico” si intende il potere calorifico inferiore (A.A. V.V., 2005).

Nello specifico è stato rilevato il potere calorifico superiore (PCS).

La determinazione del potere calorifico, è stata effettuata facendo uso della bomba calorimetrica di Berthelot-Mahler (Calorimetro Parr 6200). (Canagaratna & Witt 1988, ISCO 1991). La bomba calorimetrica di Mahler è un apparecchio utile alla determinazione del potere calorifico di un combustibile solido o liquido, per i combustibili in forma gassosa si ricorre all'uso del calorimetro di Junkers. Il calore prodotto dalla reazione di combustione del combustibile in esame viene assorbito da una massa di acqua o di altro liquido di cui si osserva l'aumento della temperatura. Essa consiste in un recipiente cilindrico di circa 500 cm³, chiuso con un coperchio a vite, dal quale rientrano due fori verso l'interno. In uno di questi fori è introdotta un'asticella di ferro che regge un crogiolo di platino ed una piccola spirale di ferro. Nel crogiolo viene inserito il combustibile di cui vogliamo conoscere il potere calorifico (di solito 40 cm³) e viene introdotto ossigeno sotto pressione. La bomba viene immersa in un calorimetro colmo d'acqua, munito di agitatore e termometro. Si mette in moto l'agitatore e, quando il termometro legge una temperatura costante, nasce una differenza di potenziale tra le asticelle di ferro la quale fa ossidare la spirale di ferro; da qui si crea la combustione del nostro materiale in esame. Il termometro legge la temperatura, che si alza bruscamente fino ad un certo valore, per poi diminuire lentamente. In tal modo è possibile calcolare il potere calorifico superiore con la seguente

formula:

$$Q_s = \frac{(T_2 - T_1)(P + A)}{p}$$

dove T₂ e T₁ sono rispettivamente le temperature di massima e di minima, P è la quantità di acqua immessa nel calorimetro, A è l'equivalente in acqua del calorimetro e p è la quantità di combustibile utilizzato.



Foto 3: (Calorimetro Parr 6200).

ANALISI ULTIMA E ANALISI PROSSIMA

È stato rilevato inoltre il contenuto di ceneri (analisi prossima) impiegando il Furnace Nabertherm L9/11 (EN 14775,2009) e alcune caratteristiche chimiche impiegando l'Elemental analyzer CHN 2000, quali i contenuti di carbonio (C), idrogeno (H) e azoto (N) (analisi ultima) (CEN/TS 15104,2005).

Ogni analisi eseguita per la caratterizzazione energetica della biomassa viene effettuata in conformità con le normative italiane ed internazionali, in particolare per la preparazione dei provini (CENT/TS 14778-1; CENT/TS 14779; CENT/TS 14780; UNI 9903-3). Per l'analisi prossima, più precisamente per la determinazione (14774-1; CENT/TS 14774-2; CENT/TS 14774-3; CENT/TS 14775). Per la determinazione delle sostanze volatili (analisi ultima) si fa riferimento alla normativa italiana UNI 9903-3 e si effettua in osservanza della direttiva procedurale indicata nella norma ASTM D-5373.

EMISSIONI GASSOSE DALL'UNITÀ TERMICA

Le emissioni sono state misurate attraverso un analizzatore di fumi. L'analizzatore fumi utilizzato dall'impianto è un ECOM J2KN, certificato per la misura dei gas di combustione ai sensi della Normativa Europea.

- Misura O₂, CO (NO, NO₂, SO₂ opzionali), temperatura del gas, temperatura dell'aria, pressione, ecc.

- Calcola CO₂, CO con riferimento dell'ossigeno.

E' dotato di display su cui visualizza i risultati ottenuti e registra in continua tutti i valore della combustione, è dotato di stampante per i risultati e una sonda di aspirazione fumi con tubo flessibile. Per permettere l'analisi in continuo dei valori di emissione ed una corretta misura degli NO_x, l'analizzatore è stato accessorizzato dalla ditta fornitrice di un sistema di raffreddamento di tipo Peltier e di una sonda di estrazione per le analisi riscaldata e specificatamente garantita per le analisi in continuo di NO ed NO₂.

Si riportano i valori limite previsti dalla normativa del D.Lgs 152/2006:

Valori limite per gli impianti che utilizzano biomasse:

- Gli impianti termici che utilizzano biomasse di cui all'Allegato X devono rispettare i seguenti valori limite di emissione, riferiti ad un ora di funzionamento dell'impianto nelle condizioni di esercizio più gravose, esclusi i periodi di avviamento, arresti e guasti. Il tenore di ossigeno di riferimento è pari all'11% in volume nell'effluente gassoso anidro. I valori limite sono riferiti al volume di effluente gassoso secco rapportato alle condizioni normali.

Tab. 7: valori limite di emissioni per impianti a biomasse (D.Lgs 152/2006).

Potenza termica nominale dell'impianto (MW)	[1] >0.15 - < 1
Polveri totali	100 mg/Nm ³
Carbonio organico totale (COT)	-
Monossido di carbonio (CO)	350 mg/Nm ³
Ossidi di azoto espressi come (NO ₂)	500 mg/Nm ³
Ossidi di zolfo espressi come (SO ₂)	200 mg/Nm ³
[1] agli impianti di potenza termica nominale inferiore a 0,15 MW, ma superiori a 35 kW si applica un valore limite di emissione per le polveri totali di 200 mg/Nm ³ .	

LOGISTICA DI APPROVVIGIONAMENTO TIPOLOGIA MEDIA

Per quanto concerne l'utilizzazione del bosco ceduo la metodologia di lavoro seguita è stata di seguito descritta. Abbattimento semimeccanico con l'ausilio di una motosega, sono state tagliate le piante in modo da direzionarle con i calci rivolti nella direzione di esbosco; per questa operazione sono stati impiegati due operai, uno addetto al taglio con la motosega ed uno in aiuto di quest'ultimo: l'abbattimento è stato effettuato in modo diverso in base al diametro al colletto della pianta. Nel caso delle matricine è stato effettuato secondo gli standard ormai

riconosciuti dalla comunità scientifica effettuando quindi una tacca di direzione composta da due tagli (uno orizzontale ed uno a 45°) nella parte del fusto in cui si vuol far cadere la pianta ed un successivo taglio di abbattimento orizzontale nella porzione opposta del fusto.

Concentramento ed esbosco: queste due operazioni sono state eseguite senza soluzione di continuità con l'ausilio di un trattore agricolo sul quale era montato un verricello forestale con cavo da 9 mm di fune speciale compattata della lunghezza di 110 m ; la squadra era formata da tre operai, due addetti all'aggancio delle piante alla fune del verricello, mentre il terzo addetto a manovrare il trattore. I primi due restavano nella tagliata e agganciavano le piante con catene strozza legno, fissate alla fune del verricello con ganci rapidi scorrevoli, il terzo azionava il verricello per effettuare lo strascico indiretto e successivamente completava l'esbosco a semistrascico giungendo all'imposto.

Allestimento e sminuzzatura: una volta giunte all'imposto le piante venivano prima parzialmente allestite. Ovvero i primi 4 m di tronco venivano sezionati ed allestiti come legna da ardere, mentre il rimanente veniva predisposto per la sminuzzatura. Per la sminuzzatura è stata utilizzata una sminuzzatrice idonea per la produzione di scaglie per impianti di riscaldamento centralizzati con alimentazione a coclea. La sminuzzatrice utilizzata era a motore autonomo ed alimentazione con gru idraulica. La squadra era composta da due operai, mentre uno alimentava la sminuzzatrice, l'altro operaio si occupava della sezionatura dei tronchi. Le scaglie tramite il convogliatore di scarico regolabile, di cui era dotata la sminuzzatrice, venivano caricate direttamente su un rimorchio agricolo, che una volta pieno veniva trasportato fino al silo di stoccaggio dello sminuzzato.

Per quanto attiene al recupero del materiale legnoso prodotto dalle potature dei vigneti e degli uliveti, la metodologia di lavoro seguita è stata di seguito descritta. Alcuni giorni dopo le normali operazioni di potatura, i residui sono stati posizionati in andane. La successiva raccolta è stata effettuata usando una macchina rotoimballatrice, è stata scelta l'imballatura perché offre vantaggi estremamente importanti sulla movimentazione e sullo stoccaggio della biomassa. La movimentazione del residuo è facilitata poiché se ne diminuisce l'ingombro e lo si organizza in forme e dimensioni omogenee. Questo permette di sfruttare al meglio la capacità di carico dei mezzi di trasporto. Inoltre, l'imballatura consente uno stoccaggio prolungato, perché le balle occupano meno spazio del residuo sciolto e non presentano i problemi di fermentazione tipici dello sminuzzato. Una volta terminata la fase di imballatura, alcuni giorni dopo, le rotoballe venivano raccolte e stoccate sotto apposita tettoia in uso nell'azienda. La successiva

sminuzzatura viene effettuata nel momento in cui è necessaria per l'approvvigionamento della caldaia. Per questo tipo di lavoro sono stati impiegati due operatori.

LOGISTICA DI APPROVVIGIONAMENTO TIPOLOGIA PICCOLA

Per quanto attiene i filari e piccoli boschetti a prevalenza di robinia, di seguito viene descritta la metodologia operativa seguita. L'abbattimento è stato di tipo semimeccanico con l'ausilio di una motosega, per questa operazione sono stati impiegati due operai, uno addetto al taglio con la motosega ed uno in aiuto di quest'ultimo. Successivamente all'abbattimento le piante sono state parzialmente sezionate per facilitarne il carico su un trattore agricolo munito di rimorchio. Una volta caricate, le piante, sono state trasportate in un piazzale dove sono state accatastate in attesa di essere sminuzzate. Per la sminuzzatura è stata utilizzata una sminuzzatrice idonea per la produzione di scaglie per impianti di riscaldamento centralizzati con alimentazione a coclea. La sminuzzatrice utilizzata era alimentata dalla presa di forza e veniva azionata da un trattore agricolo. Le scaglie tramite il convogliatore di scarico regolabile, di cui era dotata la sminuzzatrice, venivano caricate direttamente su un rimorchio agricolo, che una volta pieno veniva trasportato fino al silo di stoccaggio dello sminuzzato.

Per quanto attiene al recupero del materiale legnoso prodotto dalle potature dei vigneti, la metodologia di lavoro seguita è stata di seguito descritta. Alcuni giorni dopo le normali operazioni di potatura, i residui sono stati posizionati in andane. La successiva raccolta è stata effettuata usando una macchina rotoimballatrice, è stata scelta l'imballatura perché offre vantaggi estremamente importanti sulla movimentazione e sullo stoccaggio della biomassa. La movimentazione del residuo è facilitata poiché se ne diminuisce l'ingombro e lo si organizza in forme e dimensioni omogenee. Questo permette di sfruttare al meglio la capacità di carico dei mezzi di trasporto. Inoltre, l'imballatura consente uno stoccaggio prolungato, perché le balle occupano meno spazio del residuo sciolto e non presentano i problemi di fermentazione tipici dello sminuzzato. Una volta terminata la fase di imballatura, alcuni giorni dopo le rotoballe venivano raccolte e stoccate sotto apposita tettoia in uso nell'azienda. La successiva sminuzzatura viene effettuata nel momento in cui è necessaria per l'approvvigionamento della caldaia. Per questo tipo di lavoro sono stati impiegati due operatori. La sminuzzatrice utilizzata era alimentata dalla presa di forza e veniva azionata da un trattore agricolo.

TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ

Per entrambi i casi di studio, per ogni fase operativa, sono stati rilevati i tempi di lavoro, Il rilievo dei tempi di lavoro è stato effettuato con l'ausilio di una tabella cronometrica modello "Minerva" dotata di tre cronometri ad azione meccanica, di cui uno per il rilievo dei tempi totali (conteggio delle ore) e gli altri per il cronometraggio delle varie fasi (minuti e centesimi). I tempi presi sono stati annotati in apposite schede, adattate alle varie operazioni, ed espressi in minuti e centesimi di minuto (es.: 1,24 = 1' e 24 centesimi).

Basandosi sui tempi di lavoro, volume e massa, la produttività media oraria per operaio nelle differenti operazioni è stata calcolata (Anon. 1988; Harstela 1991; Picchio et al. 2009) come:

- produttività media lorda (PHS₁₅ productivity), calcolata prendendo in considerazione i PHS₁₅ (Productive Hour System 15), ovvero includendo tutti i tempi morti di durata inferiore a 15 minuti;
- produttività media netta (PHS₀ productivity), calcolata prendendo in considerazione i PHS₀ (Productive Hour System 0) senza alcun tempo morto.

La produttività è stata anche espressa riferita alla sostanza fresca (evidenziando lo specifico contenuto di umidità media rilevato pari al 99%), alla sostanza secca e al volume.

INPUT ENERGETICI

Partendo dall'analisi dettagliata dei tempi di lavoro e dei quantitativi di legna utilizzati si sono analizzati i cantieri dal punto di vista energetico, per fare ciò ci si è avvalsi del metodo della richiesta lorda d'energia fossile (lubrificanti e combustibili) necessaria per produrre e utilizzare l'unità di massa legnosa. L'analisi della richiesta lorda di energia (GER, Gross Energy Requirements) è una metodologia appoggiata dall'IFIAS (International Federation of Institutes for Advanced Study, di Stoccolma). Tale analisi ha un approccio pragmatico ai problemi energetici. In essa si sottolinea e si riconosce l'importanza delle fonti energetiche fossili negli attuali sistemi produttivi e soltanto sui flussi di energia fossile (diretta ed indiretta) focalizza il proprio interesse. L'analisi del GER è stata standardizzata mediante opportune convenzioni e definizioni. Il nome "Analisi energetica" è raccomandato per quel particolare campo di ricerca che studia l'energia necessaria nell'approvvigionamento di un bene o un servizio e che risulta così incorporata (sequestrata) in tale prodotto; non solo l'energia diretta impiegata, ma anche quella indiretta associata ai materiali di processo. Per i combustibili è impiegato tradizionalmente il potere calorifico superiore. I valori delle grandezze precedenti possono essere calcolati per unità di prodotto in uscita: o come media (richiesta totale di energia divisa

la quantità totale di prodotto in uscita); o come valore marginale (quantità di energia spesa a livello di ultima unità di prodotto ottenuta). Per il calcolo e la determinazione degli input indiretti delle macchine e delle attrezzature, abbiamo fatto riferimento al valore energetico dei singoli materiali strutturali, mettendoli in relazione alla loro presenza quantitativa, il tutto è stato quindi rapportato alla durata tecnica delle macchine, alla loro massa ed al loro effettivo impiego nel cantiere. Tale modo di procedere è stato adottato per le macchine e le attrezzature utilizzate in tutti i cantieri.

COSTI DELLA FILIERA

I costi di utilizzazione calcolati sono stati nello specifico scomposti in costi macchina, costi per i dispositivi di protezione individuale (DPI) e costi per il personale, il tutto riferito al 2011.

Nella ricerca applicata, relativa alla gestione delle risorse forestali, frequentemente vengono utilizzate metodologie diverse e fondamentalmente non coordinate nello studio degli stessi processi o attività economiche. Tale situazione è legata al fatto che nel settore primario i fattori che condizionano i costi di un sistema produttivo sono numerosi, fortemente interconnessi e poco standardizzati (Brun & Berruto, 2000). Poiché certe operazioni forestali, soprattutto derivanti da innovazioni di prodotto (ad esempio: produzione di scaglie di legno) o di processo tecnologico (esbosco di legno lungo o pianta intera), risultano essere sempre al limite della convenienza economica, è particolarmente importante poter valutare correttamente i costi, ed eventualmente fare confronti su basi metodologiche omogenee. Partendo dai dati riportati in una recente pubblicazione (Bresciani A. et al., 2007) nella quale figurano tutte le voci degli effettivi costi di impiego di determinate attrezzature forestali, impiegate in comuni interventi selviculturali e considerando la necessità di poterci confrontare con un orizzonte internazionale, si è preso in considerazione il metodo per il calcolo dei costi macchina Miyata E.S., (1980). Questo metodo adotta un sistema di calcolo analitico, nel quale vengono prese in considerazione diverse voci riguardanti sia i costi fissi, indipendenti da quanto tempo la macchina viene impiegata in un anno, sia i costi variabili che dipendono, invece, direttamente dall'uso che se ne fa. E' uno fra i metodi più conosciuti ed utilizzati in ambito forestale internazionale per l'analisi delle attività forestali.

ANALISI STATISTICA

I dati rilevati in campo, sono stati inseriti su fogli di calcolo elettronici ed in funzione delle loro caratteristiche e della tipologia di indagine e disegno sperimentale si è proceduto ad

appropriate analisi statistiche al fine di risalire alla significatività di quanto raccolto ed alla validazione dei risultati.

TEST T DI STUDENT

Il test t per applicato è stato quello per campioni dipendenti che prevede un numero uguali di repliche. E' un test generalmente con una buona potenza ma necessità di un buon numero di dati ed appunto per questa specifica applicazione di un numero di campioni identico tra le due popolazioni campionarie. In mancanza di questo assunto è possibile applicare una variante si tratta del t test per campioni indipendenti, ma in tal caso in genere il test diviene meno potente.

ANOVA PER RANGHI DI KRUSKAL-WALLIS

Il test di Kruskal-Wallis è un test non parametrico, ovvero l'analisi della varianza non parametrica ad un criterio di classificazione. E' uno dei test più potenti per verificare l'ipotesi nulla H_0 , cioè se k gruppi indipendenti provengano dalla stessa popolazione e/o da popolazioni che abbiano la medesima mediana. Sempre più spesso viene applicato anche per ovviare a possibili distorsioni dovute alla normalizzazione dei dati.

ANALISI DELLA VARIANZA (ANOVA) ED ASSUNTI

Uno dei test statistici più impiegati per confrontare le medie di più gruppi di campioni a confronto è l'ANOVA. Per poter procedere con una ANOVA omoschedastica, è necessario fare l'assunzione che le varianze dei k gruppi in analisi siano omogenee. I test per verificare l'omogeneità delle varianze sono numerosi; alcuni vengono applicati su campioni che seguono una distribuzione normale, che pertanto possono essere applicati se i dati seguono una distribuzione normale. In questo caso per la verifica dell'omogeneità delle varianze, è stato scelto il test di Levene. Il test di Levene è una statistica inferenziale utilizzato per valutare l'uguaglianza delle varianze nei diversi campioni. Alcune comuni procedure statistiche assumono che le varianze delle popolazioni da cui sono tratti diversi campioni sono uguali e il test di Levene valuta questa ipotesi. Si verifica l'ipotesi nulla che le varianze della popolazione sono uguali. Qualora il p-value del test di Levene è inferiore a un certo valore critico (in genere 0,05), risulta improbabile che le differenze ottenute nelle varianze del campione si siano verificate sulla base di un campionamento casuale. Così, l'ipotesi nulla delle varianze uguali è respinto e si conclude che esiste una differenza tra le variazioni nella popolazione.

Le procedure che in genere assumono omogeneità della varianza includono analisi della varianza e t-test. Un vantaggio del test di Levene è che non richiede la normalità dei dati analizzati. Tale test di è spesso usato prima di un confronto di mezzi. Quando il test di Levene è significativo si procede con altri test (ANOVA nel caso specifico), altrimenti le procedure di modifica sono assunte senza la parità di varianza. Altro punto cardine prima di applicare l'ANOVA è la verifica della normalità dei dati. In questo lavoro viene applicato test grafico di Lilliefors. Il test proposto da H. Lilliefors nel 1967 è particolarmente utile in campioni di dimensioni minime. I suoi valori critici iniziano da $n = 4$. Come scrive Lilliefors, è una modificazione del test di Kolmogorov-Smirnov: ne segue la procedura, ma utilizza una tavola di valori critici differente. Come in tutti i test di normalità, l'ipotesi nulla è che la popolazione dalla quale è stato estratto il campione non sia troppo differente dalla famiglia di distribuzioni che seguono la legge di Gauss, quindi che sia $N(\mu, \sigma^2)$ con μ e σ qualsiasi ma $\gamma_1 = 0$ e $\gamma_2 = 0$, contro l'ipotesi alternativa che sia diversa dalla normale a causa di asimmetria e/o curtosi. A questo punto possiamo procedere con il test ANOVA. L'analisi della varianza (ANOVA) è un insieme di tecniche statistiche facenti parte della statistica inferenziale che permettono di confrontare due o più gruppi di dati confrontando la variabilità interna a questi gruppi con la variabilità tra i gruppi. L'ipotesi nulla solitamente prevede che i dati di tutti i gruppi abbiano la stessa origine, ovvero la stessa distribuzione stocastica, e che le differenze osservate tra i gruppi siano dovute solo al caso. L'ipotesi alla base dell'analisi della varianza è che dati n gruppi, sia possibile scomporre la varianza in due componenti: Varianza interna ai gruppi (anche detta Within) e Varianza tra i gruppi (Between). La ragione che spinge a compiere tale distinzione è la convinzione, da parte del ricercatore, che determinati fenomeni trovino spiegazione in caratteristiche proprie del gruppo di appartenenza. In altre parole, il confronto si basa sull'idea che se la variabilità interna ai gruppi è relativamente elevata rispetto alla variabilità tra i gruppi, allora probabilmente la differenza tra questi gruppi è soltanto il risultato della variabilità interna.

COEFFICIENTE DI CORRELAZIONE DI SPEARMAN

Per indagare circa la correlazione esistente tra due variabili, l'indagine è stata effettuata con l'ausilio del coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman. Il coefficiente di correlazione dei ranghi di Spearman consente di confrontare due graduatorie al fine di verificare se vi è associazione e, in caso positivo, se vi è concordanza oppure discordanza.

Quando il coefficiente di correlazione dei ranghi vale 1 vi è perfetta concordanza fra le graduatorie. Ciò significa che l'unità classificata come prima nella graduatoria rispetto ad X lo è anche nella graduatoria rispetto a Y, l'unità classificata come seconda nella graduatoria rispetto ad X lo è anche nella graduatoria rispetto a Y e così via. Quando il coefficiente di correlazione dei ranghi vale -1 vi è perfetta discordanza fra le graduatorie. Ciò significa che l'unità classificata come prima nella graduatoria rispetto ad X è ultima nella graduatoria rispetto a Y, l'unità classificata come seconda nella graduatoria rispetto ad X è penultima nella graduatoria rispetto a Y e così via. Infine se il coefficiente di correlazione dei ranghi vale zero, ciò indica che non vi è associazione fra le graduatorie.

RISULTATI E COMMENTI

PRIME PROVE DELLA METODOLOGIA LCA CON GEMIS: LA MICROFILIERA TERMICA DI AUTOCONSUMO DEL CRA-ING DI MONTEROTONDO

La prima applicazione dell'analisi LCA con GEMIS condotte, sono state effettuate presso l'Unità di Ricerca per l'Ingegneria Agraria (CRA-ING) di Monterotondo (RM), struttura di ricerca del Consiglio per la Ricerca e Sperimentazione in Agricoltura (CRA). La ricerca è stata possibile grazie ad un finanziamento di un programma triennale di ricerca, da parte del Ministero per le Politiche Agricole Alimentari e Forestali (D.M 487/7303/2004), che ha consentito la creazione di una microfiliera per la produzione di energia termica a biomasse legnose (Verani e Sperandio, 2006).

Per valutare gli aspetti energetici e gli effetti ambientali della filiera energetica proposta è stata scelta la metodologia LCA (*Life Cycle Assessment*).

L'applicazione della metodologia LCA nel presente studio ha avuto come obiettivi:

- analizzare in dettaglio gli aspetti specifici della microfiliera a biomasse legnose al fine di verificarne la sostenibilità da un punto di vista energetico, ambientale e sociale;
- confrontare mediante l'utilizzo del software GEMIS i risultati ottenuti dalla precedente analisi con quelli forniti da una fonte energetica più tradizionale e competitiva: il GPL.

IL CASO STUDIO: DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA E DEGLI OBIETTIVI

Dall'indagine attraverso la metodologia LCA si sono definiti i confini di sistema valutando i flussi di materiali ed energia del processo principale per due diverse filiere energetiche, allo scopo di poter effettuare un confronto fra di esse da un punto di vista di sostenibilità ambientale.

Come già descritto precedentemente le due filiere energetiche poste a confronto e messe sotto analisi sono state quella sminuzzato-energia e quella GPL-energia.

È possibile delineare i processi principali che verranno considerati nell'analisi del ciclo di vita della produzione di acqua calda sanitaria e/o per riscaldamento. Tali processi sono stati delineati per mezzo del metodo IDEF (*Integration Definition for Function modeling*) (figura 7), che consente di descrivere processi anche molto complessi mediante la logica dell'analisi

per attività. Il ciclo di vita di un prodotto o di un processo viene scomposto in un insieme di attività collegate tra loro.

Le due filiere energetiche oggetto di studio precedentemente definite, pur fornendo lo stesso output, ovvero acqua calda, usano come fonte energetica input diversi, ovvero legno e GPL.

Per raggiungere tale obiettivo in GEMIS è stato creato uno scenario nel quale confrontare i 2 processi.

Prima di interrogare il programma per l'ottenimento dei risultati è stato inserito il consumo energetico annuo delle 2 tipologie di impianto pari a 279.000 kWh, ovvero il consumo medio annuo rilevato nell'Istituto.

Essendo l'obiettivo finalizzato a valutare l'impatto energetico-ambientale delle 2 filiere, è stato deciso di analizzare i seguenti output:

- gas serra, in termini di CO₂ equivalente;
- emissioni atmosferiche, in termini di SO₂ equivalente, NO_x, HCl e particolato;
- rifiuti solidi, in termini di ceneri;
- bilanci cumulati di energia (CER) e di massa (CMR).



Fig. 6: Diagramma IDEF0 per filiere energetiche.

E' stata fissata quale unità funzionale 1 kWh, essendo l'"acqua calda" il prodotto da considerare quale output delle 2 diverse filiere energetiche.

Definiti i confini del sistema e confrontando la filiera Legno - Energia dell'azienda oggetto di studio con le svariate filiere presenti nel database di GEMIS è stato possibile individuare alcuni processi analoghi facilmente adattabili e/o modificabili. In particolare, è stato identificato un processo che a partire da biomassa legnosa permette, tramite combustione di cippato in una caldaia della potenza inferiore ad 1 MW (0,232 MW), di ottenere fornitura di acqua calda sanitaria e/o riscaldamento residenziale.

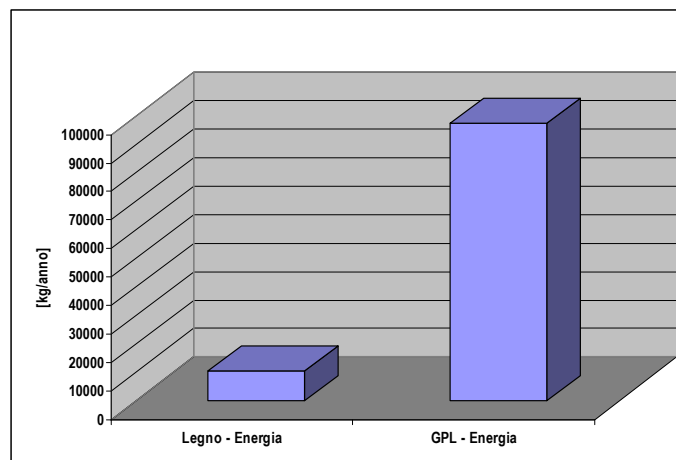
In tale filiera sulla catena principale sono inseriti due sottoprocessi: l'uso di combustibile fossile impiegato nelle macchine agricole e nei mezzi di trasporto; l'uso di energia elettrica

adoperata per il funzionamento dell'impianto di riscaldamento. Questi sottoprocessi, definibili di secondo grado, dispongono di una filiera propria che a loro volta si compone di altri sottoprocessi.

CO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE

I valori di CO₂ equivalente sono rappresentati nel grafico 1 per le due diverse filiere. Da una prima analisi appare evidente che la colonna della filiera Legno - Energia è notevolmente inferiore rispetto a quella dell'altro processo.

Ciò è essenzialmente dovuto a due motivi: il primo è che la CO₂ generata dalla combustione è considerata completamente rinnovabile e pertanto nel grafico viene completamente trascurata; il secondo è che la filiera richiede un ridotto coinvolgimento di *input* "industriali" a causa della diversa tipologia di combustibile (per esempio mancano completamente le fasi di raffinazione).

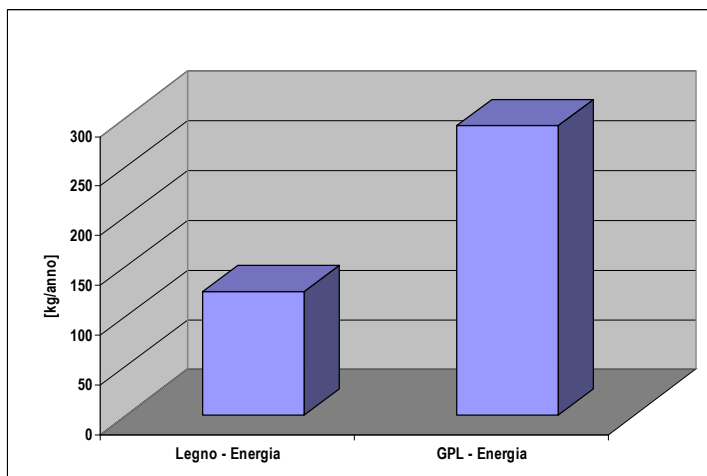


Graf. 1: CO₂ equivalente nelle filiere Legno-Energia e GPL-Energia.

SO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE

Come nel caso della CO₂ equivalente per poter valutare le emissioni provocate dai due sistemi di riscaldamento non è sufficiente esaminare la sola combustione. Il gas, GPL, utilizzato nella filiera tradizionale, subisce infatti, successive raffinazioni industriali; in particolare per essere utilizzato come combustibile viene depurato dal biossido di zolfo. Tale desolforazione ha un

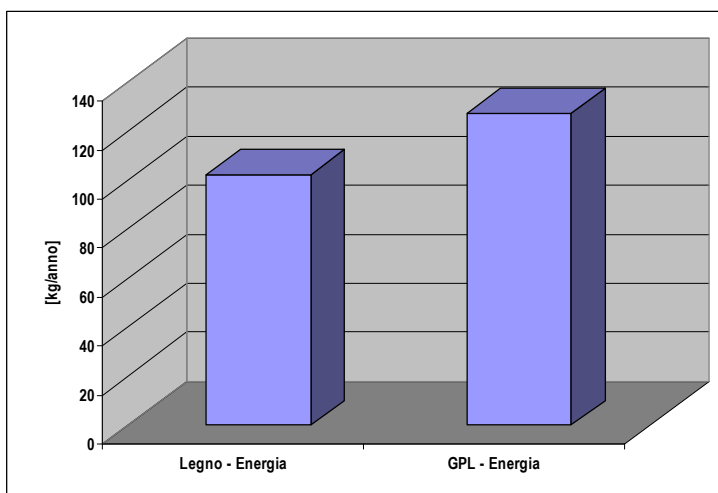
peso ambientale consistente sulle emissioni totali dell'intera filiera. I risultati ottenuti dalle elaborazioni sono rappresentati nel grafico 2.



Graf. 2: SO₂ equivalente per le filiere Legno - Energia e GPL - Energia.

NO_x EMESSI DALLE FILIERE ENERGETICHE

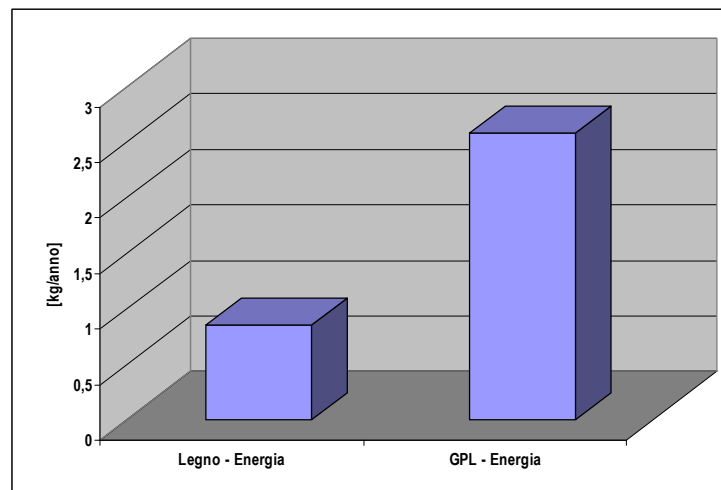
Gli NO_x risultano dalla somma pesata del monossido di azoto (NO) e del biossido di azoto (NO₂). La valutazione nei due processi ha dato come risultati i valori rappresentati nel grafico 3.



Graf. 3: NO_x nelle filiere Legno - Energia e GPL - Energia

HCL EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE

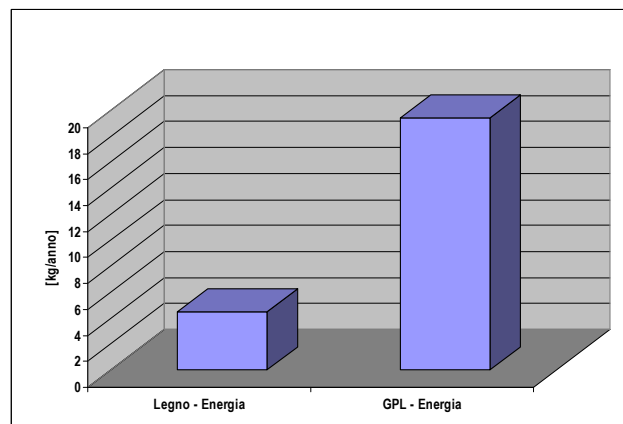
Le emissioni di HCl, sono rappresentate nel grafico 4. Il grafico dimostra che la filiera che contribuisce in maniera più significativa alle emissioni di HCl è quella del GPL. Il risultato, non molto prevedibile (a giudicare dalla composizione chimica dei due combustibili), deriva principalmente dalla bassa incidenza che ha il trasporto su questa tipologia di filiera.



Graf. 4: HCl nelle filiere Legno - Energia e GPL - Energia.

PARTICOLATO EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE

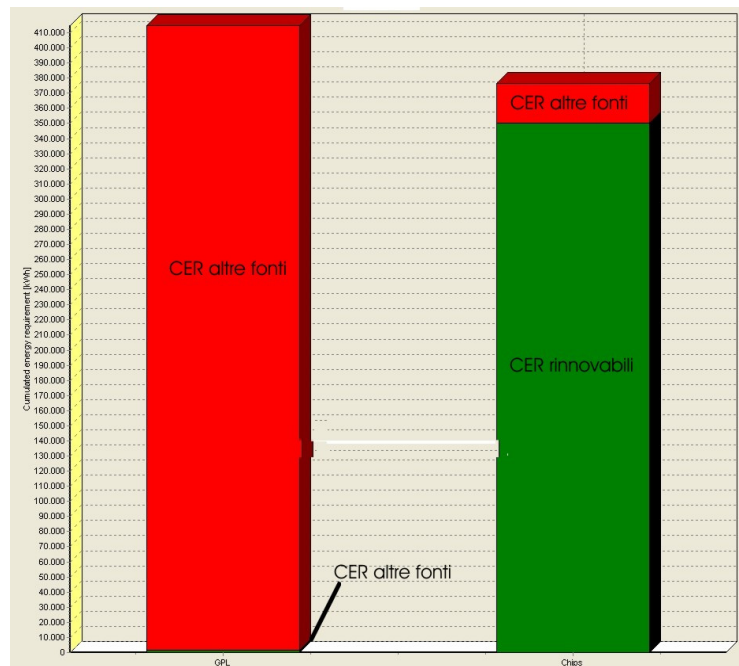
Il particolato può essere costituito da ceneri, polveri, fuliggine, sostanze silicee di varia natura, sostanze vegetali, sabbia, composti metallici, elementi come il carbonio o il piombo, etc. Lo studio svolto per le filiera ha fornito i risultati rappresentati nel grafico 5.



Graf. 5: Particolato nelle filiere Legno - Energia e GPL - Energia.

CUMULATED ENERGY REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE

Il parametro CER stima la quantità di risorse di energia primaria utilizzate lungo tutta la filiera per fornire energia termica. In particolare, nel grafico 6 vengono riportati i valori di CER, espressi come kWh di energia primaria di *input*, relativamente alle 2 filiere energetiche per la produzione annua di 279.000 kWh di energia termica, ovvero il quantitativo richiesto complessivamente dall'azienda oggetto di studio. Nel grafico viene comunque fatta una distinzione fra energie primarie rinnovabili e non.



Graf. 6: Stima del parametro CER per le diverse filiere energetiche.

CUMULATED MATERIAL REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE

Il parametro CMR stima la quantità di materiali utilizzati lungo tutta la filiera per fornire energia termica come si vede nel grafico 7.



Graf. 7: Stima del parametro CMR per le diverse filiere energetiche.

ALTRI RISULTATI

GEMIS permette di ottenere anche altri risultati utili al fine dello studio dell'impatto dell'intera filiera, oltre ai principali fattori analizzati nei precedenti paragrafi. La tabella 8 evidenzia le emissioni aeree, oltre che dei principali gas serra, anche di altri gas presenti nelle due filiere.

È stato possibile anche ottenere risultati riguardanti i rifiuti solidi, e gli effluenti liquidi prodotti dalle due filiere come riportato nelle tabelle 9 e 10. La filiera Legno – Energia mostra valori più bassi riguardanti la produzione di ceneri, la desolforazione dei fumi e la produzione di fanghi di depurazione anche se la produzione di rifiuti solidi è notevolmente più elevata rispetto alla filiera GPL – Energia.

Tab. 8: Emissioni aeree delle filiere espresse in kg.

	T00P equivalente	SO ₂ equivalente	SO ₂	NO _x	HCL	HF	PARTICOLATO	CO	NMVOC
GPL	188.64	291.41	200.05	127.36	2.58	0.26	19.38	31.25	28.43
Legno	194.70	124.57	30.94	102.39	0.85	0.008	4.46	527.09	11.54
	H ₂ S	NH ₃	As (air)	Cd (air)	Cr (air)	Hg (air)	Ni (air)	PAH (air)	Pb (air)
GPL	2.9x10 ⁻⁷	4.3x10 ⁻⁴	6.8x10 ⁻⁶	5.12x10 ⁻⁶	3.12x10 ⁻⁵	7.9x10 ⁻⁶	5.17x10 ⁻⁵	2.13x10 ⁻⁹	2x10 ⁻⁴
Legno	0.017	11.45	5.2x10 ⁻⁵	1.9x10 ⁻⁵	4.9x10 ⁻⁵	4.9x10 ⁻⁵	2.9x10 ⁻⁵	5.4x10 ⁻⁵	1.8x10 ⁻⁴

Tab. 9: Rifiuti solidi delle filiere espressi in kg.

	Ceneri	Desolforazione dei fumi	Fanghi di depurazione	Produzione di rifiuti	Scarti	Rifiuti combustibili nucleari
GPL	983,02	160,11	0,28	46,83	31.843	2,6 x 10 ⁻³
Legno	257,83	59,88	0,097	12.962	22.701	6,4 x 10 ⁻⁴

Tab. 10: Effluenti liquidi delle filiere espressi in kg

	P	N	AOX	COD	BOD5	Sali inorganici
GPL	3 x 10 ⁻⁶	1,9 x 10 ⁻⁴	1 x 10 ⁻⁶	3,23	0,09	0,005
Legno	1,8 x 10 ⁻⁵	1,7 x 10 ⁻³	7 x 10 ⁻⁶	0,52	0,02	2.748

Nella tabella 11 sono evidenziati i residui di entrambi i processi, evidenziando i valori più bassi della filiera Legno – Energia per quanto riguarda i rottami di ferro non rinnovabili, i minerali non rinnovabili, il petrolio e valori più elevati per quanto riguarda l’acqua rinnovabile. La filiera GPL – Energia mostra un valore più elevato di aria rinnovabile rispetto all’altra filiera.

Tab. 11: Residui del processo delle filiere espressi in kg.

	Totale	Aria rinnovabile	Rottami di ferro non	Altri rottami	Minerali Non rinnovabili	Gas naturale	Altri rottami NF	Petrolio non rinnovabile	Minerali non rinnovabili	Altre materie prime	Acqua rinnovabile
GPL	29.299	5,73	49,86	27,99	410,85	0,031	0,20	0,27	115,74	0,13	28.688
Legno	42.364	0,96	0	5,96	4.533	1,59	0,002	0,09	18,32	0,009	37.804

L'uso del suolo nelle due filiere mette in evidenza una sostanziale differenza, espressa in m², nel territorio utilizzato. La filiera GPL – Energia ha un valore nettamente inferiore rispetto alla filiera Legno – Energia come si può vedere nella tabella 12.

Tab. 12: Uso del suolo delle filiere espresso in m².

	Totale
GPL	170,36
Legno	68.690,00

La filiera GPL – Energia presenta costi nettamente più elevati rispetto all'altra filiera come riportato nella tabella 13.

Tab. 13: Costi annui di gestione delle filiere.

	Costi totali [€]
GPL	50.387
Legno	16.467

PRIME CONSIDERAZIONI

Una prima considerazione ha riguardato le emissioni atmosferiche relative alla sola combustione finale delle 2 diverse tipologie di filiera energetica. Da un punto di vista

normativo deve essere fatto riferimento al D.L. 152/2006 “Norme in materia ambientale”, nel quale vengono stabiliti i limiti di emissione in atmosfera per gli impianti termici ad uso sia civile sia industriale, come riportato in tabella 10 per una potenza installata di 232 kW.

Tab. 14: limiti che devono rispettare gli impianti che utilizzano biomasse, riferiti ad un’ora di funzionamento dell’impianto nelle condizioni di esercizio più gravose, esclusi i periodi di avviamento arresto e guasti. Il tenore di ossigeno di riferimento è pari all’11% in volume nell’effluente gassoso anidro. I valori limite sono riferiti al volume di effluente gassoso secco rapportato alle condizioni normali.

Potenza termica nominale dell’impianto (MW)	[1] >0.15 - < 1
Polveri totali	100 mg/Nm ³
Carbonio organico totale (COT)	-
Monossido di carbonio (CO)	350 mg/Nm ³
Ossidi di azoto espressi come (NO ₂)	500 mg/Nm ³
Ossidi di zolfo espressi come (SO ₂)	200 mg/Nm ³
[1] agli impianti di potenza termica nominale pari o inferiore 35 kW si applica un valore limite di emissione per le polveri totali di 200 mg/Nm ³ .	

Pertanto, sono state rilevate e stimate le emissioni relativamente alle 2 filiere energetiche. I risultati sono illustrati nelle tabelle 15 e 16 ed evidenziano i seguenti aspetti:

- La combustione del legno causa un'emissione in atmosfera di particolato di gran lunga superiore ai limiti normativi (1.200 mg/Nm³ della filiera contro i 100 della normativa). Tuttavia è evidente come tale problematica sia efficacemente risolvibile adottando un ciclone depolveratore come previsto nel caso oggetto di studio (abbattimento del 92%).
- I valori di CO riscontrati solo per la combustione in caldaia per la filiera Legno – Energia sono di poco inferiori ai limiti normativi (215 mg/Nm³ contro 350 mg/Nm³) cosa diversa per la filiera GPL – Energia, che invece rimane notevolmente al di sotto di tale limite (18 mg/Nm³).
- Per quanto riguarda le emissioni di NO_x è possibile notare come si rimane al di sotto del limite normativo per entrambe le filiere (140 mg/Nm³ per la filiera Legno – Energia

e 92 mg/Nm³ per la filiera GPL – Energia, in opposizione ai 500 mg/Nm³ della normativa).

- Emissioni non molto significative di SO₂ (44 mg/Nm³) vengono riscontrate soltanto per il legno, visto che il GPL subisce processi di desolforazione in fase di raffinazione.

Tab. 15: Emissioni atmosferiche relative alla sola combustione nella caldaia a cippato.

Emissioni atmosferiche	Senza depurazione	Con depurazione	Unità di misura
Particolato	1.200	96	mg/Nm ³
CO	215	215	mg/Nm ³
NO _x	140	140	mg/Nm ³
SO ₂	44	44	mg/Nm ³

Tab. 16: Emissioni atmosferiche relative alla sola combustione nella caldaia a GPL.

Emissioni atmosferiche	Valore	Unità di misura
Particolato	0,5	mg/Nm ³
CO	18	mg/Nm ³
NO _x	92	mg/Nm ³
SO ₂	-	mg/Nm ³

Invece, per quanto riguarda il bilancio ambientale delle intere filiere energetiche, ovvero i risultati della LCA riportati nel precedente paragrafo, oltre a sottolineare come la filiera Legno - Energia risulti classificabile quasi come una filiera ad emissioni nulle di gas ad effetto serra, è possibile affermare che:

- la filiera Legno - Energia presenta le emissioni di SO₂ equivalente più basse (124,57 kg/anno contro 291,41 della filiera GPL – Energia);
- la filiera Legno - Energia presenta le emissioni di NO_x più basse (102,4 kg/anno contro 127,36 kg/anno della filiera GPL – Energia);
- la filiera Legno - Energia presenta le emissioni di HCl più basse (0,852 kg/anno contro 2,58 kg/anno);
- la filiera Legno - Energia presenta emissioni di particolato nettamente inferiori a quelle della filiera GPL - Energia (4,46 kg/anno contro 19,38 kg/anno);

- la filiera Legno - Energia presenta produzione di ceneri più basse (257,83 kg contro 983,02 kg);
- la filiera Legno - Energia presenta un valore di CER abbastanza elevato, ma le energie primarie coinvolte sono quasi esclusivamente rinnovabili;
- la filiera Legno - Energia presenta il valore di CMR alto, anche questa volta in gran parte imputabile agli ingenti quantitativi di materiale rinnovabile coinvolto nella filiera.
- la filiera GPL - Energia presenta costi più elevati rispetto alla filiera Legno – Energia inoltre quest’ultima ha benefici più alti per quanto riguarda gli effetti diretti ed indiretti sull’occupazione.

IL PERCHÉ DELL’ABBANDONO DELL’IDEA PROGETTUALE

In corso d’opera si è deciso di abbandonare le ricerche presso l’Unità di Ricerca per l’Ingegneria Agraria (CRA-ING) di Monterotondo (RM), poiché l’ente ha deciso di cambiare la caldaia modificando la tipologia di impianto, passando da una caldaia che produceva solo energia termica, a una caldaia per la cogenerazione per la produzione di energia sia termica sia elettrica. Il cambio della caldaia avrebbe comportato sia una modificazione degli obiettivi iniziali, cioè lo studio di impianti di medio piccola scala per la sola conversione termotecnica delle biomasse agro forestali, sia un notevole ritardo sulla tempistica non permettendomi di continuare oltre nell’analisi dell’impianto.

L’IMPIEGO DI SIMAPRO

Allo scopo di effettuare un confronto, inizialmente si è optato di impiegare oltre GEMIS il software SIMAPRO 6.0.

Quest’ultimo in particolare è un software completamente a pagamento a differenza di GEMIS. Le realtà iniziate a studiare e messe subito a confronto fra i due “software” e “database” hanno riguardato i dati della microfiliera termica di autoconsumo del CRA-ING di Monterotondo e quelli riguardanti il caso di studio “tipologia piccola”.

IL PERCHÉ DELL'ABBANDONO DELL'IDEA PROGETTUALE

Nel corso della prima sessione di inserimento dati e prova del sistema e degli scenari ipotizzati si sono riscontrati subito le prime problematiche operative.

Entrambi i software contengono una banca dati di riferimento, modificabile secondo necessità, comprendente i dati più frequentemente richiesti sui materiali, sui processi di produzione, sulla generazione di energia, sulla distribuzione e sullo smaltimento dei prodotti. Scelto/definito il prodotto i software sono in grado di calcolare il suo impatto ambientale durante il ciclo di vita del prodotto in ogni sua fase.

Si è deciso di non impiegare tale software poiché dopo avere effettuato le prime prove, sono state riscontrate problematiche e lacune per impianti di piccola taglia come quelli oggetto della tesi, la banca dati è risultata poco plasmabile e adattabile alla realtà italiana rendendo necessarie troppe forzature, tanto più pesanti quanto più si trattasse di realtà operative di medio piccola scala.

IL SECONDO CASO DI STUDIO “TIPOLOGIA PICCOLA”

SUPERFICI

Le fonti ligneo-cellulosiche utilizzate come combustibile nell'impianto di teleriscaldamento provengono da potature e ramaglie di vite e da margini boscati di scarpate o fossi in tabella 17 vengono in dettaglio riportate le superfici rilevate dalle mappe catastali, alle quali successivamente è seguito rilievo con GPS per verificarne eventuali incongruenze dovute principalmente a fenomeni di espansione o diminuzione delle zone incolte.

Tab. 17: superfici aziendali disponibili per il mantenimento della filiera

	Catastale	Rilevata
Superficie coltivata a vigneto	10 ha	9,9 ha
Superficie con boschi cedui a prevalenza robinia	5 ha	5,6 ha

QUANTIFICAZIONE DELLA BIOMASSA LEGNOSA

VIGNETO

Dopo aver effettuato i rilievi in campo su 20 aree di saggio distribuite uniformemente sulla superficie della particella oggetto dell' intervento si è passati all'elaborazione dei dati ricavati. La massa rilevata nelle 20 aree di saggio è stata rapportata all'unità di superficie di riferimento (ha).

Tab. 18: massa di residui di potatura del vigneto, statistiche descrittive, in questo caso riferita alla superficie dell'area di saggio 400 m²)

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Osservazioni valide	[n°]	20
Media	[t]	0,07
Minimo		0,05
Massimo		0,12
Varianza		0,01
Deviazione standard		0,1
Errore standard		0,02

A questo punto sono stati ripresi i dati registrati in campo e uniti assieme a quelli di laboratorio ci hanno permesso di eseguire un'analisi generale del popolamento soffermando molto la nostra attenzione su masse disponibili nell'unità di superficie.

Tab. 19: parametri di massa dei residui di potatura.

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Età media dell'impianto	[anni]	5
Densità di impianto	[n°piante/ha]	2200
Massa media a pianta a umidità del 43%	[kg/pianta]	0,82
Massa media a pianta anidra	[kg/pianta]	0,45
Massa ad umidità del 43%	[t/ha]	1,8
Massa anidra	[t/ha]	1,0

BOSCO CEDUO A PREVALENZA DI ROBINIA

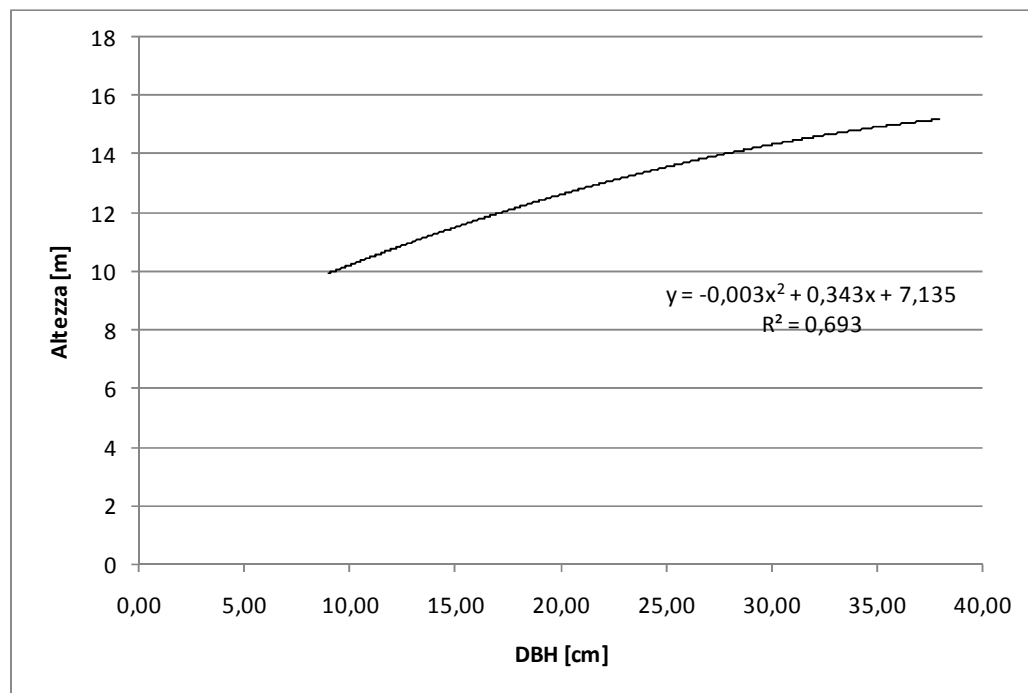
Dopo aver effettuato i rilievi in campo su 20 aree di saggio distribuite uniformemente sulla superficie della particella oggetto dell' intervento si è passati all'elaborazione dei dati ricavati.

Dall'analisi della varianza ad una via completamente randomizzata, non emergono differenze tra le medie dei diametri per le 20 aree di saggio.

Dopo aver analizzato statisticamente il popolamento sotto il punto di vista della distribuzione delle piante nelle varie classi diametriche si è passati ad analizzare le relazioni che intercorrono tra diametro ed altezza costruendo la curva ipsometrica del popolamento.

Tab. 20: diametro a petto d'uomo (DBH) (a 1,30 m dal suolo) delle piante in piedi, statistiche descrittive

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Osservazioni valide	[n°]	695
Media	[cm]	15,5
Minimo		5,0
Massimo		39,0
Varianza		2,4
Deviazione standard		1,6
Errore standard		0,3



Graf. 8: curva ipsometrica del popolamento

Una volta costruita la curva si è indagato circa il grado di correlazione che intercorre tra le due variabili (diametro a petto d'uomo [X] e altezza [Y]). L'indagine è stata effettuata con l'ausilio di due differenti metodologie:

- la prima matematica, R^2 , ricavata direttamente da Excel in base all'equazione della curva ricavata che mostra correlazione una media tra le variabili dato che R^2 assume valori compresi tra 0 e 1e nel nostro caso è pari a 0,693;
- la seconda prettamente statistica e basata sul coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman.

Nel nostro caso il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman assume un valore di 0,71 possiamo quindi affermare che esiste una discreta correlazione positiva tra le due variabili. Quindi la curva ipsometrica costruita che sarà impiegata per la cubatura del soprassuolo risulta comprovata da una buona significatività statistica e matematica.

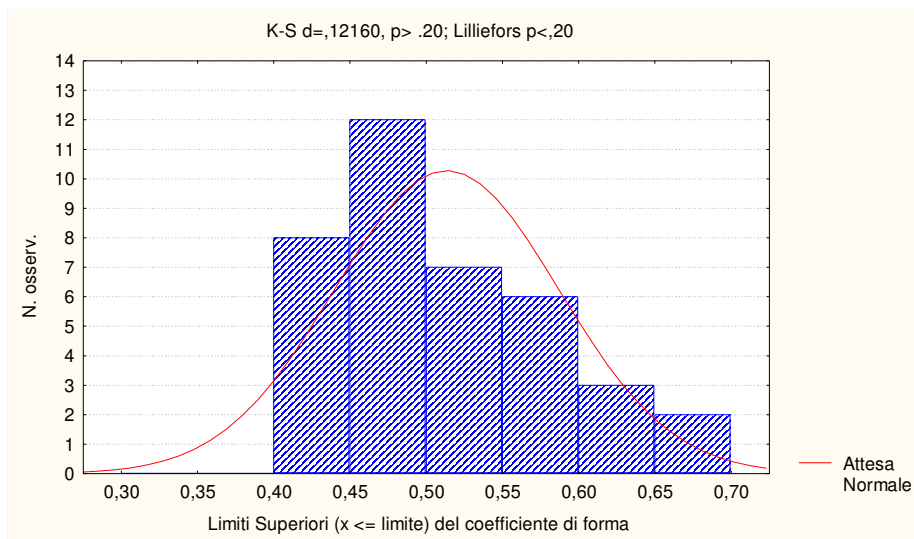
Dopo aver costruito la curva ipsometrica e analizzate le correlazioni dall'elaborazione dei dati rilevati su 40 alberi modello si è analizzato statisticamente il valore del coefficiente di forma (o coefficiente di rastremazione). In particolare è stata valutata la distribuzione del campione raccolto con test di Lilliefors. I risultati del test mostrano come il valore D calcolato, pari a 0,12160, è inferiore al valore tabulato con $\alpha = 0,15$ e quindi non è possibile rifiutare l'ipotesi nulla. Inoltre, poiché la probabilità α è inferiore a 0,20 ma maggiore di 0,15, è possibile affermare che lo scostamento della distribuzione campionaria da quella normale, con stessa media e stessa varianza, è parzialmente trascurabile.

Tab. 21: correlazione statistica tra le variabili DBH e altezza, applicando il test di Spearman

	<i>N. osservazioni valide</i>	<i>R di Spearman</i>	<i>p-level</i>
DBH & Altezza	50	0,71	0,0002

Tab. 22: statistiche descrittive del coefficiente di forma

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Osservazioni valide	[n°]	38
Media	Adimensionale	0,555
Minimo		0,410
Massimo		0,690
Varianza		0,005
Deviazione standard		0,074
Errore standard		0,012



Graf. 9: test di Lilliefors sui dati del coefficiente di forma

A questo punto sono stati ripresi i dati registrati in campo e uniti assieme a quelli di laboratorio ci hanno permesso di eseguire un'analisi generale del popolamento soffermando molto la nostra attenzione su cubature, incrementi e masse del legname presente.

Tab. 23: parametri dendroauxometrici del popolamento.

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Età media del popolamento	[anni]	10
Densità del popolamento	[n°polloni/ha]	495
DBH	[cm]	15,5
Altezza media	[m]	13,9
Volume medio a pianta	[m ³ /pianta]	0,144
Massa media a pianta a umidità del 41%	[t/pianta]	0,121
Massa media a pianta anidra	[t/pianta]	0,099
Massa ad umidità del 41%	[t/ha]	60
Massa anidra	[t/ha]	38
Incremento medio annuo	[t _{s.f.} ha ⁻¹ anno ⁻¹]	6,0
Incremento medio annuo	[t _{s.s.} ha ⁻¹ anno ⁻¹]	3,8

MASSA VOLUMICA E UMIDITÀ

I valori che sono stati analizzati sono quelli di:

MVF, massa volumica allo stato (UNI ISO 3131, 1985);

MVA, massa volumica allo stato anidro (UNI ISO 3131, 1985);

U%, percentuale di umidità del legno calcolata riferita al peso secco (UNI EN 13183-1, 2003; UNI ISO 3130, 1985);

Tab. 24: statistiche descrittive dei dati dei parametri tecnologici della biomassa studiata proveniente dalla robinia. Analisi della varianza ad una via (19;280), * differenze statisticamente significative con $p < 0,05$.

PARAMETRO	MVF	MVA	U
UNITA' DI MISURA	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
Media	0,840	0,704	41,0%
Minimo	0,729	0,495	32,9%
Massimo	1,003	0,603	45,6%
Varianza	0,004	0,001	1,0%
Deviazione standard	0,062	0,038	10,2%
Errore standard	0,025	0,016	4,2%

Tab. 25: statistiche descrittive dei dati dei parametri tecnologici della biomassa studiata proveniente dai vigneti. Analisi della varianza ad una via (19;70), * differenze statisticamente significative con $p < 0,05$.

PARAMETRO	MVF	MVA	U
UNITA' DI MISURA	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
Media	0,133	0,101	43,0%*
Minimo	0,120	0,095	30,8%
Massimo	0,145	0,115	48,5%
Varianza	0,014	0,002	1,0%
Deviazione standard	0,118	0,044	1,0%
Errore standard	0,011	0,006	1,1%

Il legno sminuzzato proveniente dai residui di potatura e dai filari di robinia, si presenta con una umidità che è stata calcolata riferendosi alla massa anidra che appena superiore 40, quindi richiede un periodo di essiccazione naturale o artificiale prima dell'utilizzo finale.

CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA

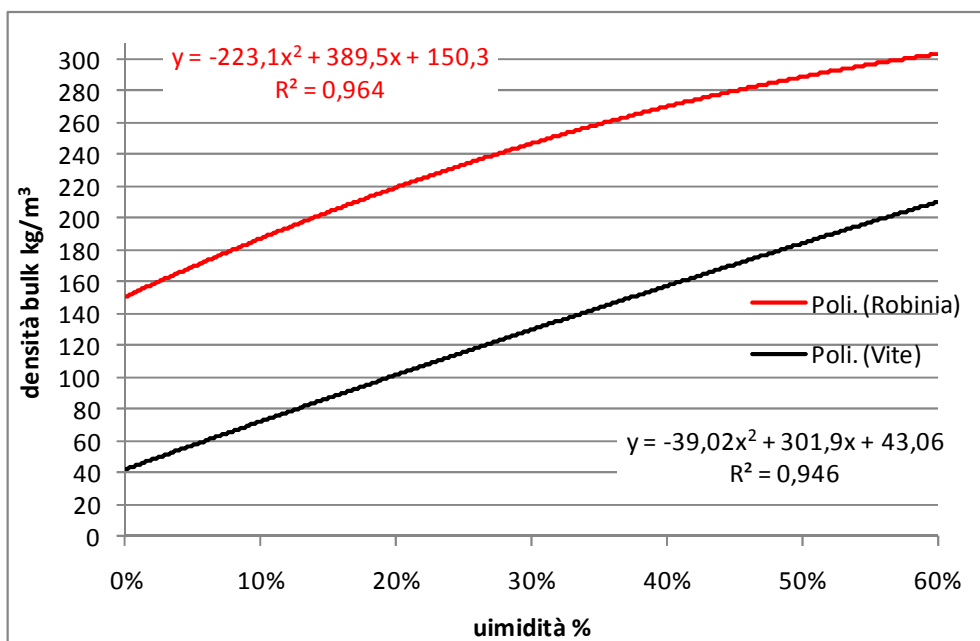
DENSITÀ BULK DELLO SMINUZZATO

La densità di bulk dello sminuzzato raccolto è un parametro che rappresenta il rapporto tra la massa ed il volume di un campione di sminuzzato non soggetto a compressione o assestamento di alcun genere. Sia la massa sia il volume sono sempre riferiti allo stesso contenuto di umidità. Valore espresso in kg/m^3 anche se è bene chiarire che si tratta di un volume sterico composto da spazi vuoti e pieni. Per quanto attiene la densità bulk al 30% di umidità media dei campioni studiati, questa è pari a 250.02 kg/m^3 per lo sminuzzato di robinia e 132.41 kg/m^3 per lo sminuzzato di sarmenti di vite. Questi dati sono stati raccolti su tre campioni per ogni area di saggio e su tali valori è stata condotta l'Anova ad una via e tale confronto non ha evidenziato differenze statisticamente significative, sia nel caso della robinia sia nel caso dei sarmenti di vite.

Tab. 26: valori medi di densità bulk al 30% di umidità e risultati ANOVA

	N Validi	Media	Minimo	Massimo	Varianza	Dev.Std.	Errore Standard	Anova
Robinia	60	250,02	210,50	265,00	29,73	5,45	1,06	(19;40), p>0,05
Vite	60	132,41	92,40	141,40	18,63	4,32	1,17	(19;40) p>0,05

Il parametro densità bulk è fortemente influenzato dall'umidità (u%), analizzando le curve riportate nel grafico 11 è chiaramente visibile come al variare dell'umidità (u%) la densità bulk abbia un andamento crescente, per validare anche statisticamente l'esistenza di questa correlazione è stata condotta un'analisi di correlazione non parametrica, che ha dimostrato il buon fitting con un valore del coefficiente r (rho) di Spearman, superiore a 0,75 in tutte le due correlazioni testate.



Graf. 10: correlazione che esprime l'andamento della densità bulk dello sminuzzato in funzione dell'umidità.

Tab. 27: correlazione statistica tra le variabili densità bulk e umidità (u%), applicando il test di Spearman

	Tipologia di sminuzzato	N. osservazioni valide	R di Spearman	p-level
den.bulk & u%	Robinia	60	0,82	0,0031
den.bulk & u%	Vite	60	0,75	0,0012

POTERE CALORIFICO

Il potere calorifico è stato determinato su campioni omogeneizzati, facendo uso della bomba calorimetrica di Berthelot-Mahler (Calorimetro Parr 6200). (Canagaratna & Witt 1988, ISCO 1991). Le prove sono state eseguite prelevando con criterio random, per ognuna delle due tipologie (robinia e vite) 5 campioni di 2 kg ciascuno da altrettanti cumuli di sminuzzato. Per ciascuno dei 5 campioni sono state fatte 3 pastiglie omogeneizzate per l'esecuzione delle prove calorimetriche. I dati ottenuti sono poi stati sottoposti ad Anova non parametrica (Kruskal Wallis test) ed in entrambi i casi non sono state evidenziate differenze statisticamente significative tra i 5 campioni.

Tab. 28: valori calorimetrici dei campioni di sminuzzato di robinia, KW 4;15.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
PCS	MJ/kg	20,8	1,2	0,512
PCI	MJ/kg	18,9	1,1	0,555

Tab. 29: valori calorimetrici dei campioni di sminuzzato di sarmenti di vite, KW 4;15.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
PCS	MJ/kg	19,4	1,6	0,081
PCI	MJ/kg	17,7	1,7	0,115

ANALISI ULTIMA E ANALISI PROSSIMA

Il contenuto di ceneri (analisi prossima) è stato rilevato impiegando il Furnace Nabertherm L9/11 (EN 14775,2009), mentre per le caratteristiche chimiche è stato utilizzato l'Helemental analyzer CHN 2000. Le prove sono state eseguite prelevando con criterio random, per ognuna delle due tipologie (robinia e vite) 5 campioni di 2 kg ciascuno da altrettanti cumuli di sminuzzato. Per ciascuno dei 5 campioni sono stati prelevati 2 campioni per l'esecuzione delle prove. I dati ottenuti sono poi stati sottoposti ad Anova non parametrica (Kruskal Wallis test) ed in entrambi i casi non sono state evidenziate differenze statisticamente significative tra i 5 campioni, eccezion fatta seppur limitatamente per lo zolfo nei campioni di robinia (p=0,049).

Tab. 30: valori dell'analisi ultima dei campioni di sminuzzato di robinia, KW 4;10.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
Ceneri	w/w db*	1,5	0,1	0,212
Carbonio	% w/w daf*	49,8	2,2	0,150
Idrogeno	% w/w daf*	6,65	1,4	0,089
Ossigeno	% w/w daf*	42,58	10,4	0,312
Azoto	% w/w daf*	0,81	0,03	0,056
Zolfo	% w/w daf*	0,032	0,004	0,049
Cloro	% w/w daf*	0,018	0,002	0,090
Fluoro	% w/w daf*	0,0006	0,00006	0,086
*w peso; daf sostanza secca senza ceneri; db sostanza secca con ceneri				

Tab. 31: valori dell'analisi ultima dei campioni di sminuzzato proveniente da sarmenti di vite, KW 4;10.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
Ceneri	w/w db*	2,2	0,2	0,152
Carbonio	% w/w daf*	49	3,2	0,101
Idrogeno	% w/w daf*	6	1,6	0,270
Ossigeno	% w/w daf*	44,2	9,2	0,116
Azoto	% w/w daf*	0,77	0,05	0,061
Zolfo	% w/w daf*	0,03	0,006	0,104
*w peso; daf sostanza secca senza ceneri; db sostanza secca con ceneri				

Le biomasse, principalmente, sono costituite da carbonio (C), ossigeno (O), idrogeno (H). la componente del biocombustibile, attraverso la cui ossidazione è liberato il suo contenuto energetico è il carbonio. L'idrogeno, invece, apporta al processo di ossidazione un ulteriore quantità di energia che, assieme a quella del carbonio, determina il potere calorifico inferiore del combustibile. L'ossigeno invece sostiene solo l'andamento del processo di ossidazione.

Invece gli elementi che hanno un effetto sul livello di emissione nocive prodotte dalla combustione, sono lo zolfo (S), l'azoto (N), il cloro (Cl) e il contenuto in ceneri. Per quanto riguarda questi elementi un loro maggior contenuto nel combustibile comporta una maggiore presenza nelle emissioni in atmosfera.

Il materiale oggetto di studio presenta buone potenzialità e una produzione di ceneri nella norma.

EMISSIONI GASSOSE DALL'UNITÀ TERMICA

Le emissioni sono state misurate attraverso un analizzatore di fumi. L'analizzatore fumi utilizzato dall'impianto è un ECOM J2KN, certificato per la misura dei gas di combustione ai sensi della Normativa Europea.

Sono stati misurati O₂, CO (NO, NO₂, SO₂ opzionali), temperatura del gas, temperatura dell'aria, pressione, ecc. Inoltre sono stati calcolati CO₂, CO con riferimento dell'ossigeno.

L'apparecchiatura è dotata di display su cui vengono visualizzati i risultati ottenuti e registrati in continua tutti i valore della combustione, è dotato di stampante per i risultati che vengono riportati in tabella 32

Tab. 32: valori di emissioni gassose rilevate all'uscita dell'unità termica.

Emissioni atmosferiche	Valore	Unità di misura
Ossigeno	3,1	%
Biossido di carbonio	11,1	%
CO ₂ eq	346×10^{-3}	kg/kWh
SO ₂ eq	$0,9 \times 10^{-3}$	kg/kWh
NO _x	$449,50 \times 10^{-6}$	kg/kWh
HCL	$9,11 \times 10^{-6}$	kg/kWh
Particolato	$66,12 \times 10^{-6}$	kg/kWh
CO	109×10^{-6}	kg/kWh
NMVOC	103×10^{-6}	kg/kWh
Ceneri volatili	$2,21 \times 10^{-3}$	kg/kWh

LOGISTICA DI APPROVVIGIONAMENTO TIPOLOGIA PICCOLA

Per quanto attiene i filari e piccoli boschetti a prevalenza di robinia, l'abbattimento è stato di tipo semimeccanico con l'ausilio di una motosega, per questa operazione sono stati impiegati due operai, uno addetto al taglio con la motosega ed uno in aiuto di quest'ultimo. Successivamente all'abbattimento le piante sono state parzialmente sezionate per facilitarne il carico su un trattore agricolo munito di rimorchio. Una volta caricate, le piante, sono state trasportate in un piazzale dove sono state accatastate in attesa di essere sminuzzate. Per la sminuzzatura. È stata utilizzata una sminuzzatrice alimentata dalla presa di forza e azionata da un trattore agricolo. Le scaglie tramite il convogliatore di scarico regolabile, venivano caricate direttamente su un rimorchio agricolo, che una volta pieno veniva trasportato fino al silo di stoccaggio dello sminuzzato.

Per quanto attiene al recupero del materiale legnoso prodotto dalle potature dei vigneti, appena effettuate le normali operazioni di potatura, i residui sono stati posizionati in andane. La successiva raccolta è stata effettuata usando una macchina rotoimballatrice, è stata scelta l'imballatura perché offre vantaggi estremamente importanti sulla movimentazione e sullo stoccaggio della biomassa. La movimentazione del residuo è facilitata poiché se ne diminuisce l'ingombro e lo si organizza in forme e dimensioni omogenee. Questo permette di sfruttare al

meglio la capacità di carico dei mezzi di trasporto. Inoltre, l'imballatura consente uno stoccaggio prolungato, perché le balle occupano meno spazio del residuo sciolto e non presentano i problemi di fermentazione tipici dello sminuzzato. Una volta terminata la fase di imballatura, le rotoballe sono state raccolte e stoccate sotto apposita tettoia in uso nell'azienda. La successiva sminuzzatura è stata effettuata nel momento in cui è necessaria per l'approvvigionamento della caldaia. Per questo tipo di lavoro sono stati impiegati due operatori. La sminuzzatrice utilizzata era alimentata dalla presa di forza e veniva azionata da un trattore agricolo. La sminuzzatura viene effettuata nei pressi del sito di stoccaggio, a poche centinaia di metri dal silo di alimentazione della caldaia.

Le strade interne all'azienda hanno una larghezza uguale o superiore a tre metri e venti, quindi i trasferimenti della biomassa vengono effettuati con un trattore agricolo di medie dimensioni con rimorchio in grado di trasportare 20 m³ di legno sminuzzato presso il silos per l'alimentazione della caldaia, posto nelle adiacenze della abitazione, che ha una capacità di 25 m³.

TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ FASCE BOSCADE DI ROBINIA

Il rilievo dei tempi di lavoro è stato eseguito per tutte le operazioni seguendo una specifica operazione di lavoro in ogni giornata di rilievo.

ABBATTIMENTO E ALLESTIMENTO

Per quel che riguarda l'abbattimento sono stati rilevati i seguenti tempi di lavoro effettivo:

- Tempo di spostamento;
- Tempo di pulizia;
- Tempo di abbattimento;
- Tempo di allestimento.

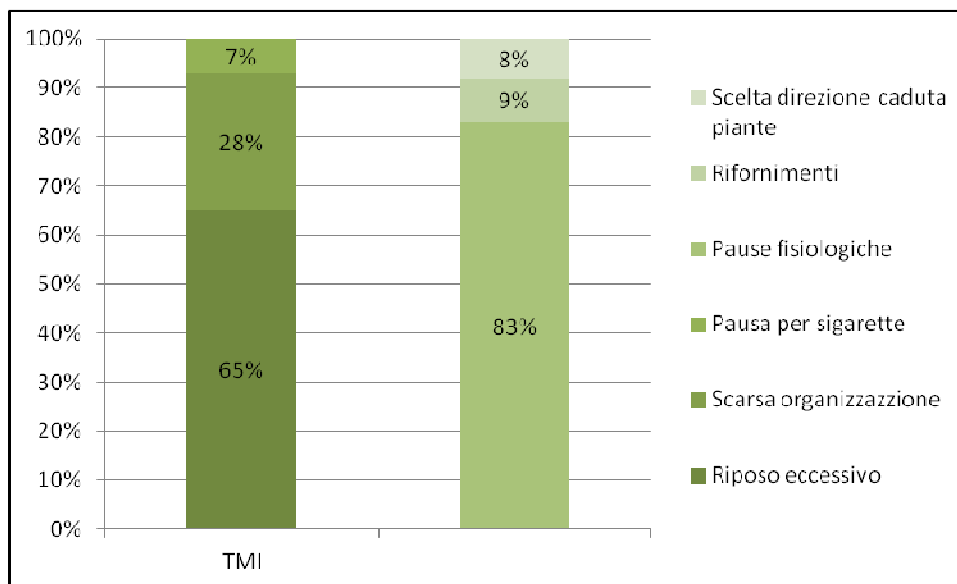
Oltre a queste tipologie sono stati registrati anche i tempi morti evitabili e i tempi morti inevitabili. I rilievi si sono concentrati in due giornate lavorative.

Tab. 33: tempi di lavoro abbattimento e allestimento (media $\pm$ deviazione standard)

Descrizione	Unità di misura	Valore
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Piante	[n°]	108
Tempo medio di spostamento	[min $\pm$ DS]	0,3 $\pm$ 0,29
Tempo medio di pulizia		0,2 $\pm$ 0,14
Tempo medio di abbattimento		0,49 $\pm$ 0,36
Tempo medio di allestimento		1,02 $\pm$ 0,51
Tempo morto evitabile		108,86
Tempo morto inevitabile		91,02
Tempi totale netto		102,25
Tempo totale lordo		302,13

Possiamo osservare come, prevedibilmente, il tempo medio di allestimento sia, superiore agli altri.

Oltre al calcolo è stato costruito un grafico a torta che rappresenta le percentuali dei tempi di lavoro effettivi, nonché la composizione analitica dei tempi morti rilevati.



Graf. 11: distribuzione percentuale dei tempi morti durante l'abbattimento ed allestimento

I tempi morti inevitabili sono composti in gran parte da pause fisiologiche (83%) ma anche da rifornimenti necessari ai mezzi e da altri fattori di carattere decisionale per l'attuazione di un corretto abbattimento direzionato, al fine di favorire il successivo concentramento ed esbosco.

Osservando in un ottica percentuale i valori dei tempi morti si è calcolato che i tempi morti inevitabili (TMI) risultano incidere per il 30% sul tempo totale lordo, mentre i tempi morti evitabili (TME) incidono su quest'ultimo per il 36%.

I valori riscontrati denotano un ampio margine di miglioramento dovuto in gran parte agli elevati tempi morti evitabili registrati. Nonostante ciò i valori di produttività sono elevati, questo è però fortemente influenzato da una forte intensità di taglio e dal volume unitario delle piante abbattute.

Tab. 34: produttività dell'operazione di abbattimento ed allestimento

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,555
	[t _{u41%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,3
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,1
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	4,574
	[t _{u41%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	3,8
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	3,2

CONCENTRAMENTO-ESBOSCO

Per quanto riguarda il loro rilievo, i tempi di questa operazione di lavoro sono stati così suddivisi:

- Tempo medio di carico con braccio idraulico;
- Tempo medio di spostamento con trattore e rimorchio;
- Tempo medio di scarico con ribaltabile;
- Tempo medio di ritorno scarico.

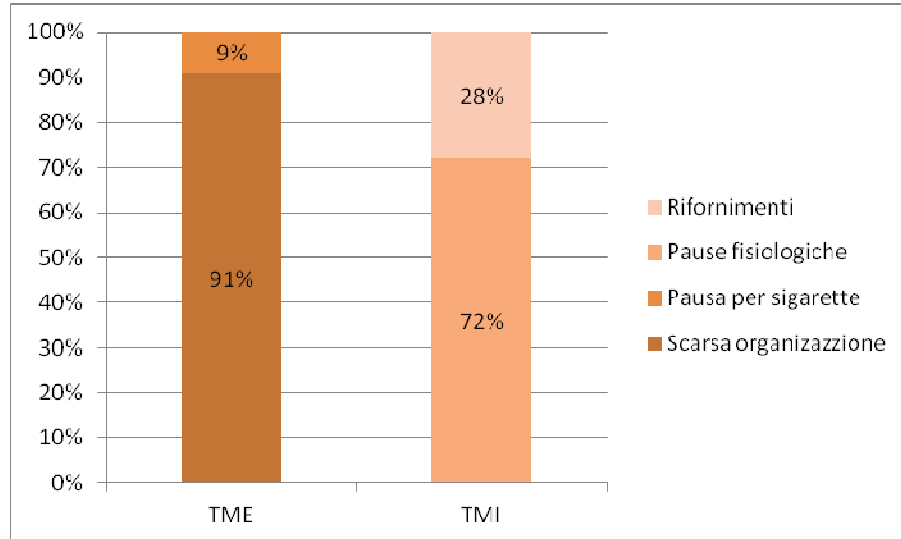
Oltre a queste tipologie sono stati registrati anche i tempi morti evitabili e i tempi morti inevitabili e anche alcuni parametri necessari per lo svolgimento delle analisi (distanza media viaggio carico, distanza media di viaggio scarico e media delle piante a carico).

Le operazioni sono state condotte da una squadra di due operai munita di trattore e rimorchio forestale con gru idraulica. La registrazione dei tempi è avvenuta durante otto giornate lavorative.

Tab. 35: tempi di lavoro concentramento ed esbosco (media $\pm$ deviazione standard)

Descrizione	Unità di misura	Valore
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Piante totali	[n°]	293
Tempo medio di carico con braccio idraulico	[min]	12,31 $\pm$ 1,47
Tempo medio di spostamento con trattore e rimorchio		12,41 $\pm$ 1,08
Tempo medio di scarico con ribaltabile		2,35 $\pm$ 0,58
Tempo medio di ritorno scarico		7,87 $\pm$ 0,29
Distanza media di viaggio carico	m	1100,4 $\pm$ 105,16
Distanza media di viaggio scarico		984,4 $\pm$ 90,01
Media piante ogni carico	[n°]	14 $\pm$ 3,1
Tempo morto evitabile	[min]	228
Tempo morto inevitabile		375
Tempi totale netto		738
Tempo totale lordo		1341

Oltre allo studio della composizione dei tempi effettivi è stata studiata anche la composizione delle due tipologie di tempi morti: tempi morti evitabili (TME) e tempi morti inevitabili (TMI). A tal fine è stato prodotto un grafico in cui si evince la suddivisione della totalità di tali tempi in base alle motivazioni che li hanno provocati.



Graf. 12: distribuzione percentuale dei tempi morti durante il concentramento ed esbosco

Nella composizione dei tempi morti inevitabili abbiamo 72% pause fisiologiche, 22% rifornimenti.

Mentre nella composizione dei tempi morti evitabili, abbiamo un 91% dovuto a scarsa organizzazione e un 9% ad eccessive pause per le sigarette.

La produttività rilevata presenta margini di miglioramento dovuti ai tempi morti ma nel complesso non è possibile raggiungere valori molto al di sopra di quelli riscontrati in quanto la densità del soprassuolo e l'orografia non permettono performance ragguardevoli, fermi restando sicurezza e salvaguardia del soprassuolo.

Tab. 36: produttività dell'operazione di concentramento ed esbosco

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,944
	[t _{u41%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,793
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,662
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,715
	[t _{u41%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,441
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,203

SMINUZZATURA

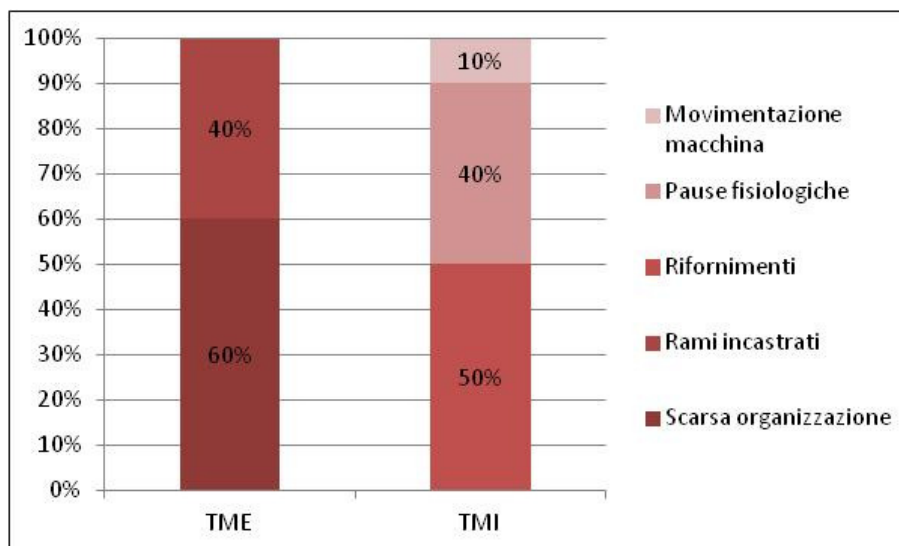
Questa operazione è stata effettuata da due operatori, uno specializzato ed uno generico; il primo ha lavorato al comando della sminuzzatrice mentre il secondo era il vero addetto al carico delle piante nella bocca della sminuzzatrice.

L'operazione è stata effettuata con l'ausilio di una sminuzzatrice Pezzolato 880/250 azionata da trattore con potenza di 70 kW.

Tab. 37: tempi di lavoro della sminuzzatura (media $\pm$ deviazione standard)

Descrizione	Unità di misura	Valore
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Piante	[n°]	172
Biomassa sminuzzata	[m ³]	24,8
	[t _{s.f.}]	20,8
	[t _{s.s.}]	17,4
Tempo medio di riempimento cassone	[min]	224,12 $\pm$ 10,11
Volume apparente carico	[m ³]	10,00
Massa media a carico	[t _{s.f.}]	3,02
Massa media a carico	[t _{s.s.}]	2,65
Tempo morto evitabile	[min]	25,6
Tempo morto inevitabile	[min]	11,41
Tempo totale netto	[min]	224,12
Tempo totale lordo	[min]	261,13

Oltre a questi valori sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia.



Graf. 13: tempi morti sminuzzatura

Dal precedente grafico si può osservare che in questa fase la maggior parte dei tempi morti evitabili è dovuta a scarsa organizzazione degli operai del cantiere, anche se una buona percentuale (40%) è dovuta a rami incastrati nella bocca di alimentazione della sminuzzatrice.

Mentre nella composizione dei tempi morti inevitabili le percentuali più rilevanti sono rappresentate dai rifornimenti, mentre solo il 10% dalla movimentazione della macchina.

Le produttività calcolate se confrontate a cantieri forestali simili risultano buone, ma se avvicinate alle produttività teoriche dichiarate dalle ditte produttrici di sminuzzatrici risultano irrisorie, a dimostrazione che spesso capacità di lavoro teoriche raramente riescono ad avvicinarsi a contesti reali.

Tab. 38: produttività dell'operazione di sminuzzatura

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,851
	[t _{u41%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,39
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,00
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	3,316
	[t _{u41%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,78
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,33

TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ SARMENTI DI VITE

Il rilievo dei tempi di lavoro è stato eseguito per tutte le operazioni seguendo una specifica operazione di lavoro in ogni giornata di rilievo.

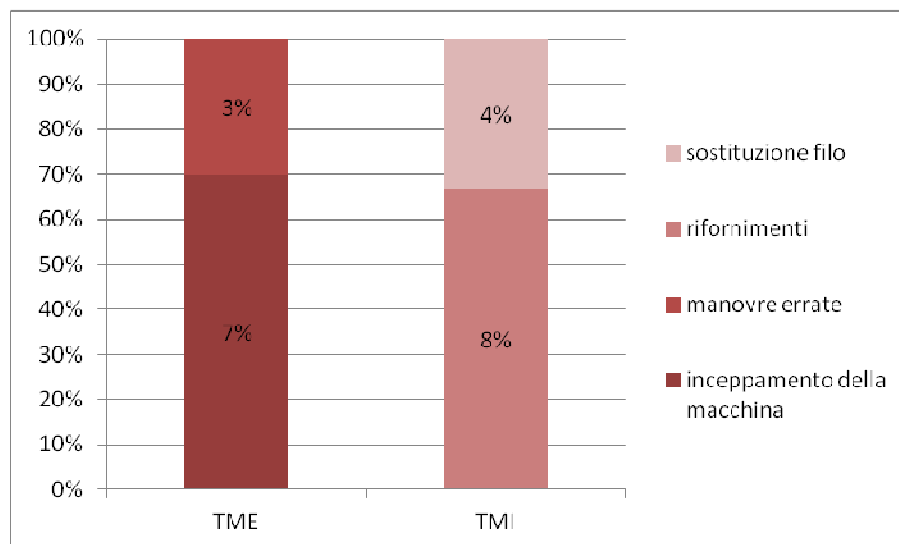
ROTOIMBALLATURA

Questa operazione è stata effettuata da due operatori.

Tab. 39: tempi di lavoro dell'operazione di rotoimballatura dei sarmenti di vite

	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Velocità effettiva	[km/h]	2,04
Capacità operativa	[ha/h]	1,08
Totale rotoballe	[n°]	90
Totale sarmenti raccolti	[m ³]	9
	[t _{u43%}]	3,6
	[t _{ss}]	2
Tempo morto evitabile	[min]	28,1
Tempo morto inevitabile		33,72
Tempo totale lordo		281
Tempo totale netto		219,2

Oltre a questi valori sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia.



Graf. 14: tempi morti rotoimballatura

Durante il rilievo dei tempi, non si sono rilevati inconvenienti di rilievo, tra i TME è stato rilevato un 7% dovuto a inceppamenti della macchina e un 3% per manovre errate, mentre tra i TMI è stato rilevato un 8% per i rifornimenti e un 3% per la sostituzione del filo.

Tab. 40: produttività dell'operazione di rotoimballatura dei sarmenti di vite

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,962
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,385
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,214
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,233
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,493
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,274

TRASPORTO ROTOBALLE

Questa operazione è stata effettuata da due operatori, uno specializzato ed uno generico; il primo ha lavorato al comando del trattore e l'altro addetto alla gru idraulica del rimorchio.

L'operazione è stata effettuata con l'ausilio di una trattore agricolo da 70 kW di potenza ed un rimorchio trazione con gru idraulica.

Tab. 41: tempi di lavoro del trasporto

Descrizione	Unità di misura	Valore
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Rotoballe	[n°]	90
Tempo medio di carico con braccio idraulico	[min]	$1,29 \pm 0,27$
Tempo medio di spostamento con trattore e rimorchio		$6,24 \pm 0,20$
Tempo medio di scarico		$3,11 \pm 0,51$
Tempo medio di ritorno scarico		$6,21 \pm 0,18$
Distanza media di viaggio carico	m	$820,6 \pm 66,06$
Distanza media di viaggio scarico		$814,5 \pm 22,01$
Media rotoballe per ogni carico	[n°]	$30 \pm 1,1$
Tempo morto evitabile	[min]	12
Tempo morto inevitabile		4
Tempi totale netto		175
Tempo totale lordo		191

Oltre a questi valori sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia. Quindi tra i TMI 70% è rappresentato dai rifornimenti, mentre il 30% da pause fisiologiche. Mentre tra i TME l'intero tempo è costituito da erronea disposizione del carico.

Tab. 42: produttività dell'operazione di trasporto

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,415
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,566
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,315
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,541
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,616
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,437

SMINUZZATURA

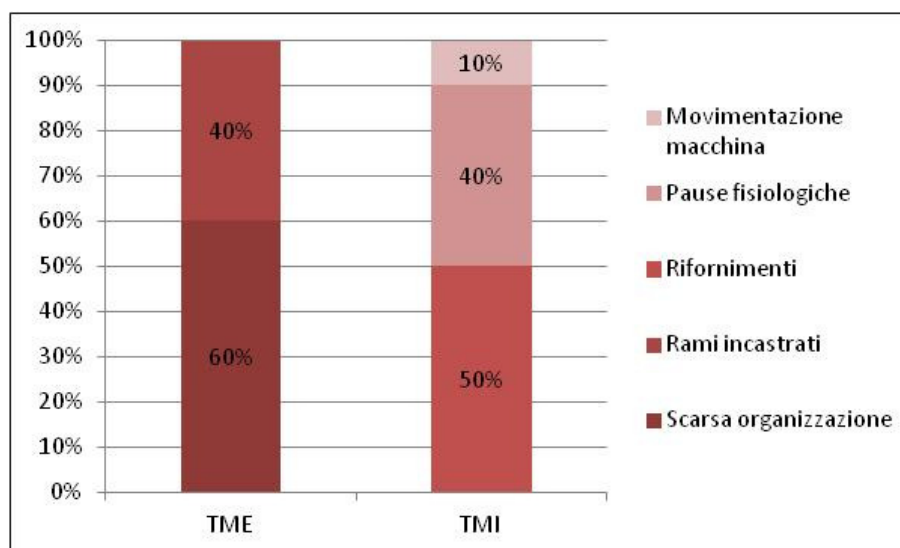
Questa operazione è stata effettuata da due operatori, uno specializzato ed uno generico; il primo ha lavorato al comando della sminuzzatrice mentre il secondo era il vero addetto al carico delle piante nella bocca della sminuzzatrice.

L'operazione è stata effettuata con l'ausilio di una sminuzzatrice Pezzolato 880/250 azionata da trattore con potenza di 110 kW.

Tab. 43: tempi di lavoro della sminuzzatura

Descrizione	Unità di misura	Valore
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Rotoballe	[n°]	90
Biomassa sminuzzata	[m ³]	9
	[t _{s.f.}]	3,6
	[t _{s.s.}]	2
Tempo morto evitabile	[min]	18,70
Tempo morto inevitabile	[min]	9,41
Tempo totale netto	[min]	96,43
Tempo totale lordo	[min]	124,54

Oltre a questi valori sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia.



Graf. 15: tempi morti sminuzzatura

Dal precedente grafico si può osservare che in questa fase la maggior parte dei tempi morti evitabili è dovuta a scarsa organizzazione degli operai del cantiere, anche se una buona percentuale (40%) è dovuta a rami incastrati nella bocca di alimentazione della sminuzzatrice. Mentre nella composizione dei tempi morti inevitabili le percentuali più rilevanti sono rappresentate dai rifornimenti, mentre solo il 10% dalla movimentazione della macchina. Le produttività calcolate se confrontate a cantieri forestali simili risultano buone, ma se avvicinate alle produttività teoriche dichiarate dalle ditte produttrici di sminuzzatrici risultano irrisorie, a dimostrazione che spesso capacità di lavoro teoriche raramente riescono ad avvicinarsi a contesti reali.

Tab. 44: produttività dell'operazione di sminuzzatura

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,163
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,865
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,481
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,557
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,023
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,568

INPUT ENERGETICI

Partendo dall'analisi dettagliata dei tempi di lavoro e dei quantitativi di legna utilizzati si sono analizzati i cantieri dal punto di vista energetico impiegando il metodo dell'analisi della richiesta lorda di energia (GER, Gross Energy Requirements). Tale modo di procedere è stato adottato per le macchine e le attrezzature utilizzate in tutti i cantieri.

FASCE BOSCADE DI ROBINIA

Gli input energetici sono per lo più influenzati dal consumo di carburanti e lubrificanti, oltre la metà degli input totali. L'operazione più impattante in termini energetici è rappresentata dal concentramento ed esbosco a seguire l'operazione di sminuzzatura. Nel contesto studiato gli input potrebbero essere notevolmente abbattuti impiegando principalmente una metodologia di concentramento ed esbosco più idonea al contesto forestale.

Tab. 45: input energetici nell'utilizzazione delle fasce boscate di robinia, valori riferiti all'unità di massa fresca (u 41%)

Operazione	Input energetici diretti [MJ t ⁻¹]	Input energetici indiretti [MJ t ⁻¹]	Input totali [MJ t ⁻¹]
Abbattimento ed allestimento	37,00	0,18	37,18
Concentramento ed esbosco	156,61	116,63	273,24
Sminuzzatura	193,09	35,78	228,87
Totale	386,70	152,58	539,28

RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI SARMENTI DI VITE

Gli input energetici sono per lo più influenzati dal consumo di carburanti e lubrificanti, oltre la metà degli input totali. L'operazione più impattante in termini energetici è rappresentata dalla raccolta ed imballatura dei sarmenti.

Tab. 46: input energetici nella raccolta e sminuzzatura dei sarmenti di vite, valori riferiti all'unità di massa fresca (u 43%)

Operazione	Input energetici diretti [MJ t ⁻¹]	Input energetici indiretti [MJ t ⁻¹]	Input totali [MJ t ⁻¹]
Raccolta, imballaggio e trasporto sarmenti	388,63	259,39	648,02
Sminuzzatura	259,93	96,33	356,26
Totale	648,56	355,72	1004,28

COSTI DELLA FILIERA

I costi calcolati per le operazioni di approvvigionamento della biomassa sono stati nello specifico scomposti in costi macchina, costi per i dispositivi di protezione individuale (DPI) e costi per il personale, il tutto riferito al 2011.

La metodologia di calcolo presa in considerazione per il calcolo dei costi macchina è stata quella proposta sviluppata da vari autori nell'ambito di una pubblicazione internazionale Picchio et al. (2011). Questo metodo che nasce per il contesto forestale è in grado di mantenere nel contempo anche una certa elasticità e flessibilità di impiego in ambito agricolo, ecco il perché della scelta tra svariate metodologie presenti nell'orizzonte scientifico internazionale.

Per quanto attiene i costi della sicurezza e della progettazione e coordinamento si è applicata la metodologia presentata da Picchio et al. (2011).

FASCE BOSCADE DI ROBINIA

Per ogni operazione e fase di utilizzazione sono stati calcolati i costi delle macchine utilizzate, nonché quelli del personale, della sicurezza e della progettazione e coordinamento.

Tab. 47: parametri tecnico economici delle macchine ed attrezzature.

	motosega	Trattore per esbosco- trasporto	Rimorchio con braccio idraulico	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice
numero	1	1	1	1	1
potenza del motore (kW)	3,4	70	0	110	0
potenza media utilizzata (%)	70	60	0	75	0
Vita tecnica (h)	2000	10000	12000	10000	8000
Vita economica (anni)	2	10	12	10	8
Impiego annuo (h/anno)	800	800	800	800	600
Tasso di deprezzamento (%)	55	10	10	10	20
Intervallo di sostituzione parti rapido	200	1000	1500	1200	400

consumo (h)					
Carburante (L/h)	0,98	2,9	0	3,1	0
Olio (L/h)	0,52	0,3	0,11	0,32	0,09
Coefficiente di ricovero (%)	3	3	3	3	3
Superficie di ricovero (m ²)	1	20	25	20	12
Coefficiente di manutenzione e riparazione (%)	20	14	10	16	18
valore a nuovo (€)	920	65000	22000	80000	40000
valore residuo (€)	186,3	22664,1	6213,4	27894,3	6710,9
Valore parti rapido consumo (€)	22	1200	800	1300	1500
Valore di ricovero (€/m ²)	120	120	120	120	120
Prezzo carburante (€/l)	2	1,5	0	1,5	0
Prezzo olio (€/l)	3,5	4,2	5,5	4,2	5,5
Assicurazione (€/anno)	0	125	110	125	0
UMA (€)	0	45	0	45	0
Tasso interesse (%)	3	3	3	3	3

Tab. 48: costi macchina totali.

	motosega	Trattore per esbosco-trasporto	Rimorchio con braccio idraulico	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice
manutenzione e riparazione (€/h)	0,23	11,38	2,75	16,00	12,00
Carburante (€/h)	1,96	4,35	0,00	4,65	0,00

Lubrificante (€/h)	1,82	1,26	0,61	1,34	0,50
Rapido consumo (€/h)	0,11	1,20	0,53	1,08	3,75
Totale costi variabili (€/h)	4,12	18,19	3,89	23,08	16,25
Deprezzamento (€/anno)	383,44	4963,06	1585,95	6108,38	4742,25
Assicurazione (€/anno)	0,00	125,00	110,00	125,00	0,00
UMA (€/anno)	0,00	5,28	0,00	5,28	0,00
Costo di ricovero (€/anno)	3,60	72,00	90,00	72,00	43,20
Totale costi fissi (€/anno)	387,04	5165,33	1785,95	6310,66	4785,45
Costi totali singolo mezzo (€/h)	4,31	18,70	4,04	23,71	16,84

Tab. 49: costi imputabile alla manodopera per singola operazione.

	Operai		
	abbattimento e allestimento	Concentramento ed esbosco	Sminuzzatura
numero	2	2	2
onorario operaio (€/h)	16	16	16
costo totale squadra (€/t)	12	20	7

Tab. 50: costi di utilizzazione ed approvvigionamento della biomassa.

	COSTI DIRETTI €/t				COSTI INDIRETTI €/t			Totale €/t
	abbattimento e allestimento	Concentramento ed esbosco	Sminuzzatura	TOT COSTI DIRETTI	Progettazione e coordinamento	Costi sicurezza	TOT COSTI INDIRETTI	
Costi totali	14,0	34,4	15,2	63,6	3,2	1,3	4,5	68,0

RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI SARMENTI DI VITE

Per ogni operazione e fase di raccolta sono stati calcolati i costi delle macchine utilizzate, nonché quelli del personale, della sicurezza e della progettazione e coordinamento.

Tab. 51: parametri tecnico economici delle macchine ed attrezzature.

	Rotoimballatrice	Trattore per azionamento rotoimballatrice e trasporto	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice	Rimorchio con braccio idraulico
numero	1	1	1	1	1
potenza del motore (kW)	0	70	110	0	0
potenza media utilizzata (%)	0	60	75	0	0
Vita tecnica (h)	12000	10000	10000	8000	12000
Vita economica (anni)	12	10	10	8	12
Impiego annuo (h/anno)	600	800	800	600	800
Tasso di deprezzamento (%)	15	10	10	20	10
Intervallo di sostituzione parti rapido consumo (h)	1500	1000	1200	400	1500
Carburante (L/h)	0	2,9	3,1	0	0
Olio (L/h)	0,03	0,3	0,32	0,09	0,11
Coefficiente di ricovero (%)	3	3	3	3	3
Superficie di ricovero (m ²)	12	20	20	12	25
Coefficiente di manutenzione e riparazione (%)	12	14	16	18	10
valore a nuovo (€)	27000	65000	80000	40000	22000
valore residuo (€)	3840,5	22664,1	27894,3	6710,9	6213,4
Valore parti rapido consumo (€)	160	1200	1200	1500	800

Valore di ricovero (€/m ²)	120	120	120	120	120
Prezzo carburante (€/l)	2	1,5	1,5	0	0
Prezzo olio (€/l)	5,1	4,2	4,2	5,5	5,5
Assicurazione (€/anno)	0	125	125	0	110
UMA (€)	0	45	45	0	0
Tasso interesse (%)	3	3	3	3	3

Tab. 52: costi macchina totali.

	Rotoimballatrice	Trattore per azionamento rotoimballatrice e trasporto	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice	Rimorchio con braccio idraulico
manutenzione e riparazione (€/h)	5,40	11,38	16,00	12,00	2,75
Carburante (€/h)	0,00	4,35	4,65	0,00	0,00
Lubrificante (€/h)	0,15	1,26	1,34	0,50	0,61
Rapido consumo (€/h)	0,11	1,20	1,00	3,75	0,53
Totale costi variabili (€/h)	5,66	18,19	22,99	16,25	3,89
Deprezzamento (€/anno)	2326,65	4963,06	6108,38	4742,25	1585,95
Assicurazione (€/anno)	0,00	125,00	125,00	0,00	110,00
UMA (€/anno)	0,00	5,28	5,28	0,00	0,00
Costo di ricovero (€/anno)	43,20	72,00	72,00	43,20	90,00
Totale costi fissi (€/anno)	2369,85	5165,33	6310,66	4785,45	1785,95
Costi totali singolo mezzo (€/h)	5,86	18,70	23,63	16,84	4,04

Tab. 53: costi imputabile alla manodopera per singola operazione.

	Raccolta	Trasporto	Sminuzzatura
numero	2	2	2
onorario operaio (€/h)	16	16	16
costo totale squadra (€/t)	42	28	18

Tab. 54: costi di utilizzazione ed approvvigionamento della biomassa.

	COSTI DIRETTI €/t				COSTI INDIRETTI €/t			Totale €/t
	Raccolta	Trasporto	Sminuzzatura	TOT COSTI DIRETTI	Progettazione e coordinamento	Costi sicurezza	TOT COSTI INDIRETTI	
Costi totali	73,5	48,4	41,9	163,8	0,0	1,6	1,6	165,4

IL TERZO CASO DI STUDIO “TIPOLOGIA MEDIA”

SUPERFICI

Le fonti ligneo-cellulosiche utilizzate come combustibile nell’impianto di teleriscaldamento provengono da potature e ramaglie di oliveto e viti e da bosco ceduo a prevalenza di cerro, in tabella 55 vengono in dettaglio riportate le superfici rilevate dalle mappe catastali alle quali successivamente è seguito rilievo con GPS per verificarne eventuali incongruenze dovute principalmente a fenomeni di espansione o diminuzione delle zone incolte.

Tab. 55: superfici aziendali disponibili per il mantenimento della filiera

	Catastale	Rilevata
Superficie dedicata a oliveto	50 ha	51,0 ha
Superficie dedicata a vigneto	90 ha	89,2 ha
Superficie dedicata a bosco ceduo a prevalenza cerro	225 ha	227,5 ha

QUANTIFICAZIONE DELLA BIOMASSA LEGNOSA

BOSCO CEDUO A PREVALENZA DI CERRO

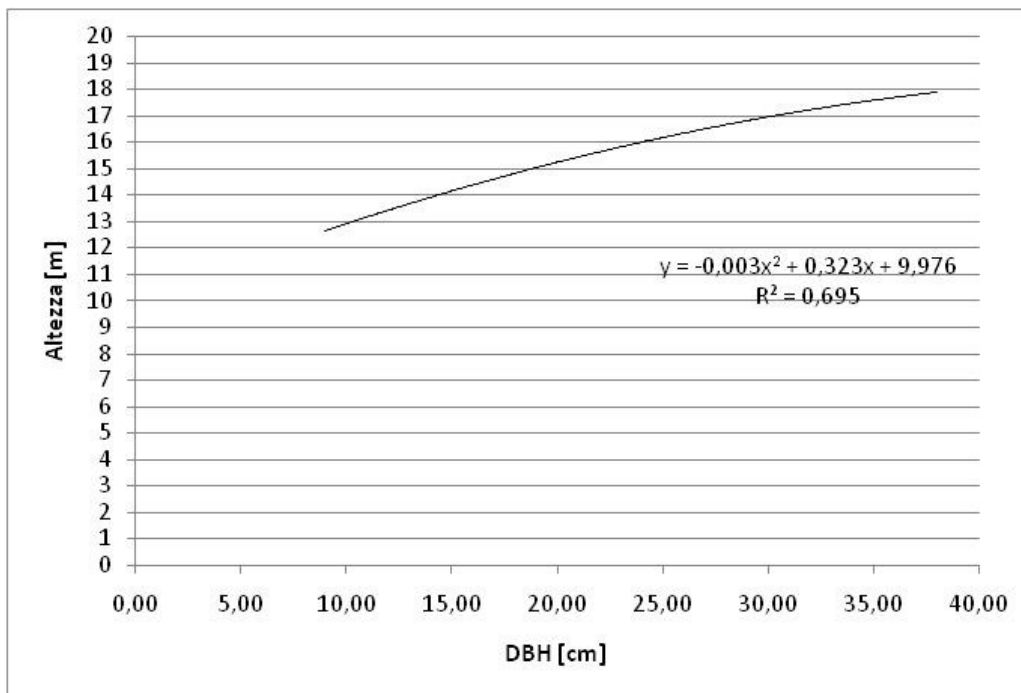
Dopo aver effettuato i rilievi in campo su 20 aree di saggio distribuite uniformemente sulla superficie della particella oggetto dell' intervento si è passati all'elaborazione dei dati ricavati.

Dall'analisi della varianza ad una via completamente randomizzata, non emergono differenze tra le medie dei diametri per le 20 aree di saggio.

Dopo aver analizzato statisticamente il popolamento sotto il punto di vista della distribuzione delle piante nelle varie classi diametriche si è passati ad analizzare le relazioni che intercorrono tra diametro ed altezza costruendo la curva ipsometrica del popolamento.

Tab. 56: diametro a petto d'uomo (DBH) (a 1,30 m dal suolo) delle piante in piedi, statistiche descrittive

Descrizione	Unità di misura	Valore
Osservazioni valide	[n°]	1520
Media	[cm]	16,7
Minimo		11,1
Massimo		47,2
Varianza		1,5
Deviazione standard		1,2
Errore standard		0,95



Graf. 16: curva ipsometrica del popolamento

Una volta costruita la curva si è indagato circa il grado di correlazione che intercorre tra le due variabili (diametro a petto d'uomo [X] e altezza [Y]). L'indagine è stata effettuata con l'ausilio di due differenti metodologie:

- la prima matematica, R^2 , ricavata direttamente da Excel in base all'equazione della curva ricavata che mostra correlazione una media tra le variabili dato che R^2 assume valori compresi tra 0 e 1 e nel nostro caso è pari a 0,695;
- la seconda prettamente statistica e basata sul coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman.

Nel nostro caso il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman assume un valore di 0,68 possiamo quindi affermare che esiste una discreta correlazione positiva tra le due variabili. Quindi la curva ipsometrica costruita che sarà impiegata per la cubatura del soprassuolo risulta comprovata da una buona significatività statistica e matematica.

Dopo aver costruito la curva ipsometrica e analizzate le correlazioni dall'elaborazione dei dati rilevati su 40 alberi modello si è analizzato statisticamente il valore del coefficiente di forma (o coefficiente di rastremazione). In particolare è stata valutata la distribuzione del campione raccolto con test di Lilliefors. I risultati del test mostrano come il valore D calcolato, pari a 0,11965, è inferiore al valore tabulato con $\alpha = 0,15$ e quindi non è possibile rifiutare l'ipotesi

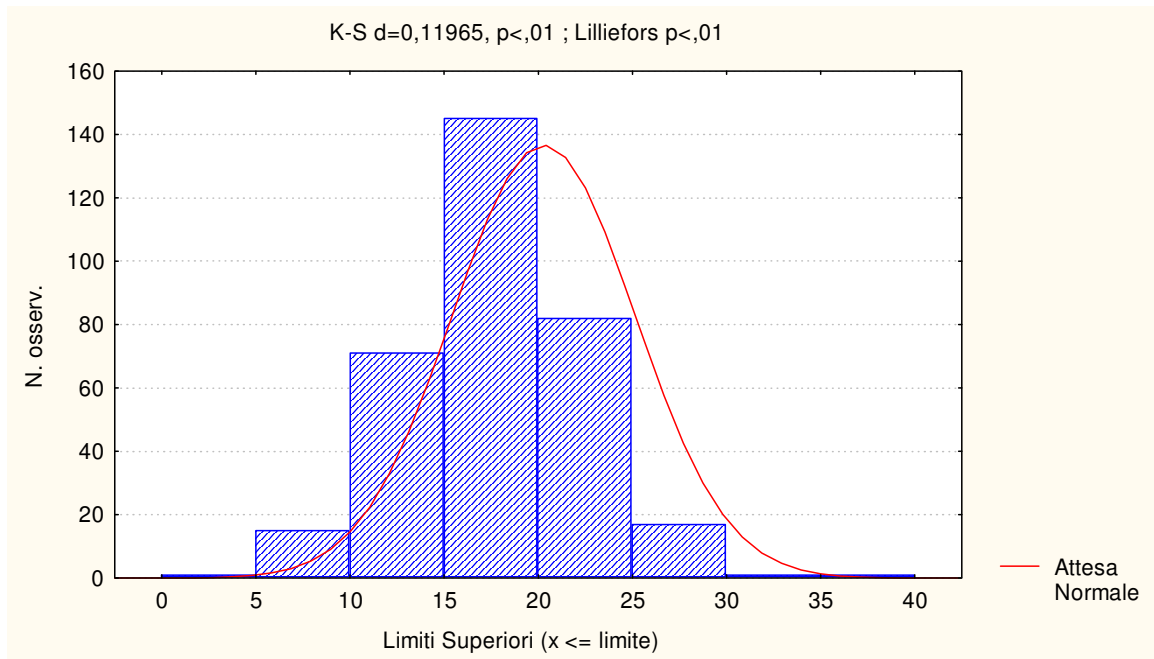
nulla. Inoltre, poiché la probabilità α è inferiore a 0,20 ma maggiore di 0,15, è possibile affermare che lo scostamento della distribuzione campionaria da quella normale, con stessa media e stessa varianza, è parzialmente trascurabile.

Tab. 57: correlazione statistica tra le variabili DBH e altezza, applicando il test di Spearman

	N. osservazioni valide	R di Spearman	p-level
DBH & Altezza	62	0,68	0,0042

Tab. 58: statistiche descrittive del coefficiente di forma

Descrizione	Unità di misura	Valore
Osservazioni valide	[n°]	40
Media	Adimensionale	0,581
Minimo		0,412
Massimo		0,621
Varianza		0,059
Deviazione standard		0,243
Errore standard		0,654



Graf. 17: test di Lilliefors sui dati del coefficiente di forma

A questo punto sono stati ripresi i dati registrati in campo e uniti assieme a quelli di laboratorio ci hanno permesso di eseguire un'analisi generale del popolamento soffermando molto la nostra attenzione su cubature, incrementi e masse del legname presente.

Tab. 59: parametri dendroauxometrici del popolamento.

Descrizione	Unità di misura	Valore
Età media del popolamento	[anni]	15
Densità del popolamento	[n°polloni/ha]	577
DBH	[cm]	16,7
Altezza media	[m]	14,1
Volume medio a pianta	[m ³ /pianta]	0,179
Massa media a pianta a umidità del 46%	[t/pianta]	0,133
Massa media a pianta anidra	[t/pianta]	0,124
Massa ad umidità del 46%	[t/ha]	76,5
Massa anidra	[t/ha]	71,7
Incremento medio annuo	[t _{s.f.} ha ⁻¹ anno ⁻¹]	5,1
Incremento medio annuo	[t _{s.s.} ha ⁻¹ anno ⁻¹]	3,2

VIGNETO

Dopo aver effettuato i rilievi in campo su 20 aree di saggio distribuite uniformemente sulla superficie della particella oggetto dell' intervento si è passati all'elaborazione dei dati ricavati. La massa rilevata nelle 20 aree di saggio è stata rapportata all'unità di superficie di riferimento (ha).

Tab. 60: massa di residui di potatura del vigneto, statistiche descrittive, in questo caso riferita alla superficie dell'area di saggio 400 m²)

Descrizione	Unità di misura	Valore
Osservazioni valide	[n°]	20
Media	[t]	0,07
Minimo		0,04
Massimo		0,14
Varianza		0,015
Deviazione standard		0,012
Errore standard		0,03

A questo punto sono stati ripresi i dati registrati in campo e uniti assieme a quelli di laboratorio ci hanno permesso di eseguire un'analisi generale del popolamento soffermando molto la nostra attenzione su masse disponibili nell'unità di superficie.

Tab. 61: parametri di massa dei residui di potatura.

Descrizione	Unità di misura	Valore
Età media dell'impianto	[anni]	7
Densità di impianto	[n°piante/ha]	2150
Massa media a pianta a umidità del 45%	[kg/pianta]	0,84
Massa media a pianta anidra	[kg/pianta]	0,51
Massa ad umidità del 45%	[t/ha]	1,8
Massa anidra	[t/ha]	1,1

OLIVETO

Dopo aver effettuato i rilievi in campo su 20 aree di saggio distribuite uniformemente sulla superficie della particella oggetto dell' intervento si è passati all'elaborazione dei dati ricavati. La massa rilevata nelle 20 aree di saggio è stata rapportata all'unità di superficie di riferimento (ha).

Tab. 62: massa di residui di potatura dell'uliveto, statistiche descrittive, in questo caso riferita alla superficie dell'area di saggio 400 m²).

Descrizione	Unità di misura	Valore
Osservazioni valide	[n°]	20
Media		56
Minimo		48
Massimo		71
Varianza		5,6
Deviazione standard		2,4
Errore standard	[t]	1,1

A questo punto sono stati ripresi i dati registrati in campo e uniti assieme a quelli di laboratorio ci hanno permesso di eseguire un'analisi generale del popolamento soffermando molto la nostra attenzione su masse disponibili nell'unità di superficie.

Tab. 63: parametri di massa dei residui di potatura.

Descrizione	Unità di misura	Valore
Età media dell'impianto	[anni]	30
Densità di impianto	[n°piante/ha]	280
Massa media a pianta a umidità del 38%	[kg/pianta]	5
Massa media a pianta anidra	[kg/pianta]	3
Massa ad umidità del 38%	[t/ha]	1,4
Massa anidra	[t/ha]	0,9

MASSA VOLUMICA E UMIDITÀ

I valori che sono stati analizzati sono quelli di:

MVF, massa volumica allo stato (UNI ISO 3131, 1985);

MVA, massa volumica allo stato anidro (UNI ISO 3131, 1985);

U%, percentuale di umidità del legno calcolata riferita al peso secco (UNI EN 13183-1, 2003; UNI ISO 3130, 1985).

Tab. 64: statistiche descrittive dei dati dei parametri tecnologici della biomassa studiata proveniente dal ceduo di cerro. Analisi della varianza ad una via (19;280), * differenze statisticamente significative con $p < 0,05$.

PARAMETRO	MVF	MVA	U
UNITA' DI MISURA	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
Media	0,74	0,694	46,00%
Minimo	0,629	0,425	30,80%
Massimo	0,98	0,801	58,10%
Varianza	0,014	0,009	2,00%
Deviazione standard	0,118	0,095	14%
Errore standard	0,022	0,026	3,1%

Tab. 65: statistiche descrittive dei dati dei parametri tecnologici della biomassa studiata proveniente dai vigneti. Analisi della varianza ad una via (19;70), * differenze statisticamente significative con $p < 0,05$.

PARAMETRO	MVF	MVA	U
UNITA' DI MISURA	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
Media	0,133	0,100	45,0%*
Minimo	0,112	0,089	31,70%
Massimo	0,151	0,119	49,50%
Varianza	0,004	0,002	1,20%
Deviazione standard	0,063	0,045	11%
Errore standard	0,012	0,016	1%

Tab. 66: statistiche descrittive dei dati dei parametri tecnologici della biomassa studiata proveniente dall'oliveto. Analisi della varianza ad una via (19;70), * differenze statisticamente significative con $p < 0,05$.

<i>PARAMETRO</i>	<i>MVF</i>	<i>MVA</i>	<i>U</i>
<i>UNITA' DI MISURA</i>	<i>[g/cm³]</i>	<i>[g/cm³]</i>	<i>[%]</i>
Media	0,95	0,81	38,0%*
Minimo	0,72	0,059	27,10%
Massimo	1,145	0,951	50,10%
Varianza	0,054	0,071	4,00%
Deviazione standard	0,232	0,266	20%
Errore standard	0,057	0,012	2,10%

Il legno sminuzzato proveniente dai residui di potatura e dal ceduo di cerro, si presenta con una umidità che è stata calcolata riferendosi alla massa anidra prossima al 40%, quindi richiede un periodo di essiccazione naturale o artificiale prima dell'utilizzo finale.

CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA

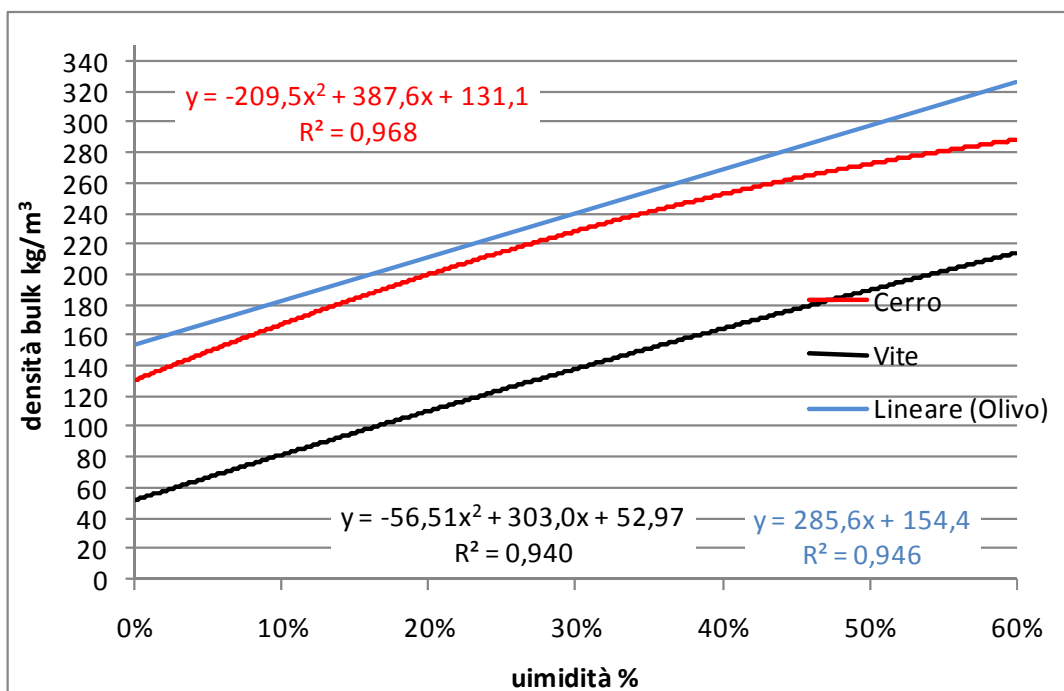
DENSITÀ BULK DELLO SMINUZZATO

La densità di bulk dello sminuzzato raccolto è un parametro che rappresenta il rapporto tra la massa ed il volume di un campione di sminuzzato non soggetto a compressione o assestamento di alcun genere. Sia la massa sia il volume sono sempre riferiti allo stesso contenuto di umidità. Valore espresso in kg/m^3 anche se è bene chiarire che si tratta di un volume sterico composto da spazi vuoti e pieni. Per quanto attiene la densità bulk al 30% di umidità media dei campioni studiati, questa è pari a 220 kg/m^3 per lo sminuzzato di cerro, 139 kg/m^3 per lo sminuzzato di sarmenti di vite e 235 kg/m^3 per lo sminuzzato di residui di potature di vite. Questi dati sono stati raccolti su tre campioni per ogni area di saggio e su tali valori è stata condotta l'Anova ad una via e tale confronto non ha evidenziato differenze statisticamente significative.

Tab. 67: valori medi di densità bulk al 30% di umidità e risultati ANOVA

	N Validi	Media	Minimo	Massimo	Varianza	Dev.Std.	Errore Standard	Anova
Cerro	60	220,12	205,6	271,5	19,17	4,38	155	(19;40), p>0,05
Vite	60	139,41	91,1	142,5	11,56	3,40	1,19	(19;40) p>0,05
Olivo	60	235,11	192,7	299,5	28,6	5,35	3,21	(19;40) p>0,05

Il parametro densità bulk è fortemente influenzato dall'umidità (u%), analizzando le curve riportate nel grafico 11 è chiaramente visibile come al variare dell'umidità (u%) la densità bulk abbia un andamento crescente, per validare anche statisticamente l'esistenza di questa correlazione è stata condotta un'analisi di correlazione non parametrica, che ha dimostrato il buon fitting con un valore del coefficiente r (rho) di Spearman, superiore a 0,75 in tutte le due correlazioni testate.



Graf. 18: correlazione che esprime l'andamento della densità bulk dello sminuzzato in funzione dell'umidità.

Tab. 68: correlazione statistica tra le variabili densità bulk e umidità (u%), applicando il test di Spearman

	Tipologia di sminuzzato	N. osservazioni valide	R di Spearman	p-level
den.bulk & u%	Cerro	60	0,69	0,045
den.bulk & u%	Vite	60	0,75	0,002
den.bulk & u%	Olivo	60	0,68	0,021

POTERE CALORIFICO

Il potere calorifico è stato determinato su campioni omogeneizzati, facendo uso della bomba calorimetrica di Berthelot-Mahler (Calorimetro Parr 6200). (Canagaratna & Witt 1988, ISCO 1991). Le prove sono state eseguite prelevando con criterio random, per ognuna delle tre tipologie (cerro, vite e olivo) 5 campioni di 2 kg ciascuno da altrettanti cumuli di sminuzzato. Per ciascuno dei 5 campioni sono state fatte 3 pastiglie omogeneizzate per l'esecuzione delle prove calorimetriche. I dati ottenuti sono poi stati sottoposti ad Anova non parametrica

(Kruskal Wallis test) ed in entrambi i casi non sono state evidenziate differenze statisticamente significative tra i 5 campioni.

Tab. 69: valori calorimetrici dei campioni di sminuzzato di cerro, KW 4;15.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
PCS	MJ/kg	20,1	2,2	>0,05
PCI	MJ/kg	18,8	1,8	>0,05

Tab. 70: valori calorimetrici dei campioni di sminuzzato di sarmenti di vite, KW 4;15.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
PCS	MJ/kg	19,4	2,8	>0,05
PCI	MJ/kg	17,7	1,1	>0,05

Tab. 71: valori calorimetrici dei campioni di sminuzzato di potature di olivo, KW 4;15.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
PCS	MJ/kg	19,4	3,6	>0,05
PCI	MJ/kg	18,1	2,7	>0,05
*w peso; daf sostanza secca senza ceneri				

ANALISI ULTIMA E ANALISI PROSSIMA

Il contenuto di ceneri (analisi prossima) è stato rilevato impiegando il Furnace Nabertherm L9/11 (EN 14775,2009), mentre per le caratteristiche chimiche è stato utilizzato l'Helemental analyzer CHN 2000. Le prove sono state eseguite prelevando con criterio random, per ognuna delle due tipologie (robinia e vite) 5 campioni di 2 kg ciascuno da altrettanti cumuli di sminuzzato. Per ciascuno dei 5 campioni sono stati prelevati 2 campioni per l'esecuzione delle prove. I dati ottenuti sono poi stati sottoposti ad Anova non parametrica (Kruskal Wallis test) ed in entrambi i casi non sono state evidenziate differenze statisticamente significative tra i 5 campioni, eccezion fatta seppur limitatamente per lo zolfo nei campioni di robinia (p=0,049).

Il contenuto di ceneri (analisi prossima) è stato rilevato impiegando il Furnace Nabertherm L9/11 (EN 14775,2009), mentre per le caratteristiche chimiche è stato utilizzato l'Helemental analyzer CHN 2000. Le prove sono state eseguite prelevando con criterio random, per ognuna

delle tre tipologie (cerro, vite e olivo) 5 campioni di 2 kg ciascuno da altrettanti cumuli di sminuzzato. Per ciascuno dei 5 campioni sono stati prelevati 2 campioni per l'esecuzione delle prove. I dati ottenuti sono poi stati sottoposti ad Anova non parametrica (Kruskal Wallis test) ed in entrambi i casi non sono state evidenziate differenze statisticamente significative tra i 5 campioni, eccezion fatta seppur limitatamente per lo zolfo nei campioni di robinia ($p=0,049$).

Tab. 72: valori dell'analisi ultima dei campioni di sminuzzato di cerro, KW 4;10.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
Ceneri	w/w db*	1,1	0,06	>0,05
Carbonio	% w/w daf*	50	5,4	>0,05
Idrogeno	% w/w daf*	6,14	0,5	>0,05
Ossigeno	% w/w daf*	43,03	2,6	>0,05
Azoto	% w/w daf*	0,35	0,02	>0,05
Zolfo	% w/w daf*	0,03	0,006	>0,05
Cloro	% w/w daf*	0,02	0,001	>0,05
Fluoro	% w/w daf*	0,0005	0,00001	>0,05
*w peso; daf sostanza secca senza ceneri; db sostanza secca con ceneri				

Tab. 73: valori dell'analisi ultima dei campioni di sminuzzato proveniente da sarmenti di vite, KW 4;10.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
Ceneri	w/w db*	2,2	0,02	>0,05
Carbonio	% w/w daf*	49	6,4	>0,05
Idrogeno	% w/w daf*	6	0,9	>0,05
Ossigeno	% w/w daf*	44,2	4,7	>0,05
Azoto	% w/w daf*	0,77	0,02	>0,05
Zolfo	% w/w daf*	0,03	0,005	>0,05

Cloro	% w/w daf*	0,018	0,002	>0,05
Fluoro	% w/w daf*	0,0006	0,00001	>0,05
*w peso; daf sostanza secca senza ceneri; db sostanza secca con ceneri				

Tab. 74: valori dell'analisi ultima dei campioni di sminuzzato proveniente da potature di olivo, KW 4;10.

Parametro	Unità di misura	Media	Deviazione St.	p-value
Ceneri	w/w db*	1,6	0,2	>0,05
Carbonio	% w/w daf*	53	9,7	>0,05
Idrogeno	% w/w daf*	6	0,4	>0,05
Ossigeno	% w/w daf*	40,5	2,9	>0,05
Azoto	% w/w daf*	0,45	0,02	>0,05
Zolfo	% w/w daf*	0,04	0,001	>0,05
Cloro	% w/w daf*	0,01	0,002	>0,05
Fluoro	% w/w daf*	-	-	>0,05
*w peso; daf sostanza secca senza ceneri; db sostanza secca con ceneri				

Le biomasse, principalmente, sono costituite da carbonio (C), ossigeno (O), idrogeno (H). la componente del biocombustibile, attraverso la cui ossidazione è liberato il suo contenuto energetico è il carbonio. L'idrogeno, invece, apporta al processo di ossidazione un ulteriore quantità di energia che, assieme a quella del carbonio, determina il potere calorifico inferiore del combustibile. L'ossigeno invece sostiene solo l'andamento del processo di ossidazione.

Invece gli elementi che hanno un effetto sul livello di emissione nocive prodotte dalla combustione, sono lo zolfo (S), l'azoto (N), il cloro (Cl) e il contenuto in ceneri. Per quanto riguarda questi elementi un loro maggior contenuto nel combustibile comporta una maggiore presenza nelle emissioni in atmosfera.

Il materiale oggetto di studio presenta buone potenzialità e una produzione di ceneri nella norma.

EMISSIONI GASSOSE DALL'UNITÀ TERMICA

Le emissioni sono state misurate attraverso un analizzatore di fumi. L'analizzatore fumi utilizzato dall'impianto è un ECOM J2KN, certificato per la misura dei gas di combustione ai sensi della Normativa Europea.

Sono stati misurati O₂, CO (NO, NO₂, SO₂ opzionali), temperatura del gas, temperatura dell'aria, pressione, ecc. Inoltre sono stati calcolati CO₂, CO con riferimento dell'ossigeno.

L'apparecchiatura è dotata di display su cui vengono visualizzati i risultati ottenuti e registrati in continua tutti i valore della combustione, è dotato di stampante per i risultati che vengono riportati in tabella 75

Tab. 75: emissioni atmosferiche riferite alla sola combustione finale.

Emissioni atmosferiche	Valore	Unità di misura
Ossigeno	10	% vol
Biossido di Carbonio	8,5	% vol
CO ₂ eq	21,20 x 10 ⁻³	kg/kWh
So ₂ eq	340 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
No _x	261 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
HCL	24 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Particolato	13 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
CO	380,65 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
NMVOC	60 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Ceneri	3,3 x 10 ⁻³	kg/kWh

LOGISTICA DI APPROVVIGIONAMENTO TIPOLOGIA MEDIA

Per quanto concerne l'utilizzazione del bosco ceduo, è stato effettuato un abbattimento semimeccanico con l'ausilio di una motosega, per questa operazione sono stati impiegati due operai, uno addetto al taglio con la motosega ed uno in aiuto di quest'ultimo.

Concentramento ed esbosco: sono stati eseguiti senza soluzione di continuità con l'ausilio di un trattore agricolo sul quale era montato un verricello forestale con cavo da 9 mm di fune speciale compattata della lunghezza di 110 m; la squadra era formata da tre operai, due addetti all'aggancio delle piante alla fune del verricello, mentre il terzo addetto a manovrare il trattore.

Allestimento e sminuzzatura: una volta giunte all'imposto le piante venivano prima parzialmente allestite. Ovvero i primi 4 m di tronco venivano sezionati ed allestiti come legna da ardere, mentre il rimanente veniva predisposto per la sminuzzatura. La sminuzzatrice utilizzata era a motore autonomo ed alimentazione con gru idraulica. La squadra era composta da due operai, mentre uno alimentava la sminuzzatrice, l'altro operaio si occupava della sezionatura dei tronchi. Le scaglie venivano caricate direttamente su un rimorchio agricolo, che una volta pieno veniva trasportato fino al silo di stoccaggio dello sminuzzato.

Per quanto attiene al recupero del materiale legnoso prodotto dalle potature dei vigneti e degli oliveti, dopo le normali operazioni di potatura, i residui sono stati posizionati in andane. La successiva raccolta è stata effettuata usando una macchina rotoimballatrice. Una volta terminata la fase di imballatura, alcuni giorni dopo le rotoballe venivano raccolte e stoccate sotto apposita tettoia in uso nell'azienda. La successiva sminuzzatura viene effettuata nel momento in cui è necessaria per l'approvvigionamento della caldaia. Per questo tipo di lavoro sono stati impiegati due operatori. La sminuzzatura viene effettuata nei pressi del sito di stoccaggio, a circa 1 km dal silo di alimentazione della caldaia.

Le strade interne all'azienda hanno una larghezza uguale o superiore a tre metri e venti, quindi i trasferimenti della biomassa vengono effettuati con un trattore agricolo di medie dimensioni con rimorchio in grado di trasportare 20 m³ di legno sminuzzato. Il silo, per l'alimentazione della caldaia, posto nei pressi dell'edificio principale ha una capienza di 60 m³, quindi per effettuare il carico completo sono necessari tre viaggi.

TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITA' DEL BOSCO CEDUO DI CERRO

Il rilievo dei tempi di lavoro è stato eseguito per tutte le operazioni di utilizzazione seguendo una specifica operazione di lavoro in ogni giornata di rilievo.

Abbattimento

Per quel che riguarda l'abbattimento sono stati rilevati i seguenti tempi di lavoro effettivo:

- Tempo di spostamento;
- Tempo di pulizia;
- Tempo di abbattimento.

Oltre a queste tipologie sono stati registrati anche i tempi morti evitabili e i tempi morti inevitabili. I rilievi si sono concentrati in due giornate lavorative.

Tab. 76: tempi di lavoro abbattimento (media $\pm$ deviazione standard)

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Piante	[n°]	197
Tempo medio di spostamento	[min]	0,56 $\pm$ 0,15
Tempo medio di pulizia		0,34 $\pm$ 0,07
Tempo medio di abbattimento		0,75 $\pm$ 0,17
Tempo morto evitabile		101,81
Tempo morto inevitabile		139,95
Tempo totale netto		327,18
Tempo totale lordo		568,94

Dalla tabella 76 possiamo osservare come, prevedibilmente, il tempo medio di abbattimento sia superiore agli altri due.

Va considerato inoltre che la dimensione delle piante ha influito molto sulle tempistiche di abbattimento, infatti con una motosega di media potenza gli operai riuscivano a abbattere le piante in maniera abbastanza rapida.

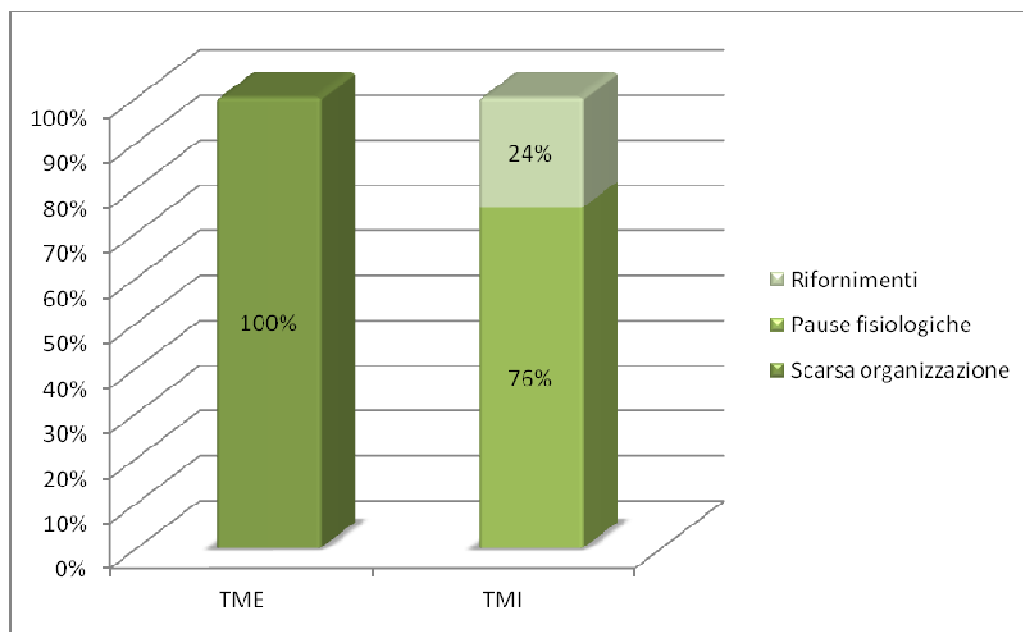


Grafico 19: distribuzione percentuale dei tempi morti durante l'abbattimento

Nel grafico 19 possiamo osservare come la totalità dei tempi morti evitabili sia stata riscontrata per la scarsa organizzazione del lavoro. Questo è avvenuto a causa della mancanza di coordinazione tra i due operatori.

Osservando in un ottica percentuale i valori dei tempi morti si è calcolato che i tempi morti inevitabili (TMI) risultano incidere per il 25% sul tempo totale lordo, mentre i tempi morti evitabili (TME) incidono su quest'ultimo per il 18%.

I tempi morti inevitabili sono composti in gran parte da pause fisiologiche (76%) mentre i rifornimenti (24%) in cui sono compresi i rifornimenti dei mezzi e le operazioni di manutenzione dei mezzi stessi.

Tab. 77: produttività dell'operazione di abbattimento

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,859
	[t _{u46%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,382
	[t _{s,s} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,288
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	3,233
	[t _{u46%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,402
	[t _{s,s} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,240

Concentramento-Esbosco

Per quanto riguarda il loro rilievo, i tempi di questa operazione di lavoro composta sono stati così suddivisi:

- Tempo medio di ritorno a vuoto;
- Tempo medio di srotolamento della fune;
- Tempo medio di aggancio;
- Tempo medio di strascico indiretto;
- Tempo medio di strascico diretto;
- Tempo medio di sgancio.

Oltre a queste tipologie sono stati registrati anche i tempi morti evitabili e i tempi morti inevitabili ma anche alcuni valori necessari per lo svolgimento delle analisi (distanza media di strascico diretto, distanza media di strascico indiretto e media delle piante a carico).

Le operazioni sono state condotte da una squadra di tre operai munita di trattore e verricello forestale. La registrazione dei tempi è avvenuta durante 3 giornate lavorative.

Tab. 78: tempi di lavoro concentramento-esbosco (media $\pm$ deviazione standard)

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Operatori	[n°]	3
Macchine	[n°]	1
Piante totali	[n°]	203
Tempo medio di ritorno a vuoto	[min]	1,71 $\pm$ 0,69
Tempo medio di srotolamento fune		1,22 $\pm$ 0,58
Tempo medio di aggancio		1,63 $\pm$ 0,73
Tempo medio di strascico indiretto		3,38 $\pm$ 1,19
Tempo medio di strascico diretto		1,20 $\pm$ 0,91
Tempo medio di sgancio		1,56 $\pm$ 0,90
Distanza media di strascico ind.	[m]	26,2 $\pm$ 5,6
Distanza media di strascico dir.	[m]	83,3 $\pm$ 8,2
Media piante ogni carico	[n°]	5 $\pm$ 1
Tempo morto evitabile	[min]	158,28
Tempo morto inevitabile		200,37
Tempi totale netto		441,87
Tempo totale lordo		800,52

Dalla tabella 78 possiamo osservare come la maggior parte del tempo di concentramento-esbosco è stato impiegato per lo strascico indiretto. Questo dato risulta prevedibile data sia la bassa velocità di recupero del tamburo del verricello che ha influito su tale tempistica, sia la pendenza della zona che recuperando il carico verso monte aumentava la forza peso gravante sul verricello.

Oltre allo studio della composizione dei tempi effettivi è stata studiata anche la composizione delle due tipologie di tempi morti: tempi morti evitabili (TME) e tempi morti inevitabili (TMI). A tal fine è stato prodotto un grafico in cui si evince la suddivisione della totalità di tali tempi in base alle motivazioni che li hanno provocati.

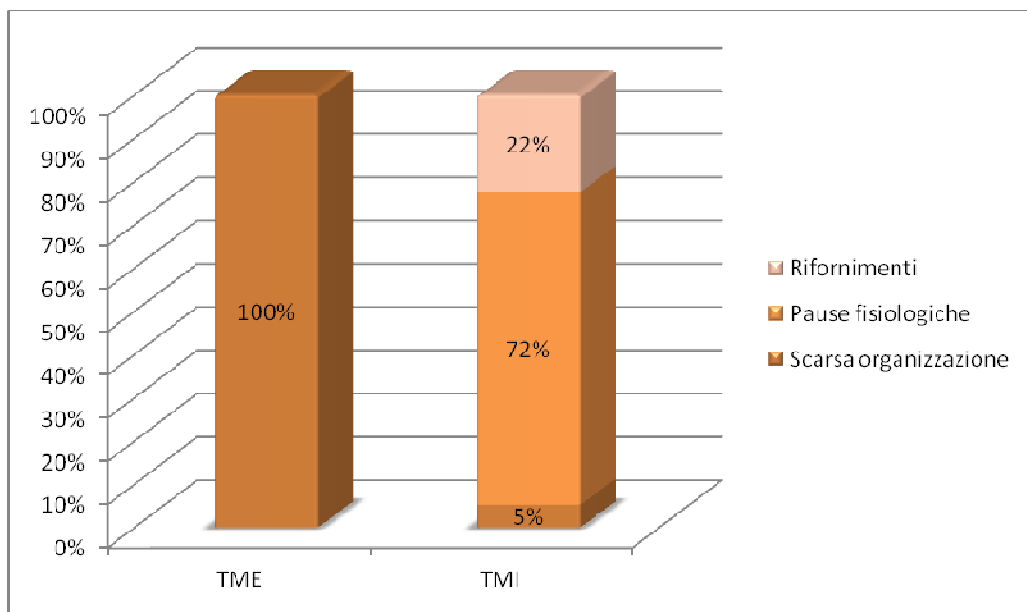


Grafico 20: tempi morti concentramento-esbosco

Anche in questo caso, come visto in precedenza per l'operazione di abbattimento, la totalità dei tempi morti evitabili è dovuta alla scarsa organizzazione degli operai del cantiere (vedi grafico 20).

Nella composizione dei tempi morti inevitabili subentra rispetto all'operazione precedente la scarsa organizzazione (5%) mentre la percentuale delle altre motivazioni (72% pause fisiologiche, 22% rifornimenti) rimane simile a quelle rilevate per la fase di abbattimento (76% pause fisiologiche, 22% rifornimenti).

Osservando in un ottica percentuale i valori dei tempi morti si è calcolato che i tempi morti inevitabili (TMI) risultano incidere per il 25% sul tempo totale lordo, mentre i tempi morti evitabili (TME) incidono su quest'ultimo per il 20%.

Tab. 79: produttività dell'operazione di concentramento-esbosco

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,908
	[t _{u46%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,675
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,629
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,645
	[t _{u46%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,222
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,139

Sminuzzatura e depezzatura

Per quel che riguarda la registrazione dei tempi di lavoro di questa operazione. Quest'ultima è stata effettuata da due operatori, uno specializzato ed uno generico; il primo ha lavorato al comando della gru della sminuzzatrice mentre il secondo ha provveduto alla seziona tura dei topi dei primi 4 m di tronco. Durante il periodo dei rilievi, durati una giornata, i due operai sono riusciti a caricare 5 cassoni di sminuzzato.

Tab. 80: tempi di lavoro della sminuzzatura (media ± deviazione standard)

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Piante	[n°]	203
Tempo medio di riempimento cassone	[min]	41,53 ± 4,76
Volume apparente carico	[m ³]	20,00
Massa media a carico	[t _{s.f.}]	4,95
Massa media a carico	[t _{s.s.}]	3,44
Media delle piante a carico	[n°]	37
Tempo morto evitabile	[min]	10,5
Tempo morto inevitabile	[min]	40,61
Tempo totale netto	[min]	225,12
Tempo totale lordo	[min]	276,23

Oltre a questi valori sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia. Osservando in un ottica percentuale i valori dei tempi morti si è calcolato che i tempi morti inevitabili (TMI) risultano incidere per il 15% sul tempo totale lordo e sono tutti imputabili a rifornimento, mentre i tempi morti evitabili (TME) incidono su quest'ultimo per meno del 4% e sono tutti imputabili ad una scarsa organizzazione del cantiere.

Tab. 81: produttività dell'operazione di sminuzzatura

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	3,946
	[t _{u99,7%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,932
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,733
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	4,842
	[t _{u99,7%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	3,598
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	3,354

TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ SARMENTI DI VITE

Il rilievo dei tempi di lavoro è stato eseguito per tutte le operazioni di utilizzazione seguendo una specifica operazione di lavoro in ogni giornata di rilievo.

ROTOIMBALLATURA

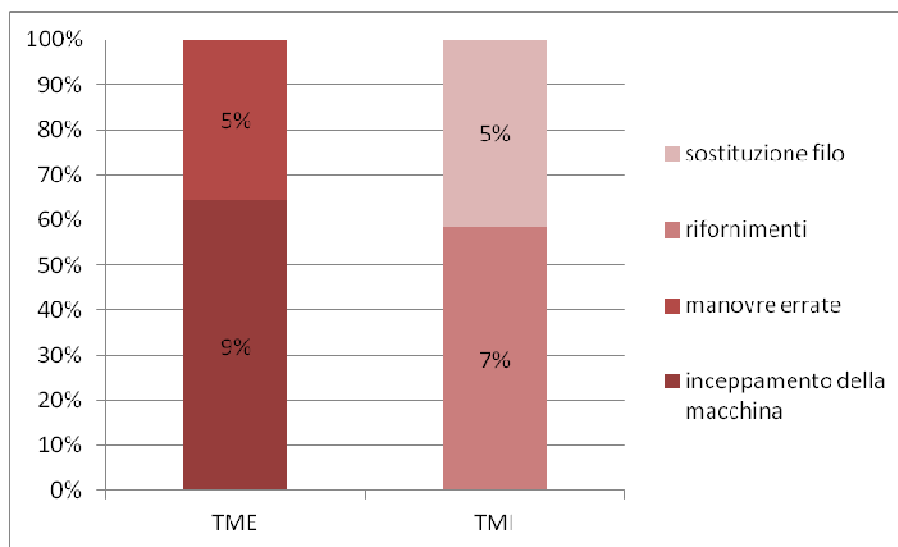
Per quel che riguarda la registrazione dei tempi di lavoro di questa operazione. Quest'ultima è stata effettuata da un operatore.

Tab. 82 tempi di lavoro dell'operazione di rotoimballatura dei sarmenti di vite

	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Operatori	[n°]	1
Macchine	[n°]	1
Velocità effettiva	[km/h]	2,88
Capacità operativa	[ha/h]	1,20

Totale rotoballe	[n°]	133
Totale sarmenti raccolti	[m ³]	13,3
	[t _{u45%}]	5,3
	[t _{ss}]	2,9
Tempo morto evitabile	[min]	27,84
Tempo morto inevitabile		34,80
Tempo totale lordo		342,00
Tempo totale netto		279,36

Oltre a questi valori sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia.



Graf. 21: tempi morti rotoimballatura

Durante il rilievo dei tempi, non si sono rilevati inconvenienti di rilievo, tra i TME è stato rilevato il 9% dovuto a inceppamenti della macchina e il 5% per manovre errate, mentre tra i TMI è stato rilevato il 7% per i rifornimenti e un 5% per la sostituzione del filo.

Tab. 83: produttività dell'operazione di rotoimballatura

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,333
	[t _{u45%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,93
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,51
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,854
	[t _{u45%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,14
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,62

TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ NELLA RACCOLTA DEI RESIDUI DI POTATURE IN OLIVETO

Il rilievo dei tempi di lavoro è stato eseguito per tutte le operazioni di utilizzazione seguendo una specifica operazione di lavoro in ogni giornata di rilievo.

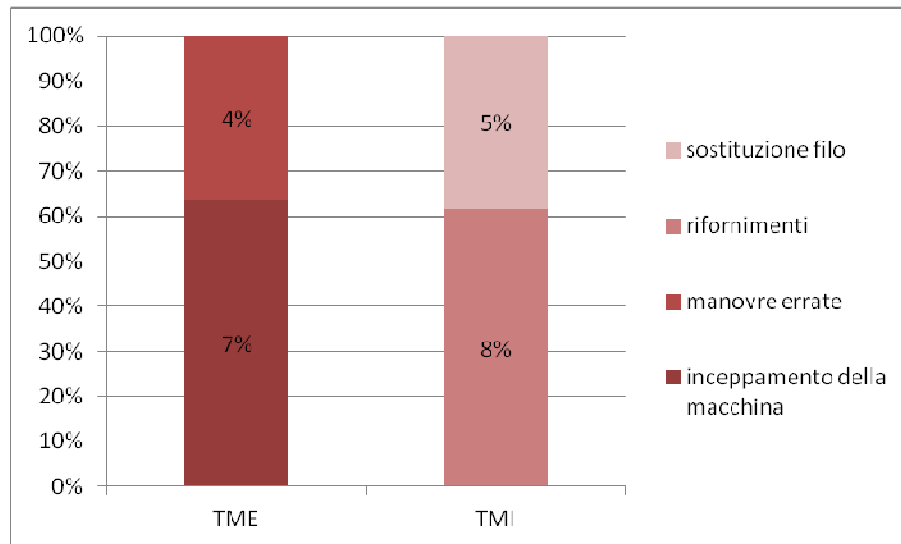
ROTOIMBALLATURA

. Questa operazione è stata effettuata da un operatore.

Tab. 84: tempi di lavoro dell'operazione di rotoimballatura

	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Operatori	[n°]	1
Macchine	[n°]	1
Velocità effettiva	[km/h]	2,6
Capacità operativa	[ha/h]	1,51
Totale rotoballe	[n°]	342
Totale sarmenti raccolti	[m ³]	36,4
	[t _{u38%}]	12,1
	[t _{ss}]	8,4
Tempo morto evitabile	[min]	31,84
Tempo morto inevitabile		44,80
Tempo totale lordo		366,02
Tempo totale netto		289,38

Oltre a questi parametri sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia.



Graf. 22: tempi morti rotoimballatura

Durante il rilievo dei tempi, non si sono rilevati inconvenienti di rilievo, il 7% dei TME è stato imputabile a inceppamenti della macchina e il 4% per manovre errate, mentre tra i TMI è stato rilevato l' 8% per i rifornimenti e il 5% per la sostituzione del filo.

Tab. 85: produttività dell'operazione di rotoimballatura

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	5,967
	[t _{u38%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,984
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,377
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	7,583
	[t _{u38%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,521
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,750

TRASPORTO ROTOBALLE

Questa operazione è stata effettuata da due operatori, uno specializzato ed uno generico; il primo ha lavorato al comando del trattore e l'altro addetto alla gru idraulica del rimorchio.

L'operazione è stata effettuata con l'ausilio di una trattore agricolo da 70 kW di potenza ed un rimorchio trazione con gru idraulica.

Tab. 86: tempi di lavoro del trasporto

Descrizione	Unità di misura	Valore
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Rotoballe	[n°]	90
Tempo medio di carico con braccio idraulico	[min]	$1,35 \pm 0,12$
Tempo medio di spostamento con trattore e rimorchio		$5,24 \pm 0,11$
Tempo medio di scarico		$3,01 \pm 0,61$
Tempo medio di ritorno scarico		$4,21 \pm 0,328$
Distanza media di viaggio carico	m	$710,5 \pm 41,61$
Distanza media di viaggio scarico		$801,1 \pm 52,11$
Media rotoballe per ogni carico	[n°]	$31 \pm 2,1$
Tempo morto evitabile	[min]	16
Tempo morto inevitabile		6
Tempo totale netto		151
Tempo totale lordo		173

Oltre a questi parametri sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia. Quindi tra il 65% TMI è rappresentato dai rifornimenti, mentre il 35% da pause fisiologiche. Mentre l'erronea disposizione del carico ha originato il totale dei TME.

Tab. 87: produttività dell'operazione di trasporto

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,563
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,625
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,313
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,786
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,714
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,357

TEMPI DI LAVORO E PRODUTTIVITÀ NELLA SMINUZZATURA DELLE ROTOBALLE DII RESIDUI DI POTATURE DI VIGNETO ED OLIVETO

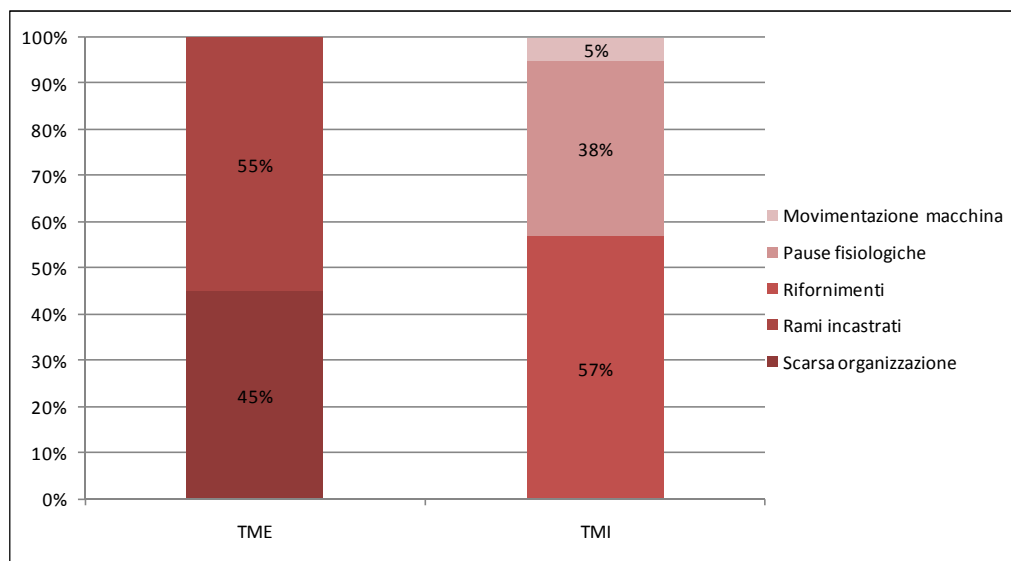
Questa operazione è stata effettuata da due operatori, uno specializzato ed uno generico; il primo ha lavorato al comando della sminuzzatrice mentre il secondo era il vero addetto al carico delle piante nella bocca della sminuzzatrice.

L'operazione è stata effettuata con l'ausilio di una sminuzzatrice Pezzolato 880/250 azionata da trattore con potenza di 70 kW.

Tab. 88: tempi di lavoro della sminuzzatura

<i>Descrizione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Rotoballe	[n°]	475
Biomassa sminuzzata	[m ³]	49,7
	[t _{s.f.}]	17,4
	[t _{s.s.}]	11,3
Tempo morto evitabile	[min]	38,67
Tempo morto inevitabile	[min]	25,33
Tempo totale netto	[min]	601,21
Tempo totale lordo	[min]	665,21

Oltre a questi parametri sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia.



Graf. 23: tempi morti sminuzzatura

Dal precedente grafico si può osservare che in questa fase la maggior parte dei tempi morti evitabili è dovuta a rami incastrati nella bocca di alimentazione della sminuzzatrice e ad una scarsa organizzazione degli operai del cantiere.

Mentre nella composizione dei tempi morti inevitabili le percentuali più rilevanti sono rappresentate dai rifornimenti e dalle pause fisiologiche.

Le produttività calcolate se confrontate a cantieri simili risultano buone, ma se avvicinate alle produttività teoriche dichiarate dalle ditte produttrici di sminuzzatrici risultano irrisorie, a dimostrazione che spesso capacità di lavoro teoriche raramente riescono ad avvicinarsi a contesti reali.

Tab. 89: produttività dell'operazione di sminuzzatura

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,259
	[t _{s.f.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,790
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,514
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	2,485
	[t _{s.f.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,870
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,565

TRASPORTO ROTOBALLE

Questa operazione è stata effettuata da due operatori, uno specializzato ed uno generico; il primo ha lavorato al comando del trattore e l'altro addetto alla gru idraulica del rimorchio.

L'operazione è stata effettuata con l'ausilio di una trattore agricolo da 70 kW di potenza ed un rimorchio trazione con gru idraulica.

Tab. 90: tempi di lavoro del trasporto

Descrizione	Unità di misura	Valore
Operatori	[n°]	2
Macchine	[n°]	1
Rotoballe	[n°]	90
Tempo medio di carico con braccio idraulico	[min]	$1,25 \pm 0,05$
Tempo medio di spostamento con trattore e rimorchio		$5,56 \pm 0,18$
Tempo medio di scarico		$3,21 \pm 0,31$
Tempo medio di ritorno scarico		$4,11 \pm 0,21$
Distanza media di viaggio carico	m	$780,1 \pm 24,60$
Distanza media di viaggio scarico		$822,5 \pm 22,55$
Media rotoballe per ogni carico	[n°]	$30 \pm 1,9$
Tempo morto evitabile	[min]	13
Tempo morto inevitabile		6
Tempo totale netto		164
Tempo totale lordo		183

Oltre a questi parametri sono stati esaminati i tempi morti evitabili (TME) e i tempi morti inevitabili (TMI) e suddivisi per tipologia. Quindi tra il 64% dei TMI è rappresentato dai rifornimenti, mentre il 36% da pause fisiologiche. Mentre l'erronea disposizione del carico ha originato il totale dei TME.

Tab. 91: produttività dell'operazione di trasporto

Descrizione	Unità di misura	Valore
PHS ₁₅	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,623
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,590
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,295
PHS ₀	[m ³ h ⁻¹ operaio ⁻¹]	1,813
	[t _{u43%} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,659
	[t _{s.s.} h ⁻¹ operaio ⁻¹]	0,330

INPUT ENERGETICI

Partendo dall'analisi dettagliata dei tempi di lavoro e dei quantitativi di legna utilizzati sono stati analizzati i cantieri dal punto di vista energetico impiegando il metodo dell'analisi della richiesta lorda di energia (GER, Gross Energy Requirements). Tale modo di procedere è stato adottato per le macchine e le attrezzature utilizzate in tutti i cantieri.

BOSCO CEDUO DI CERRO

Gli input energetici sono per lo più influenzati dal consumo di carburanti e lubrificanti, che costituiscono oltre la metà degli input totali. L'operazione più impattante in termini energetici è rappresentata dal concentramento ed esbosco a seguire l'operazione di sminuzzatura.

Tab. 92: input energetici nell'utilizzazione del bosco ceduo di cerro, valori riferiti all'unità di massa fresca (u 99,7%)

Operazione	Input energetici diretti [MJ t ⁻¹]	Input energetici indiretti [MJ t ⁻¹]	Input totali [MJ t ⁻¹]
Abbattimento ed allestimento	20,11	0,10	20,20
Concentramento ed esbosco	103,03	53,81	156,85
Sminuzzatura	126,25	23,39	149,65
Totale	249,39	77,30	326,70

RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI SARMENTI DI VITE

Gli input energetici, che sono oltre la metà degli input totali, sono per lo più influenzati dal consumo di carburanti e lubrificanti.

Tab. 93: input energetici nella raccolta e sminuzzatura dei sarmenti di vite, valori riferiti all'unità di massa fresca (u 43%)

Operazione	Input energetici diretti [MJ t ⁻¹]	Input energetici indiretti [MJ t ⁻¹]	Input totali [MJ t ⁻¹]
Raccolta ed imballaggio sarmenti	250,48	162,66	413,14
Sminuzzatura	311,91	115,60	427,51
Totale	562,39	278,26	840,65

RACCOLTA E SMINUZZATURA DELLE POTATURE DI OLIVO

Gli input energetici, che sono oltre la metà degli input totali, sono per lo più influenzati dal consumo di carburanti e lubrificanti. L'operazione più impattante in termini energetici è rappresentata dalla sminuzzatura delle rotoballe.

Tab. 94: input energetici nella raccolta e sminuzzatura delle potature di olivo, valori riferiti all'unità di massa fresca (u 43%)

Operazione	Input energetici diretti [MJ t ⁻¹]	Input energetici indiretti [MJ t ⁻¹]	Input totali [MJ t ⁻¹]
Raccolta ed imballaggio residui di potatura	113,42	73,66	187,08
Sminuzzatura	311,91	115,60	427,51
Totale	425,34	189,26	614,59

COSTI DELLA FILIERA

I costi calcolati per le operazioni di approvvigionamento della biomassa sono stati nello specifico scomposti in costi macchina, costi per i dispositivi di protezione individuale (DPI) e costi per il personale, il tutto riferito al 2011.

La metodologia di calcolo presa in considerazione per i costi macchina è stata quella proposta sviluppata da vari autori nell'ambito di una pubblicazione internazionale Picchio et al. (2011). Questo metodo che nasce per il contesto forestale è in grado di mantenere nel contempo anche una certa elasticità e flessibilità di impiego in ambito agricolo, ecco il perché della scelta tra svariate metodologie presenti nell'orizzonte scientifico internazionale.

Per quanto attiene i costi della sicurezza e della progettazione e coordinamento si è applicata la metodologia presentata da Picchio et al. (2011).

CEDUO A PREVALENZA DI CERRO

Per ogni operazione e fase di utilizzazione sono stati calcolati i costi delle macchine utilizzate, nonché quelli del personale, della sicurezza e della progettazione e coordinamento.

Tab. 95: parametri tecnico economici delle macchine ed attrezzature.

	Motosega	Trattore per esbosco	Verricello forestale	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice
numero	1	1	1	1	1
potenza del motore (kW)	3,4	70	0	70	0
potenza media utilizzata (%)	70	60	0	75	0
Vita tecnica (h)	2000	10000	10000	10000	8000
Vita economica (anni)	2	10	10	10	8
Impiego annuo (h/anno)	800	800	600	800	600
Tasso di deprezzamento (%)	55	10	10	10	20
Intervallo di sostituzione parti rapido	200	1000	1500	1200	400

consumo (h)					
Carburante (L/h)	0,98	2,9	0	3,1	0
Olio (L/h)	0,52	0,3	0,09	0,32	0,09
Coefficiente di ricovero (%)	3	3	3	3	3
Superficie di ricovero (m ²)	1	20	1,6	20	12
Coefficiente di manutenzione e riparazione (%)	20	14	12	16	18
valore a nuovo (€)	920	65000	8500	65000	40000
valore residuo (€)	186,3	22664,1	2963,8	22664,1	6710,9
Valore parti rapido consumo (€)	22	1200	800	1300	1500
Valore di ricovero (€/m ²)	120	120	120	120	120
Prezzo carburante (€/l)	2	1,5	0	1,5	0
Prezzo olio (€/l)	3,5	4,2	5,5	4,2	5,5
Assicurazione (€/anno)	0	125	0	125	0
UMA (€)	0	45	0	45	0
Tasso interesse (%)	3	3	3	3	3

Tab. 96: costi macchina totali.

	Motosega	Trattore per esbosco	Verricello forestale	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice
manutenzione e riparazione (€/h)	0,23	11,38	1,70	13,00	12,00
Carburante (€/h)	1,96	4,35	0,00	4,65	0,00
Lubrificante (€/h)	1,82	1,26	0,50	1,34	0,50

Rapido consumo (€/h)	0,11	1,20	0,53	1,08	3,75
Totale costi variabili (€/h)	4,12	18,19	2,73	20,08	16,25
Deprezzamento (€/anno)	383,44	4963,06	649,02	4963,06	4742,25
Assicurazione (€/anno)	0,00	125,00	0,00	125,00	0,00
UMA (€/anno)	0,00	5,28	0,00	5,28	0,00
Costo di ricovero (€/anno)	3,60	72,00	5,76	72,00	43,20
Totale costi fissi (€/anno)	387,04	5165,33	654,78	5165,33	4785,45
Costi totali singolo mezzo (€/h)	4,31	18,70	2,79	20,59	16,84

Tab. 97: costi imputabile alla manodopera per singola operazione.

	Operai		
	Abbattimento	Concentramento ed esbosco	Sminuzzatura-depezzatura
Numero	2	2	2
onorario operaio (€/h)	16	16	16
costo totale squadra (€/t)	12	24	5

Tab. 98: costi di utilizzazione ed approvvigionamento della biomassa.

	COSTI DIRETTI €/t				COSTI INDIRETTI €/t			Totale €/t
	Abbattimento	Concentramento ed esbosco	Sminuzzatura-depezzatura	TOT COSTI DIRETTI	Progettazione e coordinamento	Costi sicurezza	TOT COSTI INDIRETTI	
Costi totali	13,1	39,6	12,6	65,3	3,3	1,3	4,6	69,9

RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI SARMENTI DI VITE

Per ogni operazione e fase di raccolta sono stati calcolati i costi delle macchine utilizzate, nonché quelli del personale, della sicurezza e della progettazione e coordinamento.

Tab. 99: parametri tecnico economici delle macchine ed attrezzature.

	Rotoimballatrice	Trattore per azionamento rotoimballatrice e trasporto	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice	Rimorchio con braccio idraulico
numero	1	1	1	1	1
potenza del motore (kW)	0	70	70	0	0
potenza media utilizzata (%)	0	60	75	0	0
Vita tecnica (h)	12000	10000	10000	8000	12000
Vita economica (anni)	12	10	10	8	12
Impiego annuo (h/anno)	600	800	800	600	800
Tasso di deprezzamento (%)	15	10	10	20	10
Intervallo di sostituzione parti rapido consumo (h)	1500	1000	1200	400	1500
Carburante (L/h)	0	2,9	3,1	0	0
Olio (L/h)	0,03	0,3	0,32	0,09	0,11
Coefficiente di ricovero (%)	3	3	3	3	3
Superficie di ricovero (m ²)	12	20	20	12	25
Coefficiente di manutenzione e riparazione (%)	12	14	16	18	10
valore a nuovo (€)	27000	65000	65000	40000	22000
valore residuo (€)	3840,5	22664,1	22664,1	6710,9	6213,4
Valore parti	160	1200	1200	1500	800

rapido consumo (€)					
Valore di ricovero (€/m ²)	120	120	120	120	120
Prezzo carburante (€/l)	2	1,5	1,5	0	0
Prezzo olio (€/l)	5,1	4,2	4,2	5,5	5,5
Assicurazione (€/anno)	0	125	125	0	110
UMA (€)	0	45	45	0	0
Tasso interesse (%)	3	3	3	3	3

Tab. 100: costi macchina totali.

	Rotoimballatrice	Trattore per azionamento rotoimballatrice e trasporto	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice	Rimorchio con braccio idraulico
manutenzione e riparazione (€/h)	5,40	11,38	13,00	12,00	2,75
Carburante (€/h)	0,00	4,35	4,65	0,00	0,00
Lubrificante (€/h)	0,15	1,26	1,34	0,50	0,61
Rapido consumo (€/h)	0,11	1,20	1,00	3,75	0,53
Totale costi variabili (€/h)	5,66	18,19	19,99	16,25	3,89
Deprezzamento (€/anno)	2326,65	4963,06	4963,06	4742,25	1585,95
Assicurazione (€/anno)	0,00	125,00	125,00	0,00	110,00
UMA (€/anno)	0,00	5,28	5,28	0,00	0,00
Costo di ricovero (€/anno)	43,20	72,00	72,00	43,20	90,00
Totale costi fissi (€/anno)	2369,85	5165,33	5165,33	4785,45	1785,95
Costi totali singolo mezzo (€/h)	5,86	18,70	20,51	16,84	4,04

Tab. 101: costi imputabile alla manodopera per singola operazione.

	Raccolta	Trasporto	Sminuzzatura
numero	1	2	2
onorario operaio (€/h)	16	16	16
costo totale squadra (€/t)	17	26	20

Tab. 102: costi di utilizzazione ed approvvigionamento della biomassa.

	COSTI DIRETTI €/t				COSTI INDIRETTI €/t			Totale €/t
	Raccolta	Trasporto	Sminuzzatura	TOT COSTI DIRETTI	Progettazione e coordinamento	Costi sicurezza	TOT COSTI INDIRETTI	
Costi totali	43,6	43,8	43,9	131,3	0,0	1,3	1,3	132,6

RACCOLTA E SMINUZZATURA DEI RESIDUI DI POTATURA DEGLI OLIVETI

Per ogni operazione e fase di raccolta sono stati calcolati i costi delle macchine utilizzate, nonché quelli del personale, della sicurezza e della progettazione e coordinamento.

Tab. 103: parametri tecnico economici delle macchine ed attrezzature.

	Rotoimballatrice	Trattore per azionamento rotoimballatrice e trasporto	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice	Rimorchio con braccio idraulico
numero	1	1	1	1	1
potenza del motore (kW)	0	70	70	0	0
potenza media utilizzata (%)	0	60	75	0	0
Vita tecnica (h)	12000	10000	10000	8000	12000
Vita economica (anni)	12	10	10	8	12
Impiego annuo (h/anno)	600	800	800	600	800

Tasso di deprezzamento (%)	15	10	10	20	10
Intervallo di sostituzione parti rapido consumo (h)	1500	1000	1200	400	1500
Carburante (L/h)	0	2,9	3,1	0	0
Olio (L/h)	0,03	0,3	0,32	0,09	0,11
Coefficiente di ricovero (%)	3	3	3	3	3
Superficie di ricovero (m ²)	12	20	20	12	25
Coefficiente di manutenzione e riparazione (%)	12	14	16	18	10
valore a nuovo (€)	27000	65000	65000	40000	22000
valore residuo (€)	3840,5	22664,1	22664,1	6710,9	6213,4
Valore parti rapido consumo (€)	160	1200	1200	1500	800
Valore di ricovero (€/m ²)	120	120	120	120	120
Prezzo carburante (€/l)	2	1,5	1,5	0	0
Prezzo olio (€/l)	5,1	4,2	4,2	5,5	5,5
Assicurazione (€/anno)	0	125	125	0	110
UMA (€)	0	45	45	0	0
Tasso interesse (%)	3	3	3	3	3

Tab. 104: costi macchina totali.

	Rotoimballatrice	Trattore per azionamento rotoimballatrice e trasporto	Trattore per sminuzzatura	Sminuzzatrice	Rimorchio con braccio idraulico
--	------------------	---	---------------------------	---------------	---------------------------------

manutenzione e riparazione (€/h)	5,40	11,38	13,00	12,00	2,75
Carburante (€/h)	0,00	4,35	4,65	0,00	0,00
Lubrificante (€/h)	0,15	1,26	1,34	0,50	0,61
Rapido consumo (€/h)	0,11	1,20	1,00	3,75	0,53
Totale costi variabili (€/h)	5,66	18,19	19,99	16,25	3,89
Deprezzamento (€/anno)	2326,65	4963,06	4963,06	4742,25	1585,95
Assicurazione (€/anno)	0,00	125,00	125,00	0,00	110,00
UMA (€/anno)	0,00	5,28	5,28	0,00	0,00
Costo di ricovero (€/anno)	43,20	72,00	72,00	43,20	90,00
Totale costi fissi (€/anno)	2369,85	5165,33	5165,33	4785,45	1785,95
Costi totali singolo mezzo (€/h)	5,86	18,70	20,51	16,84	4,04

Tab. 105: costi imputabile alla manodopera per singola operazione.

	Raccolta	Trasporto	Sminuzzatura
numero	1	2	2
onorario operaio (€/h)	16	16	16
costo totale squadra (€/t)	17	27	20

Tab.106: costi di utilizzazione ed approvvigionamento della biomassa.

	COSTI DIRETTI €/t				COSTI INDIRETTI €/t			Totale €/t
	Raccolta	Trasporto	Sminuzzatura	TOT COSTI DIRETTI	Progettazione e coordinamento	Costi sicurezza	TOT COSTI INDIRETTI	
Costi totali	43,6	46,4	43,9	133,9	0,0	1,3	1,3	135,2

APPLICAZIONE DELLA LCA AI DUE CASI DI STUDIO

IL CASO DI STUDIO PIÙ GRANDE LA “TIPOLOGIA MEDIA”: DESCRIZIONE DELL’AZIENDA AGRICOLA

Nel presente studio la metodologia LCA illustrata nei precedenti paragrafi è stata applicata a diverse filiere energetiche che concorrono alla fornitura di energia termica per l'azienda agricola.

L’Azienda studiata rappresenta una realtà abbastanza significativa in cui all’interno dell’azienda a prevalente governo agricolo sussistono attività satelliti. All’azienda è infatti annesso un albergo con piscina con apertura stagionale da aprile a ottobre. Dall’analisi dei consumi di energia termica è risultata particolarmente significativa la fornitura di acqua calda sanitaria, considerando anche l’elevata quantità di energia necessaria al riscaldamento dell’acqua della piscina.

Nell’azienda è stata installata una sola caldaia a cippato in grado di erogare una potenza utile di 650 kW. Le utenze sono raggiunte attraverso una rete di teleriscaldamento.

STRUTTURA DELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA

Il termine “filiera Legno-Energia” indica un insieme organizzato di fattori di produzione, trasformazione, trasporto e utilizzazione del legno a scopo energetico. Il primo passo è la produzione (nel nostro caso comprende il recupero dei residui di potature di vite e olivo e la gestione del bosco), passando per la riduzione del legno in materiale idoneo alla trasformazione energetica (operazione di cippatura), per arrivare all’alimentazione della caldaia e alla gestione degli impianti termici.

La filiera per essere economicamente sostenibile deve originarsi a livello locale, economizzando i costi di trasporto del legno: le massime distanze devono rimanere entro un raggio di 20-30 km dall’impianto termico di utilizzazione.

La logistica del cantiere suggerisce alcuni punti chiave da tenere in considerazione in fase di progettazione della filiera:

- accessibilità dei punti di raccolta, con particolare attenzione alla pendenza e alla viabilità del territorio;
- specie presenti e tipo di governo;
- eventuali approvvigionamenti esterni alla proprietà;
- strutturazione del cantiere di raccolta e cippatura;

- organizzazione dei trasporti;
- stoccaggio.

Per pianificare l'intero processo è stata analizzata ogni singola voce della filiera, escludendo dalla trattazione solamente il primo punto, che dovrà essere approfondito in fase esecutiva. Inoltre l'accorpamento della proprietà è tale da assicurare un posizionamento dei cantieri limitrofi al punto di utilizzo del cippato, consentendo di escludere qualsiasi problema relativo al trasporto.

DISPONIBILITÀ DI BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA

Come anticipato le fonti ligno-cellulosiche utilizzate come combustibile nell'impianto di teleriscaldamento provengono da potature e ramaglie di vite e olivo e dal bosco. Nelle tabelle 107, 108, 109, sono riassunti i dati relativi alla superficie impiantata con colture di olivo, vite e bosco ceduo rispettivamente, nonché le caratteristiche del legno.

Tab. 107: biomassa disponibile proveniente dalle potature di olivo

Superficie dedicata a uliveto	50 ha
Biomassa effettivamente disponibile	0,9 t _{s.s.} /ha anno
Biomassa effettivamente disponibile	1,4 t _{s.f.} /ha anno
PCI sminuzzato	18,1 MJ/kg _{s.s.}
Potenza alla fiamma complessiva	326.340 kWh/anno
Potenza utile complessiva (rendimento 85%)	277.389 kWh/anno

Tab. 108: biomassa disponibile proveniente dalle potature di vite

Superficie dedicata a vigneto	90 ha
Biomassa effettivamente disponibile	1,1 t _{s.s.} /ha anno
Biomassa effettivamente disponibile	1,8 t _{s.f.} /ha anno
PCI sminuzzato	17,7 MJ/kg _{s.s.}
Potenza alla fiamma complessiva	834900 kWh/anno
Potenza utile complessiva (rendimento 85%)	709665 kWh/anno

Tab. 109: biomassa disponibile proveniente dal taglio del bosco ceduo

Superficie dedicata a bosco ceduo a prevalenza cerro	225 ha
Incremento medio annuo	3,2 t _{s.s.} /ha anno
Incremento medio annuo	5,1 t _{s.f.} /ha anno
Turno di ceduazione	15 anni
Superficie annua utilizzata	15 ha/anno
PCI sminuzzato	18,8 MJ/kgs.s.
Potenza alla fiamma complessiva	485632 kWh/anno
Potenza utile complessiva (rendimento 85%)	412787 kWh/anno

Tab. 110: dati relativi al legno sminuzzato proveniente da residui di potatura degli olivi

Parametro	Unità di misura	Valore rilevato
Umidità	%	38
Ceneri	w/w db*	1,6
PCS	MJ/kg daf*	19,4
PCI	MJ/kg daf*	18,1
Carbonio	% w/w daf*	53
Idrogeno	% w/w daf*	6
Ossigeno	% w/w daf*	40,5
Azoto	% w/w daf*	0,45
Zolfo	% w/w daf*	0,04
Cloro	% w/w daf*	0,01
Fluoro	% w/w daf*	-

Tab. 111: dati relativi al legno sminuzzato proveniente da residui di potatura dei vigneti

Parametro	Unità di misura	Valore rilevato
Umidità	%	43
Ceneri	w/w db*	2,2
PCS	MJ/kg daf*	19,4

PCI	MJ/kg daf*	17,7
Carbonio	% w/w daf*	49
Idrogeno	% w/w daf*	6
Ossigeno	% w/w daf*	44,2
Azoto	% w/w daf*	0,77
Zolfo	% w/w daf*	0,03

Tab. 112: dati relativi al legno sminuzzato proveniente da ceduo di cerro

Parametro	Unità di misura	Valore rilevato
Umidità	%	46
Ceneri	w/w db*	1,1
PCS	MJ/kg daf*	20,1
PCI	MJ/kg daf*	18,8
Carbonio	% w/w daf*	50
Idrogeno	% w/w daf*	6,135
Ossigeno	% w/w daf*	43,025
Azoto	% w/w daf*	0,3495
Zolfo	% w/w daf*	0,0285
Cloro	% w/w daf*	0,022
Fluoro	% w/w daf*	0,0005
*w peso; daf sostanza secca senza ceneri; db sostanza secca con ceneri		

IL CASO STUDIO: DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA E DEGLI OBIETTIVI

L'analisi del ciclo di vita (LCA) parte con la definizione dell'intero sistema cui deve essere applicata. In pratica devono essere definiti gli obiettivi, le ipotesi e i confini dello studio dell'LCA. I limiti o confini del sistema vengono identificati valutando i flussi di materiali ed energia del processo principale. Il primo problema è decidere dove interrompere il flusso di materiali ed energia dei sottoprocessi, poiché l'analisi potrebbe risultare infinita se i confini non venissero tracciati in modo da considerare solo gli impatti ambientali più importanti.

Nella realtà la determinazione dei limiti del sistema è fatta basandosi sulla disponibilità dei dati, oppure sull'ipotesi, quando si tratta di paragonare più soluzioni progettuali di escludere dall'analisi i processi che compaiono equivalentemente in tutti i sistemi oggetto di studio.

Nel presente capitolo i limiti del sistema sono stati determinati per due diverse filiere energetiche, allo scopo di poter effettuare un confronto fra di esse da un punto di vista di sostenibilità ambientale. La scelta di queste tre filiere energetiche è stata determinata dall'organizzazione e dalle necessità dell'azienda stessa.

Come alternativa validamente applicabile attualmente quale combustibile per la produzione di acqua calda sanitaria e per il riscaldamento degli edifici dell'annesso agriturismo, l'azienda potrebbe utilizzare GPL.

Pertanto, sono state analizzate le seguenti filiere energetiche:

1. Filiera Legno - Energia
2. Filiera GPL – Energia.

DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA

È possibile delineare i processi principali che verranno considerati nell'analisi del ciclo di vita della produzione di acqua calda sanitaria e/o per riscaldamento. Tali processi sono stati delineati per mezzo del metodo IDEF0 (Integration Definition for Function modeling), che consente di descrivere processi anche molto complessi mediante la logica dell'analisi per attività. Il ciclo di vita di un prodotto o di un processo viene scomposto in un insieme di attività collegate tra loro, come illustrato in Fig. 7, per le filiere energetiche. In un diagramma IDEF0 gli elementi analizzati sono rappresentati da frecce e caselle: le caselle individuano le attività, le frecce entranti dal lato sinistro costituiscono gli input, ovvero tutti quegli elementi che vengono modificati durante le attività principali; le frecce uscenti dal lato destro indicano gli output, e indicano il risultato delle modificazioni; le frecce entranti dal basso evidenziano i meccanismi, ovvero quelle entità che permettono lo svolgimento dell'attività (personale, impianti); le frecce entranti dall'alto costituiscono il controllo, in sostanza i vincoli, le specifiche e le procedure cui l'attività deve sottostare. Il diagramma così impostato permette di scegliere i processi più importanti della LCA, in modo da poter inventariare i dati occorrenti per definire correttamente gli impatti ambientali.

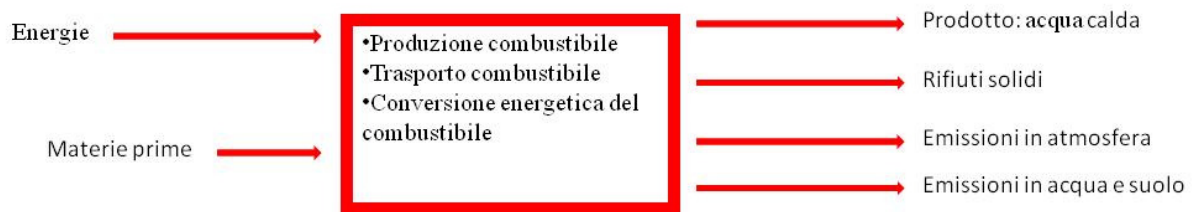


Fig. 7: diagramma IDEF0 per filiere energetiche

DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI PRINCIPALI

Il caso di studio indagato e l'ipotesi di raffronto, pur fornendo lo stesso output, ovvero acqua calda, usano come fonte energetica input diversi, ovvero legno o GPL. Lo sfruttamento di questi input coinvolge tecnologie diverse per la creazione delle quali occorrono filiere specializzate. La specializzazione di una filiera è concretamente individuata in una LCA da una diversificazione sia dei flussi di materia che di quelli di energia. Dato che la metodologia LCA segue il prodotto "dalla culla alla tomba", per poter comprendere l'impatto che questi tre processi provocano non è sufficiente fermarsi alle emissioni che vengono prodotte nella fase di combustione finale in caldaia.

L'obiettivo principale del presente studio è, quindi, duplice:

- paragonare il prodotto "acqua calda" con funzione di riscaldamento e/o fornitura di acqua calda sanitaria, originato dalle 2 diverse filiere energetiche;
- analizzare la filiera Legno-Energia nelle sue diverse fasi per verificarne la sostenibilità energetico-ambientale in maniera approfondita e non soltanto complessivamente.

Per raggiungere tale obiettivo in GEMIS è stato creato uno scenario nel quale confrontare i 2 processi: filiera Legno-Energia e filiera GPL-Energia. Prima di interrogare il programma per l'ottenimento dei risultati è stato inserito il consumo energetico annuo delle 2 tipologie di impianto pari a 845'000 kWh, ovvero il consumo medio annuo rilevato nell'azienda agricola.

Essendo l'obiettivo finalizzato a valutare l'impatto energetico-ambientale delle 2 filiere, è stato deciso di analizzare i seguenti output:

- gas serra, in termini di CO₂ equivalente;
- emissioni atmosferiche, in termini di SO₂ equivalente, NO_x, HCl e particolato;
- rifiuti solidi, in termini di ceneri;
- bilanci cumulati di energia (CER) e di massa (CMR).

Gli ultimi due parametri, CER e CMR, permettono di valutare in maniera indicativa la sostenibilità del processo calcolando l'uso di risorse primarie. Il parametro CER misura la quantità di risorse di energia primaria, mentre il parametro CMR la quantità di materie prime necessarie per realizzare un determinato prodotto.

Le risorse in GEMIS sono gli input dei processi di estrazione e quindi sono l'inizio delle filiere dei processi. In particolare, le risorse di energia primaria possono essere rinnovabili o non rinnovabili e includere energia e materie prime, ma mai gli scarti/rifiuti identificati quali risorse secondarie. Nel caso in oggetto per esempio il calcolo del parametro CER lungo la filiera Legno-Energia non includerà la biomassa ligneo-cellulosica nel caso in cui vengano utilizzate le potature di olivo e vite, mentre includerà il legno da bosco essendo in questo caso usata la legna da ardere senza preoccuparsi della ramaglia e del sottobosco. Per quanto riguarda le materie prime GEMIS considera tutte le risorse che possono essere convertite in materiali primari utilizzabili nei processi. Alcuni esempi sono metalli, minerali, aria, acqua, ma anche petrolio, metano, carbone o biomassa se sono usati come materia (per esempio in processi chimici come lubrificanti, ...) e non come combustibili.

DEFINIZIONE DELL'UNITÀ FUNZIONALE

Nel caso oggetto di studio è stata fissata quale unità funzionale 1 kWht, essendo l'"acqua calda" il prodotto da considerare quale output delle 2 diverse filiere energetiche. È stato, inoltre, considerato che le filiere energetiche abbiano quale output soltanto il prodotto "acqua calda". Infatti, sebbene il processo di combustione finale nel caso della filiera Legno-Energia comporti la produzione di ceneri, tali ceneri non sono state considerate sottoprodotto. Tale scelta è stata determinata dal fatto che in fase di progetto di massima non è stata presa in considerazione l'opportunità di smaltire tali ceneri in campo perché l'operazione, anche se valutata positivamente da un punto di vista agronomico, risulterebbe troppo onerosa in termini di stoccaggio, spandimento e in generale di organizzazione aziendale. Le ceneri, pertanto, sono state considerate quale rifiuto solido.

DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI QUALITÀ DEI DATI

Per ciascun processo della filiera, GEMIS fornisce indicazioni relative alla qualità dei dati riportando informazioni fra cui:

1. le fonti bibliografiche di riferimento;

2. l'autore (per esempio le 2 filiere energetiche analizzate hanno come autore FUWG e sono così facilmente identificabili all'interno dell'intero data base di GEMIS);
3. un indicatore della qualità;
4. il gruppo tecnologico di appartenenza (per esempio le 3 filiere energetiche hanno come technology group "heat boiler");
5. lo stato tecnologico, ovvero se la tecnologia considerata nei processi è antiquata, esistente, nuova o rientra nella definizione di BAT (Best Available Technology);
6. l'anno di riferimento, indicando così se il processo in questione è modellato sulla base di analoghi processi tenendo conto della realtà di mercato o industriale attuale o futura (per alcuni processi vengono fatte proiezioni in termini di efficienza, affidabilità, impatto ambientale e quant'altro su orizzonti temporali futuri fino anche al 2030);
7. la localizzazione spaziale del processo indicando Paese o Continente coinvolto.

Anche per i prodotti sono fornite alcune di queste indicazioni sulla qualità dei dati. In particolare, per quanto riguarda l'indicatore di qualità, GEMIS, tenendo conto delle indicazioni riportate per singoli processi e/o prodotti, stabilisce automaticamente la qualità dei risultati ottenuti nello scenario conclusivo in cui vengono confrontate le 2 diverse filiere energetiche.

L'indicatore può risultare di livello:

- molto buono, i dati sono stati validati sperimentalmente e inseriti direttamente dall'autore;
- buono, i dati non sono stati validati sperimentalmente, ma comunque sono stati inseriti direttamente dall'autore;
- medio, i dati provengono da fonti indirette (per esempio da letteratura);
- semplicemente stimato, i dati sono stati stimati sulla base di analoghe esperienze riportate in fonti di varia natura;
- preliminare, i dati non sono utilizzabili per elaborare confronti e hanno bisogno di un approfondito affinamento.

I dati con cui abbiamo implementato il database GEMIS al fine di strutturare il sistema studiato e i relativi scenari sono stati riportati nei capitoli precedenti al fine di esplicitare al meglio anche il livello di validazione statistica e metodologica eseguita.

APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA LEGNO-ENERGIA

Tramite il diagramma IDEF0, è possibile adattare le attività ed i flussi di materia e energia per la filiera Legno-Energia ipotizzabile nell'azienda agricola. Vengono prodotti principalmente

vino e olio. In figura 8, è stato schematizzato il sistema agricolo aziendale mettendo in rilievo alcune interazioni con l'ambiente. Nello schema sono stati evidenziati anche gli scarti di produzione, ovvero le potature (ed eventualmente gli espianti) di olivo e vite. Questi scarti fino ad oggi hanno rappresentato un residuo rifiuto e sono stati destinati alla combustione a bordo campo. In particolare, i vigneti dell'azienda agricola utilizzano forme di allevamento a Gouyot; l'estensione della superficie interessata da vigneti è di circa 90 ha e la relativa stima della produzione annuale di biomassa ligneo-cellulosica recuperabile è attorno a 153 t/anno.

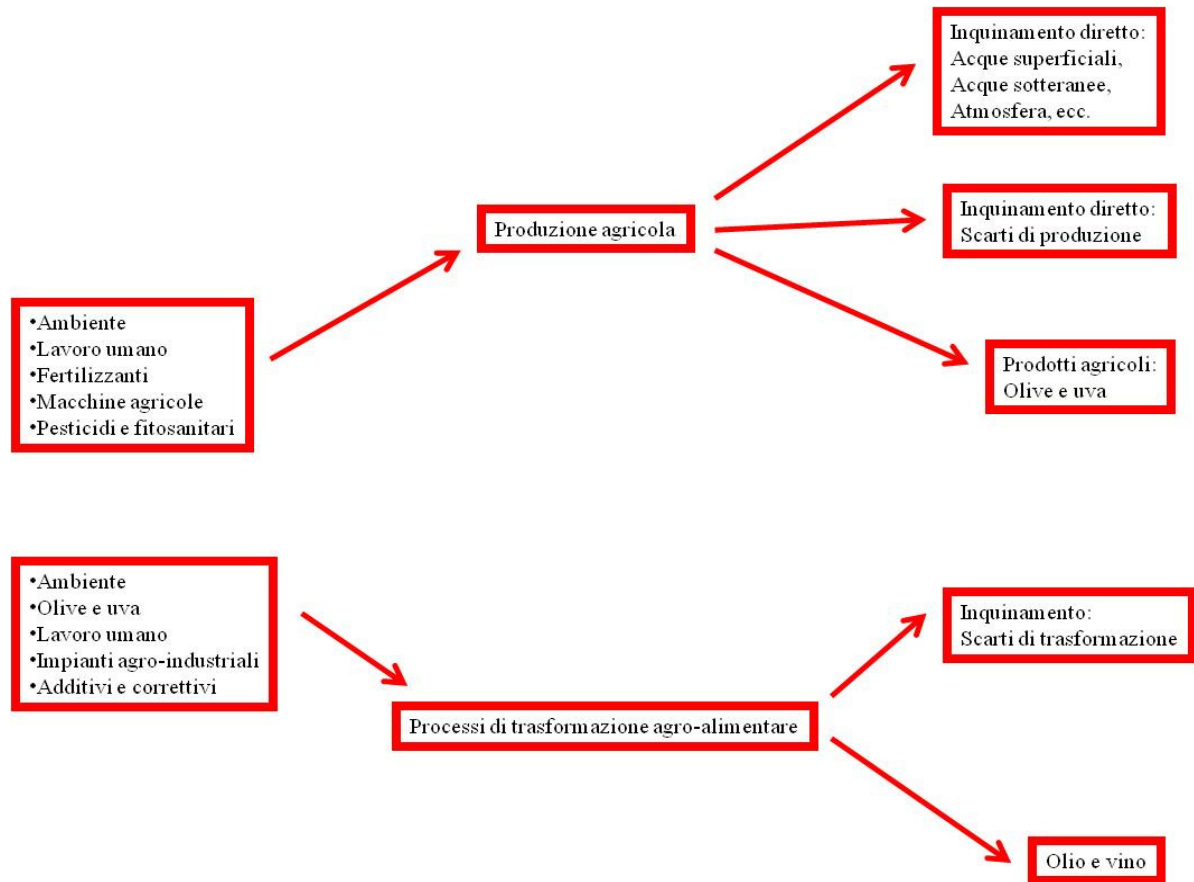


Fig. 8: schematizzazione del sistema aziendale del primo caso di studio

Nella LCA è possibile a questo punto, delineare la prima importante ipotesi: dato che frasche e ramaglie rappresentano gli scarti della produzione principale dell'azienda, ai fini dell'analisi, non saranno considerati gli impatti relativi alle fasi di produzione e dismissione delle macchine agricole per la gestione del vigneto, i mezzi utilizzati per il trasporto della biomassa, gli impatti provocati dai fertilizzanti e dai pesticidi utilizzati per la gestione del vigneto, nonché l'impiantistica relativa alla filiera di trasformazione agro-alimentare.

Anche per l'oliveto sono state assunte analoghe ipotesi per l'implementazione della LCA. Le superfici dedicate a oliveti nell'azienda sono di circa 50 ha e la stima della biomassa ligneo-cellulosica recuperabile intesa come residuo secco è di 70 t/anno. La cifra stimata comprende sia il legno che le ramaglie. L'azienda agricola possiede alcuni boschi cedui la superficie totale dei quali è pari a circa 225 ha. Attualmente la legna, ricavata dai tagli del bosco, viene collocata sul mercato come legna da ardere. Da un punto di vista di una LCA non è, quindi, necessario considerare nuovi flussi di materia o di energia per la raccolta, trasporto e stoccaggio della legna, in quanto queste operazioni sono già presenti nell'attuale scenario di riferimento. La stima delle quantità di legno proveniente dal bosco è di circa 76,5 t/anno.

In conclusione, l'analisi del ciclo di vita non prenderà in considerazione tutti i processi a monte della produzione della biomassa ligneo-cellulosica né i flussi di materia per la dismissione delle caldaie. Tenendo conto delle precedenti considerazioni inerenti il caso oggetto di studio, è allora possibile definire un opportuno diagramma IDEF0 per la filiera Legno-Energia, così come riportato in figura 8. Così definiti i confini del sistema e confrontando la filiera Legno-Energia dell'azienda agricola oggetto di studio con le svariate filiere presenti nel data base di GEMIS è stato possibile individuare alcuni processi analoghi facilmente adattabili e/o modificabili. In particolare, è stato identificato un processo che a partire da biomassa residuale permette, tramite combustione di cippato in una caldaia da 1 MW, di ottenere fornitura di acqua calda sanitaria e/o riscaldamento residenziale. La figura 9, rappresenta lo schema della filiera Legno- Energia sviluppata in GEMIS per il caso oggetto di studio. In tale filiera sulla catena principale sono inseriti due sottoprocessi: l'uso di combustibile fossile impiegato nelle macchine agricole e nei mezzi di trasporto; l'uso di energia elettrica adoperata per il funzionamento dell'impianto di riscaldamento. Questi sottoprocessi, definibili di secondo grado, dispongono di una filiera propria che a loro volta si compone di altri sottoprocessi. La filiera complessiva sviluppata in GEMIS coinvolge tutti i processi e sottoprocessi che saranno oggetto di studio: i dati inventariati dal software saranno la base di riferimento per tutti quei valori necessari nella LCA.

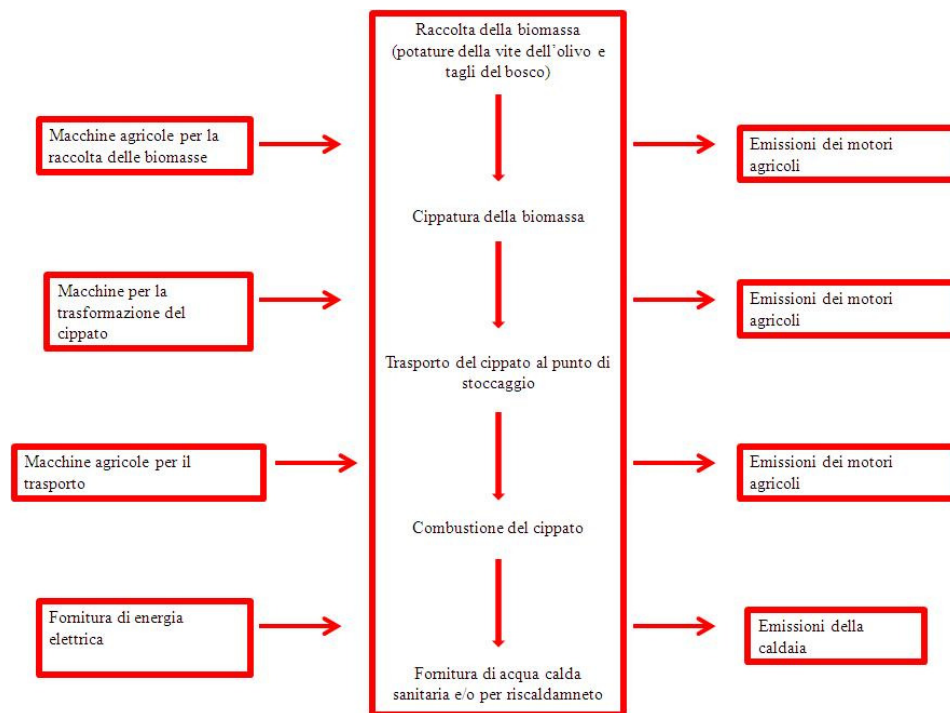


Fig. 9: diagramma IDEF0 per la filiera legno-energia oggetto di studio.

Nel presente studio alcuni processi sono stati modificati inserendo dati derivanti da letteratura e/o da sperimentazioni in campo, in particolare:

- "biomass-residuals";
- "Xtra-residue\wood-D-forest";
- "chipper-big\wood-chips-coarse-2000";
- "wood-chips-forest-heat-plant-1MW".

Come spiegato in dettaglio nei paragrafi seguenti. Tuttavia, è necessario ricordare che la maggior parte dei dati utilizzati sono stati estratti dalla banca dati di GEMIS e presentano un livello di qualità tale che lo scenario finale di confronto fra le 2 filiere energetiche origina risultati in parte oggetto di stima. Pertanto, anche se è auspicabile prevedere sviluppi di ricerca futuri che permettano di introdurre sempre ulteriori dati rilevati di livello buono o addirittura molto buono, risulta comunque possibile effettuare un confronto significativo fra le 2 filiere energetiche.

BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA QUALE FONTE ENERGETICA

Il primo passaggio della filiera, "biomass-residuals" insieme a "Xtra-residue\wood-D-forest", tiene conto del processo di estrazione della biomassa, ovvero del recupero della biomassa che diventa così una materia prima.

UTILIZZO DI GASOLIO AGRICOLO NELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA

Il secondo passaggio della filiera principale prevede il trasporto della biomassa. Viene coinvolto in questo modo il primo sottoprocesso della catena "dieselmotor-D-agricultureend (100%)". Il gasolio prodotto in tale sottoprocesso è il combustibile utilizzato sia dalle macchine agricole che trasferiscono la biomassa dal luogo di "estrazione" al punto di stoccaggio, sia dalla macchina cippatrice che riduce la biomassa legnosa in cippato. GEMIS permette di studiare gli impatti del sottoprocesso partendo dall'estrazione del petrolio grezzo e seguendo tutte le successive fasi. La produzione del combustibile si sviluppa secondo una propria filiera, costituita a sua volta da svariati sottoprocessi, come rappresentato. Le emissioni e gli impatti calcolati per il sottoprocesso di produzione del gasolio agricolo saranno sommati ai valori delle emissioni e degli impatti ambientali che derivano dalla combustione dei motori che realizzano il trasporto della biomassa o che permettono il funzionamento della macchina cippatrice.

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA NELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA

Dopo lo stoccaggio tutta la legna raccolta viene trasformata in combustibile mediante un processo di cippatura. La fase successiva consiste nella combustione in caldaia per permettere il riscaldamento dell'acqua, che sarà poi distribuita tramite reti già esistenti alle varie utenze. Il funzionamento della caldaia, delle pompe di ricircolo acqua, dei sistemi di depurazione fumi e rimozione ceneri e di quant'altro necessario per la conversione energetica finale, sono alimentati con corrente elettrica. La generazione e la distribuzione di corrente elettrica vengono, come nel caso del gasolio agricolo, considerati in una propria filiera, rappresentata e inventariata in GEMIS.

TRASPORTO DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA

Per rappresentare correttamente la fase di trasporto è stato necessario adattare GEMIS alle caratteristiche strutturali/organizzative dell'azienda studiata. La filiera impostata in GEMIS prende in considerazione un tragitto per il trasporto della biomassa di 100 km. Pertanto a

livello di impatti sono considerate le emissioni provocate dall'estrazione e dalla raffinazione di una quantità di gasolio necessaria a far coprire al mezzo di trasporto una distanza di 100 km oltre che le emissioni dirette associate alla combustione provocata dal motore del mezzo stesso. Nel caso studiato, dopo aver valutato la lunghezza delle strade poderali e demaniali, è stato stimato un percorso medio di 20 km, incluso il tragitto dal parco macchine e ritorno. Inoltre, nella filiera impostata in GEMIS per i trasferimenti della biomassa viene preso in considerazione l'uso di un camion da 40 t. Questa ipotesi tuttavia non simula correttamente la situazione presente nell'azienda agricola. Pertanto, visto che il software è fornito di un ampio data base di trattori agricoli, è stato possibile modificare adeguatamente la tipologia di veicolo considerando un trattore agricolo di medie dimensioni.

CIPPATURA DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA

Per quanto riguarda il processo di cippatura è stato modificato il processo "chipper-big-woodchips-coarse-2000" già presente in GEMIS.

Tab. 113: informazioni relative al processo di cippatura della filiera Legno-Energia sviluppata in GEMIS.

	Filiera LEGNO-ENERGIA	
	Processo di cippatura	
informazioni su dati di inventario	Processo originario d riferimento	chipper-big-wood-chips-coarse-2000
	Bibliografia	BMU biomass 2004
	Indicatore della qualità dei dati del processo originario	Livello di semplice stima
	Gruppo tecnologico	Other
	Anno di riferimento	Germania
	Localizzazione spaziale del processo originario	2000
dati tecnici/tecnologici	Potenza	2000 kW ^a
	Funzionamento	1000 h/anno
	Tempo di vita	10 anni

Energia spesa/energia ricavata	2.1*10 ⁻³ kWh/kW ^b
Distanza trasporto	0 km (cippatura sul posto)

GEMIS è fornito di una ampia banca dati relativa ai combustibili, dove sono raccolti dati relativi alla composizione chimica e al potere calorifico, e dati relativi ai processi, con informazioni sui trattamenti dei combustibili, dall'estrazione fino al loro utilizzo finale. La filiera principale, che termina con la combustione della biomassa, inserisce nelle formule usate dal software per l'ottenimento dei risultati finali la composizione chimica della legna cippata. Tale composizione può essere modificata dall'utente, inserendo dati attinenti al caso oggetto di studio. È stato, pertanto, necessario ipotizzare la composizione merceologica della biomassa ligneo-cellulosica: sono state stimate le percentuali in peso di legno da bosco, di residui di potatura di olivo e di vite, che costituiranno il mix da sottoporre a cippatura. Nello specifico è stata ipotizzata la seguente composizione media annua:

- 60% di legno proveniente da bosco,
- 30% di legno proveniente da potature di vite,
- 10% di legna proveniente da potature di olivo.

Nelle tabelle 110, 111, 112, sono riassunte le composizioni chimiche della legna. La sostanza secca senza ceneri (daf) rappresenta la parte della biomassa che partecipa attivamente alla combustione senza i "contaminanti", acqua (presente nel materiale come umidità) e ceneri. Pertanto, per indicare le caratteristiche specifiche del combustibile in fase di combustione (ad esempio il potere calorifico) è opportuno fare riferimento proprio alla sostanza secca senza ceneri. Questi valori così ricavati sono stati inseriti nel software ed in base a questi sono state calcolate le emissioni in fase di conversione energetica in caldaia. In particolare, è stata misurata una umidità media del cippato del 29% tenendo conto che comunque le ramaglie di partenza spesso presentano valori anche molto elevati (40-50%).

CONVERSIONE ENERGETICA DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA

Per il caso oggetto di studio è stato ipotizzato l'uso di una caldaia a griglia fissa a fiamma inversa. L'efficienza di combustione minima è quindi almeno pari all'85%, la durata di vita della caldaia può essere stimata di circa 10 anni con un funzionamento medio annuo di 1300 ore. La caldaia ha una potenza al focolare di 650 kW. La tabella 114 riassume tutte le informazioni riguardanti il processo di combustione finale. Per consentire un abbattimento delle ceneri volatili prodotte durante la combustione è stata prevista la presenza di un

multiciclone semplice che assorbe una potenza elettrica di 3,5 kW. Infine, sono stati introdotti i costi sia della caldaia (inclusendo anche i costi relativi alla realizzazione del locale stoccaggio e dell'impiantistica di depurazione fumi), sia del cippato (tenendo conto delle operazioni di raccolta e cippatura). Tali costi sono riportati nelle tabelle 115, 116, distinguendo in costi di investimento e costi di gestione. Questi dati potranno essere utilizzati in futuri sviluppi della metodologia LCA, visto che GEMIS permette di analizzare aspetti economici dei processi considerando costi interni ed esterni e quindi tenendo conto anche dei cosiddetti costi ambientali e/o sociali. In tabella 117 sono riportate le emissioni in atmosfera dovute alla sola combustione in caldaia.

Tab. 114: Informazioni relative al processo di combustione della filiera Legno-Energia sviluppata in GEMIS.

	Filiera LEGNO-ENERGIA	
	Processo di combustione	
informazioni su dati di inventario	Processo originario di riferimento	Wood-chips-forest-heat-plant-1MW
	Bibliografia	OEKO 1994 BMU 2002 Fichtner 2002 IVD 2000 BMU biomass 2004
	Indicatore della qualità dei dati del processo originario	livello buono
	Gruppo tecnologico	heat boiler
	Anno di riferimento	2008
	Localizzazione spaziale del processo originario	Germania
dati tecnici/tecnologici	Potenza	650 kW
	Funzionamento	1300 h/anno
	Tempo di Vita	10 anni
	Efficienza	85%

Tab. 115: Costi di investimento dell'impianto di riscaldamento

Costi	€
Investimento caldaia	95000
Investimento multiciclone	14000
Investimento totale	109000

Tab. 116: Costi di gestione dell'impianto di riscaldamento

Costi	€/anno
Costo Capitale	15100
Costi fissi	8400
Trasporti	520
Costi variabili	531
Costo del cippato	20700
Totale	45251

Tab. 117: emissioni atmosferiche dovute alla sola combustione nella caldaia

Emissioni atmosferiche	Valore	Unità di misura
Ossigeno	10	% vol
Biossido di Carbonio	8,5	% vol
CO ₂ eq	21,20 x 10 ⁻³	kg/kWh
So ₂ eq	340 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
No _x	261 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
HCL	24 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Particolato	13 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
CO	380,65 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
NMVOC	60 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Ceneri	3,3 x 10 ⁻³	kg/kWh

APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA GPL-ENERGIA

Ipotizzando l'impiego di GPL per la produzione di acqua calda sanitaria e per riscaldamento. La sigla GPL (Gas di Petrolio Liquefatti) identifica una miscela commerciale di gas

(idrocarburi) prevalentemente costituita da propano e butano. In natura questa miscela si presenta allo stato gassoso, ma ha la positiva caratteristica di poter essere portata allo stato liquido, a temperatura ambiente, se sottoposta a pressioni anche moderatamente superiori a quella ambientale. Questa caratteristica consente un'elevata facilità di stoccaggio e trasporto in recipienti a pressione. Il GPL può essere ottenuto sostanzialmente in 2 modi:

1) mediante estrazione

Nei giacimenti petroliferi i gas sono associati al greggio e abitualmente costituiscono oltre il 2% in peso della quantità complessiva del materiale estratto. Per ottenere un greggio commerciabile è necessario procedere ad una separazione dei liquidi dai gas; i gas vengono, quindi, canalizzati separatamente dal greggio. Analogo è il caso dei giacimenti metaniferi, dove propano e butano sono commisti al metano (e ad altri gas, come ad esempio l'elio) e rappresentano circa il 5% del prodotto estratto.

2) mediante raffinazione

I processi di raffinazione del greggio producono naturalmente alcuni gas: i tecnici li definiscono come prodotti fatali, ossia connaturati ai processi chimici attuati. Chiaramente questi prodotti fatali hanno costi di produzione nulli e non richiedono impieghi energetici aggiuntivi. A seconda delle caratteristiche del greggio e dei processi attuati, viene stimata una produzione di gas da un minimo del 2,5% ad un massimo del 5% del greggio trattato (la benzina arriva al 39%). Attualmente in Europa il GPL è per circa il 55% estratto da giacimenti di gas naturale e per il restante 45% derivato dalla raffinazione del petrolio.

Le caratteristiche della filiera GPL-Energia e le emissioni atmosferiche riferite alla sola combustione finale sono riportate nelle tabelle 119, 120.

Tab. 118: Caratteristiche del GPL in GEMIS

GPL Europa			
Composizione	C ₃ H ₈	50	%
	C ₄ H _{10i}	50	%
Peso specifico		0,08	kg/kWh
Quantità di CO ₂ prodotta nella combustione		637,488	kg/tJ
PCI		45,99	MJ/kg
PCS		49,86	MJ/kg

Tab. 119: Informazioni relative al processo di combustione della filiera GPL-Energia sviluppata in GEMIS

Filiera GPL-ENERGIA		
Processo di combustione		
informazioni su dati	Processo originario di riferimento	LPG-heating-atm.D-100%-end
	Bibliografia	CityPlan 2000
di inventario	Indicatore della qualità dei dati del processo originario	Livello semplicemente stimato
	Gruppo tecnologico	heat central heating
	Anno di riferimento	Germania
	localizzazione spaziale del processo originario	2000
dati tecnici/tecnologici	Potenza	650 kW
	Funzionamento	1300 h/anno
	Tempo di vita	20 anni
	Efficienza	90%

Tab. 120: Emissioni in atmosfera dovute alla sola combustione nella caldaia a GPL

Emissioni atmosferiche	Valore	Unità di misura
Ossigeno	3,1	%
Biossido di carbonio	11,1	%
CO ₂ eq	346 x 10 ⁻³	kg/kWh
SO ₂ eq	0,9 x 10 ⁻³	kg/kWh
NO _x	449,50 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
HCL	9,11 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Particolato	66,12 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
CO	109 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
NMVOC	103 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Ceneri volatili	2,21 x 10 ⁻³	kg/kWh

IL CASO STUDIO: VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

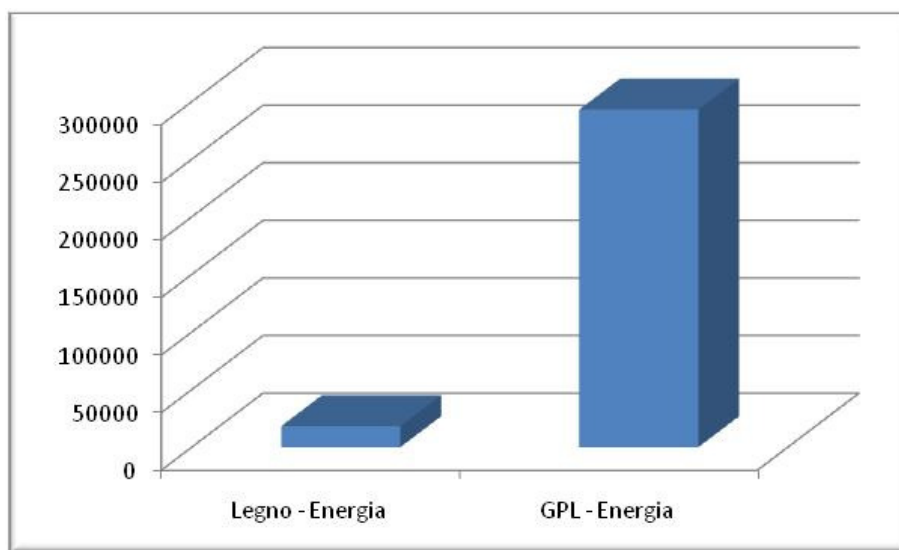
CO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE

Prima di commentare l'analisi svolta è necessario ricordare la distinzione tra due tipologie di CO₂: CO₂ originata da combustibili fossili e CO₂ originata da combustibili rinnovabili. I combustibili fossili (petrolio, carbone, ecc.) contengono carbonio immagazzinato nella materia vegetale mineralizzata disponibile nei giacimenti fossili; invece i combustibili rinnovabili come le biomasse ligneo-cellulosiche contengono carbonio atmosferico sequestrato attraverso la fotosintesi e immagazzinato nelle strutture vegetali. Anche se apparentemente il destino del carbonio è lo stesso, sia per i combustibili fossili sia per quelli rinnovabili in realtà l'intervallo di tempo richiesto per fissare il carbonio in composti chimici ad alto contenuto energetico è sensibilmente diverso. È proprio la brevità di tale intervallo di tempo che determina la rinnovabilità della risorsa biomassa ligneo-cellulosica non provocando aumento netto di CO₂ nell'atmosfera. La CO₂ prodotta dalla combustione di combustibili fossili, invece, non risulta prontamente riutilizzabile. In conclusione il principale "gas serra" è l'anidride carbonica e attorno ad essa ruota il concetto della rinnovabilità di una risorsa energetica, e quindi, nello specifico, della biomassa ligneo-cellulosica il cui punto di forza risiede proprio nella capacità di riassorbire il carbonio emesso durante la combustione. Tuttavia, l'effetto serra non è provocato unicamente dalla CO₂, ma anche da altri composti quali il metano, il protossido di azoto, il monossido di carbonio e altri composti organici volatili non metanici. La tabella 121, riassume i valori della CO₂ equivalente e dei gas che concorrono alla sua formazione per ciascuna delle 2 filiere energetiche proposte. I valori di CO₂ equivalente sono rappresentati nel grafico 24 per le due diverse filiere. Da una prima analisi appare evidente che la colonna della filiera Legno-Energia è notevolmente inferiore rispetto a quelle degli altri due processi. Ciò è essenzialmente dovuto a due motivi: il primo è che la CO₂ generata dalla combustione è considerata completamente rinnovabile e pertanto nel grafico viene completamente trascurata; il secondo è che la filiera richiede un ridotto coinvolgimento di input "industriali" a causa della diversa tipologia di combustibile (per esempio mancano completamente le fasi di raffinazione). GEMIS permette, inoltre, di individuare i processi maggiormente responsabili di un determinato impatto ambientale. Il Graf. 25, riporta i contributi alla CO₂ equivalente dei processi principali della filiera Legno-Energia. Il processo maggiormente responsabile dell'emissione di CO₂ equivalente è imputabile alla fornitura di energia elettrica, seguono

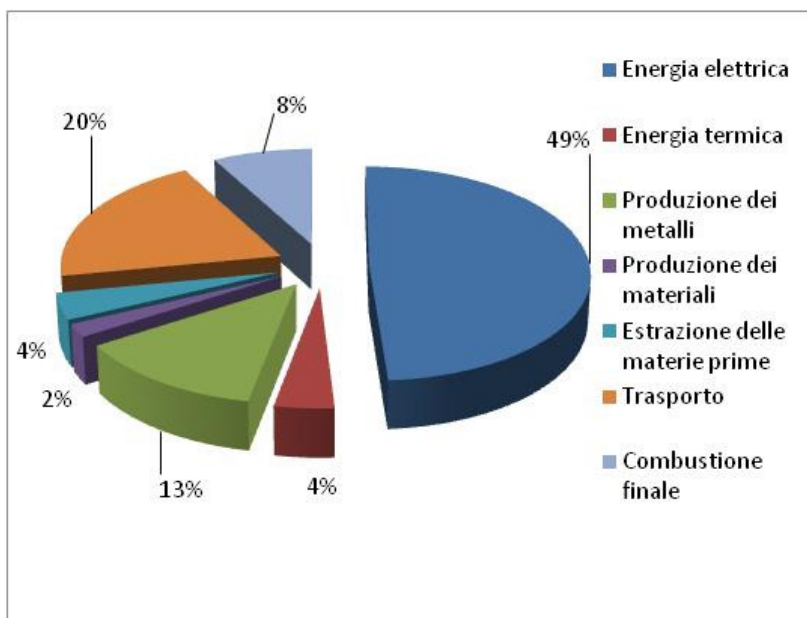
trasporto, produzione di metalli e infine combustione. Procedendo in modo analogo per la filiera GPL-Energia, sono stati ottenuti i risultati illustrati nei grafici 26. Concludendo è possibile affermare che nella filiera GPL-Energia il contributo più importante è dato dalla combustione finale, segue l'energia elettrica e, in minor misura, l'energia termica.

Tab. 121: Valori di CO₂ eq, CO₂, CH₄ e N₂O per la filiera Legno-Energia, GPL-Energia.

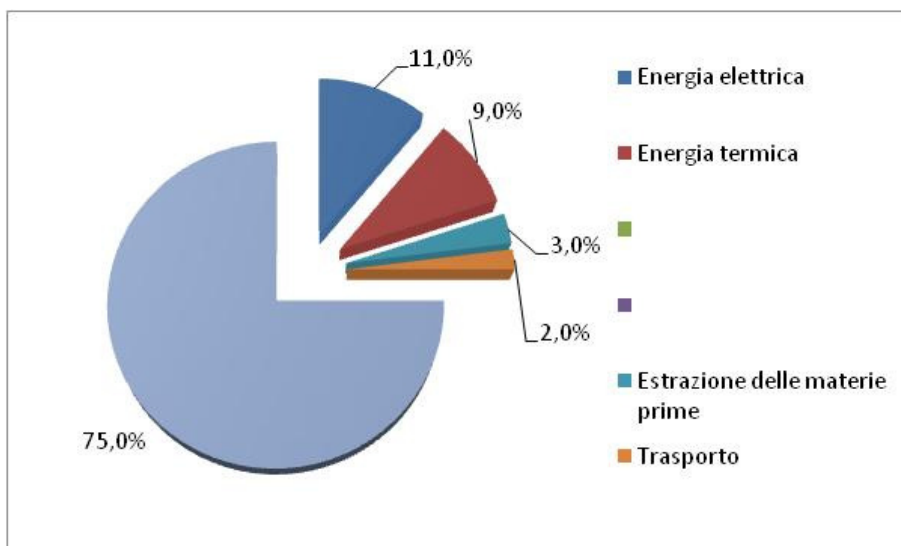
Filiera	CO ₂ equivalente [kg/anno]	CO ₂ [kg/anno]	CH ₄ [kg/anno]	N ₂ O [kg/anno]
Legno - Energia	18233	15721	50,8	4,5
GPL - Energia	293109	197167	308,3	2,4



Graf. 24: CO₂ equivalente(kg/anno) nelle filiere Legno-Energia, GPL-Energia.



Graf. 25: Contributi alla CO₂ equivalente dei principali processi della filiera Legno-Energia.



Graf. 26: Contributi alla CO₂ equivalente dei principali processi della filiera GPL-Energia.

SO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE

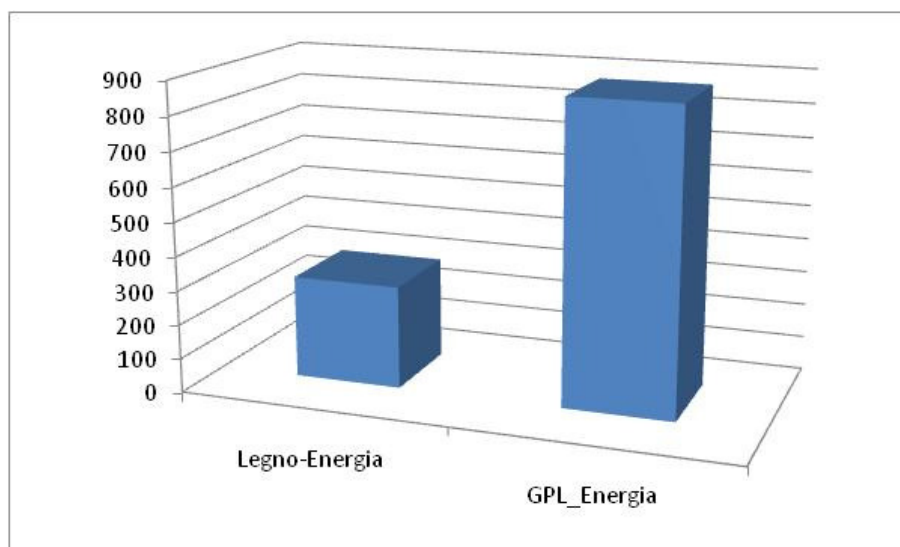
Come nel caso della CO₂ equivalente per poter valutare le emissioni provocate dai due sistemi di riscaldamento non è sufficiente esaminare la sola combustione. Il gas GPL, subisce infatti successive raffinazioni industriali; in particolare per essere utilizzato come combustibile viene depurato dal biossido di zolfo. Tale desolforazione ha un peso ambientale consistente sulle

emissioni totali dell'intera filiera. I risultati ottenuti dalle elaborazioni sono riportati in tabella 122 e rappresentati nel grafico 27.

Il sistema che provoca le maggior emissioni di SO₂ equivalente è la filiera GPL-Energia. I gas che concorrono al calcolo della SO₂ equivalente sono: anidride solforosa, ossidi di NO_x (che comprendono il monossido di azoto e il biossido di azoto), acido cloridrico, acido solfidrico, acido fluoridrico e ammoniaca. Nei grafici 28, 29, vengono analizzati i contributi dei sottoprocessi che determinano le emissioni di SO₂ equivalente nelle 2 diverse filiere.

Tab. 122: Valori di SO₂ equivalente per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia.

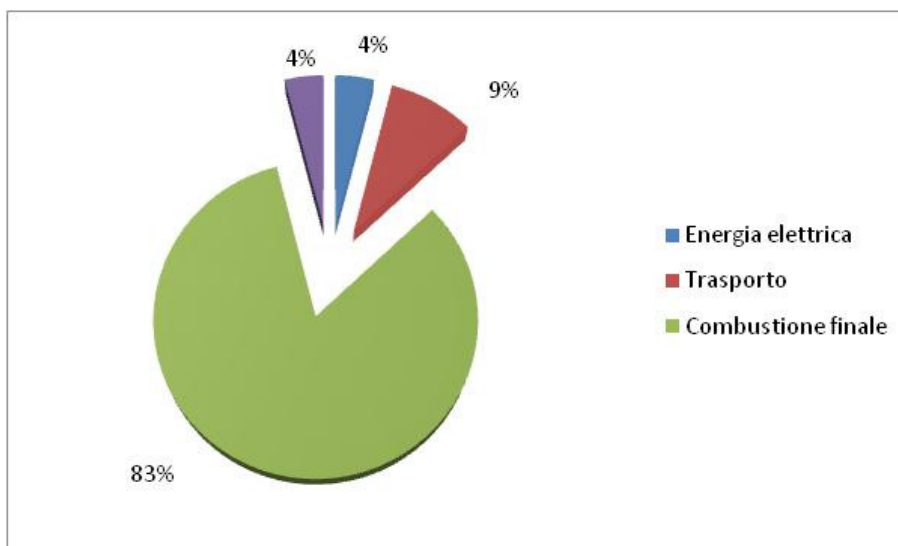
Filiera	SO ₂ equivalente [kg/anno]
Legno-Energia	301
GPL_Energia	878



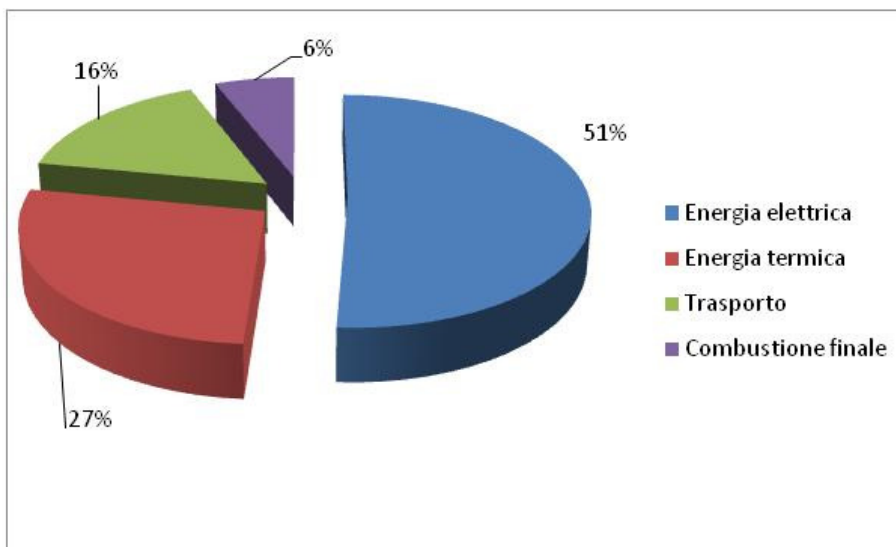
Graf. 27: SO₂ equivalente (kg/anno) per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia

Per quanto riguarda la filiera Legno-Energia, la combustione finale è la maggiore responsabile per le emissioni degli ossidi di zolfo; il trasporto, nel quale sono inclusi le emissioni dei motori è il secondo fattore in termine di importanza. Nella filiera GPL-Energia la raffinazione del GPL gioca un ruolo determinante e non a caso la voce “energia termica” che include questo sottoprocesso rappresenta il fattore con maggiore responsabilità nei confronti delle emissioni di

SO₂ equivalente. Tale filiera è comunque tra i 2 processi quello che provoca le maggiori emissioni di ossidi di zolfo. È pertanto interessante evidenziare il contributo della combustione finale: se venisse analizzata la sola combustione finale la filiera GPL-Energia risulterebbe la meno inquinante in termini di SO₂ equivalente.



Graf. 28: Contributi alla SO₂ equivalente dei principali processi della filiera Legno-Energia.



Graf. 29: Contributi alla SO₂ equivalente dei principali processi della filiera GPL-Energia.

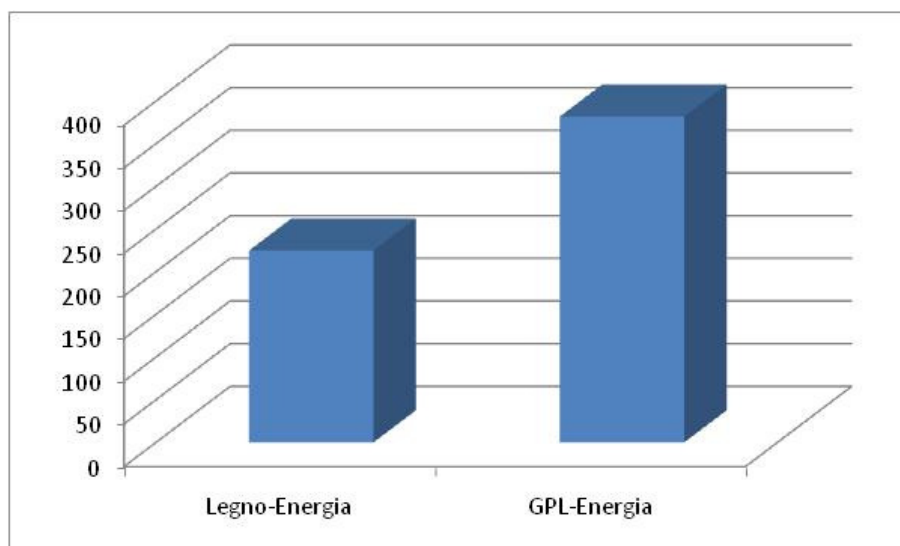
NO_x EMESSI DALLE FILIERE ENERGETICHE

Gli NO_x risultano dalla somma pesata del monossido di azoto (NO) e del biossido di azoto (NO₂). La valutazione nei tre processi ha dato come risultati i valori rappresentati nella tabella

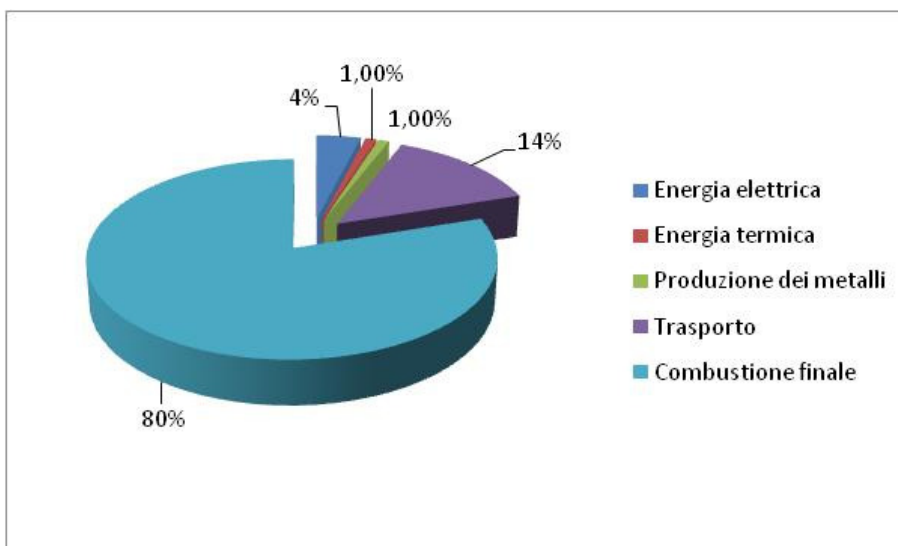
123 e nel grafico 30. I risultati ottenuti dimostrano che il GPL è il maggior responsabile di emissioni di NO_x. Lo studio condotto, come nei casi precedenti, ha visto valutare gli impatti dei relativi contributi all'interno di ciascuna filiera come rappresentato nei grafici 31, 32. Il maggior responsabile per le emissioni di NO_x nella filiera Legno-Energia è dato dalla combustione finale. Tale risultato potrebbe subire variazioni nel caso in cui, per impianti di elevata potenza, venissero adottate opportune tecnologie di abbattimento/riduzione delle emissioni. Anche il trasporto contribuisce, ma in misura nettamente inferiore. Nel caso della filiera GPL-Energia, invece, sono tre i fattori che partecipano alle emissioni: il più rilevante è rappresentato dal trasporto, segue la combustione finale e l'energia termica utilizzata lungo tutta la filiera. In questo caso i margini di miglioramento sono più limitati rispetto al caso del legno cippato, in quanto energia termica e trasporto non permettono margini di miglioramento.

Tab. 123: Valori di NO_x per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia

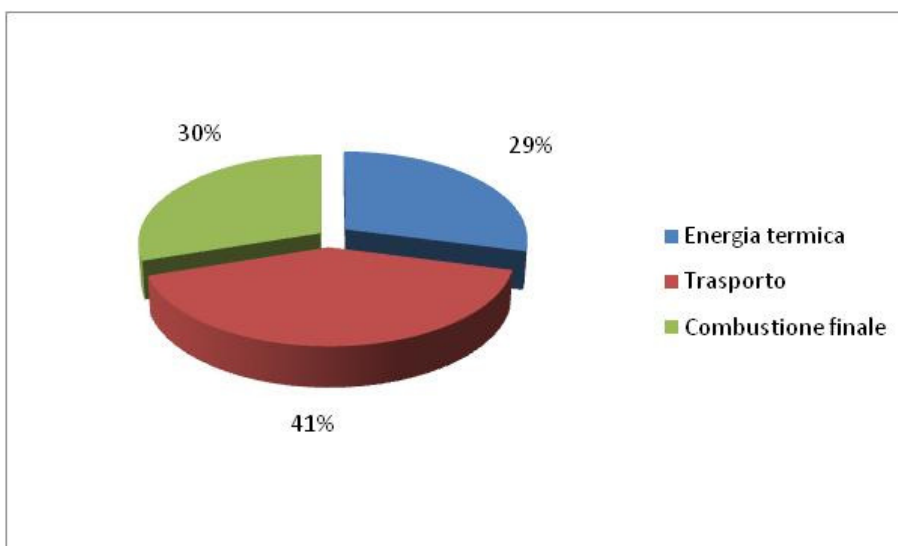
Filiera	NO _x [kg/anno]
Legno-Energia	225
GPL-Energia	382



Graf. 30: NO_x (kg/anno) nelle filiere Legno-Energia, GPL-Energia



Graf. 31: Contributi agli NO_x dei principali processi della filiera Legno-Energia.



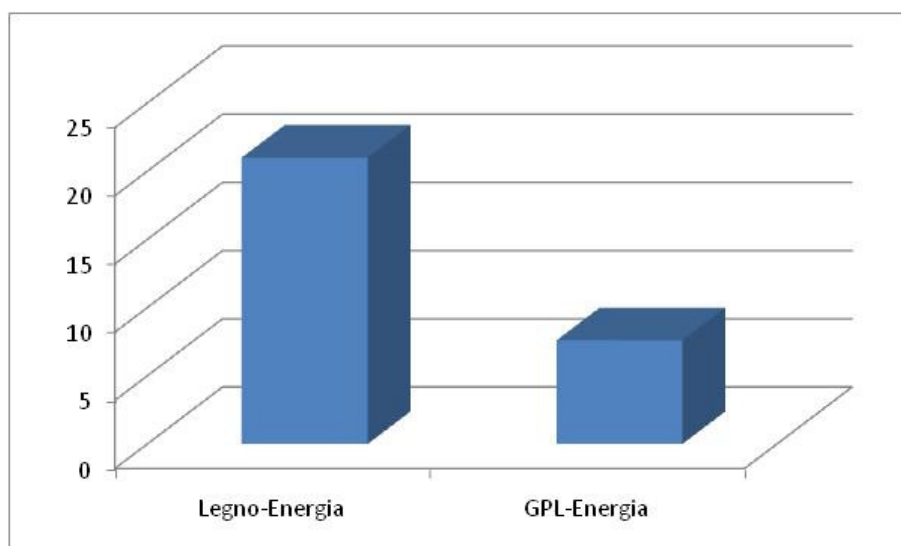
Graf. 32: Contributi agli NO_x dei principali processi della filiera GPL-Energia.

HCL EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE

Le emissioni di HCl, sono rappresentate in tabella 124 e nel grafico 33. Il grafico dimostra che la filiera che contribuisce in maniera più significativa alle emissioni di HCl è quella del legno cippato. Il risultato, peraltro previsto, deriva dalla composizione chimica dei combustibili.

Tab. 124: Valori di HCl per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia

Filiera	HCl [kg/anno]
Legno-Energia	21
GPL-Energia	7,6



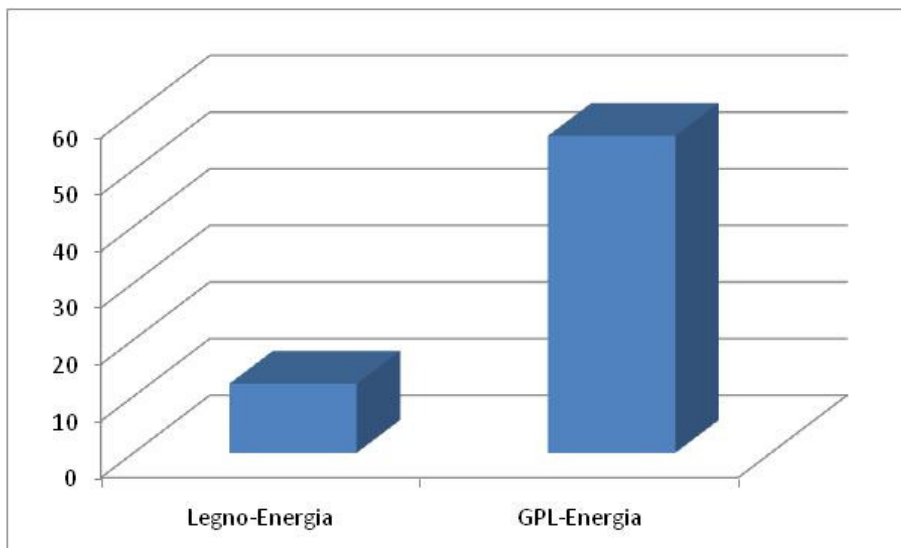
Graf. 33: HCl (kg/anno) nelle filiere Legno-Energia, GPL-Energia

PARTICOLATO EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE

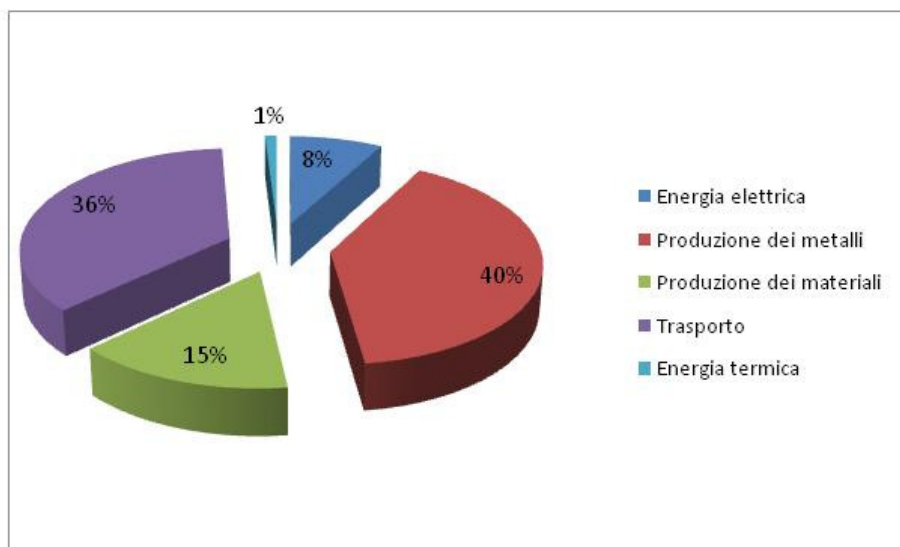
Il particolato può essere costituito da ceneri, polveri, fuliggine, sostanze silicee di varia natura, sostanze vegetali, sabbia, composti metallici, elementi come il carbonio o il piombo, ...ecc. Lo studio svolto per le filiera ha fornito i risultati riportati in tabella 125 e nel grafico 34. La stima complessiva per le emissioni di particolato per i due processi identifica nella filiera GPL-Energia, la filiera con maggiori emissioni. Nei grafici 35, 36, sono riportate le analisi delle filiere. I valori ricavati indicano come maggior responsabile per le emissioni di particolato la produzione dei metalli e il trasporto, di minore importanza sono, invece, i contributi dovuti alla produzione dei materiali e all'energia elettrica. Nel caso del GPL il maggior responsabile è l'energia termica richiesta nelle fasi di raffinazione ed estrazione del gas; seguono l'energia elettrica e il trasporto.

Tab. 125: Valori di particolato per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia

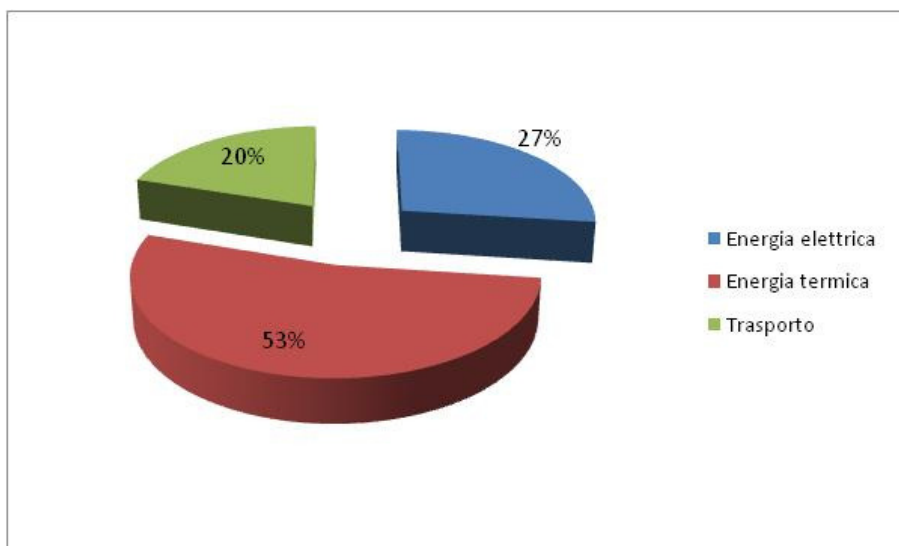
Filiera	Particolato [kg/anno]
Legno-Energia	12,2
GPL-Energia	56



Graf. 34: Particolato (kg/anno) nelle filiere Legno-Energia, GPL-Energia



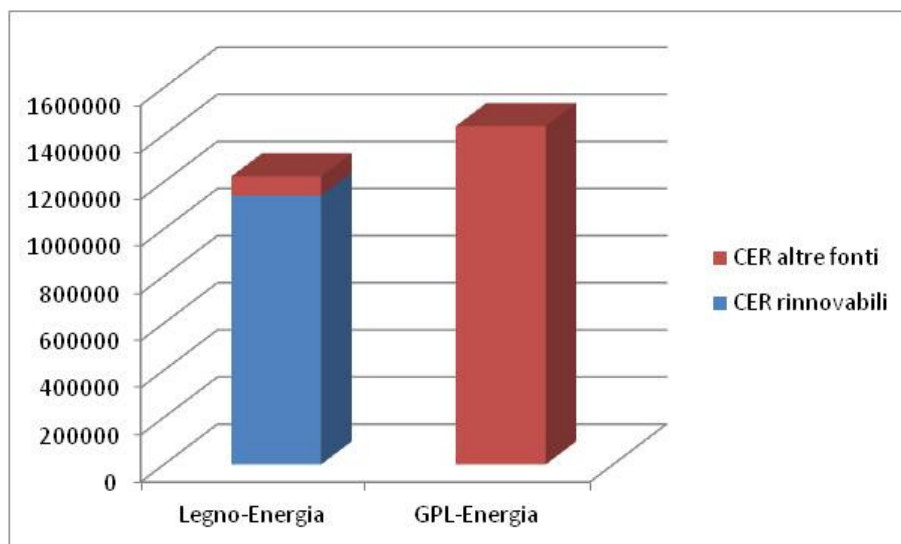
Graf. 35: Contributi al Particolato dei principali processi della filiera Legno-Energia.



Graf. 36: Contributi al Particolato dei principali processi della filiera GPL-Energia.

CUMULATED ENERGY REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE

Il parametro CER stima la quantità di risorse di energia primaria utilizzata lungo tutta la filiera per fornire energia termica. In particolare, nel grafico 37, e in tabella 126 più dettagliatamente, vengono riportati i valori di CER, espressi come kWh di energia primaria di input, relativamente alle 2 filiere energetiche per la produzione annua di 845'000 kWh di energia termica, ovvero il quantitativo richiesto complessivamente dall'azienda oggetto di studio. Nel grafico viene comunque fatta una distinzione fra energie primarie rinnovabili e non.



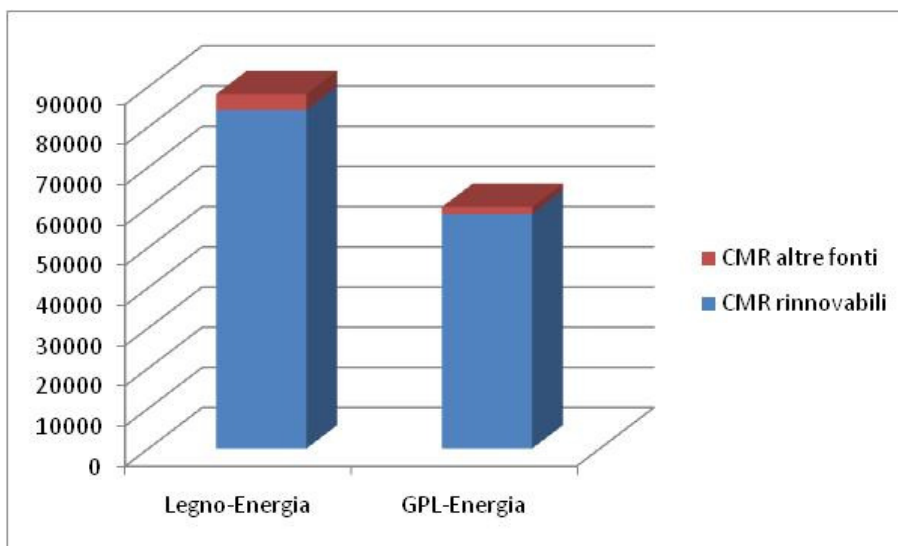
Graf. 37: Stima del parametro CER (kWh) per le diverse filiere energetiche.

Tab. 126: Contributi in kWh al parametro CER per le 3 diverse filiere.

Fili era	Total e	Bioma ssa residua le rinnov abile	Energi a geoter mica rinnov abile	Energi a idroele trica rinnov abile	Energi a rinnov abile	Carbon e non rinnov abile	Lignite non rinnov abile	Metan o non rinnov abile	Energi a nuclear e non rinnov abile	Petroli o non rinnov abile	Mate rie secon de- ALT RO	Rifiut i- altro
Leg no- Ene rgia	1076 731	10048 87,2	0,0	884,6	290,5	19601, 4	12242, 8	4004,9	15877, 2	13423, 2	1643, 3	3829, 8
GP L- Ene rgia	1265 079	1,8	0,0	6560,2	0,0	58031, 3	7340,9	3310,5	18184, 2	11713 45,2	300,2	3,5

***CUMULATED MATERIAL REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE
ENERGETICHE***

Il parametro CMR stima la quantità di materiali utilizzati lungo tutta la filiera per fornire energia termica. In particolare, nel grafico 38, e in tabella 127, più dettagliatamente, vengono riportati i valori di CMR, espressi come kg di materiali, relativamente alle 2 filiere energetiche per la produzione annua di 845'000 kWh di energia termica, ovvero il quantitativo richiesto complessivamente dall'azienda oggetto di studio. Nel grafico viene comunque fatta una distinzione fra materiali rinnovabili e non.



Graf. 38: Stima del parametro CMR (kg) per le diverse filiere energetiche.

Tab. 127: Contributi in kg al parametro CMR per le 2 diverse filiere.

Filiera	Totale	Aria - rinnovabile	Acqua - rinnovabile	Minerali - non rinnovabili	Scarti di ferro - non rinnovabili	Metano - non rinnovabili	Petrolio - non rinnovabili	Metalli - non rinnovabili	Scarti di acciaio - altro
Legno-Energia	88177	115,3	84060,2	1017,5	0,0	4,4	154,9	2161,8	662,8
GPL-Energia	60083	19,4	58313,8	1068,6	177,8	0,0	6,2	400,5	95,9

IL CASO STUDIO: INTERPRETAZIONE E MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA

Una prima considerazione ha riguardato le emissioni atmosferiche relative alla sola combustione finale delle 2 diverse tipologie di filiera energetica. Da un punto di vista

normativo deve essere fatto riferimento al D.Lgs 152/2006 in tabella 30 nel quale vengono stabiliti i limiti di emissione per gli impianti che utilizzano biomasse.

Tab. 128: limiti che devono rispettare gli impianti che utilizzano biomasse, riferiti ad un'ora di funzionamento dell'impianto nelle condizioni di esercizio più gravose, esclusi i periodi di avviamento arresto e guasti. Il tenore di ossigeno di riferimento è pari all'11% in volume nell'effluente gassoso anidro. I valori limite sono riferiti al volume di effluente gassoso secco rapportato alle condizioni normali.

Potenza termica nominale dell'impianto (MW)	[1] >0.15 - < 1
Polveri totali	100 mg/Nm ³
Carbonio organico totale (COT)	-
Monossido di carbonio (CO)	350 mg/Nm ³
Ossidi di azoto espressi come (NO ₂)	500 mg/Nm ³
Ossidi di zolfo espressi come (SO ₂)	200 mg/Nm ³
[1] agli impianti di potenza termica nominale pari o inferiore 35 kW si applica un valore limite di emissione per le polveri totali di 200 mg/Nm ³ .	

Pertanto, sono state stimate le emissioni relativamente alle 2 filiere energetiche. I risultati sono illustrati nelle tabella 129, 130, ed evidenziano i seguenti aspetti:

1. La combustione del legno causa un'emissione in atmosfera di particolato di gran lunga superiore ai limiti normativi. Tuttavia è evidente come tale problematica sia facilmente ed efficacemente (abbattimento del 92%) risolvibile adottando un semplice ciclone depolveratore come previsto nel caso oggetto di studio.
2. I valori di CO riscontrati per le 2 filiere sono comunque inferiori ai limiti normativi. Più bassi risultano tali valori più la combustione risulta essere completa.
3. Per quanto riguarda le emissioni di NO_x è possibile notare come si rimane entro i limiti normativi per entrambe le filiere.
4. Emissioni significative di SO₂ vengono riscontrate soltanto per il legno, visto che il GPL subisce processi di desolforazione in fase di raffinazione risulta essere pressoché privo di zolfo.

Tab. 129: Emissioni atmosferiche relative alla combustione finale della filiera Legno-Energia.

Filiera LEGNO – ENERGIA			
	senza depurazione	con depurazione	
Particolato	1003	2,5	mg/Nm ³
CO	123	123	mg/Nm ³
NO _x	98	98	mg/Nm ³
SO ₂ equivalente	55	50	mg/Nm ³

Tab. 130: Emissioni atmosferiche relative alla combustione finale della filiera GPL-Energia.

Filiera GPL – ENERGIA		
Particolato	0,5	mg/Nm ³
CO	18	mg/Nm ³
NO _x	92	mg/Nm ³
SO ₂ equivalente	-	mg/Nm ³

Invece, per quanto riguarda il bilancio ambientale delle intere filiere energetiche, ovvero i risultati della LCA precedentemente riportati, oltre a sottolineare come la filiera Legno-Energia risulti classificabile quasi come una filiera ad emissioni nulle di gas ad effetto serra, è possibile affermare che:

1. la filiera Legno-Energia presenta le emissioni di SO₂ equivalente più basse;
2. la filiera Legno-Energia presenta le emissioni di NO_x più basse;
3. la filiera Legno-Energia presenta le emissioni di HCl più elevate;
4. la filiera Legno-Energia presenta emissioni di particolato nettamente inferiori a quelle della filiera GPL-Energia;
5. la filiera Legno-Energia presenta un valore di CER abbastanza elevato, ma le energie primarie coinvolte sono quasi esclusivamente rinnovabili;
6. la filiera Legno-Energia presenta il valore di CMR più alto, anche questa volta in gran parte imputabile agli ingenti quantitativi di materiale rinnovabile coinvolto nella filiera.

È, inoltre, possibile prevedere futuri sviluppi e/o approfondimenti della metodologia LCA, ovvero:

- effettuare prove/rilievi sperimentali che permettano di aumentare la qualità dei dati di alcuni processi, soprattutto relativamente alla filiera Legno-Energia;

- valutare se sia fattibile da parte dell'azienda agricola prevedere una riutilizzazione tramite spandimento in campo delle ceneri prodotte dalla combustione della biomassa ligneo-cellulosica, ridefinendo conseguentemente la fase di allocazione per la filiera Legno-Energia;
- ampliare la valutazione dell'impatto ambientale, con particolare riferimento alle variazioni indotte dalla diversa gestione del bosco (per esempio sviluppando un'adeguata modellistica del sistema bosco-suolo, considerando anche le eventuali variazioni dei cosiddetti serbatoi di carbonio) e dei residui di potatura;
- considerare aspetti sociali/economici connessi alla filiera Legno-Energia stimabili con GEMIS, quali eventuale variazione dell'uso del suolo (per esempio se una parte del terreno aziendale viene convertita a bosco), incremento dell'occupazione (per esempio imputabile alla creazione di adeguata cooperativa che provveda alla raccolta della biomassa ligneo-cellulosica forestale), stima dei costi esterni.

IL CASO DI STUDIO PIÙ PICCOLO LA “TIPOLOGIA PICCOLA”: DESCRIZIONE DELL’AZIENDA AGRICOLA

Nel presente studio la metodologia LCA illustrata nei precedenti paragrafi è stata applicata a diverse filiere energetiche che concorrono alla fornitura di energia termica per l'azienda agricola.

L'Azienda studiata rappresenta una realtà agricola locale senza altre attività collaterali. La necessità termica è derivata dal riscaldamento dell’abitazione del proprietario e relativa acqua sanitaria, inoltre è anche presente una piscina che necessita di un discreto apporto di energia termica per il riscaldamento dell’acqua.

Nell’azienda è stata installata una sola caldaia a cippato in grado di erogare una potenza utile di 61 kW. L’utenza è raggiunta attraverso una minirete di teleriscaldamento.

STRUTTURA DELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA

Il termine “filiera Legno-Energia” indica un insieme organizzato di fattori di produzione, trasformazione, trasporto e utilizzazione del legno a scopo energetico. Il primo passo è la produzione (nel nostro caso comprende il recupero dei residui di potature di vite e la gestione di filari di robinia), passando per la riduzione del legno in materiale idoneo alla trasformazione

energetica (operazione di cippatura), per arrivare all'alimentazione della caldaia e alla gestione degli impianti termici.

La filiera per essere economicamente sostenibile deve originarsi a livello locale, economizzando i costi di trasporto del legno: le massime distanze devono rimanere entro un raggio di 10-20 km dall'impianto termico di utilizzazione.

La logistica del cantiere suggerisce alcuni punti chiave da tenere in considerazione in fase di progettazione della filiera:

- accessibilità dei punti di raccolta, con particolare attenzione alla pendenza e alla viabilità del territorio;
- specie presenti e tipo di governo;
- eventuali approvvigionamenti esterni alla proprietà;
- strutturazione del cantiere di raccolta e cippatura;
- organizzazione dei trasporti;
- stoccaggio.

Per pianificare l'intero processo è stata analizzata ogni singola voce della filiera, escludendo dalla trattazione solamente il primo punto, che dovrà essere approfondito in fase esecutiva. Inoltre l'accorpamento della proprietà è tale da assicurare un posizionamento dei cantieri limitrofi al punto di utilizzo del cippato, consentendo di escludere qualsiasi problema relativo al trasporto.

DISPONIBILITÀ DI BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA

Come anticipato le fonti ligneo-cellulosiche utilizzate come combustibile nell'impianto di teleriscaldamento provengono da potature e ramaglie di vite e da filari arborei. Nelle tabelle 131, 132, sono riassunti i dati relativi alla superficie impiantata con vite e filari cedui di robinia rispettivamente, nonché le caratteristiche del legno.

Tab. 131: biomassa disponibile proveniente dalle potature di vite

Superficie dedicata a vigneto	10 ha
Biomassa effettivamente disponibile	1,0 t _{s.s.} /ha anno
Biomassa effettivamente disponibile	1,8 t _{s.f.} /ha anno
PCI sminuzzato	17,7 MJ/kg _{s.s.}
Potenza alla fiamma complessiva	50600 kWh/anno
Potenza utile complessiva (rendimento 77%)	38962 kWh/anno

Tab. 132: biomassa disponibile proveniente dai filari di robinia

Superficie dedicata a filari cedui a prevalenza robinia	5 ha
Incremento medio annuo	3,8 t _{s.s.} /ha anno
Incremento medio annuo	6 t _{s.f.} /ha anno
Turno di ceduzione	10 anni
Superficie annua utilizzata	0,5 ha/anno
PCI sminuzzato	18,9 MJ/kg _{s.s.}
Potenza alla fiamma complessiva	10298 kWh/anno
Potenza utile complessiva (rendimento 77%)	7930 kWh/anno

Tab. 133: dati relativi al legno sminuzzato proveniente da residui di potatura dei vigneti

Parametro	Unità di misura	Valore rilevato
Umidità	%	43
Ceneri	w/w db*	2,2
PCS	MJ/kg daf*	19,4
PCI	MJ/kg daf*	17,7
Carbonio	% w/w daf*	49
Idrogeno	% w/w daf*	6
Ossigeno	% w/w daf*	44,2
Azoto	% w/w daf*	0,77
Zolfo	% w/w daf*	0,03

Tab. 134: dati relativi al legno sminuzzato proveniente da filari di robinia

Parametro	Unità di misura	Valore rilevato
Umidità	%	41
Ceneri	w/w db*	1,5
PCS	MJ/kg daf*	20,8
PCI	MJ/kg daf*	18,9
Carbonio	% w/w daf*	49,8

Idrogeno	% w/w daf*	6,65
Ossigeno	% w/w daf*	42,58
Azoto	% w/w daf*	0,81
Zolfo	% w/w daf*	0,032
Cloro	% w/w daf*	0,018
Fluoro	% w/w daf*	0,0006
*w peso; daf sostanza secca senza ceneri; db sostanza secca con ceneri		

IL CASO STUDIO: DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA E DEGLI OBIETTIVI

L'analisi del ciclo di vita (LCA) parte con la definizione dell'intero sistema cui deve essere applicata. In pratica devono essere definiti gli obiettivi, le ipotesi e i confini dello studio dell'LCA. I limiti o confini del sistema vengono identificati valutando i flussi di materiali ed energia del processo principale. Il primo problema è decidere dove interrompere il flusso di materiali ed energia dei sottoprocessi, poiché l'analisi potrebbe risultare infinita se i confini non venissero tracciati in modo da considerare solo gli impatti ambientali più importanti.

Nella realtà la determinazione dei limiti del sistema è fatta basandosi sulla disponibilità dei dati, oppure sull'ipotesi, quando si tratta di paragonare più soluzioni progettuali di escludere dall'analisi i processi che compaiono equivalentemente in tutti i sistemi oggetto di studio.

Nel presente capitolo i limiti del sistema sono stati determinati per due diverse filiere energetiche, allo scopo di poter effettuare un confronto fra di esse da un punto di vista di sostenibilità ambientale. La scelta di queste due filiere energetiche è stata determinata dall'organizzazione e dalle necessità dell'azienda stessa.

L'alternativa validamente applicabile attualmente quale combustibile per la produzione di acqua calda sanitaria e per il riscaldamento degli edifici dell'annesso agriturismo, l'azienda potrebbe utilizzare GPL.

Pertanto, sono state analizzate le seguenti filiere energetiche:

1. Filiera Legno - Energia
2. Filiera GPL – Energia.

DEFINIZIONE DEI CONFINI DI SISTEMA

È possibile delineare i processi principali che verranno considerati nell'analisi del ciclo di vita della produzione di acqua calda sanitaria e/o per riscaldamento. Tali processi sono stati delineati per mezzo del metodo IDEF0 (Integration Definition for Function modeling), che consente di descrivere processi anche molto complessi mediante la logica dell'analisi per attività. Il ciclo di vita di un prodotto o di un processo viene scomposto in un insieme di attività collegate tra loro, come illustrato in figura 10, per le filiere energetiche. In un diagramma IDEF0 gli elementi analizzati sono rappresentati da frecce e caselle: le caselle individuano le attività, le frecce entranti dal lato sinistro costituiscono gli input, ovvero tutti quegli elementi che vengono modificati durante le attività principali; le frecce uscenti dal lato destro indicano gli output, e indicano il risultato delle modificazioni; le frecce entranti dal basso evidenziano i meccanismi, ovvero quelle entità che permettono lo svolgimento dell'attività (personale, impianti); le frecce entranti dall'alto costituiscono il controllo, in sostanza i vincoli, le specifiche e le procedure cui l'attività deve sottostare. Il diagramma così impostato permette di scegliere i processi più importanti della LCA, in modo da poter inventariare i dati occorrenti per definire correttamente gli impatti ambientali.

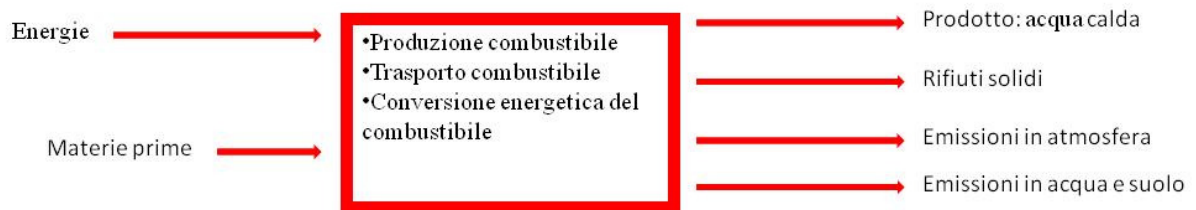


Fig. 10: diagramma IDEF0 per filiere energetiche

DEFINIZIONE DEGLI OBIETTIVI PRINCIPALI

Il caso di studio indagato e l'ipotesi di raffronto, pur fornendo lo stesso output, ovvero acqua calda, usano come fonte energetica input diversi, ovvero legno o GPL. Lo sfruttamento di questi input coinvolge tecnologie diverse per la creazione delle quali occorrono filiere specializzate. La specializzazione di una filiera è concretamente individuata in una LCA da una diversificazione sia dei flussi di materia che di quelli di energia. Dato che la metodologia LCA segue il prodotto "dalla culla alla tomba", per poter comprendere l'impatto che questi tre

processi provocano non è sufficiente fermarsi alle emissioni che vengono prodotte nella fase di combustione finale in caldaia.

L'obiettivo principale del presente studio è, quindi, duplice:

- paragonare il prodotto "acqua calda" con funzione di riscaldamento e/o fornitura di acqua calda sanitaria, originato dalle 2 diverse filiere energetiche;
- analizzare la filiera Legno-Energia nelle sue diverse fasi per verificarne la sostenibilità energetico-ambientale in maniera approfondita e non soltanto complessivamente.

Per raggiungere tale obiettivo in GEMIS è stato creato uno scenario nel quale confrontare i 2 processi: filiera Legno-Energia e filiera GPL-Energia. Prima di interrogare il programma per l'ottenimento dei risultati è stato inserito il consumo energetico annuo delle 2 tipologie di impianto pari a 61'000 kWh, ovvero il consumo medio annuo rilevato nell'azienda agricola.

Essendo l'obiettivo finalizzato a valutare l'impatto energetico-ambientale delle 2 filiere, è stato deciso di analizzare i seguenti output:

- gas serra, in termini di CO₂ equivalente;
- emissioni atmosferiche, in termini di SO₂ equivalente, NO_x, HCl e particolato;
- rifiuti solidi, in termini di ceneri;
- bilanci cumulati di energia (CER) e di massa (CMR).

Gli ultimi due parametri, CER e CMR, permettono di valutare in maniera indicativa la sostenibilità del processo calcolando l'uso di risorse primarie. Il parametro CER misura la quantità di risorse di energia primaria, mentre il parametro CMR la quantità di materie prime necessarie per realizzare un determinato prodotto.

Le risorse in GEMIS sono gli input dei processi di estrazione e quindi sono l'inizio delle filiere dei processi. In particolare, le risorse di energia primaria possono essere rinnovabili o non rinnovabili e includere energia e materie prime, ma mai gli scarti/rifiuti identificati quali risorse secondarie. Nel caso in oggetto per esempio il calcolo del parametro CER lungo la filiera Legno-Energia non includerà la biomassa ligneo-cellulosica nel caso in cui vengano utilizzate le potature di olivo e vite, mentre includerà il legno da bosco essendo in questo caso usata la legna da ardere senza preoccuparsi della ramaglia e del sottobosco. Per quanto riguarda le materie prime GEMIS considera tutte le risorse che possono essere convertite in materiali primari utilizzabili nei processi. Alcuni esempi sono metalli, minerali, aria, acqua, ma anche petrolio, metano, carbone o biomassa se sono usati come materia (per esempio in processi chimici come lubrificanti, ...) e non come combustibili.

DEFINIZIONE DELL'UNITÀ FUNZIONALE

Nel caso oggetto di studio è stata fissata quale unità funzionale 1 kWht, essendo l'"acqua calda" il prodotto da considerare quale output delle 2 diverse filiere energetiche. È stato, inoltre, considerato che le filiere energetiche abbiano quale output soltanto il prodotto "acqua calda". Infatti, sebbene il processo di combustione finale nel caso della filiera Legno-Energia comporti la produzione di ceneri, tali ceneri non sono state considerate sottoprodotto. Tale scelta è stata determinata dal fatto che in fase di progetto di massima non è stata presa in considerazione l'opportunità di smaltire tali ceneri in campo perché l'operazione, anche se valutata positivamente da un punto di vista agronomico, risulterebbe troppo onerosa in termini di stoccaggio, spandimento e in generale di organizzazione aziendale. Le ceneri, pertanto, sono state considerate quale rifiuto solido.

DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI QUALITÀ DEI DATI

Per ciascun processo della filiera, GEMIS fornisce indicazioni relative alla qualità dei dati riportando informazioni fra cui:

1. le fonti bibliografiche di riferimento;
2. l'autore (per esempio le 2 filiere energetiche analizzate hanno come autore FUWG e sono così facilmente identificabili all'interno dell'intero data base di GEMIS);
3. un indicatore della qualità;
4. il gruppo tecnologico di appartenenza (per esempio le 3 filiere energetiche hanno come technology group "heat boiler");
5. lo stato tecnologico, ovvero se la tecnologia considerata nei processi è antiquata, esistente, nuova o rientra nella definizione di BAT (Best Available Technology);
6. l'anno di riferimento, indicando così se il processo in questione è modellato sulla base di analoghi processi tenendo conto della realtà di mercato o industriale attuale o futura (per alcuni processi vengono fatte proiezioni in termini di efficienza, affidabilità, impatto ambientale e quant'altro su orizzonti temporali futuri fino anche al 2030);
7. la localizzazione spaziale del processo indicando Paese o Continente coinvolto.

Anche per i prodotti sono fornite alcune di queste indicazioni sulla qualità dei dati. In particolare, per quanto riguarda l'indicatore di qualità, GEMIS, tenendo conto delle indicazioni riportate per singoli processi e/o prodotti, stabilisce automaticamente la qualità dei risultati ottenuti nello scenario conclusivo in cui vengono confrontate le 2 diverse filiere energetiche.

L'indicatore può risultare di livello:

- molto buono, i dati sono stati validati sperimentalmente e inseriti direttamente dall'autore;
- buono, i dati non sono stati validati sperimentalmente, ma comunque sono stati inseriti direttamente dall'autore;
- medio, i dati provengono da fonti indirette (per esempio da letteratura);
- semplicemente stimato, i dati sono stati stimati sulla base di analoghe esperienze riportate in fonti di varia natura;
- preliminare, i dati non sono utilizzabili per elaborare confronti e hanno bisogno di un approfondito affinamento.

I dati con cui abbiamo implementato il database GEMIS al fine di strutturare il sistema studiato e i relativi scenari sono stati riportati nei capitoli precedenti al fine di esplicitare al meglio anche il livello di validazione statistica e metodologica eseguita.

APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA LEGNO-ENERGIA

Tramite il diagramma IDEF0, è possibile adattare le attività ed i flussi di materia e energia per la filiera Legno-Energia ipotizzabile nell'azienda agricola. Vengono prodotti principalmente vino e olio. In figura 11, è stato schematizzato il sistema agricolo aziendale mettendo in rilievo alcune interazioni con l'ambiente. Nello schema sono stati evidenziati anche gli scarti di produzione, ovvero le potature (ed eventualmente gli espianti) di viti. Questi scarti fino ad oggi hanno rappresentato un residuo rifiuto e sono stati destinati alla combustione a bordo campo. In particolare, i vigneti dell'azienda agricola utilizzano forme di allevamento a Gouyot; l'estensione della superficie interessata da vigneti è di circa 10 ha e la relativa stima della produzione annuale di biomassa ligneo-cellulosica recuperabile è attorno a 18 t/anno.

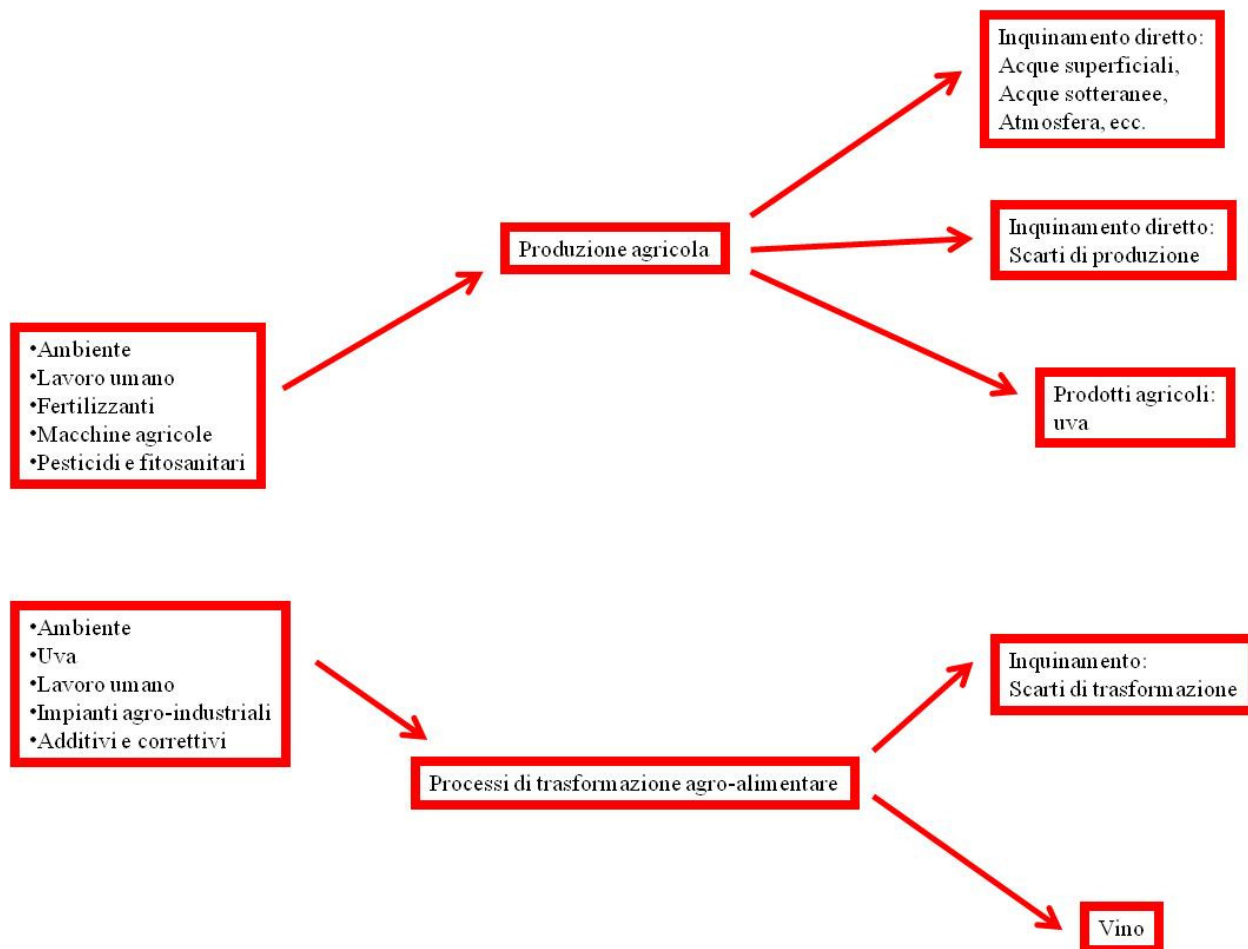


Fig. 11: schematizzazione del sistema aziendale del secondo caso di studio

Nella LCA è possibile a questo punto, delineare la prima importante ipotesi: dato che frasche e ramaglie rappresentano gli scarti della produzione principale dell'azienda, ai fini dell'analisi, non saranno considerati gli impatti relativi alle fasi di produzione e dismissione delle macchine agricole per la gestione del vigneto, i mezzi utilizzati per il trasporto della biomassa, gli impatti provocati dai fertilizzanti e dai pesticidi utilizzati per la gestione del vigneto, nonché l'impiantistica relativa alla filiera di trasformazione agro-alimentare.

L'azienda agricola possiede alcuni filari cedui di robinia, la superficie totale dei quali è pari a circa 5 ha. Attualmente la legna, ricavata dai tagli dei filari, viene collocata sul mercato come legna da ardere. Da un punto di vista di una LCA non è, quindi, necessario considerare nuovi flussi di materia o di energia per la raccolta, trasporto e stoccaggio della legna, in quanto queste

operazioni sono già presenti nell'attuale scenario di riferimento. La stima delle quantità di legno proveniente dai filari è di circa 3 t/anno.

In conclusione, l'analisi del ciclo di vita non prende in considerazione tutti i processi a monte della produzione della biomassa ligneo-cellulosica né i flussi di materia per la dismissione delle caldaie. Tenendo conto delle precedenti considerazioni inerenti il caso oggetto di studio, è stato allora possibile definire un opportuno diagramma IDEF0 per la filiera Legno-Energia, così come riportato in figura 10. Così definiti i confini del sistema e confrontando la filiera Legno-Energia dell'azienda agricola oggetto di studio con le svariate filiere presenti nel data base di GEMIS è stato possibile individuare alcuni processi analoghi facilmente adattabili e/o modificabili. In particolare, è stato identificato un processo che a partire da biomassa residuale permette, tramite combustione di cippato in una caldaia da 1 MW, di ottenere fornitura di acqua calda sanitaria e/o riscaldamento residenziale. La figura 12, rappresenta lo schema della filiera Legno- Energia sviluppata in GEMIS per il caso oggetto di studio. In tale filiera sulla catena principale sono inseriti due sottoprocessi: l'uso di combustibile fossile impiegato nelle macchine agricole e nei mezzi di trasporto; l'uso di energia elettrica adoperata per il funzionamento dell'impianto di riscaldamento. Questi sottoprocessi, definibili di secondo grado, dispongono di una filiera propria che a loro volta si compone di altri sottoprocessi. La filiera complessiva sviluppata in GEMIS coinvolge tutti i processi e sottoprocessi che saranno oggetto di studio: i dati inventariati dal software saranno la base di riferimento per tutti quei valori necessari nella LCA.

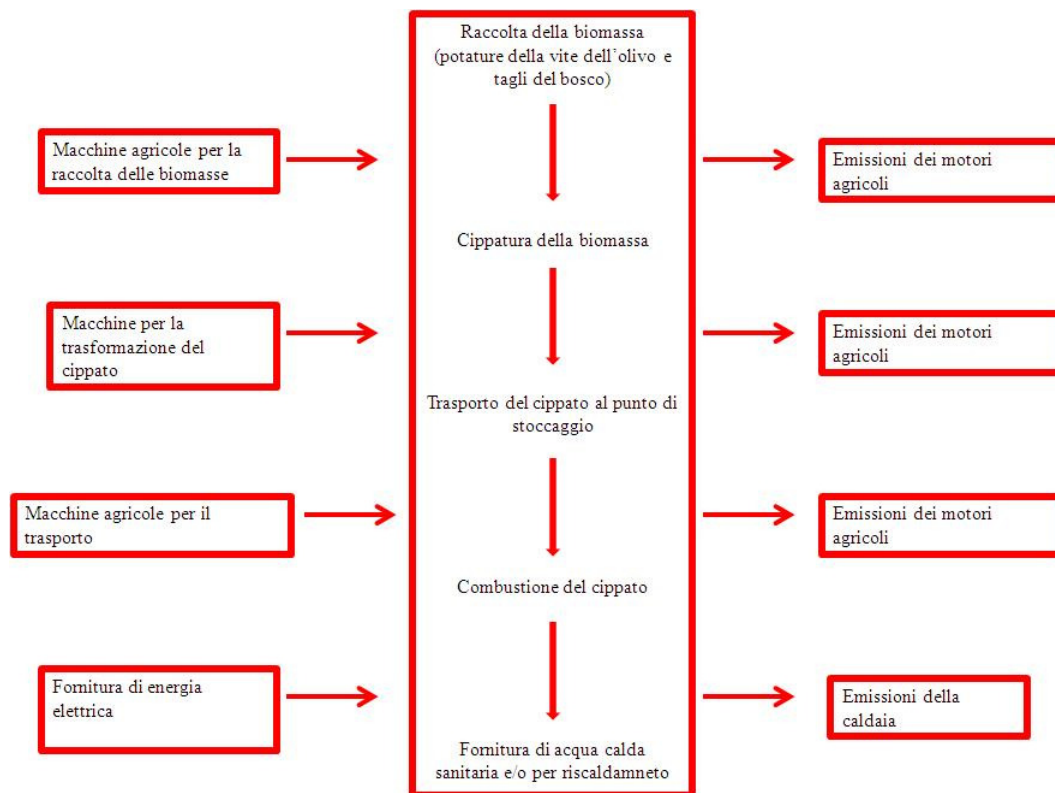


Fig.12: diagramma IDEF0 per la filiera legno-energia oggetto di studio

Nel presente studio alcuni processi sono stati modificati inserendo dati derivanti da letteratura e/o da sperimentazioni in campo, in particolare:

- "biomass-residuals";
- "Xtra-residue\wood-D-forest";
- "chipper-big\wood-chips-coarse-2000";
- "wood-chips-forest-heat-plant-1MW".

Come spiegato in dettaglio nei paragrafi seguenti. Tuttavia, è necessario ricordare che la maggior parte dei dati utilizzati sono stati estratti dalla banca dati di GEMIS e presentano un livello di qualità tale che lo scenario finale di confronto fra le 2 filiere energetiche origina risultati in parte oggetto di stima. Pertanto, anche se è auspicabile prevedere sviluppi di ricerca futuri che permettano di introdurre sempre ulteriori dati rilevati di livello buono o addirittura

molto buono, risulta comunque possibile effettuare un confronto significativo fra le 2 filiere energetiche.

BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA QUALE FONTE ENERGETICA

Il primo passaggio della filiera, "biomass-residuals" insieme a "Xtra-residue\wood-D-forest", tiene conto del processo di estrazione della biomassa, ovvero del recupero della biomassa che diventa così una materia prima.

UTILIZZO DI GASOLIO AGRICOLO NELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA

Il secondo passaggio della filiera principale prevede il trasporto della biomassa. Viene coinvolto in questo modo il primo sottoprocesso della catena "dieselmotor-D-agricultureend (100%)". Il gasolio prodotto in tale sottoprocesso è il combustibile utilizzato sia dalle macchine agricole che trasferiscono la biomassa dal luogo di "estrazione" al punto di stoccaggio, sia dalla macchina cippatrice che riduce la biomassa legnosa in cippato. GEMIS permette di studiare gli impatti del sottoprocesso partendo dall'estrazione del petrolio grezzo e seguendo tutte le successive fasi. La produzione del combustibile si sviluppa secondo una propria filiera, costituita a sua volta da svariati sottoprocessi, come rappresentato. Le emissioni e gli impatti calcolati per il sottoprocesso di produzione del gasolio agricolo saranno sommati ai valori delle emissioni e degli impatti ambientali che derivano dalla combustione dei motori che realizzano il trasporto della biomassa o che permettono il funzionamento della macchina cippatrice.

CONSUMI DI ENERGIA ELETTRICA NELLA FILIERA LEGNO-ENERGIA

Dopo lo stoccaggio tutta la legna raccolta viene trasformata in combustibile mediante un processo di cippatura. La fase successiva consiste nella combustione in caldaia per permettere il riscaldamento dell'acqua, che sarà poi distribuita tramite reti già esistenti alle varie utenze. Il funzionamento della caldaia, delle pompe di ricircolo acqua, dei sistemi di depurazione fumi e rimozione ceneri e di quant'altro necessario per la conversione energetica finale, sono alimentati con corrente elettrica. La generazione e la distribuzione di corrente elettrica vengono, come nel caso del gasolio agricolo, considerati in una propria filiera, rappresentata e inventariata in GEMIS.

TRASPORTO DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA

Per rappresentare correttamente la fase di trasporto è stato necessario adattare GEMIS alle caratteristiche strutturali/organizzative dell'azienda studiata. La filiera impostata in GEMIS prende in considerazione un tragitto per il trasporto della biomassa di 100km. Pertanto a livello di impatti sono considerate le emissioni provocate dall'estrazione e dalla raffinazione di una quantità di gasolio necessaria a far coprire al mezzo di trasporto una distanza di 100km oltre che le emissioni dirette associate alla combustione provocata dal motore del mezzo stesso. Nel caso studiato, dopo aver valutato la lunghezza delle strade poderali e demaniali, è stato stimato un percorso medio di 15 km, incluso il tragitto dal parco macchine e ritorno. Inoltre, nella filiera impostata in GEMIS per i trasferimenti della biomassa viene preso in considerazione l'uso di un camion da 40 t. Questa ipotesi tuttavia non simula correttamente la situazione presente nell'azienda agricola. Pertanto, visto che il software è fornito di un ampio data base di trattori agricoli, è stato possibile modificare adeguatamente la tipologia di veicolo considerando un trattore agricolo di medie dimensioni.

CIPPATURA DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA

Per quanto riguarda il processo di cippatura è stato modificato il processo "chipper-big-woodchips-coarse-2000" già presente in GEMIS. Le informazioni relative a tale parte di filiera sono riassunte in tabella 135.

Tab. 135: informazioni relative al processo di cippatura della filiera Legno-Energia sviluppata in GEMIS.

informazioni su dati di inventario	Filiera LEGNO-ENERGIA	
	Processo di cippatura	
	Processo originario d riferimento	chipper-big-wood-chips-coarse-2000
	Bibliografia	BMU biomass 2004
	Indicatore della qualità dei dati del processo originario	Livello di semplice stima
	Gruppo tecnologico	Other
	Anno di riferimento	Germania
	Localizzazione spaziale del processo originario	2000
dati	Potenza	800 kW ^a

tecnici/tecnologici	Funzionamento	100 h/anno
	Tempo di vita	10 anni
	Energia spesa/energia ricavata	$1,8 \cdot 10^{-3}$ kWh/kW ^b
	Distanza trasporto	0 km (cippatura sul posto)

^aQuesto valore è stato ottenuto considerando che la potenza prodotta dipende da 21t/anno di legno cippato con PCI di circa 17 MJ/kg per circa 100 h/anno di funzionamento.

GEMIS è fornito di una ampia banca dati relativa ai combustibili, dove sono raccolti dati relativi alla composizione chimica e al potere calorifico, e dati relativi ai processi, con informazioni sui trattamenti dei combustibili, dall'estrazione fino al loro utilizzo finale. La filiera principale, che termina con la combustione della biomassa, inserisce nelle formule usate dal software per l'ottenimento dei risultati finali la composizione chimica della legna cippata. Tale composizione può essere modificata dall'utente, inserendo dati attinenti al caso oggetto di studio. È stato, pertanto, necessario ipotizzare la composizione merceologica della biomassa ligneo-cellulosica: sono state stimate le percentuali in peso di legno da bosco, di residui di potatura di vite, che costituiranno il mix da sottoporre a cippatura. Nello specifico è stata ipotizzata la seguente composizione media annua:

- 14% di legno proveniente da filari di robinia;
- 86% di legno proveniente da potature di vite.

Le composizioni chimiche delle tre tipologie di legno sono state ricavate da fonte CTI (CTI, 2003) e da queste, utilizzando gli opportuni pesi, è stato possibile ricavare la composizione chimica del cippato per l'azienda agricola. Nelle tabelle 133, 134, sono riassunte le composizioni chimiche della legna. La sostanza secca senza ceneri (daf) rappresenta la parte della biomassa che partecipa attivamente alla combustione senza i "contaminanti", acqua (presente nel materiale come umidità) e ceneri. Pertanto, per indicare le caratteristiche specifiche del combustibile in fase di combustione (ad esempio il potere calorifico) è opportuno fare riferimento proprio alla sostanza secca senza ceneri. Questi valori così ricavati sono stati inseriti nel software ed in base a questi sono state calcolate le emissioni in fase di conversione energetica in caldaia. In particolare, è stata misurata una umidità media del cippato del 25% tenendo conto che comunque le ramaglie di partenza spesso presentano valori anche molto elevati (40-50%).

CONVERSIONE ENERGETICA DELLA BIOMASSA LIGNEO-CELLULOSICA

Per il caso oggetto di studio è stato ipotizzato l'uso di una caldaia a griglia fissa a fiamma inversa. L'efficienza di combustione minima è quindi almeno pari all'77%, la durata di vita della caldaia può essere stimata di circa 10 anni con un funzionamento medio annuo di 1000 ore. La caldaia ha una potenza al focolare di 61 kW. La tabella 136, riassume tutte le informazioni riguardanti il processo di combustione finale. Per consentire un abbattimento delle ceneri volatili prodotte durante la combustione non è stata prevista alcuna misura. Infine, sono stati introdotti i costi sia della caldaia (inclusendo anche i costi relativi alla realizzazione del locale stoccaggio e dell'impiantistica di depurazione fumi), sia del cippato (tenendo conto delle operazioni di raccolta e cippatura). Tali costi sono riportati nelle tabelle 137, 138, distinguendo in costi di investimento e costi di gestione. Questi dati potranno essere utilizzati in futuri sviluppi della metodologia LCA, visto che GEMIS permette di analizzare aspetti economici dei processi considerando costi interni ed esterni e quindi tenendo conto anche dei cosiddetti costi ambientali e/o sociali. In tabella 139 sono riportate le emissioni in atmosfera dovute alla sola combustione in caldaia.

Tab. 136: Informazioni relative al processo di combustione della filiera Legno-Energia sviluppata in GEMIS.

	Filiera LEGNO-ENERGIA	
	Processo di combustione	
informazioni su dati di inventario	Processo originario di riferimento	Wood-chips-forest-heat-plant-1MW
	Bibliografia	OEKO 1994 BMU 2002 Fichtner 2002 IVD 2000 BMU biomass 2004
	Indicatore della qualità dei dati del processo originario	livello buono
	Gruppo tecnologico	heat boiler
	Anno di riferimento	2008
	Localizzazione spaziale del processo originario	Germania
dati tecnici/tecnologici	Potenza	61 kW
	Funzionamento	1000 h/anno
	Tempo di Vita	10 anni
	Efficienza	77%

Tab. 137: Costi di investimento dell'impianto di riscaldamento

Costi	€
Investimento caldaia	25500
Investimento multi ciclone	0
Investimento totale	25500

Tab. 138: Costi di gestione dell'impianto di riscaldamento

Costi	€/anno
Costo Capitale	2550
Costi fissi	700
Trasporti	150
Costi variabili	120
Costo del cippato	1230
Totale	4750

Tab. 139: emissioni atmosferiche dovute alla sola combustione nella caldaia

Emissioni atmosferiche	Valore	Unità di misura
Ossigeno	9,8	% vol
Biossido di Carbonio	9,1	% vol
CO ₂ eq	20,10 x 10 ⁻³	kg/kWh
So ₂ eq	350 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
No _x	252 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
HCl	22 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Particolato	18 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
CO	368,65 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
NMVOC	52 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Ceneri	3,8 x 10 ⁻³	kg/kWh

APPLICAZIONE DELLA LCA ALLA FILIERA GPL-ENERGIA

La sigla GPL (Gas di Petrolio Liquefatti) identifica una miscela commerciale di gas (idrocarburi) prevalentemente costituita da propano e butano. In natura questa miscela si presenta allo stato gassoso, ma ha la positiva caratteristica di poter essere portata allo stato liquido, a temperatura ambiente, se sottoposta a pressioni anche moderatamente superiori a

quella ambientale. Questa caratteristica consente un'elevata facilità di stoccaggio e trasporto in recipienti a pressione. Il GPL può essere ottenuto sostanzialmente in 2 modi:

1) mediante estrazione

Nei giacimenti petroliferi i gas sono associati al greggio e abitualmente costituiscono oltre il 2% in peso della quantità complessiva del materiale estratto. Per ottenere un greggio commerciabile è necessario procedere ad una separazione dei liquidi dai gas; i gas vengono, quindi, canalizzati separatamente dal greggio. Analogo è il caso dei giacimenti metaniferi, dove propano e butano sono commisti al metano (e ad altri gas, come ad esempio l'elio) e rappresentano circa il 5% del prodotto estratto.

2) mediante raffinazione

I processi di raffinazione del greggio producono naturalmente alcuni gas: i tecnici li definiscono come prodotti fatali, ossia connaturati ai processi chimici attuati. Chiaramente questi prodotti fatali hanno costi di produzione nulli e non richiedono impieghi energetici aggiuntivi. A seconda delle caratteristiche del greggio e dei processi attuati, viene stimata una produzione di gas da un minimo del 2,5% ad un massimo del 5% del greggio trattato (la benzina arriva al 39%). Attualmente in Europa il GPL è per circa il 55% estratto da giacimenti di gas naturale e per il restante 45% derivato dalla raffinazione del petrolio.

Le caratteristiche della filiera GPL-Energia e le emissioni atmosferiche riferite alla sola combustione finale sono riportate nelle tabelle 141, 142.

Tab. 140: Caratteristiche del GPL in GEMIS

GPL Europa			
Composizione	C ₃ H ₈	50	%
	C ₄ H _{10i}	50	%
Peso specifico		0,08	kg/kWh
Quantità di CO ₂ prodotta nella combustione		637,488	kg/tJ
PCI		45,99	MJ/kg
PCS		49,86	MJ/kg

Tab. 141: Informazioni relative al processo di combustione della filiera GPL-Energia sviluppata in GEMIS

	Filiera GPL-ENERGIA	
	Processo di combustione	
informazioni su dati	Processo originario di riferimento	LPG-heating-atm.D-100%-end
	Bibliografia	CityPlan 2000
di inventario	Indicatore della qualità dei dati del processo originario	Livello semplicemente stimato
	Gruppo tecnologico	heat central heating
	Anno di riferimento	Germania
	localizzazione spaziale del processo originario	2000
dati tecnici/tecnologici	Potenza	61 kW
	Funzionamento	1000 h/anno
	Tempo di vita	20 anni
	Efficienza	90%

Tab. 142: Emissioni in atmosfera dovute alla sola combustione nella caldaia a GPL

Emissioni atmosferiche	Valore	Unità di misura
Ossigeno	3,1	%
Biossido di carbonio	11,1	%
CO ₂ eq	346 x 10 ⁻³	kg/kWh
SO ₂ eq	0,9 x 10 ⁻³	kg/kWh
NO _x	449,50 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
HCL	9,11 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Particolato	66,12 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
CO	109 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
NMVOC	103 x 10 ⁻⁶	kg/kWh
Ceneri volatili	2,21 x 10 ⁻³	kg/kWh

IL CASO STUDIO: VALUTAZIONE DELL'IMPATTO AMBIENTALE

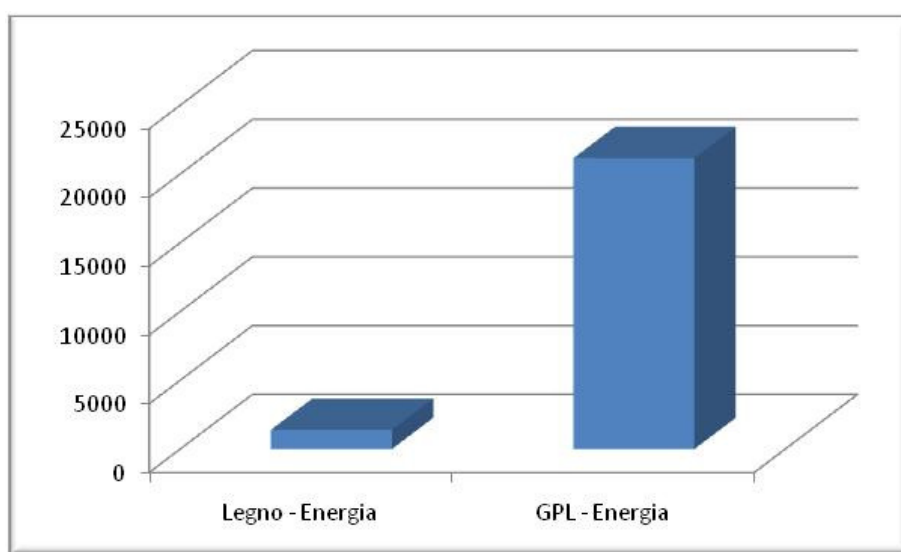
CO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE

Prima di commentare l'analisi svolta è necessario ricordare la distinzione tra due tipologie di CO₂: CO₂ originata da combustibili fossili e CO₂ originata da combustibili rinnovabili. I combustibili fossili (petrolio, carbone, ecc.) contengono carbonio immagazzinato nella materia vegetale mineralizzata disponibile nei giacimenti fossili; invece i combustibili rinnovabili come le biomasse ligneo-cellulosiche contengono carbonio atmosferico sequestrato attraverso la fotosintesi e immagazzinato nelle strutture vegetali. Anche se apparentemente il destino del carbonio è lo stesso, sia per i combustibili fossili sia per quelli rinnovabili in realtà l'intervallo di tempo richiesto per fissare il carbonio in composti chimici ad alto contenuto energetico è sensibilmente diverso. È proprio la brevità di tale intervallo di tempo che determina la rinnovabilità della risorsa biomassa ligneo-cellulosica non provocando aumento netto di CO₂ nell'atmosfera. La CO₂ prodotta dalla combustione di combustibili fossili, invece, non risulta prontamente riutilizzabile. In conclusione il principale "gas serra" è l'anidride carbonica e attorno ad essa ruota il concetto della rinnovabilità di una risorsa energetica, e quindi, nello specifico, della biomassa ligneo-cellulosica il cui punto di forza risiede proprio nella capacità di riassorbire il carbonio emesso durante la combustione. Tuttavia, l'effetto serra non è provocato unicamente dalla CO₂, ma anche da altri composti quali il metano, il protossido di azoto, il monossido di carbonio e altri composti organici volatili non metanici. La tabella 143, riassume i valori della CO₂ equivalente e dei gas che concorrono alla sua formazione per ciascuna delle 2 filiere energetiche proposte. I valori di CO₂ equivalente sono rappresentati nel grafico 39 per le due diverse filiere. Da una prima analisi appare evidente che la colonna della filiera Legno-Energia è notevolmente inferiore rispetto a quelle degli altri due processi. Ciò è essenzialmente dovuto a due motivi: il primo è che la CO₂ generata dalla combustione è considerata completamente rinnovabile e pertanto nel grafico viene completamente trascurata; il secondo è che la filiera richiede un ridotto coinvolgimento di input "industriali" a causa della diversa tipologia di combustibile (per esempio mancano completamente le fasi di raffinazione). GEMIS permette, inoltre, di individuare i processi maggiormente responsabili di un determinato impatto ambientale. Il grafico 40, riporta i contributi alla CO₂ equivalente dei processi principali della filiera Legno-Energia. Il processo maggiormente responsabile dell'emissione di CO₂ equivalente è imputabile alla fornitura di energia elettrica, seguono trasporto, produzione di metalli e infine combustione. Procedendo in modo analogo per la

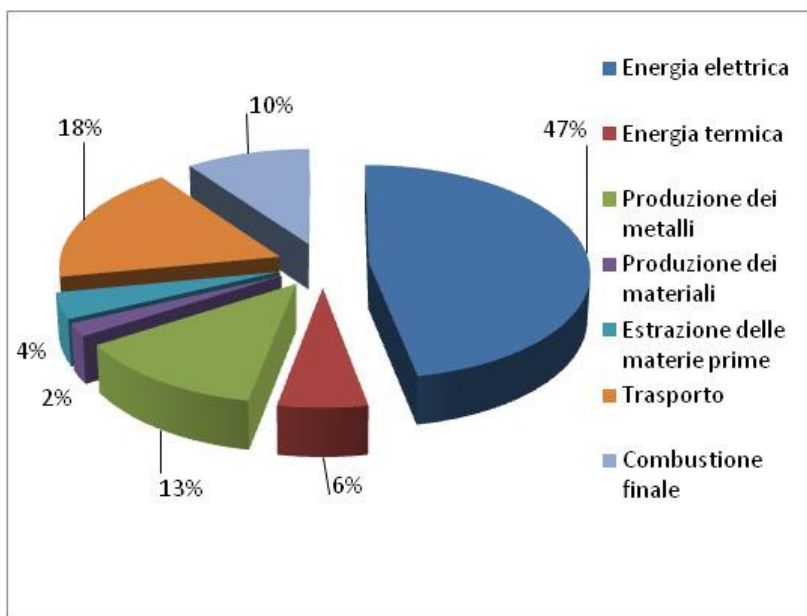
filiera GPL-Energia, sono stati ottenuti i risultati illustrati nel grafico 41. Concludendo è possibile affermare che nella filiera GPL-Energia il contributo più importante è dato dalla combustione finale, segue l'energia elettrica e, in minor misura, l'energia termica.

Tab. 143: Valori di CO₂ eq, CO₂, CH₄ e N₂O per la filiera Legno-Energia, GPL-Energia.

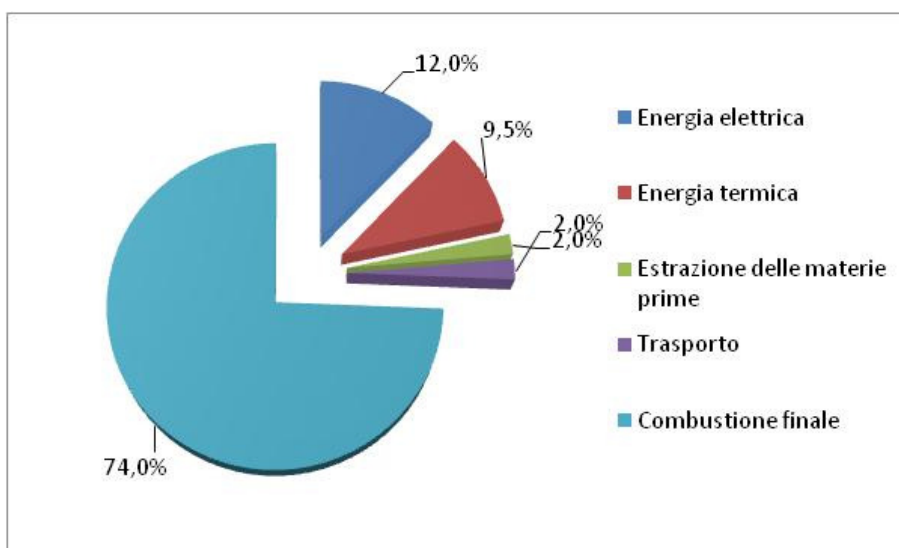
Filiera	CO ₂ equivalente [kg/anno]	CO ₂ [kg/anno]	CH ₄ [kg/anno]	N ₂ O [kg/anno]
Legno - Energia	1402	1125	4,5	1,2
GPL - Energia	21160	14201	23,0	0,3



Graf. 39: CO₂ equivalente(kg/anno) nelle filiere Legno-Energia, GPL-Energia.



Graf. 40: Contributi alla CO₂ equivalente dei principali processi della filiera Legno-Energia.



Graf. 41: Contributi alla CO₂ equivalente dei principali processi della filiera GPL-Energia.

SO₂ EQUIVALENTE EMESSA DALLE FILIERE ENERGETICHE

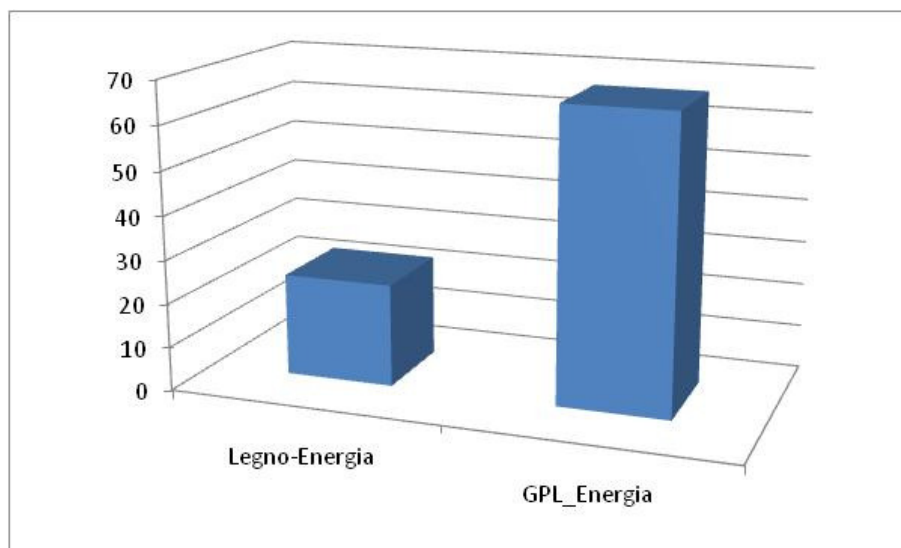
Come nel caso della CO₂ equivalente per poter valutare le emissioni provocate dai due sistemi di riscaldamento non è sufficiente esaminare la sola combustione. Il gas GPL, subisce infatti successive raffinazioni industriali; in particolare per essere utilizzato come combustibile viene

depurato dal biossido di zolfo. Tale desolforazione ha un peso ambientale consistente sulle emissioni totali dell'intera filiera. I risultati ottenuti dalle elaborazioni sono riportati in tabella 144 e rappresentati nel grafico 42.

Il sistema che provoca le maggior emissioni di SO₂ equivalente è la filiera GPL-Energia. I gas che concorrono al calcolo della SO₂ equivalente sono: anidride solforosa, ossidi di NO_x (che comprendono il monossido di azoto e il biossido di azoto), acido cloridrico, acido solfidrico, acido fluoridrico e ammoniaca. Nei grafici 43, 44, vengono analizzati i contributi dei sottoprocessi che determinano le emissioni di SO₂ equivalente nelle 2 diverse filiere.

Tab. 144: Valori di SO₂ equivalente per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia.

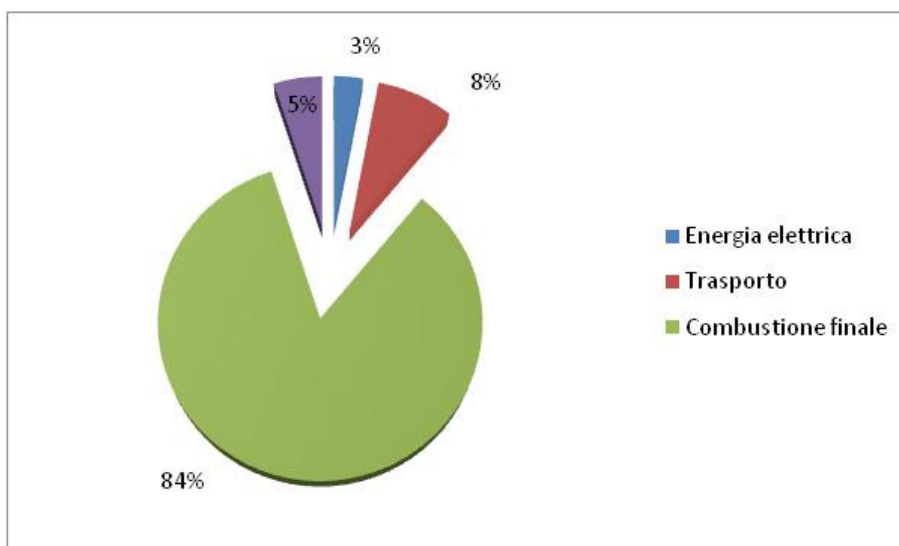
Filiera	SO ₂ equivalente [kg/anno]
Legno-Energia	23,5
GPL_Energia	66,7



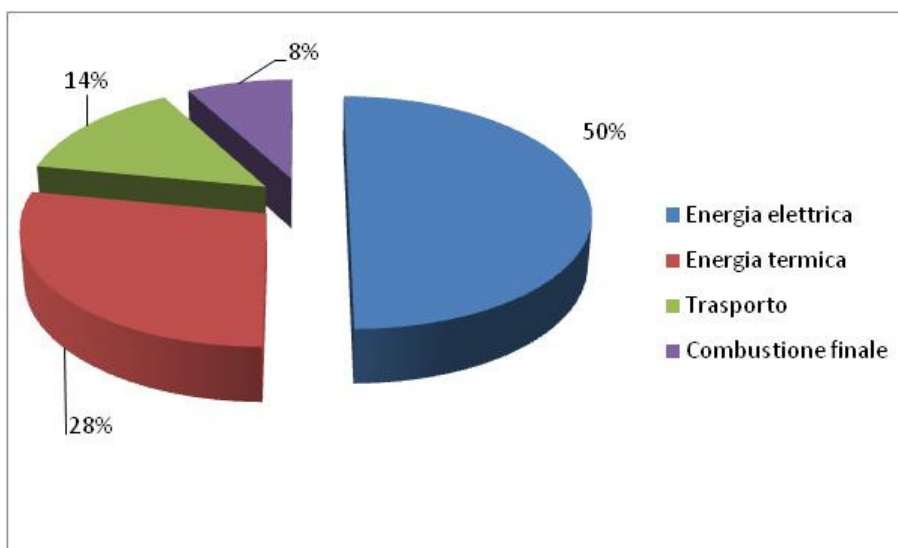
Graf. 42: SO₂ equivalente (kg/anno) per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia

Per quanto riguarda la filiera Legno-Energia, la combustione finale è la maggiore responsabile per le emissioni degli ossidi di zolfo; il trasporto, nel quale sono inclusi le emissioni dei motori è il secondo fattore in termine di importanza. Nella filiera GPL-Energia la raffinazione del GPL gioca un ruolo determinante e non a caso la voce “energia termica” che include questo sottoprocesso rappresenta il fattore con maggiore responsabilità nei confronti delle emissioni di

SO₂ equivalente. Tale filiera è comunque tra i 2 processi quello che provoca le maggiori emissioni di ossidi di zolfo. È pertanto interessante evidenziare il contributo della combustione finale: se venisse analizzata la sola combustione finale la filiera GPL-Energia risulterebbe la meno inquinante in termini di SO₂equivalente.



Graf. 43: Contributi alla SO₂ equivalente dei principali processi della filiera Legno-Energia.



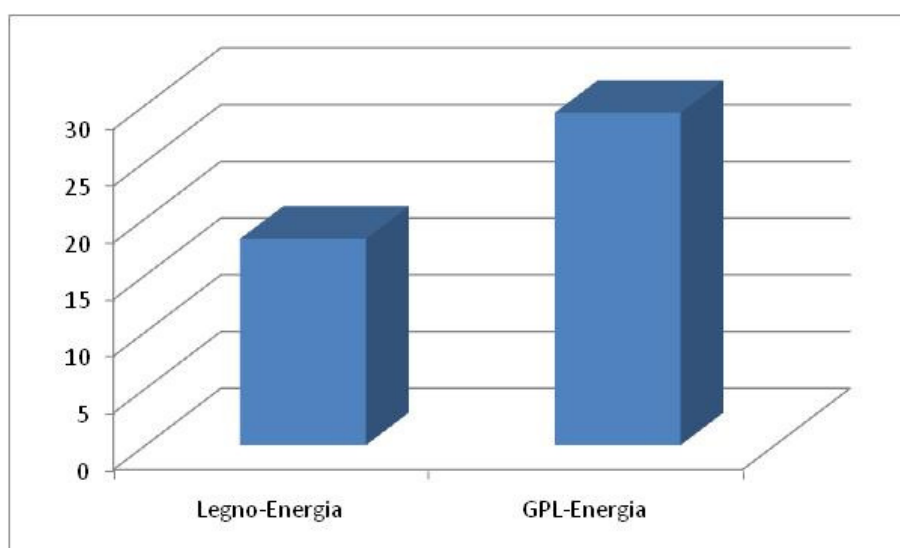
Graf. 44: Contributi alla SO₂ equivalente dei principali processi della filiera GPL-Energia.

NO_x EMESSI DALLE FILIERE ENERGETICHE

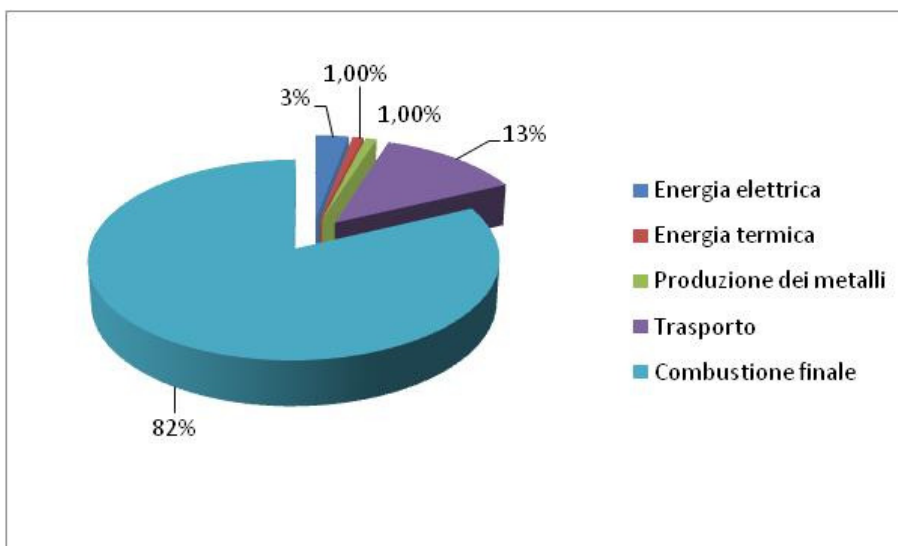
Gli NO_x risultano dalla somma pesata del monossido di azoto (NO) e del biossido di azoto (NO₂). La valutazione nei tre processi ha dato come risultati i valori rappresentati nella tabella 145 e nel grafico 45. I risultati ottenuti dimostrano che il GPL è il maggior responsabile di emissioni di NO_x. Lo studio condotto, come nei casi precedenti, ha visto valutare gli impatti dei relativi contributi all'interno di ciascuna filiera come rappresentato nei grafici 46, 47. Il maggior responsabile per le emissioni di NO_x nella filiera Legno-Energia è dato dalla combustione finale. Tale risultato potrebbe subire variazioni nel caso in cui, per impianti di elevata potenza, venissero adottate opportune tecnologie di abbattimento/riduzione delle emissioni. Anche il trasporto contribuisce, ma in misura nettamente inferiore. Nel caso della filiera GPL-Energia, invece, sono tre i fattori che partecipano alle emissioni: il più rilevante è rappresentato dal trasporto, segue la combustione finale e l'energia termica utilizzata lungo tutta la filiera. In questo caso i margini di miglioramento sono più limitati rispetto al caso del legno cippato, in quanto energia termica e trasporto non permettono margini di miglioramento.

Tab. 145: Valori di NO_x per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia

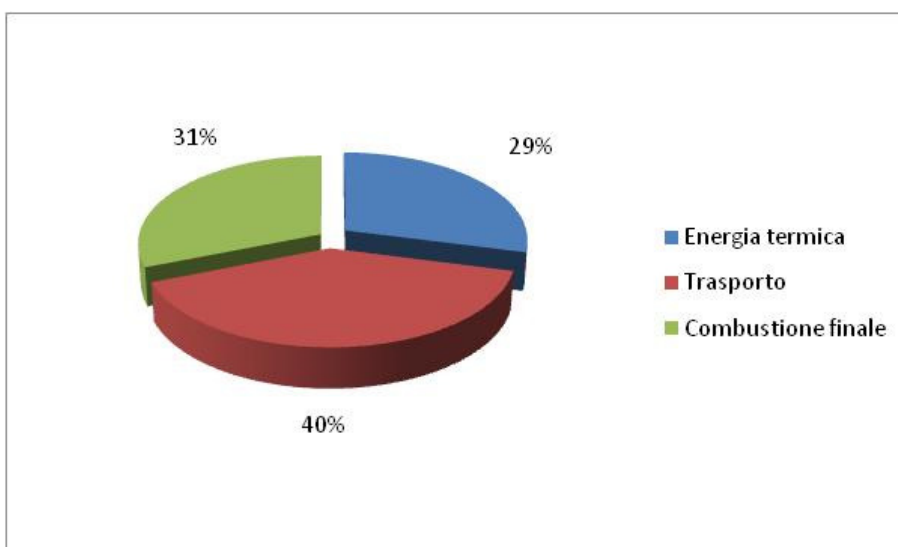
Filiera	NO _x [kg/anno]
Legno-Energia	18,2
GPL-Energia	29,3



Graf. 45: NO_x (kg/anno) nelle filiere Legno-Energia, GPL-Energia



Graf. 46: Contributi agli NO_x dei principali processi della filiera Legno-Energia.



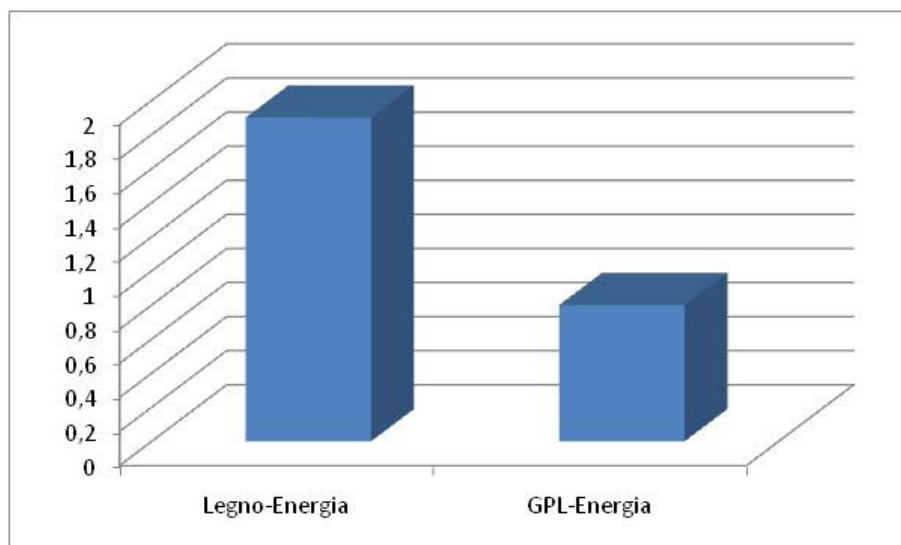
Graf. 47: Contributi agli NO_x dei principali processi della filiera GPL-Energia.

HCL EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE

Le emissioni di HCl, sono rappresentate in tabella 146, e nel grafico 48. Il grafico dimostra che la filiera che contribuisce in maniera più significativa alle emissioni di HCl è quella del legno cippato. Il risultato, peraltro previsto, deriva dalla composizione chimica dei combustibili.

Tab. 146: Valori di HCl per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia

Filiera	HCl [kg/anno]
Legno-Energia	1,9
GPL-Energia	0,8



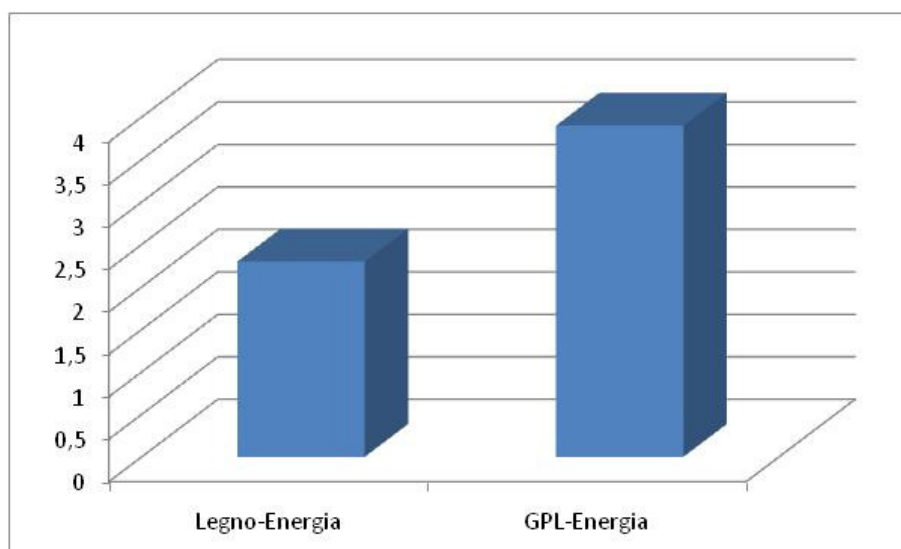
Graf. 48: HCl (kg/anno) nelle filiere Legno-Energia, GPL-Energia

PARTICOLATO EMESSO DALLE FILIERE ENERGETICHE

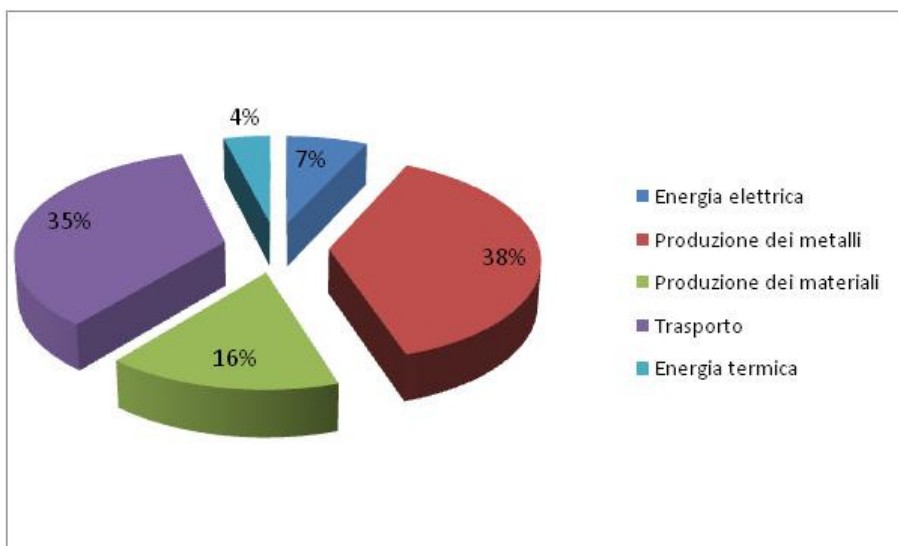
Il particolato può essere costituito da ceneri, polveri, fuliggine, sostanze silicee di varia natura, sostanze vegetali, sabbia, composti metallici, elementi come il carbonio o il piombo, ...ecc. Lo studio svolto per le filiera ha fornito i risultati riportati in tabella 147, e nel grafico 49. La stima complessiva per le emissioni di particolato per i due processi identifica nella filiera GPL-Energia, la filiera con maggiori emissioni. Nei grafici 50, 51, sono riportate le analisi delle filiere. I valori ricavati indicano come maggior responsabile per le emissioni di particolato la produzione dei metalli e il trasporto, di minore importanza sono, invece, i contributi dovuti alla produzione dei materiali e all'energia elettrica. Nel caso del GPL il maggior responsabile è l'energia termica richiesta nelle fasi di raffinazione ed estrazione del gas; seguono l'energia elettrica e il trasporto.

Tab . 147: Valori di particolato per le filiere Legno-Energia, GPL-Energia

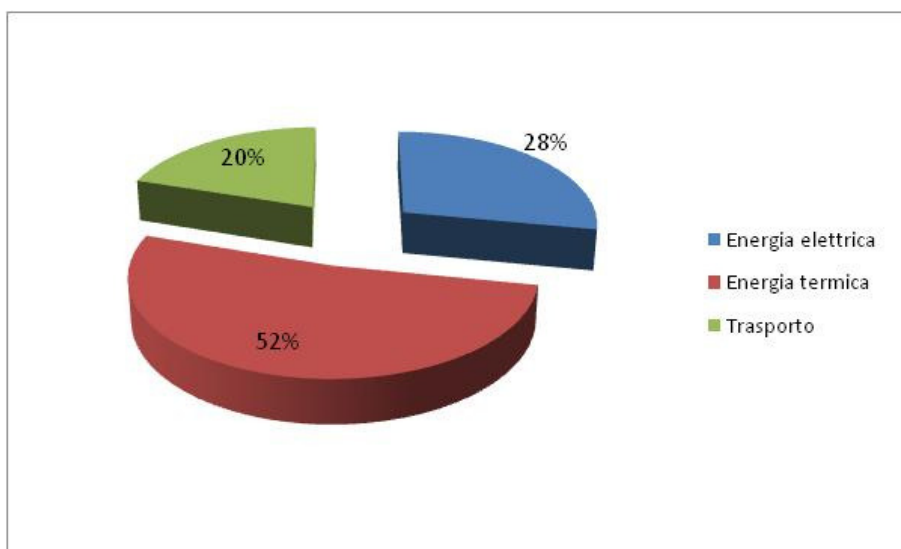
Filiera	Particolato [kg/anno]
Legno-Energia	2,3
GPL-Energia	3,9



Graf.49: Particolato (kg/anno) nelle filiere Legno-Energia, GPL-Energia



Graf. 50: Contributi al Particolato dei principali processi della filiera Legno-Energia.

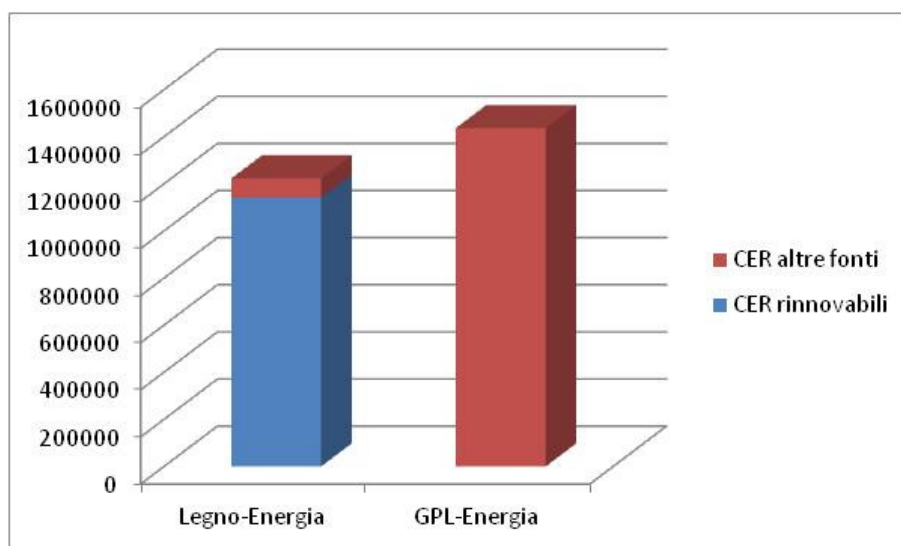


Graf. 51: Contributi al Particolato dei principali processi della filiera GPL-Energia.

CUMULATED ENERGY REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE

Il parametro CER stima la quantità di risorse di energia primaria utilizzata lungo tutta la filiera per fornire energia termica. In particolare, nel grafico 52, e in tabella 148, più dettagliatamente, vengono riportati i valori di CER, espressi come kWh di energia primaria di input, relativamente alle 2 filiere energetiche per la produzione annua di 845'000 kWh di energia

termica, ovvero il quantitativo richiesto complessivamente dall'azienda oggetto di studio. Nel grafico viene comunque fatta una distinzione fra energie primarie rinnovabili e non.



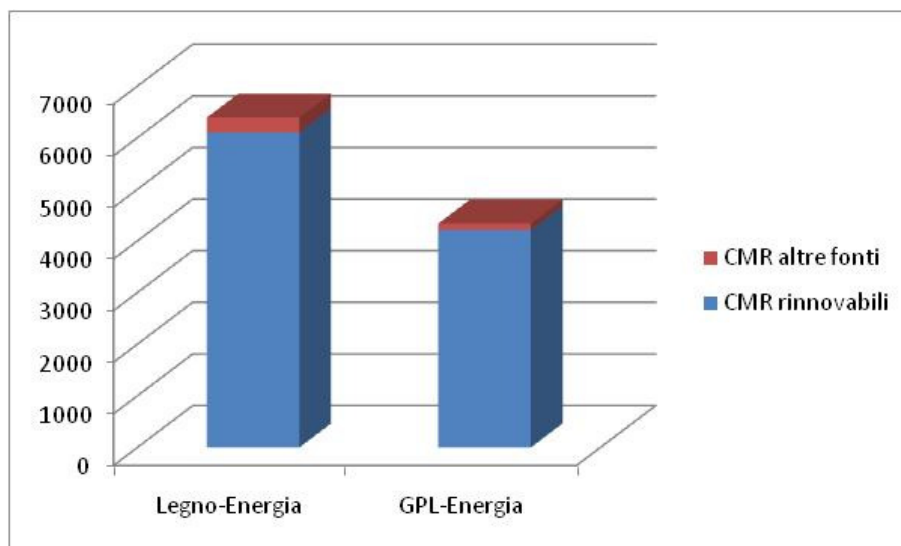
Graf. 52: Stima del parametro CER (kWh) per le diverse filiere energetiche

Tab. 148: contributi in kWh al parametro CER per le 2 diverse filiere.

Filiere	Totale	Biomassa residuale rinnovabile	Energia geotermica rinnovabile	Energia idroelettrica rinnovabile	Energia rinnovabile	Carboni non rinnovabile	Lignite non rinnovabile	Metano non rinnovabile	Energia nucleare non rinnovabile	Petroli non rinnovabile	Materie seconde-ALTR	Rifiuti-altro
Legno-Energia	77708	72732	0,0	64,2	66,1	1102,0	753,1	305,2	921,2	1223,0	165,2	376,4
GPL-Energia	91356	0,1	0,0	473,7	0,0	4190,7	530,1	239,1	1313,2	84587	21,7	0,3

CUMULATED MATERIAL REQUIREMENT IN RELAZIONE ALLE FILIERE ENERGETICHE

Il parametro CMR stima la quantità di materiali utilizzati lungo tutta la filiera per fornire energia termica. In particolare, nel grafico 53, e in tabella 149 più dettagliatamente, vengono riportati i valori di CMR, espressi come kg di materiali, relativamente alle 2 filiere energetiche per la produzione annua di 845'000 kWh di energia termica, ovvero il quantitativo richiesto complessivamente dall'azienda oggetto di studio. Nel grafico viene comunque fatta una distinzione fra materiali rinnovabili e non.



Graf. 53: Stima del parametro CMR (kg) per le diverse filiere energetiche.

Tab. 149: Contributi in kg al parametro CMR per le 2 diverse filiere.

Filiera	Totale	Aria - rinnovabile	Acqua - rinnovabile	Minerali - non rinnovabili	Scarti di ferro - non rinnovabili	Metano - non rinnovabili	Petrolio - non rinnovabili	Metalli - non rinnovabili	Scarti di acciaio - altro
Legno-Energia	6391	8,4	6092,6	73,7	0,0	0,3	11,2	156,7	48,0
GPL-Energia	4338	1,4	4210,3	77,2	12,8	0,0	0,4	28,9	6,9

IL CASO STUDIO: INTERPRETAZIONE E MIGLIORAMENTO DEL SISTEMA

Una prima considerazione ha riguardato le emissioni atmosferiche relative alla sola combustione finale delle 2 diverse tipologie di filiera energetica. Da un punto di vista normativo deve essere fatto riferimento al D.Lgs 152/2006 (Tab. 150), nel quale vengono stabiliti i limiti di emissione in atmosfera per gli impianti che utilizzano biomasse.

Tab. 150: limiti che devono rispettare gli impianti che utilizzano biomasse, riferiti ad un'ora di funzionamento dell'impianto nelle condizioni di esercizio più gravose, esclusi i periodi di avviamento arresto e guasti. Il tenore di ossigeno di riferimento è pari all'11% in volume nell'effluente gassoso anidro. I valori limite sono riferiti al volume di effluente gassoso secco rapportato alle condizioni normali.

Potenza termica nominale dell'impianto (MW)	[1] >0.15 - < 1
Polveri totali	100 mg/Nm ³
Carbonio organico totale (COT)	-
Monossido di carbonio (CO)	350 mg/Nm ³
Ossidi di azoto espressi come (NO ₂)	500 mg/Nm ³
Ossidi di zolfo espressi come (SO ₂)	200 mg/Nm ³
[1] agli impianti di potenza termica nominale pari o inferiore 35 kW si applica un valore limite di emissione per le polveri totali di 200 mg/Nm ³ .	

Pertanto, sono state stimate le emissioni relativamente alle 2 filiere energetiche. I risultati sono illustrati nelle tabelle 151, 152 ed evidenziano i seguenti aspetti:

1. La combustione del legno causa un'emissione in atmosfera di particolato di gran lunga superiore ai limiti normativi. Tuttavia è evidente come tale problematica sia facilmente ed efficacemente (abbattimento del 92%) risolubile adottando un semplice ciclone depolveratore non previsto nel caso oggetto di studio.
2. I valori di CO riscontrati per le 2 filiere sono comunque inferiori ai limiti normativi. Più bassi risultano tali valori più la combustione risulta essere completa.
3. Per quanto riguarda le emissioni di NO_x è possibile notare come si rimane entro i limiti normativi per entrambe le filiere.
4. Emissioni significative di SO₂ vengono riscontrate soltanto per il legno, visto che il GPL subisce processi di desolforazione in fase di raffinazione risulta essere pressoché privo di zolfo.

Tab .151: Emissioni atmosferiche relative alla combustione finale della filiera Legno-Energia.

Filiera LEGNO - ENERGIA		
	senza depurazione	
Particolato	1003	mg/Nm ³
CO	123	mg/Nm ³
NO _x	98	mg/Nm ³
SO ₂ equivalente	55	mg/Nm ³

Tab. 152: Emissioni atmosferiche relative alla combustione finale della filiera GPL-Energia.

Filiera GPL – ENERGIA		
Particolato	0,5	mg/Nm ³
CO	18	mg/Nm ³
NO _x	92	mg/Nm ³
SO ₂ equivalente	-	mg/Nm ³

Invece, per quanto riguarda il bilancio ambientale delle intere filiere energetiche, ovvero i risultati della LCA riportati precedentemente, oltre a sottolineare come la filiera Legno-Energia risulti classificabile quasi come una filiera ad emissioni nulle di gas ad effetto serra, è possibile affermare che:

1. la filiera Legno-Energia presenta le emissioni di SO₂ equivalente più basse;
2. la filiera Legno-Energia presenta le emissioni di NO_x più basse;
3. la filiera Legno-Energia presenta le emissioni di HCl più elevate;
4. la filiera Legno-Energia presenta emissioni di particolato nettamente inferiori a quelle della filiera GPL-Energia;
5. la filiera Legno-Energia presenta un valore di CER abbastanza elevato, ma le energie primarie coinvolte sono quasi esclusivamente rinnovabili;
6. la filiera Legno-Energia presenta il valore di CMR più alto, anche questa volta in gran parte imputabile agli ingenti quantitativi di materiale rinnovabile coinvolto nella filiera.

È, inoltre, possibile prevedere futuri sviluppi e/o approfondimenti della metodologia LCA, ovvero:

- effettuare prove/rilievi sperimentali che permettano di aumentare la qualità dei dati di alcuni processi, soprattutto relativamente alla filiera Legno-Energia;
- valutare se sia fattibile da parte dell'azienda agricola prevedere una riutilizzazione tramite spandimento in campo delle ceneri prodotte dalla combustione della biomassa

ligneo-cellulosica, ridefinendo conseguentemente la fase di allocazione per la filiera Legno-Energia;

- ampliare la valutazione dell'impatto ambientale, con particolare riferimento alle variazioni indotte dalla diversa gestione del bosco (per esempio sviluppando un'adeguata modellistica del sistema bosco-suolo, considerando anche le eventuali variazioni dei cosiddetti serbatoi di carbonio) e dei residui di potatura;
- considerare aspetti sociali/economici connessi alla filiera Legno-Energia stimabili con GEMIS, quali eventuale variazione dell'uso del suolo (per esempio se una parte del terreno aziendale viene convertita a bosco), incremento dell'occupazione (per esempio imputabile alla creazione di adeguata cooperativa che provveda alla raccolta della biomassa ligneo-cellulosica forestale), stima dei costi esterni.

IPOTESI DI ANALISI RIVOLTA AD UN CONTESTO TERRITORIALE SU SCALA PROVINCIALE

In Italia attualmente c'è molto fervore nel settore biomasse in generale, il che ha portato negli ultimi anni ad un discreto sviluppo sul territorio di numerose centrali energetiche. Queste realtà sono facilmente censibili quando si parla di impianti di grandi dimensioni e se rivolti alla produzione di energia elettrica. La cosa diventa assai più complicata nel caso si voglia indagare le realtà per la produzione di sola energia termica e di potenza inferiore ad 1 MW. Nel caso di filtrare inoltre queste centrali in base al combustibile, nel nostro caso specifico, combustibile legnoso ed ancor più in dettaglio sminuzzato, le complicazioni aumentano considerevolmente. Una delle realtà territoriali che si è attivata maggiormente nel settore specifico anche con monitoraggi sul territorio è la Provincia di Trento.

Complessivamente risultano presenti quindici impianti di teleriscaldamento, dove per teleriscaldamento si intendono impianti a servizio di numerose aziende. Gli impianti sono stati avviati gradualmente a partire dal 1999, per aumentare di frequenza negli ultimi anni. Nel loro insieme la potenza termica installata è pari a quasi 54 MW. (Sacchelli 2011)

Tab. 153: Impianti di teleriscaldamento presenti in provincia di Trento (Sacchelli 2010).

Distretto forestale	Localizzazione dell'impianto	Potenza termica installata (MW)	Lunghezza rete teleriscaldamento (m)	Utenze servite
Cavalese	Cavalese	8	22,000	500
	Predazzo	2,3	7,000	57
Fiera di	Fiera di Primiero	13,5	30,000	850

Primiero	San Martino di Castrozza	8	15,000	266
Pergine	Sant'Orsola Terme	1,5	620	5
Trento	San Michele all'Adige	3,6	1,200	3
	Grumes	0,43	790	8
Cles	Cloz	0,8	300	7
	Coredo	2,4	8,000	200
	Fondo	6	13,000	270
	Malosco	1,1	600	6
	Tres	0,54	N.P.	9
Malè	Peio	4	N.P.	1
	Pellizzano	1	2,500	19
Riva del Garda	Pieve di Ledro	0,5	N.P.	15
Totale			101,010	2,216

Per quanto riguarda gli impianti di “media” e “piccola” potenza, vengono considerati esclusivamente impianti al servizio di un'unica utenza tipo alberghi, camping, capannoni o serre o in abitazioni per il riscaldamento e l'acqua sanitaria. Nel loro insieme sviluppano una potenza termica pari a quasi 9,4 MW per gli impianti “piccoli” e 8 MW per gli impianti “medi”. (Sacchelli 2011)

Tab. 154: Impianti di “piccola e “media” potenza installati in provincia di Trento (Sacchelli 2010).

Classe di potenza	“piccoli”	Classe di potenza	“medi”
0-149 kW	37	200-249 kW	15
150-199 kW	28	250-299 kW	3
		300-399 kW	4
		400-999 kW	3

Considerando la totalità degli impianti installati, alimentati a biomasse legnose, presenti in provincia di Trento, essi sviluppano una potenza termica totale pari a 71,4 MW.

Ora restringendo il campo alle sole realtà termiche al disotto della soglia 1 MW avremo un totale di 94 centrali termiche di medio piccola taglia, per un totale di potenza termica installata di 19,7 MW. Al fine di stimare il minor impatto del combustibile legnoso rispetto ad una

risorsa esauribile di derivazione fossile come il GPL si prendono come base di riferimento le due tipologie studiate la “piccola” e la “media”. Sulla base di queste due realtà si classificano le centrali censite nella Provincia di Trento in due categorie “piccoli” potenza da 0-199 kW e “medi” potenza da 200 a 999 kW.

Tab. 155: Impianti classificati come “piccoli e “medi” per la Provincia di Trento.

Classe di potenza	Tipologia classificazione	n°	Potenza termica totale MW
0-199 kW	piccoli	65	9,4
200-999 kW	medi	29	10,3

Sulla base dei dati elaborati dall’analisi LCA dei nostri due casi di studio in comparazione con la filiera GPL energia termica è possibile estendere l’ipotesi comparativa ad un preciso contesto territoriale.

Tab. 156: Diminuzioni percentuali di emissioni rispetto alla filiera GPL, riscontrate nella filiera media. (Le cifre percentuali contrassegnate con asterisco sono ad una diminuzione della filiera GPL rispetto alla legno-energia).

CO ₂ equivalente [kg/anno]	CO ₂ [kg/anno]	CH ₄ [kg/anno]	N ₂ O [kg/anno]	CER (kWh)
94%	92%	84%	47% *	15%
SO ₂ equivalente [kg/anno]	NO _x [kg/anno]	HCl [kg/anno]	Particolato [kg/anno]	CMR (kg)
66%	41%	64% *	78%	32% *

Tab. 157: Diminuzioni percentuali di emissioni rispetto alla filiera GPL, riscontrate nella filiera piccola. (Le cifre percentuali contrassegnate con asterisco sono ad una diminuzione della filiera GPL rispetto alla legno-energia).

CO ₂ equivalente [kg/anno]	CO ₂ [kg/anno]	CH ₄ [kg/anno]	N ₂ O [kg/anno]	CER (kWh)
93%	92%	80%	75% *	15%
SO ₂ equivalente [kg/anno]	NO _x [kg/anno]	HCl [kg/anno]	Particolato [kg/anno]	CMR (kg)
65%	38%	58% *	41%	32% *

Tab. 158: Il caso di studio esteso ad una realtà territoriale come quella della Provincia di Trento, diminuzione (o aumento in rosso) delle emissioni nella filiera legno energia rispetto a quella GPL, nelle tipologie di centrali “medie”, riferito all’anno.

Filiere medie	CO ₂ equivalente [kg/anno]	CO ₂ [kg/anno]	CH ₄ [kg/anno]	N ₂ O [kg/anno]	CER (kWh)
Legno - Energia	4355727	2875221	4080	-33	2984591
GPL - Energia					
Filiere medie	SO ₂ equivalente [kg/anno]	NO _x [kg/anno]	HCl [kg/anno]	Particolato [kg/anno]	CMR (kg)
Legno - Energia	9143	2488	-212	694	-445182
GPL - Energia					

Tab. 159: Il caso di studio esteso ad una realtà territoriale come quella della Provincia di Trento, diminuzione (o aumento in rosso) delle emissioni nella filiera legno energia rispetto a quella GPL, nelle tipologie di centrali “piccole”, riferito all’anno.

Filiere piccole	CO ₂ equivalente [kg/anno]	CO ₂ [kg/anno]	CH ₄ [kg/anno]	N ₂ O [kg/anno]	CER (kWh)
Legno - Energia	3044675	2014990	2851	-139	2103134
GPL - Energia					
Filiere piccole	SO ₂ equivalente [kg/anno]	NO _x [kg/anno]	HCl [kg/anno]	Particolato [kg/anno]	CMR (kg)
Legno - Energia	6657	1710	-170	247	-316364
GPL - Energia					

Analizzando i dati è evidente come la diminuzione di emissioni nell’atmosfera sia palesemente a favore a livello di sostenibilità della filiera legno energia sia per impianti piccoli che medi. Fanno eccezione le emissioni di N₂O ed HCl, in genere più alti rispetto alla filiera GPL di oltre il 50%.

Si evidenzia inoltre un budget negativo per la filiera legno, rispetto a quella GPL, anche per i materiali impiegati nel processo e destinati poi a dismissione, un aumento pari ad oltre il 30%

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati affrontati diversi aspetti connessi alla realizzazione di una filiera Legno-Energia nei territori rurali del centro Italia. Inizialmente il lavoro si incentrava su tre tipologie di filiere energetiche-termiche di autoconsumo, tutte circoscritte all'impiego di legno sottoforma di sminuzzato, proveniente da impianti cedui a corta rotazione, potature di olivo, potature di vite e legno di origine forestale. Queste tipologie di biomassa sono infatti abitualmente presenti nel tessuto aziendale del centro Italia. L'indagine LCA svolta su queste tre filiere doveva essere incentrata su due differenti banche dati, quella GEMIS e quella SIMAPRO.

In particolare le ricerche svolte si focalizzano principalmente sull'implementazione delle banche dati, attualmente carenti in riferimento alle realtà oggetto di studio. Le indagini svolte nel corso dei tre anni ci hanno permesso oltre che di incrementare specifici processi con rilievi in campo, di individuare alcune criticità che hanno riadeguato lo svolgimento della ricerca.

Il software SIMAPRO 6.0 è un software-database completamente a pagamento a differenza di GEMIS. Nel corso della prima sessione di inserimento dati e prova del sistema e degli scenari ipotizzati si sono riscontrate subito le prime problematiche operative. Il software SIMAPRO ha evidenziato problematiche e lacune per impianti di piccola taglia come quelli oggetto della tesi, la banca dati è risultata poco plasmabile e adattabile alla realtà italiana rendendo necessarie troppe forzature, tanto più pesanti quanto più si trattasse di realtà operative di medio piccola scala. Quindi si è optato per non proseguire con l'impiego di tale software, tale scelta è stata dettata principalmente dalla scarsa possibilità di implementare in dettaglio il database con i dati analitici oggetto della ricerca.

La prima applicazione dell'analisi LCA con GEMIS condotte, sono state effettuate presso l'Unità di Ricerca per l'Ingegneria Agraria (CRA-ING) di Monterotondo (RM), struttura di ricerca del Consiglio per la Ricerca e Sperimentazione in Agricoltura (CRA). La ricerca è stata possibile grazie ad un finanziamento di un programma triennale di ricerca, da parte del Ministero per le Politiche Agricole Alimentari e Forestali (D.M 487/7303/2004), che ha consentito la creazione di una microfiliera per la produzione di energia termica a biomasse legnose (Verani e Sperandio, 2006).

In corso d'opera si è deciso di abbandonare le ricerche presso l'Unità di Ricerca per l'Ingegneria Agraria (CRA-ING) di Monterotondo (RM), poiché a seguito di successivi

sviluppi scientifici inerenti la microfiliera di autoconsumo, l'ente ha deciso di cambiare la caldaia modificando la tipologia di impianto, passando da una caldaia che produceva solo energia termica, a una caldaia per la cogenerazione per la produzione di energia sia termica sia elettrica. Il cambio della caldaia avrebbe comportato sia una modificazione degli obiettivi iniziali, cioè lo studio di impianti di medio piccola scala per la sola conversione termotecnica delle biomasse agro forestali, sia un notevole ritardo sulla tempistica non permettendomi di continuare oltre nell'analisi dell'impianto.

Le due filiere rimaste ed oggetto di dettagliate analisi nel corso della ricerca, sono state quindi valutate utilizzando la metodologia LCA, applicata tramite il software GEMIS, al fine di confrontare l'impatto ambientale della filiera Legno-Energia rispetto all'uso del GPL, combustibile precedentemente utilizzato nelle aziende e l'unica vera alternativa nei contesti di studio. I risultati mostrano i benefici dell'utilizzo di una fonte energetica rinnovabile in termini di emissioni atmosferiche e sostenibilità.

In conclusione, il presente studio può fornire alcune indicazioni per affrontare gli aspetti più problematici della filiera Legno-Energia, ovvero la distribuzione territoriale della risorsa rinnovabile, la fase operativa della sua raccolta, l'impatto ambientale della filiera in confronto alle filiere che utilizzano fonti energetiche fossili.

I dati riportati in un contesto territoriale come quello riportato nella ricerca relativo alla Provincia di Trento, evidenziano delle evidenti positività in termini di emissioni ma non solo della filiera legno energia rispetto a quella GPL energia. I valori riportati sono inoltre pur se dotati di un buon livello di validazione scientifica leggermente sottostimati. Tale sottostima è dovuta al diverso impiego annuo delle caldaie oggetto di ricerca rispetto a quelle della realtà territoriale. Ciò è da imputarsi ad una diversa collocazione geografica e conseguentemente climatica. Ma questo non fa altro che confermare la necessità di una banca dati più estesa per contesti territoriali, sociali ed economici differenti, al fine di rendere le analisi LCA quanto più accurate possibile.

BIBLIOGRAFIA

- A.A. V.V. (2005) “*La selvicoltura delle pinete toscane*”, Firenze, Regione Toscana, Arsia.
- ALLIONE C., LANZAVECCHIA C., (2008) “*Dall’ecodesign all’architettura*” TIME&MIND, TORINO, pp. 1-310. ISBN 9788890339257.
- ANON, (1988). “*Introduction to work study*”. International Labour Office. Geneva.
- APAT (2003) “*Le biomasse legnose: un’indagine sulle potenzialità del settore forestale italiano nell’offerta di fonti di energia*”. Rapporti 30/2003.
- ARNOLD S.F. (1993) “*An evaluation of environmental Life Cycle Assessment*”. Environmental Law Institute, U.S. EPA.
- BLASI C., (1994). Il fitoclima del Lazio. Fitosociologia 27: 151-175.
- BOUSTEAD CONSULTING LTD. (1997) “*Il Boustead Model*”. Ufficio italiano, Torino.
- BRESCIANI A., FRATINI R., LORENZONI M., PIEGAI F., (2007). “*Tempi e costi nelle utilizzazioni boschive. Analisi tecnico-economica degli interventi selvicolturali di una Comunità Montana*”. Sherwood, 130: 5-11. Arezzo.
- BROWING B.L., (1967). “*Methods of wood chemistry*”. Interscience, New York, NY.
- BROWN S., (1997). “*Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer*”. FAO Forestry- Paper. 134, 55 p. Food and Agriculture Organization to the United Nations, Rome.
- BRUN F., BERRUTO R., (2000). “*Confronto fra modelli colturali cerealicoli: organizzazione e costo della meccanizzazione*”. Assessorato Agricoltura, Caccia e Pesca della Regione Piemonte, Possibili alternative per un’agricoltura sostenibile.
- CANAGARATNA S G, WITT J..(1998) “*Calculation of temperature rise in calorimetry*”. Journal of chemical education (1988) 65 (2):126-129.
- CASTELLANI C., (1982). Raccolta di tavole stereometriche e alsometriche costruite per i boschi italiani. Istituto Forestale per l’Assestamento Forestale e per l’Alpicoltura Trento.
- CENT/TS 14774-1: Solid Biofuels - Methods for determination of moisture content - Oven dry method. Part 1: Total moisture - Reference method, (2004).

- CENT/TS 14774-2: Solid Biofuels - Methods for determination of moisture content- Oven dry method. Part 2: Total moisture - Simplified method, **(2004)**.
- CENT/TS 14774-3: Solid Biofuels -Methods for determination of moisture content- Oven dry method. Part 3: Moisture in general analysis sample, **(2004)**.
- CENT/TS 14775: Solid Biofuels – Methods for determination of ash content, **(2004)**.
- CENT/TS 14778-1: Solid Biofuels – Sampling–Part 1: Methods for sampling, **(2004)**.
- CENT/TS 14779 : Solid Biofuels – Sampling – Methods for preparing sampling plans and sampling certificates, **(2004)**.
- CENT/TS 14780: Solid Biofuels – Methods for sample preparation, (2004).UNI 9903-3: Combustibili solidi non minerali ricavati da rifiuti (RDF). Indicazioni di base per il campionamento sistematico dei combustibili (in Italian), **(1992)**.
- DECRETO LEGISLATIVO 3 APRILE 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale".
- DECRETO LEGISLATIVO 3 marzo 2011 , n. 28 Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.
- EN ISO 14040 (1997) - Environmental management. Life Cycle Assessment. Principles and framework.
- EN ISO 14041 (1998) - Environmental management. Life Cycle Assessment. Goal and scope definition and inventory analysis.
- EN ISO 14042 (2000) - Environmental management. Life Cycle Assessment. Life cycle impact assessment.
- EN ISO 14043 (2000) - Environmental management. Life Cycle Assessment. Life cycle interpretation.
- EN ISO 14049 (2000) - Environmental management. Life Cycle Assessment. Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis.
- FINNVEDEN, G. AND MOBERG Å (2005). “*Environmental systems analysis tools – an overview*”. Journal of Cleaner Production 2005, 13, 1165-1173”.
- GLAVIC, P., AND LUKMAN, R. (2007). “*Review of sustainability terms and their definition*”s. Journal of Cleaner Production, 15(18), 1875-1885.
- HAKKILA P.,(1979). “*Wood density survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland*”. Commun. Inst. For. Fenn. 96(3):1-59.

- HAKKILA P.,(1989). “*Utilization of residual forest biomass*”. Springer-Verlag, Berlino. 568 p. ISBN 3-540-50299-8.
- HALL D.O e SCRASE J.I. (1998) “*Will biomass be the environmentally friendly fuel of the future*”? Biomass and Bioenergy, 15: 357-367.
- HARSTELA, P., (1991). “*Work studies in forestry*”. Silva Carelica 18: 1-41.
- ISCO 1991 – *Calorimetro di Berthelot-Mahler, istruzioni per l'uso*. Milano, Italia.
- MANN M.K. e SPATH P.L. (1997) “*Life Cycle Assessment of Biomass-based Electricity production*”. National Renewable Energy Laboratory, SETAC.
- MIYATA E. S., (1980). “*Determining fixed and operating costs of logging equipment*”. North Central Forest Experiment Station. USDA Forest Service. General tecnica report NC-55.
- ÖKO-INSTITUT (2004) - Global Emission Model of Integrated Systems (GEMIS) MANUAL version 4.2. Darmstadt.
- OXYGEN BOMB CALORIMETER (6200) Operating Instruction Manual.
- PICCHIO R., MAESANO M., SAVELLI S., MARCHI E. (2009). “*Productivity and energy balance in the conversion into high forest system of a Quercus cerris L. coppice in Central Italy*”. Croatian Journal of Forest Engineering, 1: 15-26.
- PICCHIO R., SPINA R., MAESANO M., CARBONE F., LO MONACO A., MARCHI E., (2011). “*Stumpage value in the short wood system for the conversion into high forest of a oak coppice*”. Forestry Studies in China Volume 13, Issue 4, September 2011, Pages 252-262.
- ROBERT P., (1984). “*De la forêt aux chaufferies à bois*”. Idf, Parigi. Samson R., Girouard P., 1998. Bioenergy Opportunities from Agriculture. R.E.A.P. Canada Research Report presented to 24th Annual Conference of the Solar Energy Society of Canada, ‘Renewable Energy Technologies in Cold Climates’. 4-6 May. Montreal, Quebec, Canada. 5p.
- SACCHELLI S., (2011). “*Metodi quantitativi per la pianificazione agroenergetica del territorio: applicazione di un modello di valutazione economica su base GIS*”. Tesi di dottorato in Economia e Pianificazione Forestale e Scienze del Legno, Università degli Studi di Firenze 2011.
- SARKANEN K.V., LUDWIG C.H., (1971). “*Lignins. Occurrence, formation, structure and reactions*”. Wiley, New York.

- SCHLAMADINGER B., APPS M., BOHLIN F., GUSTAVSSON L., JUNGMEIER G., MARLAND G., PINGOUDT K., SAVOLAINE L., (1997) “*Towards a standard methodology for greenhouse gas balances of bioenergy systems in comparison with fossil energy systems*”. Biomass and Bioenergy, 13: 359-375.
- SETAC (1993) - Guidelines for Life-Cycle Assessment: a "Code Practice". Brussels and Pensacola.
- SPINELLI R., (2000). “*Meccanizzazione forestale intermedia*”. Calderini-Edagricole.
- TILLMANN D.A., (1981). “*Review of mechanism associated with wood combustion*”. Wood Science 13(4): 21-34.
- TIMMELL T.E., (1986). “*Compression wood in gymnosperms*”. Springer, Berlin.
- UNI 9017: Legno da ardere – Determinazione delle caratteristiche energetiche (in Italian), (1987).
- UNI 9903-8: Combustibili solidi non minerali ricavati da rifiuti (RDF). Determinazione delle sostanze volatili. (in Italian), (1992).
- UNI ISO 3131,. Wood – Determination of density for physical and mechanical tests (1985).
- VERANI S. e SPERANDIO G. (2006) “*La microfiliera energetica di autoconsumo dell’Isma*”. Alberi e Territorio, 3 (10/11): 32-36.
- VERANI S., SPERANDIO G., PICCHIO R., SAVELLI S., (2008) “*Nozioni di base per la costituzione di micro filiere energetiche di autoconsumo*”. Pubblicazione eseguita all’interno del progetto sportello COFEA, finanziamento MIPAAF, D.M. 487/7303/2004, stampa grafica Tipografia Bonanni Roma, 23 pp.
- VIGON B.W., TOLLE D.A., CARNABY B.W., LATHEM H.C., HARRISON C.L., BOGUSKI T.L., HUNT R.G., SELLERS J.D. (1993) “*Life Cycle Assessment: Inventory Guidelines and Principals*”. U.S. EPA Report, EPA/600/R-92/245, Cincinnati (OH, USA).
- WENZL H., (1970). “*The chemical technology of wood*”. Academic press, New York, NY.