

Filiera della biomassa, caratteristiche fisiche ed energetiche

Matteo Mazzolini

APE FVG - Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia

INDICE

- **PARTE 1**
La biomassa come risorsa energetica nel contesto europeo, nazionale e regionale
- **PARTE 2**
La biomassa come combustibile: definizione, tipologie e caratteristiche chimico-fisiche rilevanti per l'impiego energetico
- **PARTE 3**
Focus sui biocombustibili solidi: definizione, tipologie e caratteristiche chimico-fisiche rilevanti per l'impiego energetico
- **PARTE 4**
Filiera produttiva della biomassa e percorsi di trasformazione (tracciabilità e certificazione)
- **PARTE 5**
Processi di conversione energetica delle biomasse con focus sul processo di conversione termica (combustione, gassificazione, pirolisi)

PARTE 1

MODULO 1

MATERIE PRIME E TECNOLOGIE

Pordenone, 17 settembre 2020

La biomassa come risorsa energetica nel contesto europeo, nazionale e regionale

Matteo Mazzolini

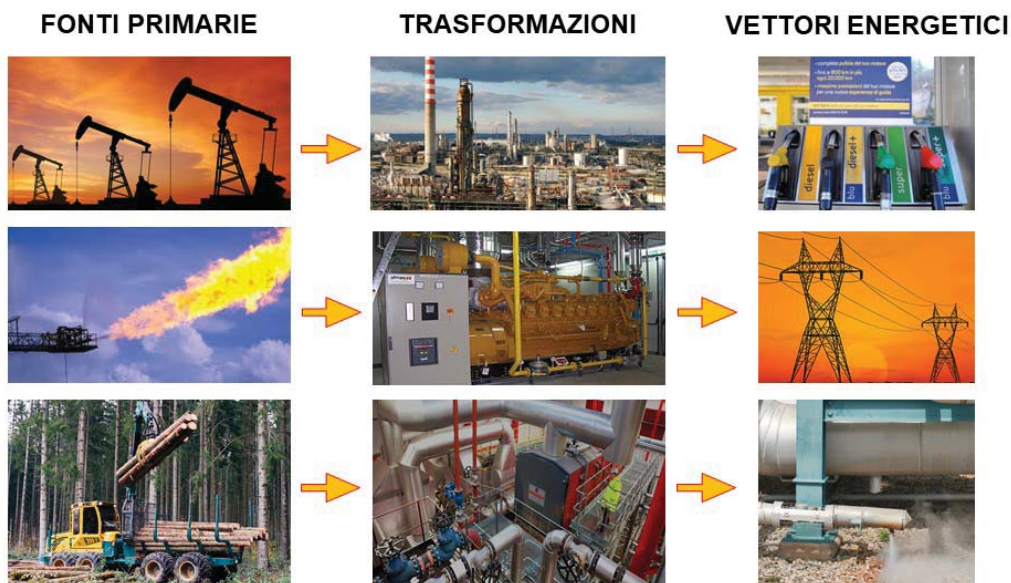
APE FVG - Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia

LA BIOMASSA COME FONTE ENERGETICA

Una fonte energetica, prima del suo utilizzo da parte dell'utilizzatore finale, ha bisogno di una filiera di trasformazione a partire dalla fonte iniziale detta fonte primaria.



LE TRASFORMAZIONI ENERGETICHE

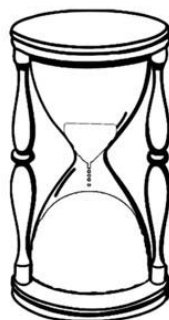


FONTI RINNOVABILI E NON RINNOVABILI

FONTI NON RINNOVABILI

Uso > Rinnovo

Carbone
Petrolio
Gas naturale
Uranio

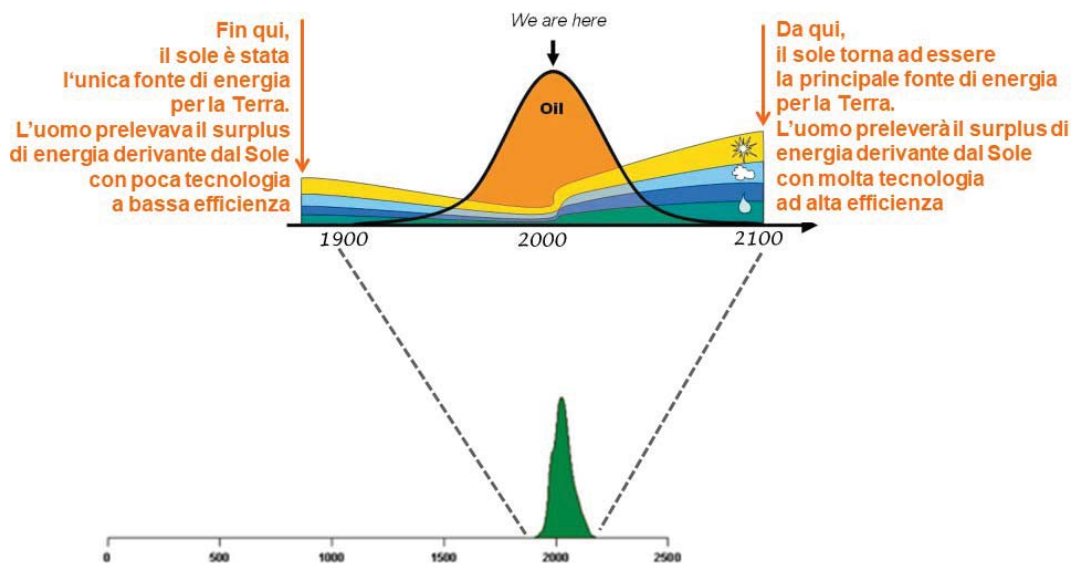


FONTI RINNOVABILI

Uso ≤ Rinnovo

Biomasse (legna)
Idroelettrico (mulini)
Eolico (mulini)
Solare termico
Solare fotovoltaico
Bioetanolo
Biodiesel
Geotermia
Maree

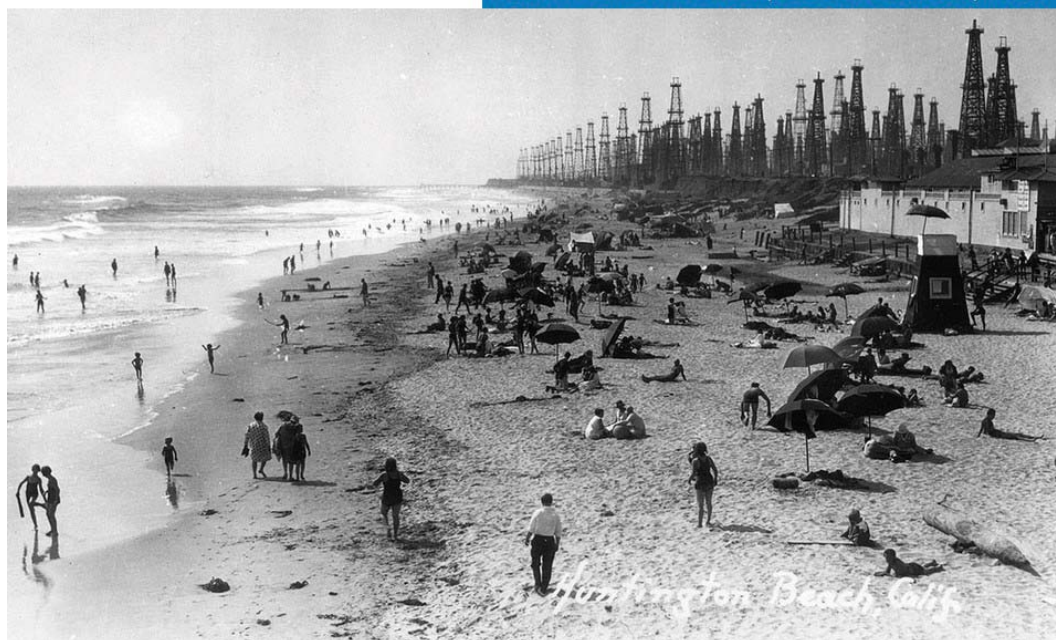
FONTI RINNOVABILI E NON RINNOVABILI



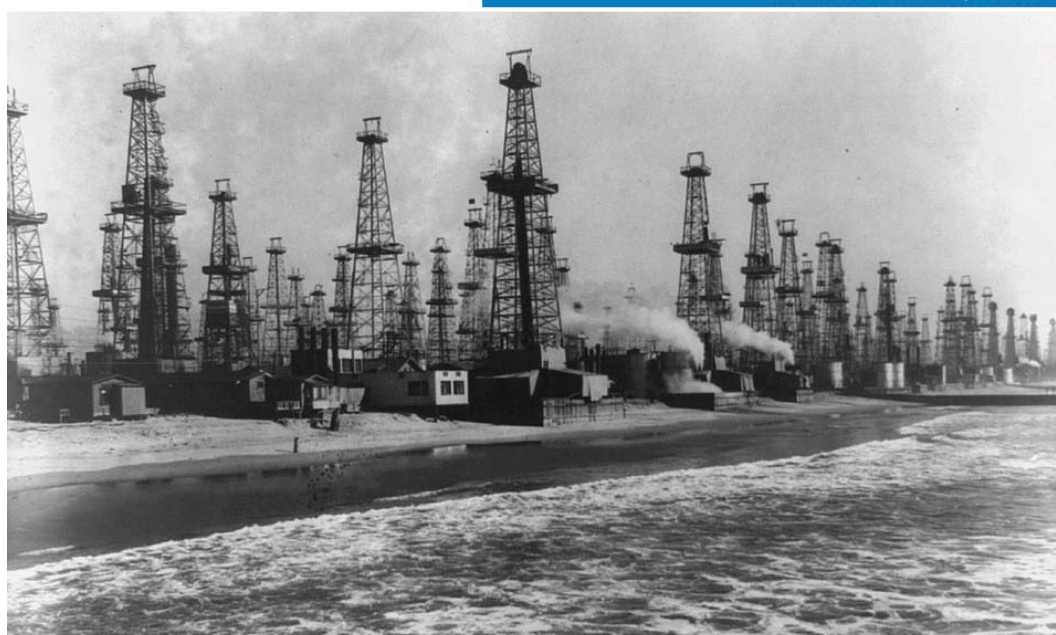
SIGNAL HILL, LOS ANGELES, 1937



HUNTINGTON BEACH, LOS ANGELES, 1930



VENICE BEACH, 1952

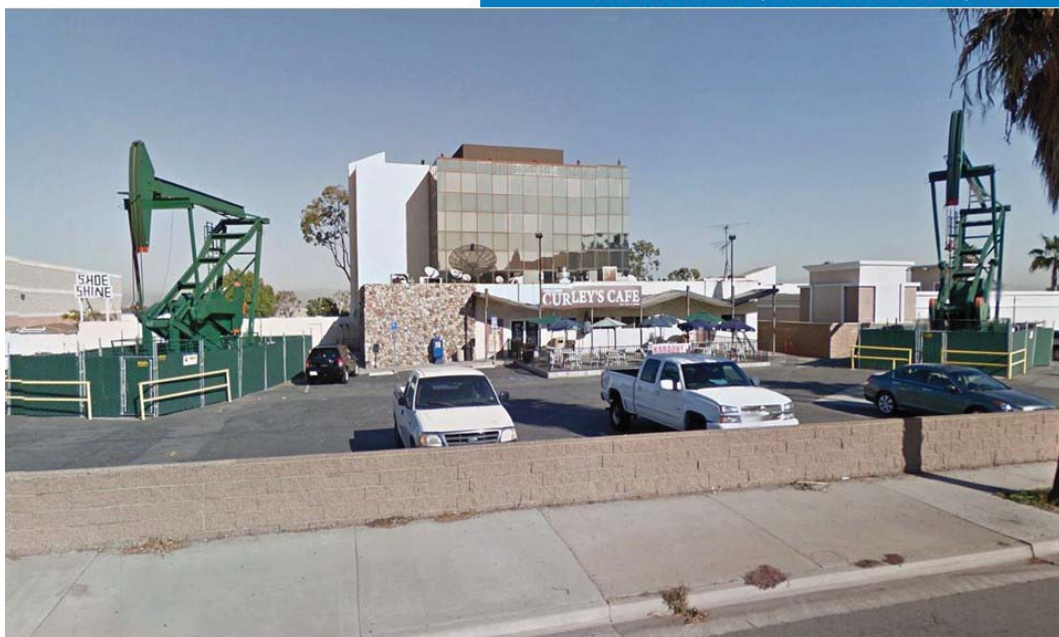


CALIFORNIA, 2003

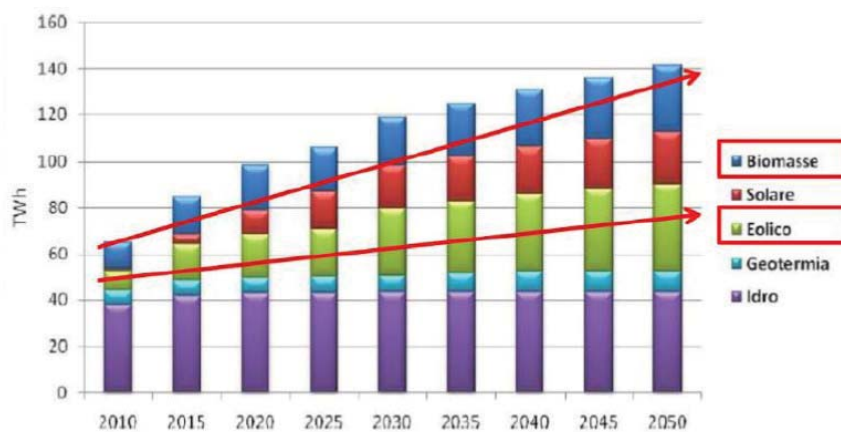


Fonte: Photographer Edward Burtynsky, *Manufactured Landscapes*, 2005

SIGNAL HILL, LOS ANGELES, 2018

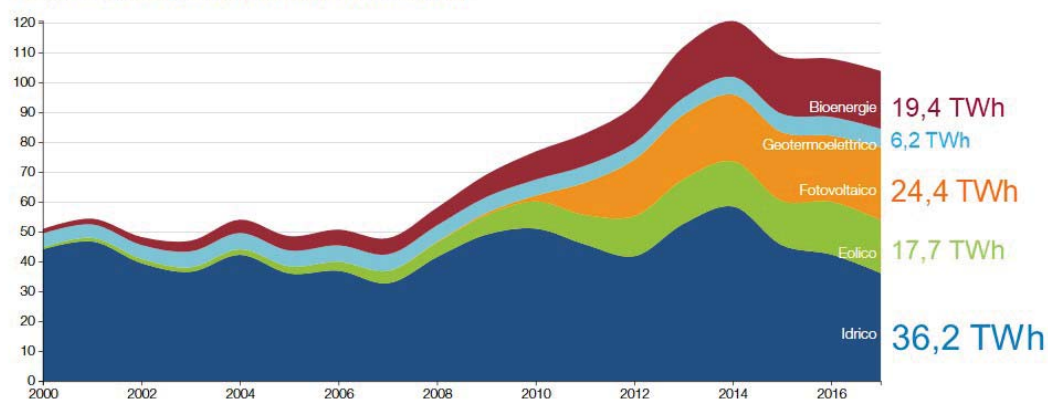


FER: POTENZIALITÀ E ANDAMENTI



PRODUZIONE ELETTRICA DA FER IN ITALIA

Produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (TWh)

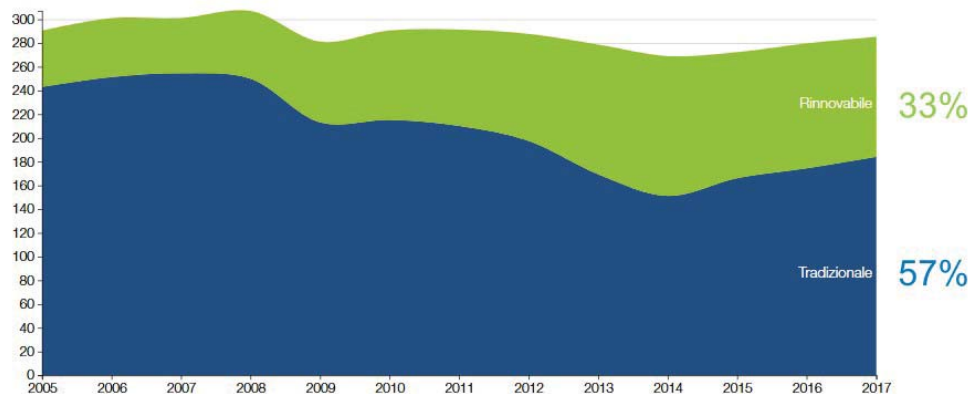


L'evoluzione storica del contributo delle varie fonti rinnovabili alla produzione di energia elettrica del nostro paese, dal 2000 in poi.

Fonte: Terna, 2018

COPERTURA DOMANDA EE IN ITALIA

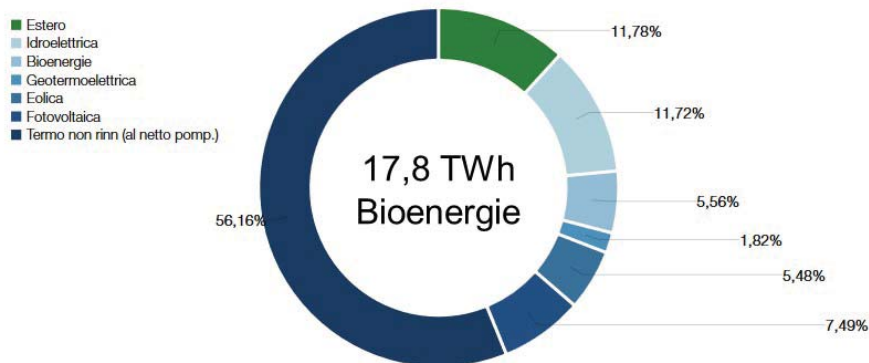
Copertura della domanda di energia elettrica (TWh)



L'evoluzione storica, a partire dal 2005, del contributo delle fonti di produzione rinnovabili e non rinnovabili (tradizionali) alla copertura del fabbisogno di energia elettrica del nostro paese.

Fonte: Terna, 2018

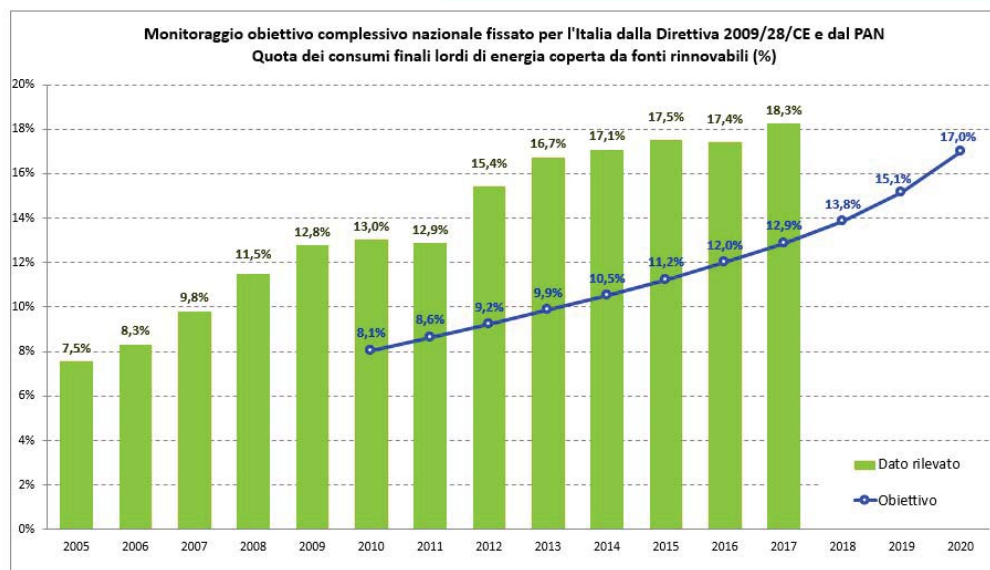
STRUTTURA DOMANDA EE IN ITALIA



La composizione del fabbisogno di energia elettrica per i vari elementi che lo compongono: produzioni, pompaggi e scambi esteri. In base al periodo selezionato è possibile osservare come sia evoluta la struttura di questa grandezza, dal 2005 in poi.

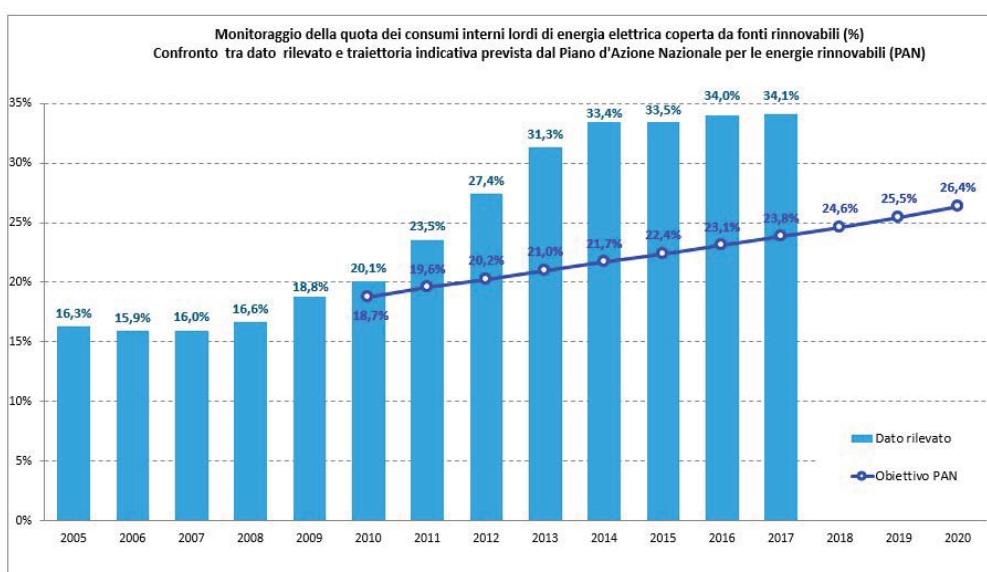
Fonte: Terna, 2018

IL PAN ITALIANO



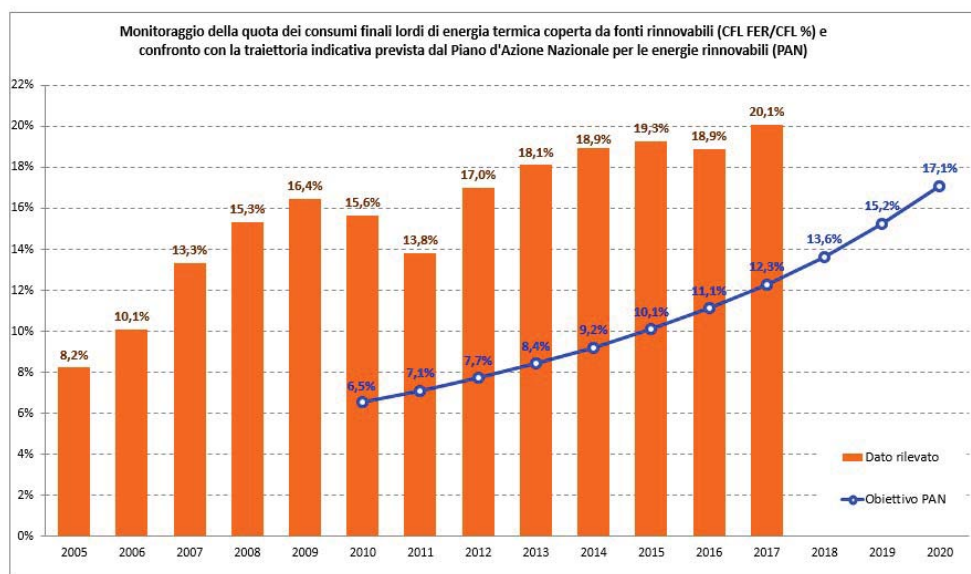
Fonte: GSE, 2018

IL PAN ITALIANO



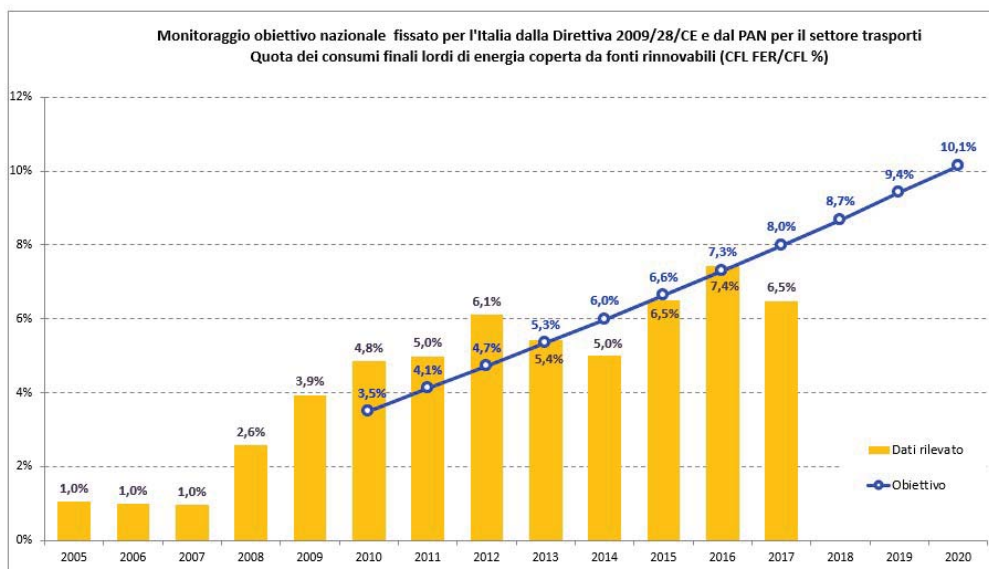
Fonte: GSE, 2018

IL PAN ITALIANO



Fonte: GSE, 2017

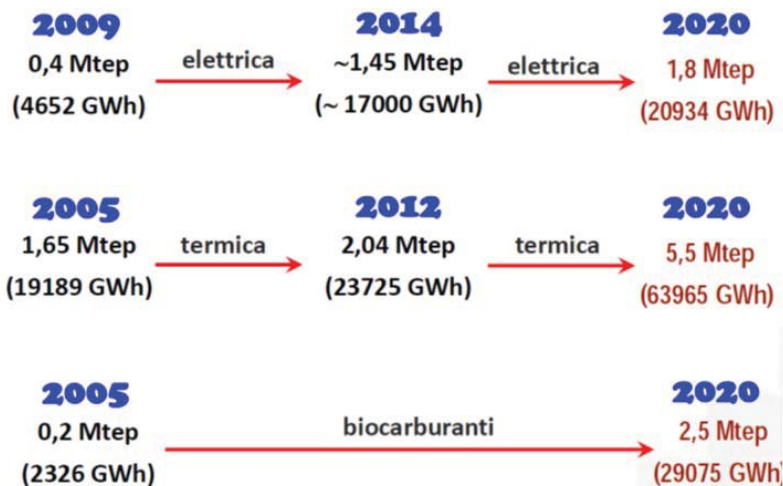
IL PAN ITALIANO



Fonte: GSE, 2018

IL PAN ITALIANO

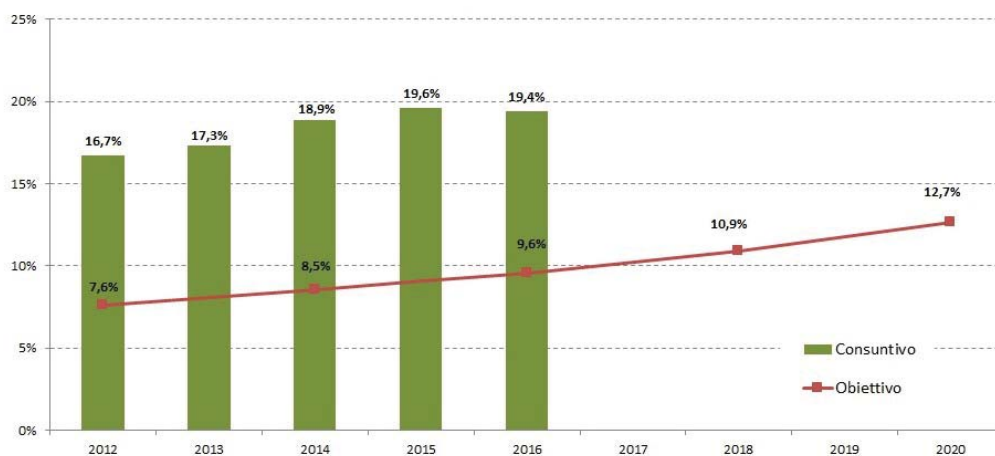
Energia da biomassa



Fonte: ENEA, 2015

IL FVG NEL PANORAMA NAZIONALE

Regione FRIULI VENEZIA GIULIA Monitoraggio obiettivi regionali fissati dal DM 15 marzo 2012 "Burden sharing" Quota dei consumi finali lordi di energia coperta da fonti rinnovabili (%)



Fonte: GSE, 2018

IL P.E.R. DEL FVG

Il Piano Energetico Regionale (PER) è stato approvato nel dicembre 2015.

Obiettivi:

- 6. Diversificare le fonti energetiche incentivando e incrementando l'utilizzo delle FER
- 7. Aumentare il ricorso all'utilizzo sostenibile di FER ...
- 9. Realizzare impianti innovativi e tecnologicamente avanzati alimentati a FER
- 10. Favorire la produzione energetica da FER...
- 26. Sviluppare la generazione distribuita...

Misure:

- 11b. Istituire fondi di rotazione e/o di garanzia che aiutino le PMI nell'investimento in ... cogenerazione ad alto rendimento, teleriscaldamento e impiego di FER,...
- 28. Incentivare l'utilizzo delle biomasse in modo sostenibile...
- 28a. Promuovere la diffusione delle biomasse in agricoltura, ...

Aspetti da migliorare:

- non ci sono indicazioni quantitative su tempi ed obiettivi da perseguire;
- manca un piano finanziario per l'attuazione delle misure.

LA SEN ITALIANA

Lo sviluppo delle FER in Italia persegue i seguenti obiettivi:

- riduzione delle emissioni di gas climalteranti (ambientale)
- contenimento della dipendenza energetica (strategico)
- riduzione del gap di prezzo dell'ee rispetto alla media europea (economico)

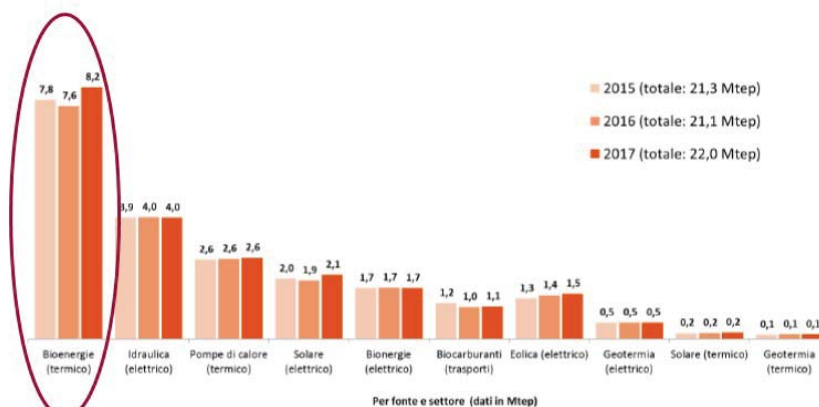
Scenario al 2030:

- FER elettriche al 55%
- FER termiche al 33%
- FER trasporti al 21%

Strategia per le FER termiche centrata su:

- pompe di calore
- biomasse a basse emissioni inquinanti ed alta qualità ambientale
- teleriscaldamento efficiente, sia in ambito urbano che extra-urbano

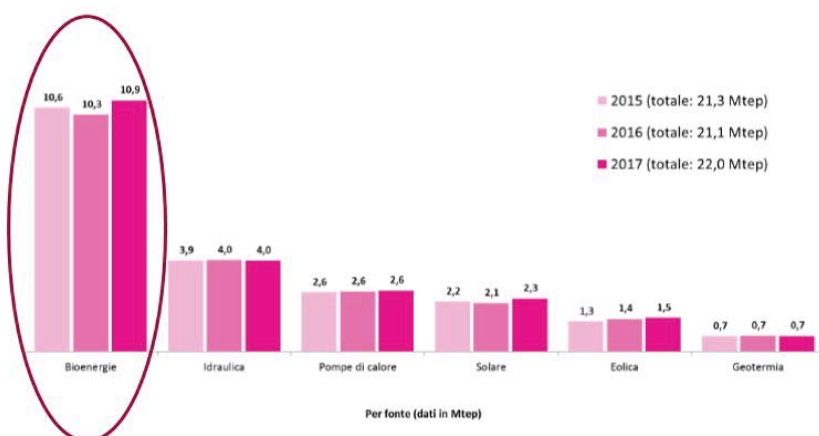
CONSUMI FINALI DI ENERGIA



Contributo delle bioenergie (calore) sui consumi finali lordi di energia da FER
≈ 37%

Fonte: GSE, 2018

CONSUMI FINALI DI ENERGIA

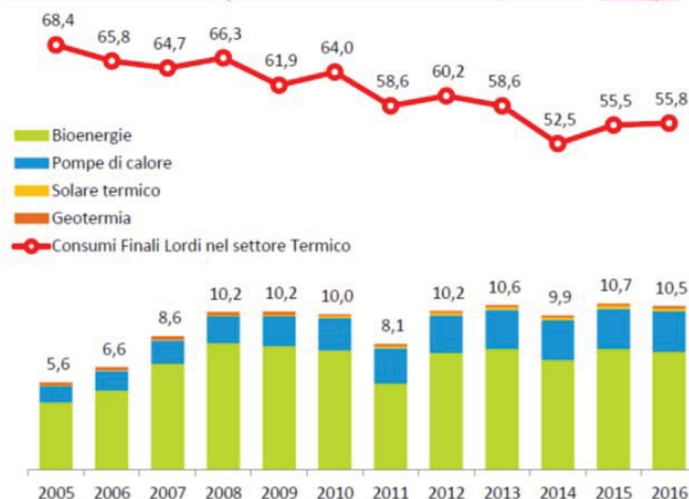


Contributo delle bioenergie (totale) sui consumi finali lordi di energia da FER
≈ 50%

Fonte: GSE, 2018

ANDAMENTO FER PER FONTE NEL TERMICO

Andamento FER per fonte e CFL – 2005-2016 (Mtep)



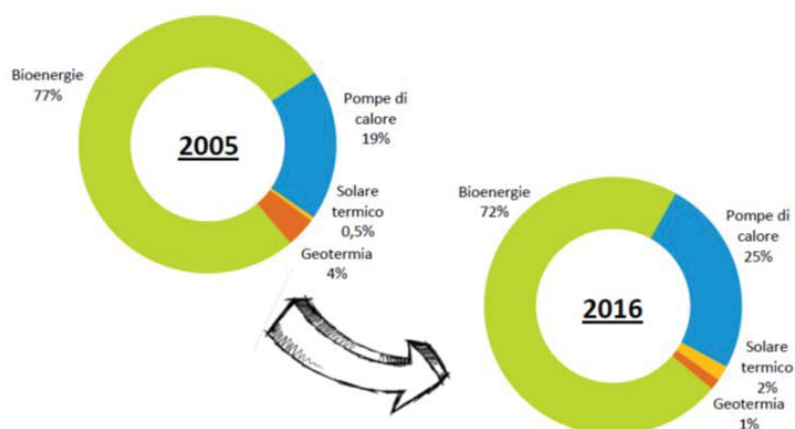
≈ 19%

Penetrazione FER
nel settore termico

Fonte: GSE, 2018

ANDAMENTO FER PER FONTE NEL TERMICO

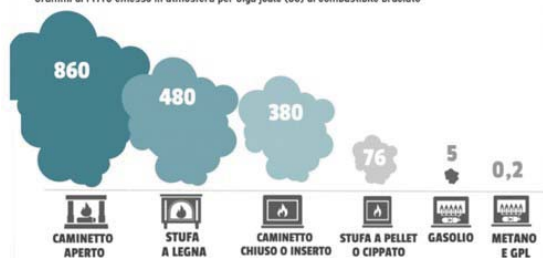
Mix di fonti nelle rinnovabili termiche – 2005 e 2016 (%)



Fonte: GSE, 2018

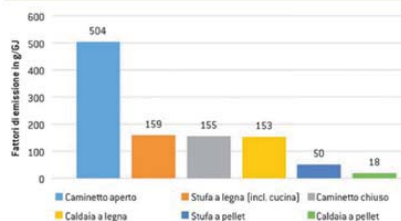
BIOMASSE E QUALITÀ DELL'ARIA

PM10: fattori di emissione medi per combustibile domestico (g/GJ)
Grammi di PM10 emesso in atmosfera per Giga joule (GJ) di combustibile bruciato

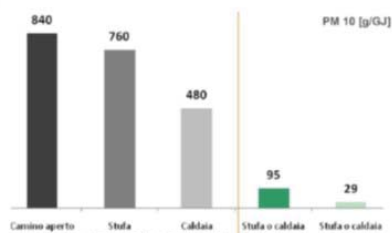


Fonte: ARPAE, 2017

Fattori di emissione (Fe) utilizzati per il calcolo della produzione di PM10 della combustione residenziale di legna e pellet in Italia nel 2015.
Il Fe ponderato sulla percentuale di consumo è risultato pari a 166 g/GJ



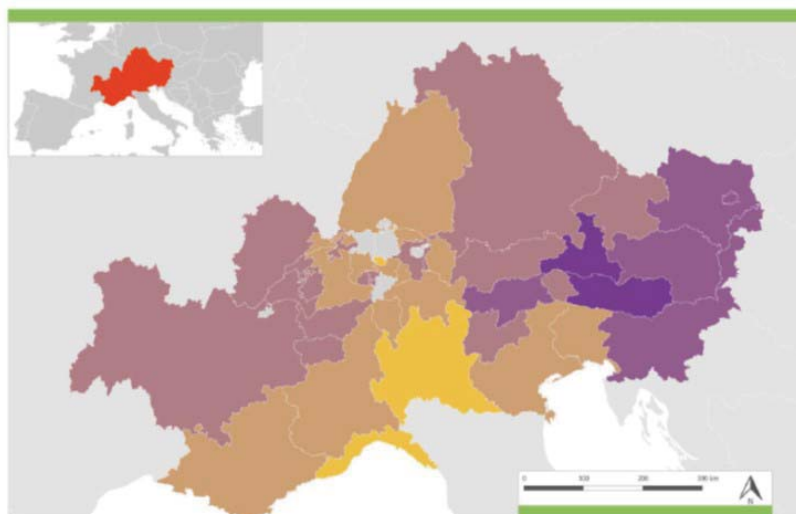
Fonte: AIEL, 2016



Fonte: SEN, 2017

PENETRAZIONE FER SETTORE TERMICO

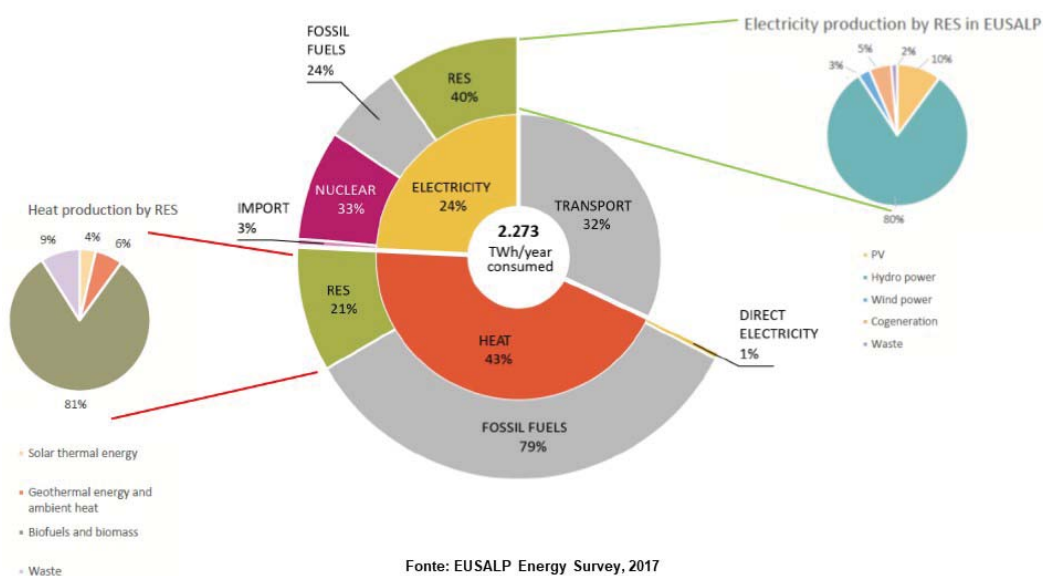
Legend
Share of heat
from RES [%]
no data
0 - 7
7 - 18
18 - 35
35 - 58
58 - 100



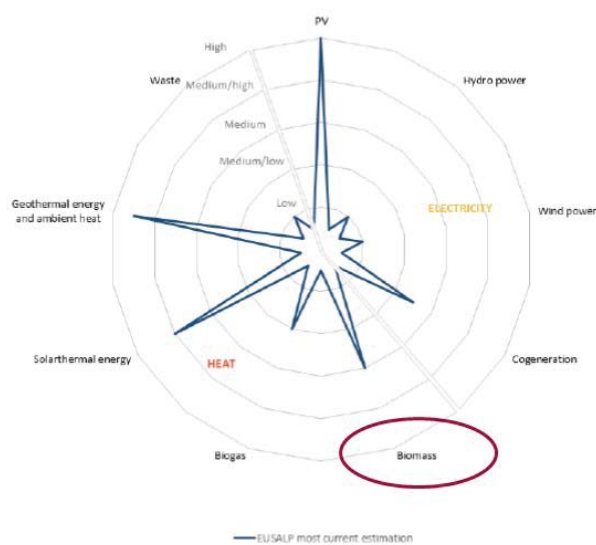
Fonte: EUSALP Energy
Survey, 2017

EUSALP: strategia di sviluppo territoriale per la macroarea europea costituita da 48 Regioni di 7 Stati, assimilabile allo Spazio Alpino

EUSALP: CONSUMI DI ENERGIA



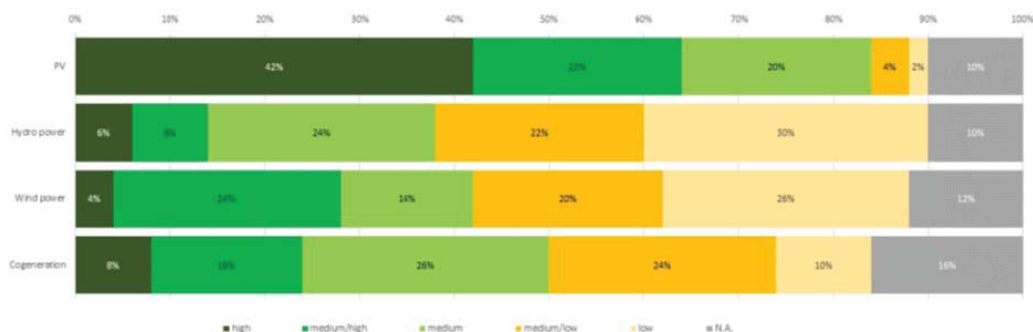
EUSALP: POTENZIALE SVILUPPO



Fonte: EUSALP Energy Survey, 2017

EUSALP: POTENZIALE SVILUPPO

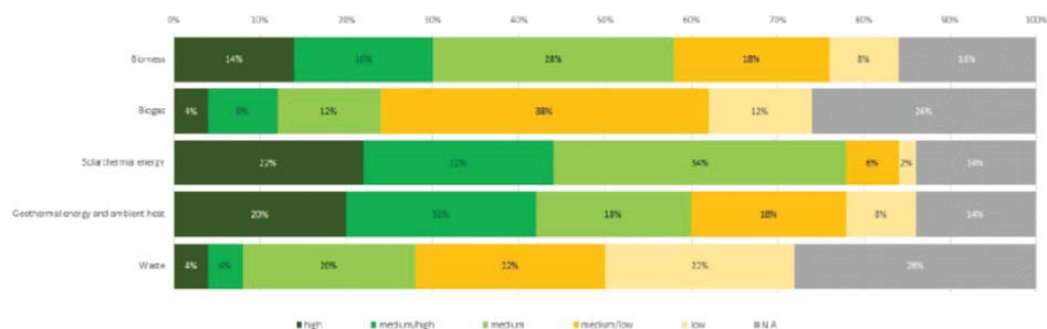
POTENZIALE DI SVILUPPO PERCEPITO PER LE FER NEL SETTORE DELLA PRODUZIONE ELETTRICA



Fonte: EUSALP Energy Survey, 2017

EUSALP: POTENZIALE SVILUPPO

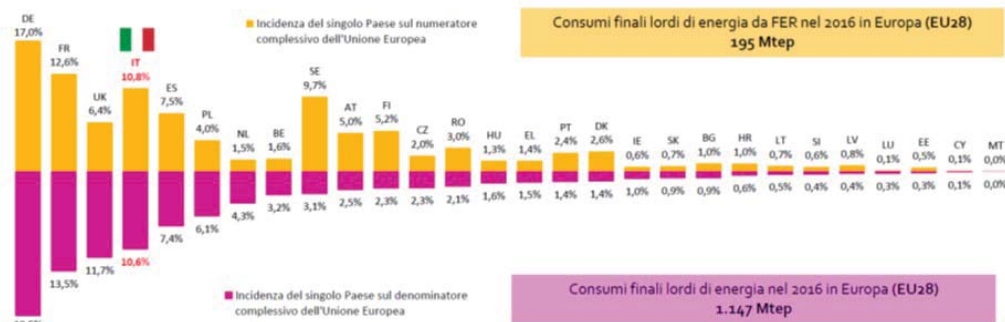
POTENZIALE DI SVILUPPO PERCEPITO PER LE FER NEL SETTORE DELLA PRODUZIONE DI CALORE



Fonte: EUSALP Energy Survey, 2017

EU: USI DI ENERGIA DA FER

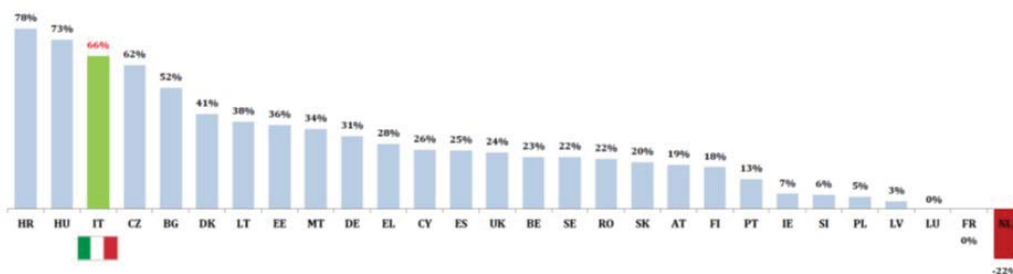
- Nel 2016 in **Europa**, su un totale di circa 1.150 Mtep di energia consumati, 195 Mtep provengono dall'uso di energie rinnovabili (17%).
- La somma dei consumi finali lordi di energia di Germania, Francia, Regno Unito e Italia è maggiore della metà dei consumi complessivi europei.
- L'Italia, che nel 2016 si attesta al 4° posto in termini di consumi complessivi, è il 3° Paese in termini di contributo ai consumi europei da FER.



Fonte: GSE, 2016

EU: SCOSTAMENTO DAGLI OBIETTIVI

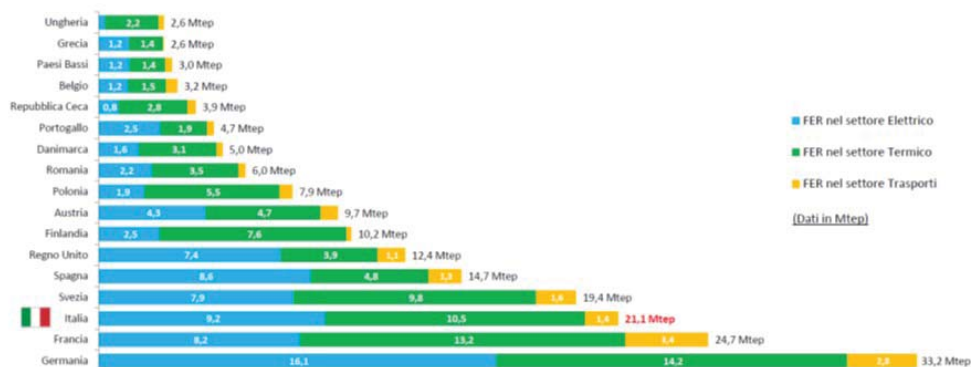
- La Direttiva 28/2009 individua le **traiettorie biennali (non vincolanti)** da seguire per raggiungere gli obiettivi nazionali obbligatori stabiliti per il 2020.
- Nel grafico sottostante sono confrontate le quote FER dei Consumi Finali Lordi rilevate nel 2016 con quelle indicate dalla Direttiva per il 2015-2016 (% rilevata nel 2016 / % prevista per il 2016 - 1): **quasi tutti Paesi hanno superato le previsioni** della Direttiva 28/2009.
- In particolare, si nota come l'Italia sia uno degli Stati membri dell'Unione europea che ha maggiormente sviluppato il proprio consumo di FER rispetto alle previsioni della Direttiva 28/2009: il valore non vincolante previsto dalla Direttiva 28/2009 per il biennio 2015-2016 è pari a 10,5% mentre il dato a consuntivo nel 2016 è pari a 17,4% (nel grafico risulta dunque uno scostamento del +66% rispetto alle previsioni).



Fonte: GSE, 2016

EU: FER PER SETTORE DI UTILIZZO

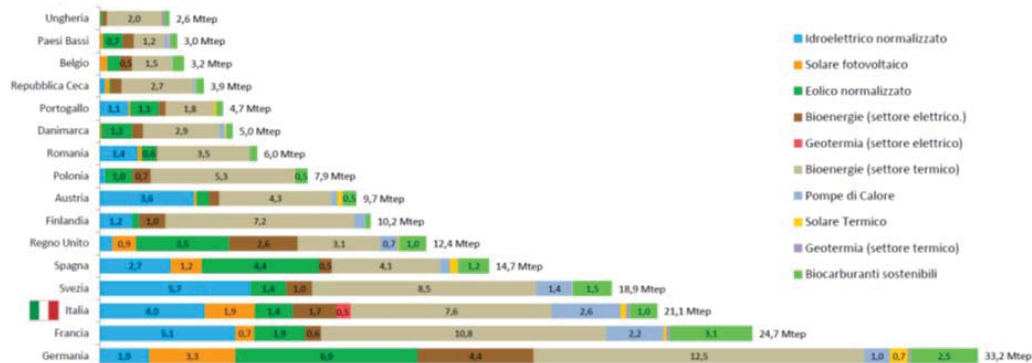
- Il grafico mostra, per alcuni dei principali Paesi UE, la suddivisione degli usi di FER nei tre settori (anche in questo grafico il settore Trasporti comprende i biocarburanti e l'energia elettrica rinnovabile utilizzata per i trasporti senza alcun coefficiente moltiplicativo).



Fonte: GSE, 2016

EU: FER PER SETTORE DI UTILIZZO

- Il mix di fonti rinnovabili utilizzate varia significativamente tra i diversi Paesi europei.
- Nella maggior parte dei Paesi, le bioenergie (biomasse solide, liquide e gassose) utilizzate per la produzione termica forniscono il contributo maggiore ai consumi complessivi da FER.
- L'Italia è il terzo Paese in Europa per consumi di energia da fonti rinnovabili; rispetto agli altri Paesi, in Italia si rilevano consumi elevati di energia rinnovabile da pompe di calore (utilizzo invernale), da risorsa geotermica e da fonte solare per la produzione di energia elettrica (fotovoltaico).



Fonte: GSE, 2016

PARTE 2

MODULO 1

MATERIE PRIME E TECNOLOGIE

Pordenone, 17 settembre 2020

La biomassa come combustibile Definizione, tipologie e caratteristiche chimico fisiche rilevanti per l'impiego energetico

Matteo Mazzolini

APE FVG - Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia

LA BIOMASSA COME COMBUSTIBILE



LA BIOMASSA: DEFINIZIONE

Direttiva Europea 2009/28/CE «Promozione dell'energia da fonti rinnovabili»

Si intende per biomassa 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, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani

...ma attenzione alla definizione di sottoprodotti
(art. 183 bis del D.Lgs. 152/06)

Il concetto di biomassa è comunque ampio e, almeno a livello teorico, include praticamente ogni combustibile di derivazione non minerale, non fossile.

BIOMASSE: TIPOLOGIE

Pellet di
legna



Chips di
legna



Legna



Sansa



Trucioli



Segatura



Nocciolino



Mais



Gusci triti



Paglia

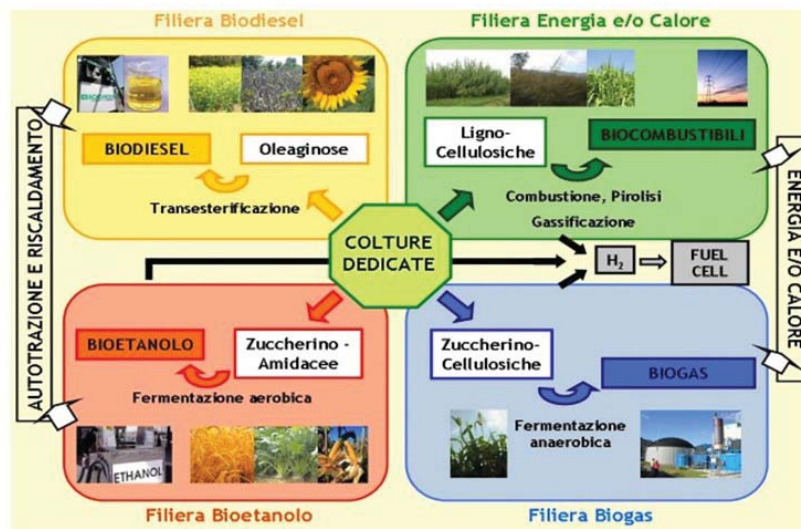


Vinacce



Chi non c'entra?

BIOMASSE: TIPOLOGIE AD USO ENERGETICO

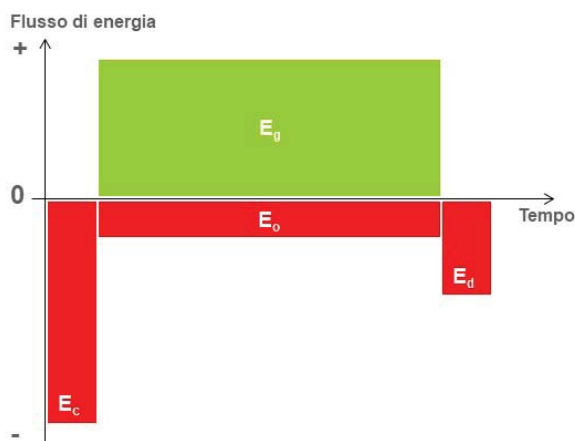


FONTE: Prof. Enrico Bonari – Scuola Superiore Sant'Anna, 2014

BIOMASSE SOSTENIBILI

- Residui forestali
- Scarti industria trasformazione del legno (es. segatura)
- Scarti agro-industriali (es. vinacce, gusci, sanse, etc.)
- Scarti aziende zootecniche (es. reflui)
- Residui di coltivazioni destinate all'alimentazione umana o animale
- Colture energetiche (non food e quando sostenibili)
- Parte biodegradabile dei rifiuti solidi urbani
- **Altri sottoprodotti (art. 183 bis del D.Lgs. 152/06), a patto che:**
 - a) la sostanza o l'oggetto è originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto;
 - b) è certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi;
 - c) la sostanza o l'oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;
 - d) l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.

SOSTENIBILITÀ: EROEI



E_g = energia ottenuta

E_c = energia per la costruzione

E_o = energia per la conduzione

E_d = energia per la dismissione

$$\text{EROEI} = \frac{E_g}{E_c + E_o + E_d} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$$

SOSTENIBILITÀ: EROEI

Tecnologia	EROEI	Note
Grande idroelettrico	50-250	Decade con il degrado dei bacini
Mini idroelettrico	30-270	Se ben dimensionato, il migliore investimento
Petrolio "anni d'oro"	50-100	Fino al 1970 circa
Petrolio estratto oggi	5-15	Pozzi in esaurimento rendono l'estrazione sempre più costosa
Petrolio da nuove scoperte	3	Trovare nuove riserve di petrolio è sempre più difficile e costoso
Eolico	5-80	Dipende dai siti: coste del Mare del Nord ~ 50-100, coste italiane ~ 20
Nucleare	1<-100	Tecnologie controverse, esternalità molto alte (rifiuti radioattivi)
Fotovoltaico a film sottile	25-80	
Fotovoltaico convenzionale	3-9	
Carbone	2-7	
Gas naturale	5-6	
Biomassa	5-27	Dipende dai siti e dalle tecnologie
Biodiesel	0,6-3	Analisi ancora molto controverse
Etanolo	0,6-1,2	Analisi ancora molto controverse
Sabbie bituminose	<1	Costi molto alti di estrazione, esternalità molto alte

BIOMASSE: VANTAGGI

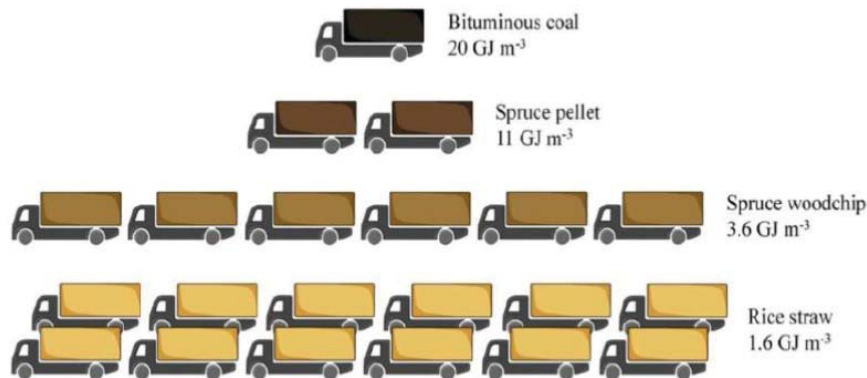
- **Risorse endogene (filieri locali di produzione)**
- **Bilancio di CO₂ semi-nullo (dipende da dove provengono)**
- **Biodegradabilità (compatibilità ambientale)**
- **Valorizzazione di sottoprodotti a basso valore aggiunto**
- **Prezzi competitivi (se le filiere sono ben gestite)**
- **Risorse non delocalizzabili**
- **Filieri ad alta intensità di lavoro umano (soprattutto nelle Alpi) → ma questo alza il costo unitario!**

BIOMASSE: SVANTAGGI

- **Bassa densità energetica**
- **Emissioni in atmosfera penalizzanti (con tecnologie errate od obsolete)**
- **Grandi aree per la coltivazione**
- **Possono richiedere uso di fertilizzanti (colture energetiche)**
- **Filieri di approvvigionamento articolate**
- **Esigenze logistiche significative**
- **Produzione legata a fattori climatici/ambientali**
- **Disponibilità non costante (soprattutto se crescerà ancora l'impiego e non sarà fatta un'adeguata programmazione dell'uso)**
- **Volatilità dei prezzi (es. olio di colza, cippato, ...)**

BIOMASSE: SVANTAGGI

Trasporto e densità energetica (GJ m^{-3})



BIOMASSE RINNOVABILI

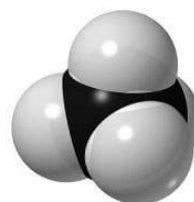
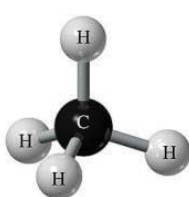
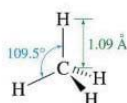
In termini pratici, la biomassa per essere utilizzata come combustibile rinnovabile deve:

- non aver subito trattamenti chimici (es. verniciatura) ma solo meccanici (es. sezionatura, carteggiatura, etc.);
- non essere accoppiata con altri materiali (es. profili plastici);
- non provenire da paesi esotici (es. Malesia, Indonesia, ...) ma da filiere EU;
- non essere destinata all'alimentazione umana (non food, no frumento, maïs, etc.);
- non contenere materiali pericolosi (composti organici alogenati, residui di metalli pesanti, isotopi radioattivi, etc.)
- non provenire da materia prima vegetale o animale a rischio di contaminazione biologica (carcasse di animali, grassi, residui di patate, etc.) → in questo caso vanno «incenerite» e non «bruciate» → quadro normativo per l'utilizzo a fine energetici significativamente diverso

STATO FISICO

STATO GASSOSO

METANO

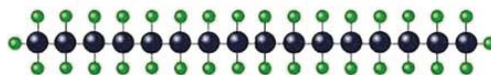


Ottima combustione: produce poca CO_2

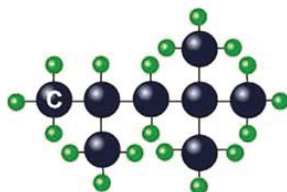
STATO FISICO

STATO LIQUIDO

BENZINE, GASOLIO



gasolio



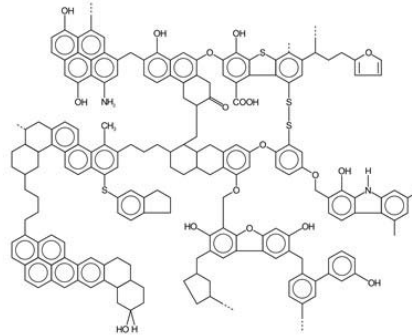
benzina

Buona combustione: produce CO_2

STATO FISICO

STATO SOLIDO

LEGNA → CARBONE



Buona combustione con molta aria: produce molta CO₂ (...e altri inquinanti)

STATO FISICO NEL TEMPO

Sostanza	% C	% H	% O	% N	% S	% ceneri
Legno	50 - 54	6 - 6,5	43,5 - 44	0,3 - 0,5	0	0,5 - 1,2
Torba	50 - 60	5,5 - 6,5	30 - 48	0,8 - 3	0,1 - 0,2	3 - 25
Lignite	60 - 75	5 - 6	20 - 45	0,7 - 2	1 - 12	3 - 8
Litantrace	75 - 90	4,5 - 5,5	5 - 15	0,7 - 2	0,5 - 4	0,5 - 4
Antracite	92 - 95	2 - 2,5	3	0,5 - 1	0,5 - 2	0,5 - 2

Sostanza	rapporto H/C	P.C. (MJ/kg)
Legno	1,55	10,5-18,8 (2500-4500 kcal/kg)
Torba	1,30	12,6-18,8 (3000-4500 kcal/kg)
Lignite	0,97	16,7-26,0 (4000-6200 kcal/kg)
Litantrace	0,72	31,8-37,7 (7600-9000 kcal/kg)
Antracite	0,29	34,8-37,7 (8300-9000 kcal/kg)



- % Carbonio
- % Elementi volatili (H,O)
- % Zolfo



Torba

Antracite

SUDDIVISIONE PER STATO FISICO

SOLIDO



LEGNA DA ARDERE
BRICCHETTE
CIPPATO
PELLET
SANSÀ
GUSCI
NOCCIOLI
VINACCE
PAGLIA
LOLLA

LIQUIDO



OLII VEGETALI
BIODIESEL
BIOETANOLO

GAS



BIOGAS
SYNGAS

BIOMASSE PER STATO FISICO

Le biomasse gassificate sono ottenute a partire da biomasse solide con appositi processi. Per quanto riguarda il biogas, esso è ottenuto tramite un processo biologico a bassa temperatura per mezzo del quale, in assenza di ossigeno, la sostanza organica (costituita sovente da scarti provenienti dal comparto zootecnico, dalla frazione umida dei rifiuti urbani,...) viene trasformata in una miscela gassosa di metano (CH_4) e anidride carbonica (CO_2). Il syngas viene invece ottenuto da un processo di pirolisi e gassificazione ad alta temperatura, e corrisponde ad una miscela di monossido di carbonio (CO) e idrogeno molecolare (H_2).

Le biomasse liquide derivano tipicamente da processi di estrazione/raffinazione e sono trasformate in energia tramite tecnologie diffuse nel settore automobilistico/cogenerativo. Possono, in alcuni casi, essere utilizzate in sostituzione ai carburanti comuni per autotrasporto.

Le biomasse solide sono generalmente utilizzate come combustibile in impianti termici. Esse possono essere utilizzate direttamente nello stato in cui si trovano o dopo un trattamento, che può avere differenti scopi: riduzione delle dimensioni, compattamento a fini di handling e riduzione del contenuto d'acqua.

PARTE 3

MODULO 1

MATERIE PRIME E TECNOLOGIE

Pordenone, 17 settembre 2020

Focus sui biocombustibili solidi Definizione, tipologie e caratteristiche chimico fisiche rilevanti per l'impiego energetico

Matteo Mazzolini

APE FVG - Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia

BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI

Alle nostre latitudini, le biomasse solide, ed in particolare quelle legnose, risultano essere un combustibile **tradizionale** e culturalmente **accettato**, decisamente **disponibile** in alcune zone, economicamente **appetibile** ed ecologicamente **sostenibile**.

Nel prendere in considerazione questo combustibile è bene tener presente che vi sono alcune importanti variabili economiche, tecnologiche ed ambientali da valutare onde poter avere a disposizione un quadro completo e bilanciato della realtà.

Si tenga presente che, abbandonando combustibili «standardizzabili» come il legno ed avvicinandosi a combustibili come le cosiddette «**biomasse solide agricole**» (strame cavalli, pollina, paglia, lolla, bucce, noccioli, residui di distillazione, trebbia di birreria, scarti dell'olio di semi, scarti di lavorazione del pomodoro, crusca, mela,...), tutti i valori fisico-chimici mutano e risulta fondamentale una rilevazione empirica dei dati relativi ad inquinanti, basso fondenti, polverosità, umidità e ceneri.

In via sintetica, nelle slides che seguono, si raccolgono le principali variabili fisico-tecniche da considerare nella valutazione della biomassa solida come combustibile.

BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI

Biocombustibili solidi - Specifiche e classificazione del combustibile

- UNI EN ISO 17225-1:2014 - Parte 1: Requisiti generali
- UNI EN ISO 17225-2:2014 - Parte 2: Definizione delle classi di pellet di legno
- UNI EN ISO 17225-3:2014 - Parte 3: Definizione delle classi di bricchette di legno
- UNI EN ISO 17225-4:2014 - Parte 4: Definizione delle classi di cippato di legno
- UNI EN ISO 17225-5:2014 - Parte 5: Definizione delle classi di legna da ardere
- UNI EN ISO 17225-6:2014 - Parte 6: Definizione delle classi di pellet non legnoso
- UNI EN ISO 17225-7:2014 - Parte 7: Definizione delle classi di bricchette non legnose
- UNI ISO/TS 17225-8:2018 - Parte 8: Definizione delle classi di biomasse combustibili trattate termicamente e densificate

In termini generali, secondo la ISO 17225, la biomassa solida comprende il materiale organico di origine biologica, non fossile, che può essere utilizzato come combustibile per la generazione di calore ed elettricità.

LE BIOMASSE LEGNOSE: PROPRIETÀ

- tipologie
- forma e geometria
- struttura
- composizione
- percentuale di carbonio fisso e sostanza volatile
- presenza di elementi chimici (azoto, zolfo, cloro)
- densità sterica
- contenuto idrico e umidità
- ceneri
- potere calorifico
- densità energetica
- resistenza meccanica

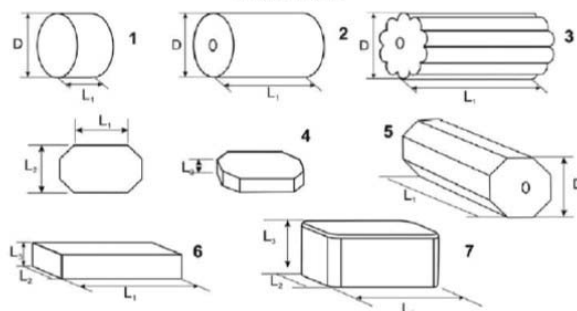


BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI: TIPOLOGIE

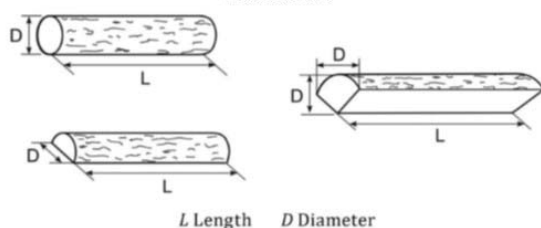
Tipologia di biocombustibile	Dimensioni tipiche	Metodo di preparazione
Briquettes	diametro > 25 mm	compressione meccanica
Pellets	diametro < 25 mm	compressione meccanica
Polvere combustibile	< 1 mm	macinazione fine
Segatura	1 - 5 mm	taglio
Legno sminuzzato (chips)	5 - 100 mm	taglio
Legno spezzettato	varie	frantumazione
Legno in tronchetti	100 - 1.000 mm	taglio
Legno intero	> 500 mm	taglio
Paglia in balle prismatiche	0,1 m ³	compressione e imballatura
Paglia in balle prism. grandi	3,7 m ³	compressione e imballatura
Paglia in rotoballe	2,1 m ³	compressione e imballatura
Fascine	varie	raccolta e legatura dei fusti
Corteccia	varie	scortecciamento della legna
Paglia trinciata	10 - 200 mm	trinciatura durante la raccolta
Granaglie o semi	varie	nessuna preparazione
Gusci e noccioli di frutti	5 - 15 mm	nessuna preparazione
Panelli di fibra	varie	disidratazione di residui fibrosi

BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI: FORMA E GEOMETRIA

Bricchette



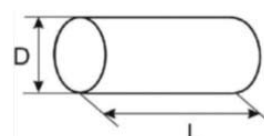
Tronchetti



Cippato



Pellet



L Length D Diameter

FORMA E TIPOLOGIA PIÙ COMUNI

Le biomasse solide legnose si presentano in varie forme e tipologie:

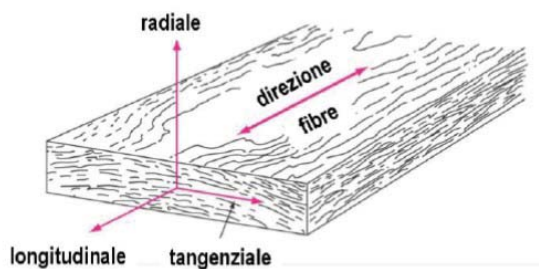
- legna in ciocchi o tondelli;
- bricchette;
- cippato;
- pellet.



LE BIOMASSE LEGNOSE: STRUTTURA

Struttura del legno:

- direzione longitudinale (L): parallela al tronco;
- direzione radiale (R): direzione di crescita degli anelli, perpendicolare al tronco;
- direzione tangenziale (T): tangente agli anelli



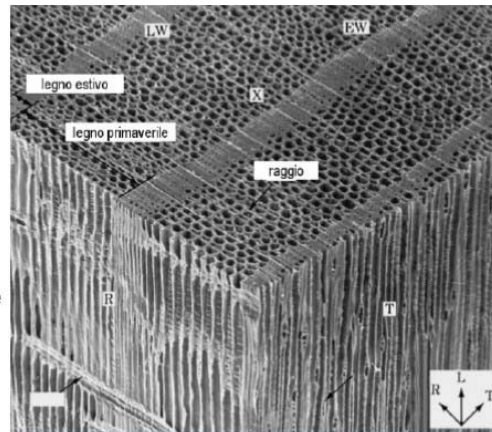
LE BIOMASSE LEGNOSE: STRUTTURA

Struttura del legno in 3D

LEGNO TENERO (abete, pino, etc.)

Scansione al microscopio elettronico

Il legno tenero è costituito da cellule lunghe 3-5 mm e di diametro 20-80 micron, con funzione sia strutturale che per il trasporto della linfa.



LE BIOMASSE LEGNOSE: STRUTTURA

Struttura del legno in 3D

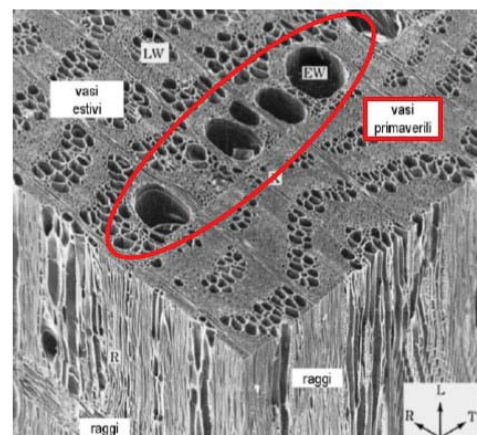
LEGNO DURO (betulla, faggio, etc.)

Scansione al microscopio elettronico

Il legno tenero è costituito da fibre di legno e vasi.

Le fibre sono costituite da cellule lunghe 0,7-3mm e di diametro 20-80 micron, con funzione strutturale.

Il trasporto della linfa avviene attraverso i vasi con diametro di gran lunga maggiore.



LE BIOMASSE LEGNOSE: COMPOSIZIONE

Legno duro

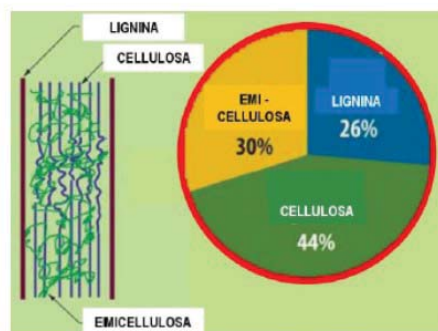
- 39-54% cellulosa
- 14-37% emicellulosa
- 17-30% lignina

Legno tenero

- 41-50% cellulosa
- 11-27% emicellulosa
- 20-30% lignina

Residui agricoli, erbacee

- 32-47% cellulosa
- 19-27% emicellulosa
- 5-24% lignina



Estraibili vari: resine, tannini, gomme, cere, ... < 2%

COMPOSIZIONE IN PESO

umidità totale	acqua libera				
	acqua legata				
sostanze minerali	ceneri				ceneri
	minerali v.				S
	organici vol.				N
	volatili				O
					H
sostanze organiche	carbonio fisso				C
		secca senza ceneri	secca	seccata all'aria	tal quale

ANALISI IMMEDIATA E CARBONIO FISSO

ANALISI IMMEDIATA (PROXIMATE)

- Umidità (essiccazione a 105°C fino a massa costante) **UNI EN 14774-2**
- Ceneri (ossidazione a 550°C per 2-3 ore) **UNI EN 14775**
- Volatili (ossidazione a 900°C per 7 min) **UNI EN 14148**
- Carbonio fisso (per differenza)

I risultati possono essere espressi su base:

tal quale	$C \text{ fisso} = 100 - \text{ceneri (tal q.)} - \text{acqua} - \text{volatili (tal q.)}$
secco	$C \text{ fisso} = 100 - \text{ceneri (secco)} - \text{volatili (secco)}$
secco senza ceneri	$C \text{ fisso} = 100 - \text{volatili (secco senza ceneri)}$

CARBONIO FISSO

	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)
Legno	50	6	43,8	0,2

La componente "carbonio" in altri combustibili di origine legnosa può essere anche superiore a quella del legno, ciò è dovuto ai lunghi processi biochimici di formazione delle sostanze in condizioni particolari di pressione e temperatura.

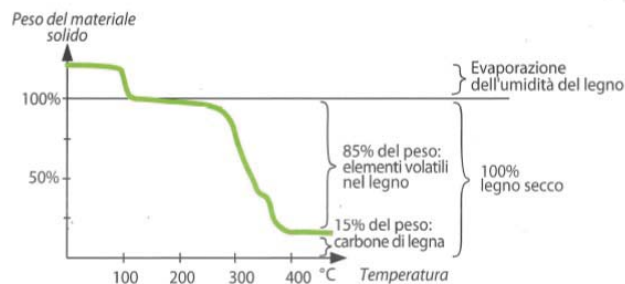
	kgC/kg	AUTORE
Legno anidro	0,5 ⁴	AA.VV.
Dendromassa (anidra)	0,45	Tuscan
Biomassa arborea totale	0,45	La Marca
Carbone di legno di carbonaia	0,91	Giordano
Carbone di legno	0,83	Giordano
Torba	0,60 - 0,65	Giordano
Lignite	0,72	Giordano
Carbone bituminoso	0,75	Tuscan
Litantrace	0,75 - 0,90	Giordano
Antracite	0,90 - 0,93	Giordano
Carbone	0,97 - 0,98	Giordano
Gasolio	0,86	Enciclop. Petrolio
Petrolio	0,85	Giordano

COMPONENTE VOLATILE

E' la componente del legno, prevalentemente gassosa, rilasciata nella fase di riscaldamento del legno ($T > 150^{\circ}\text{C}$).

In termini quantitativi è inversamente proporzionale alla componente carboniosa (carbone di legna).

- **Combustibili legnosi** → in media 85% s.s.
- **Combustibili erbacei (paglia)** → in media 75% s.s.
- **Combustibili fossili (carbone)** → 6-63% s.s.



ELEMENTI CHIMICI PRINCIPALI

ANALISI ELEMENTARE

- Carbonio (C)
- Idrogeno (H)
- Ossigeno (O)
- Azoto (N)
- Zolfo (S)

MA...

Molto difficile dedurre il comportamento della biomassa sottoposta ad un trattamento termico dall'analisi della composizione elementare

Non ci sono solo gli elementi principali e il contenuto d'acqua a influenzare il PC ma anche struttura e legami intermolecolari

COMPOSIZIONE CHIMICA

	C	H	O	N	K	S	Cl
	in % sulla sostanza secca (ss)						
Faggio (con corteccia)	47,9	6,2	43,3	0,22	0,22	0,015	0,006
Pioppo SRC	47,5	6,2	44,1	0,42	0,35	0,031	0,004
Salice SRC	47,1	6,1	44,2	0,54	0,26	0,045	0,004
Corteccia di conifere	51,4	5,7	38,7	0,48	0,24	0,085	0,019
Miscanto	47,5	6,2	41,7	0,73	0,7	0,150	0,220
Paglia di frumento	45,6	5,8	42,4	0,48	1,0	0,082	0,190
Granella di triticale	43,5	6,4	46,4	1,68	0,6	0,11	0,07
Panello di colza	51,5	7,38	30,1	4,97	1,60	0,55	0,019

Per confronto, combustibili fossili

Carbone	72,5	5,6	11,0	1,30	-	0,940	< 0,1
Lignite	65,9	4,6	23,0	0,70	-	0,390	< 0,1
Gasolio	85-86	11-13	1-4	-	-	-	-
Metano	75	25	-	-	-	-	-

COMPOSIZIONE CHIMICA ED EMISSIONI

- $C + O \rightarrow CO_2 + \text{ENERGIA}$
 - $H + O \rightarrow H_2O + \text{ENERGIA}$
 - $O \rightarrow \text{comburente}$
 - $N + O \rightarrow NO_x$ (passa quasi interamente allo stato gassoso)
 - $S + O \rightarrow SO_x$ (la maggior parte rimane nelle ceneri, dal 40 al 90%)
 - $Cl + O \rightarrow HCl$, diossine, furani (la maggior parte rimane nelle ceneri, dal 40 al 95%. Tuttavia, se si combina con la condensa dei fumi, può corrodere caldaie e canne fumarie)
 - $K \rightarrow$ abbassa il punto di fusione delle ceneri ed è un elemento molto presente nel particolato
- } Insieme determinano il PCI

DENSITÀ: VOLUME

Metro cubo (m³)

Tronchi, legname da opera

Metro stero (ms)

Combustibili legnosi

Vuoto per pieno

Metro stero accatastato (msa)

Legna da ardere

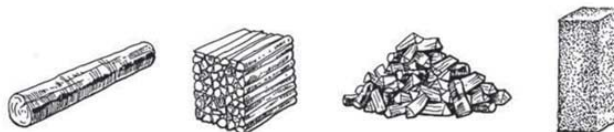
Metro stero riversato (msr)

Cippato

Il volume varia in funzione di forma e dimensione, perché dipende dalla disposizione dei singoli pezzi, fattori questi che modificano il rapporto tra volume pieno e volume vuoto ovvero il volume sterico.

Assortimento	Legno tondo	Spacconi	Legna spaccata corta		Cippato	
			accatastata	riversata	fino (G30)	medio (G50)
	m ³	msa	msa	msr	msr	msr
1 m ³ tondo	1	1,4	1,2	2,0	2,5	3,0
1 msa spacconi 1 m	0,7	1	0,8	1,4	(1,75)	(2,1)
1 msa legna spaccata corta	0,85	1,2	1	1,7		
1 msr legna spaccata corta	0,5	0,7	0,6	1		
1 msr cippato di bosco fino (G30)	0,4	(0,55)			1	1,2
1 msr cippato di bosco medio (G50)	0,33	(0,5)			0,8	1

Nota: una tonnellata di cippato G30 con M 35% corrisponde a circa 4 msr di cippato di abete rosso e a circa 3 msr di cippato di faggio.



1 m³ tondo ≈ 1,4 msa spacconi ≈ 2 msr legna ≈ 3 msr cippato (G50)

DENSITÀ STERICA

Unità di misura

tonnellata	chilogrammo	metro stero accatastato	metro stero riversato
t	kg	msa	msr
Legna da ardere Cippato Pellet e Briquettes		Legna da ardere	Cippato Legna da ardere

PESO SPECIFICO [adimensionale]

Rapporto tra il peso e il volume dell'acqua e quello delle sostanze legnose (a 4°C). Si riferisce al peso specifico delle sostanze legnose allo stato anidro pari a 1,5 indipendentemente dall'essenza legnosa.

MASSA VOLUMICA (Mv) [kg/m³]

Spesso indicata come «peso specifico apparente» è il rapporto tra il peso e il volume del corpo legnoso

MASSA VOLUMICA STERICA o DENSITÀ STERICA (Ms) [kg/ms]

È il rapporto tra il peso e il volume di un ammasso di combustibile legnoso (tipicamente cippato)

DENSITÀ STERICA: ESEMPI DI Mv

CONIFERE

Valori medi con contenuto idrico (M) 13%

SPECIE	kg/m ³	SPECIE	kg/m ³
Abete rosso	450	Cipresso	600
Abete bianco	470	Pino domestico	620
Pino cembro	500	Larice	660
Douglasia	510	Pino marittimo	680
Pino silvestre	550	Tasso	700
Pino nero	560	Pino d'aleppo	810

DENSITÀ STERICA: ESEMPI DI Mv

LATIFOGLIE

Valori medi con contenuto idrico (M) 13%

SPECIE	kg/m ³	SPECIE	kg/m ³
Salici	450	Bagolaro	720
Pioppo bianco	480	Frassino maggiore	720
Pioppo nero	500	Orniello	720
Ontano bianco	520	Maggiociondolo	730
Ontano napoletano	550	Acero campestre	740
Ontano nero	560	Faggio	750
Castagno	580	Rovere	760
Ciliegio	600	Robinia	760
Olmo	620	Farnia	770
Sambuco	620	Sorbi	770
Betulla	650	Carpino bianco	800
Tiglio	650	Carpino nero	820
Nocciolo	670	Cerro	900
Acero montano e riccio	670	Olivo	920
Platano	670	Leccio	940
Noce	700	Corniolo	980

DENSITÀ STERICA: ESEMPI DI Ms

Lsp = legna spaccata

Cip = cippato

Cont. idrico M %	Faggio			Quercia			Abete rosso			Pino		
	m ³	Lsp ms	Cip msr	m ³	Lsp ms	Cip msr	m ³	Lsp ms	Cip msr	m ³	Lsp ms	Cip msr
masse volumiche e steriche in kg*												
0	680	422	280	660	410	272	430	277	177	490	316	202
10	704	437	290	687	427	283	457	295	188	514	332	212
15	716	445	295	702	436	289	472	304	194	527	340	217
20	730	453	300	724	450	298	488	315	201	541	349	223
30	798	495	328	828	514	341	541	349	223	615	397	253
40	930	578	383	966	600	397	631	407	260	718	463	295
50	1117	694	454	1159	720	477	758	489	312	861	556	354

DENSITÀ STERICA: ESEMPI DI Ms

Combustibili legnosi	M %	specie	Massa sterica (kg/ms)
Legna da ardere (33 cm in catasta)	15	faggio	445
		abete	304
Cippato	30	faggio	328
		abete	223
Corteccia di conifere	15		180
Segatura			160
Trucioli di pialla			90
Pellet	8		620-650
Combustibili di origine agricola			
Balle parallelepipedo	15	miscanto	140
Triturato		miscanto	110
Granella		triticale	750

DETERMINAZIONE PRATICA DELLA Ms

DETERMINAZIONE DELLA MASSA STERICA DI UN CARICO DI CIPPATO PER CAMPIONAMENTO

1. Procurarsi un contenitore di volume noto (es. 13 litri) ed una bilancia
2. Prelevare un campione dal rimorchio (ad es. 3 secchi da un rimorchio di 30m3)
3. Riempire completamente il secchio senza compattare il cippato
4. Pesare i campioni
5. Dividere il valore medio (kg) per il volume noto (litri)



Esempio:

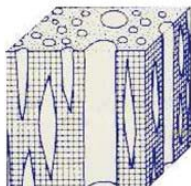
- Secchio n.1 = 3,21 kg
- Secchio n.2 = 3,24 kg
- Secchio n.3 = 3,27 kg
- $(3,21 \text{ kg} + 3,24 \text{ kg} + 3,27 \text{ kg}) / 3 = 3,24 \text{ kg/secchio (peso medio)}$
- $3,24 \text{ kg} / 13 \text{ litri} = 0,249 \text{ kg/litro}$
- $0,249 \text{ kg/litro} \times 1000 \text{ litri/msr} = 249 \text{ kg/msr}$

CONTENUTO IDRICO ED UMIDITÀ

IGROSCOPICO

Acqua Legata (o di saturazione)

- Acqua che è sempre presente in qualche modo nel reticolo fibroso del legno
- Sempre presente se non artificialmente essiccato (ai attesta intorno al 20% di U)



Microporosità (cellulosa, emicellulose, lignina). Il legno assorbe acqua fino al punto di saturazione delle fibre. Il punto di saturazione delle fibre è con $U = 30\%$

POROSO

Acqua Libera (o di imbibizione)

- Il volume delle cavità cellulari è sempre maggiori del volume occupato dalla parete
- La prima ad evaporare

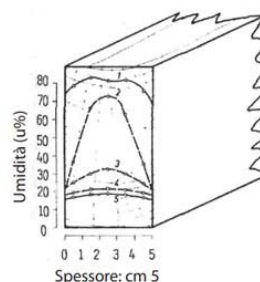


Macroporosità (vasi conduttori). Se il legno è immerso, gradualmente l'aria contenuta (e che lo fa galleggiare) è sostituita da acqua fino al punto di totale imbibizione

CONTENUTO IDRICO ED UMIDITÀ

**Variazione nel tempo,
in senso radiale,
dell'umidità (U)
in un tavola di faggio**

- LEGENDA
1. dopo 6 settimane
 2. dopo 6 mesi
 3. periodo intermedio 2-4
 4. dopo un anno
 5. dopo un anno e 6 mesi^[4]



Il legno non è MAI allo stato anidro.

Ha un contenuto idrico (M) variabile tra il 60 e il 15%. Dopo il taglio, la prima ad evaporare è l'acqua di imbibizione, dall'esterno all'interno del tronco in senso radiale. La perdita d'acqua avviene in modo non uniforme.

Nel legno stagionato l'acqua libera evapora completamente mentre quella di saturazione raggiunge un equilibrio dinamico con l'umidità dell'ambiente esterno, attestandosi a livelli intorno a $U \leq 20\%$.

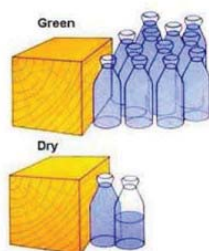
CONTENUTO IDRICO ED UMIDITÀ

CONTENUTO IDRICO $M = \left(\frac{\text{peso fresco} - \text{peso secco}}{\text{peso fresco}} \right) \times 100$

$M = \left(\frac{100 - 50}{100} \right) \times 100 = 50\%$

UMIDITÀ $U = \left(\frac{\text{peso fresco} - \text{peso secco}}{\text{peso secco}} \right) \times 100$

$u = \left(\frac{100 - 50}{50} \right) \times 100 = 100\%$



Equivalences between values of moisture content in dry basis and wet basis

M		U	
%WB	%DB	%DB	%WB
0	0,0	0	0,0
5	5,3	5	4,8
10	11,1	10	9,1
15	17,6	15	13,0
20	25,0	20	16,7
25	33,3	25	20,0
30	42,9	30	23,1
35	53,8	40	28,6
40	66,7	50	33,3
45	81,8	60	37,5
50	100,0	70	41,2
55	122,2	80	44,4
60	150,0	90	47,4
65	185,7	100	50,0

CONTENUTO IDRICO SIGNIFICA...

DIAMO I NUMERI...

CONTENUTO IDRICO

15.000 t pellet/anno

M10: 10 % → 1500 t

M6: 6 % → 900 t

Differenza 600 t

Differenza 120.000 €



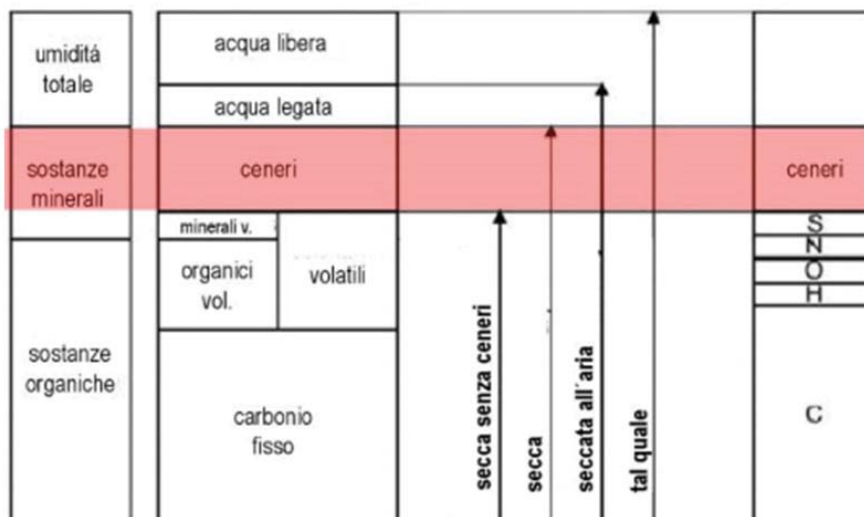
Pellet più secco a parità di volume:

- **maggior energia** conferita per carico
- **minori consumi** di trasporto per MWh
- **minori costi** di trasporto per MWh

Fonte: dott. Sgarbossa – TESAF Padova

CENERI

Cosa rimane dal processo di combustione?



CENERI

Cosa sono?

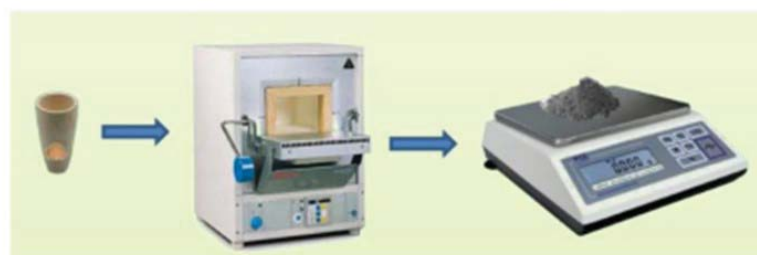
- cenere è il termine generico per descrivere la materia inorganica in un combustibile
- è il residuo solido che rimane al termine del processo di combustione e che deve essere gestito/smaltito
- nella biomassa, il contenuto di cenere può provenire:
 - dalla stessa biomassa, ad esempio materiali che la pianta ha assorbito dall'acqua o dal suolo durante la sua crescita
 - dalla catena di approvvigionamento, ad esempio terreno o materiali inerti raccolti insieme alla biomassa



CENERI

Come si misurano in laboratorio?

- Forno a muffola ($T_{\max}$ 1000/1800 °C)
- Piatto di materiale inerte
- Bilancia
- Standard UNI EN 14775:2010 (ossidazione a 550°C per 2-3 ore)



CENERI

Quante sono?

	PC ₉₀ MJ/kg	Ceneri (% ss)	Punto di fusione delle ceneri (°C)
Abete rosso (con corteccia)	18,8	0,6	1.426
Faggio (con corteccia)	18,4	0,5	1.340
Pioppo (SRC)	18,5	1,8	1.335
Salice (SRC)	18,4	2,0	1.283
Corteccia di conifere	19,2	3,8	1.440
Legno di vite (cippato)	19,8	3,4	1.450
Miscanto	17,6	3,9	973
Paglia di frumento	17,2	5,7	998
Granella di triticale	16,9	2,1	730
Panello di colza	21,2	6,2	-

CENERI

Quante sono?

- Il contenuto di ceneri della biomassa erbacea è superiore a quello della biomassa legnosa
 - ✓ Per il legno, il contenuto di ceneri in peso secco ha valori stimati inferiori a 1%
 - ✓ Vari tipi di biomassa erbacee hanno valori che variano da meno del 2% fino all'8-10% o addirittura fino al 25% nel caso della lolla di riso
- Nelle frazioni di rifiuti, il contenuto di ceneri può spesso arrivare al 30-50% ed è raramente intorno al 10%

Contenuto di ceneri per le varie biomasse [w/w (d.b.)]	
Biomassa	Contenuto di cenere
Corteccia	5-8
Trucioli di legno senza corteccia	1-2.5
Trucioli di legno con corteccia	0.8-1.4
Segatura	0.5-1.1
Pino	1.3
Aghi di pino	1.5
Pioppo	0.7
Faggio	0.8
Paglia	8.9
Cereali	5.9
Miscanto	2-8
Lolla di riso	20.6
Bagassa	11.3

CENERI

Di cosa sono fatte?

Elementi principali: Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na e Ti

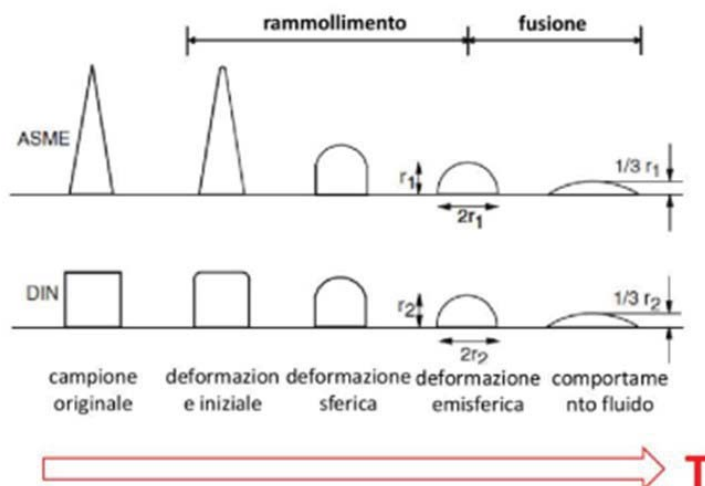
Nessun problema ambientale significativo è associato con questi elementi, tuttavia essi hanno un impatto notevole sul comportamento della fusione delle ceneri, sull'incrostazione e sulla corrosione

Alte concentrazioni di alcuni elementi possono indicare contaminazione del combustibile con terra o sabbia

Parametri	u.m.	ceneri di cortecchia	ceneri di cippato	ceneri di segatura	ceneri di paglia
pH	CaCl ₂	12,7	12,8	12,5	11,2
C _{org}		0,8	1,3	5,9	5,2
CO ₂		4	7,2	12,5	1
P ₂ O ₅		1,7	3,6	2,5	2,7
K ₂ O		5,1	6,7	7,1	11,5
CaO		42,2	44,7	35,5	7,4
MgO		6,5	4,8	5,7	3,8
Na ₂ O		0,8	0,6	0,5	0,3
Al ₂ O ₃		7,1	4,6	2,3	1,2
SiO ₂		26,0	25,0	25,0	54,0
SO ₃		0,6	1,9	2,4	1,2
Fe ₂ O ₃		3,5	2,3	3,7	1
MnO		1,5	1,7	2,6	0,1
Cu		87,8	126,8	177,8	23,2
Zn		618,6	375,7	1429,8	234,6
Co		23,9	15,3	16,7	1,5
Mo		4,8	1,7	3,4	7,1
As		11,4	8,2	7,8	5,4
Ni		94,1	61,5	71,9	3,9
Cr		132,6	54,1	137,2	12,3
Pb		25,3	25,4	35,6	7,7
Cd		3,9	4,8	16,8	0,7
V		58,4	42,0	26,7	5,5

CENERI

Come si comportano (stato fisico all'interno della caldaia)?



CENERI

Come si comportano (stato fisico all'interno della caldaia)?

Esempi di ceneri fuse «slagging»



Combustore di biomasse erbacee



Combustore di legno di scarto

CENERI

Come si comportano (stato fisico all'interno della caldaia)?

Ceneri fuse «slagging»

Depositi che si formano sulle pareti della caldaia esposte principalmente a calore radiante, come le pareti del forno.

Questi depositi (slagging) sono formati da particelle di ceneri fuse o semi-fuse che si attaccano alle pareti calde del forno.

Esse non si formano immediatamente al momento dell'accensione della caldaia ma si accumulano lentamente dopo che un primo strato si è formato sulle pareti

CENERI

Come si comportano (stato fisico all'interno della caldaia)?

**Esempi di ceneri volanti
«fouling»**



CENERI

Come si comportano (stato fisico all'interno della caldaia)?

**Esempi di ceneri volanti
«fouling»**

Depositi che si formano nei passaggi convettivi, ad esempio nei tubi dello scambiatore di calore.

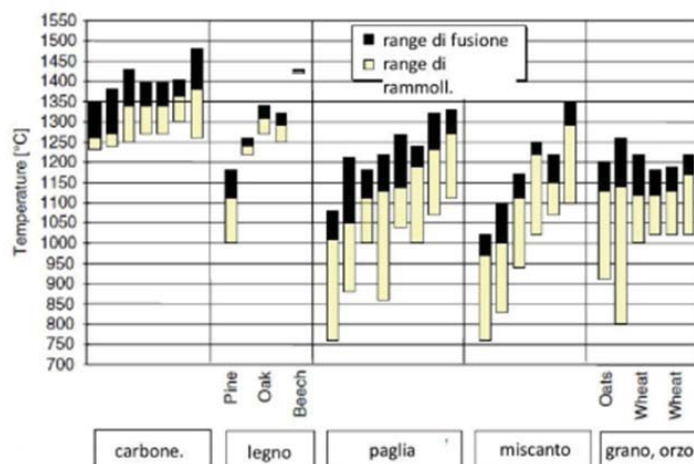
Questi depositi (fouling) sono formati da vapori inorganici che si condensano sulle superfici relativamente più fredde dei tubi dello scambiatore di calore.

Determinano un peggioramento delle proprietà di scambio termico (trasmissione).

CENERI

Come si comportano (stato fisico all'interno della caldaia)?

Diverse ceneri...diversi punti di fusione



CENERI

Come si comportano (stato fisico all'interno della caldaia)?

L'uso di biocombustibili con basse temperature di fusione delle ceneri, aumenta il rischio di formazione di scorie di fusione sulla griglia.

Le scorie di fusione disturbano il processo di combustione alterando i flussi di aria primaria e favorendo il surriscaldamento della griglia ed i fenomeni corrosivi.

Il legno e la corteccia hanno un punto di fusione relativamente elevato (1300-1400°C) mentre nelle erbacee è inferiore ai 1000°C. Nel caso dei cereali (granella) il punto di fusione è inferiore ai 750°C, risultando così particolarmente critico.

Per i motivi sopra elencati, i biocombustibili agricoli sono particolarmente critici e devono essere impiegati solo in specifici apparecchi di combustione.

CENERI

Come gestirle

Ceneri pesanti o sottogriglia
Frazione più consistente da sotto la griglia
Massa volumica 1,3 t/m³



Ceneri leggere o volanti
Frazione minoritaria da pulizia dei fumi
Massa volumica 0,8-0,9 t/m³



CENERI

Come gestirle

Disciplinate dalla parte IV del D.Lgs. N.152/2006.

Classificate come «rifiuti speciali non pericolosi» nella categoria rifiuti inorganici provenienti da processi termici.

Il codice CER [10.00.00] è distinto in:

- ceneri pesanti [10.01.01]
- ceneri leggere [10.01.03]

Solo ceneri di legna non trattata con vernici o prodotti chimici in generale.

L'attuale orientamento normativo dei rifiuti prevede, laddove possibile, il recupero di materia ed energia ed impone il conferimento solo come ultima scelta.

Classificare la cenere come «sottoprodotto»

CENERI

Come gestirle se «sottoprodotti»

Disciplinata da All. 1 e s.m.i. introdotte dal D.M. 186/2006:

1. Produzione di conglomerati cementizi, utilizzo in cementifici o industria laterizi
2. Produzione di compost
3. Produzione di fertilizzanti (conformi alla L. 748/1984)
4. Recupero ambientali con test di cessione del rifiuto
5. Produzione di concimi e ammendanti per l'agricoltura biologica se cenere di legno vergine (D.Lgs. 220/95 che ha recepito il Reg. CEE/2092/91)

CENERI

Come gestirle: uso agronomico

L'uso agronomico delle ceneri è strettamente collegato alla loro composizione chimica ed alle analisi a cui è tenuto chi ne fa questo utilizzo.

Valori espressi in mg/kg ss	ceneri sottogiglia	ceneri fini dal ciclone	ceneri fini dal condensatore	limite di legge*
Cu	164,6	143,1	389,2	250
Zn	432,5	1.870,4	12.980,7	1.500
Co	21	19	17,5	100
Mo	2,8	4,2	13,2	20
As	4,1	6,7	37,4	20
Ni	66	59,6	63,4	100
Cr	325,5	158,4	231,3	250
Pb	13,6	57,6	1 053,3	100
Cd	1,2	21,6	80,7	8
V	43	40,5	23,6	100
Hg	0,01	0,04	1,47	--

FONTE: Ministero Austriaco per agricoltura, foreste, acqua ed ambiente: risultati delle analisi condotte su campioni di cenere di 20 impianti

CONTENUTO DI CENERI SIGNIFICA...

CENERI

4 t pellet/anno

3 % → 120 kg

0.3% → 12 kg

Differenza 108 kg

Pellet più «puro» a parità di volume:

- **maggior energia** conferita per carico
- **minori costi** di smaltimento ceneri
- **minori costi** di manutenzione
- **minori costi** per MWh



Fonte: dott. Sgarbossa – TESAF Padova

POTERE CALORIFICO

Il **potere calorifico (Q)** di un combustibile esprime **la quantità di energia** che può essere ricavata dalla **combustione completa** di un'**unità di peso o di volume**.

Il contenuto idrico (M) delle biomasse legnose modifica – **riducendolo** – il potere calorifico.

Parte dell'energia liberata nel processo di combustione è infatti spesa per l'evaporazione dell'acqua che consuma $2,44 \text{ MJ/kg}_{\text{H}_2\text{O}}$

Nel sistema internazionale (S.I.) si misura in Joule (J) o Watt (W) e loro multipli.

Le unità di misura più comunemente impiegate sono:

- MJ/kg
- MJ/ms
- kWh/kg
- kWh/ms
- MWh/t



NOTA BENE: le calorie (cal) non fanno più parte del S.I. di misura

UNITA DI MISURA ED EQUIVALENZE

	kJ	kcal[°]	kWh	tep
1 kJ	1	0,239	$0,278 \times 10^{-3}$	$23,88 \times 10^{-9}$
1 kcal [°]	4,1868	1	$1,163 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-6}$
1 kWh	3.600	860	1	86×10^{-6}
1 tep	$41,87 \times 10^6$	10×10^6	$11,63 \times 10^3$	1

**Equivalenze tra unità di misura
di energia termica**

1 kWh	= 860 kcal	= 3.600 kJ (3,6 MJ)
1 MJ	= 239 kcal	= 0,278 kWh
1 kcal	= 4,19 kJ	= 0,00116 kWh
1 tep	= 41,87 GJ	= 11,63 MWh

Conversioni più comuni

1 Joule =	1 Newton x 1 metro =	1 Watt x secondo (Ws)
-----------	----------------------	-----------------------

Unità di misura dell'energia

	kWh	MWh	GWh	TWh	TJ	PJ	tep
1 kWh	1	1×10^{-3}	1×10^{-6}	1×10^{-9}	$3,6 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-9}$	86×10^{-6}
1 MWh	1×10^3	1	1×10^{-3}	1×10^{-6}	$3,6 \times 10^{-3}$	$3,6 \times 10^{-6}$	86×10^{-3}
1 GWh	1×10^6	1×10^3	1	1×10^{-3}	3,6	$3,6 \times 10^{-3}$	86
1 TWh	1×10^9	1×10^6	1×10^3	1	$3,6 \times 10^3$	3,6	86×10^3
1 TJ	278×10^3	278	278×10^{-3}	278×10^{-6}	1	1×10^{-3}	23,9
1 PJ	278×10^6	278×10^3	278	278×10^{-3}	1×10^3	1	$23,9 \times 10^3$
1 tep	$11,6 \times 10^3$	11,6	$11,6 \times 10^{-3}$	$11,6 \times 10^{-6}$	$41,87 \times 10^{-3}$	$41,87 \times 10^{-6}$	1

**Corrispondenze tra quantità
usuali di energia termica**

POTERE CALORIFICO

**Il di fondamentale importanza specificare a quale unità di peso o di volume si
rapporta il potere calorifico.**

al PESO	al VOLUME	alla DENSITA' STERICA
kg	m³	mst
J/kg – Wh/kg – cal/kg	J/m ³ – Wh/m ³ – kcal/m ³	J/mst – Wh/mst – cal/mst
es:		
LEGNA DA ARDERE	LEGNAME TONDO	CIPPATO

Fonte: Grigolato, Hellrigl, 2004

POTERE CALORIFICO

Potere calorifico superiore (PCS)

Tutta l'acqua al termine della reazione si trova allo stato liquido

Nel prodotto della combustione si considera come calore anche quello recuperato dalla condensazione del vapore acqueo nei fumi (calore latente di vaporizzazione dell'acqua contenuta nel legno bruciato)

Potere calorifico inferiore (PCI)

Tutta l'acqua al termine della reazione si trova allo stato gassoso (vapore)

Nel prodotto della combustione non si considera il calore perso col vapore acqueo nei fumi (calore latente di vaporizzazione dell'acqua contenuta nel legno bruciato)

Se non specificato, per «poter calorifico» si intende il potere calorifico inferiore.

POTERE CALORIFICO

DIFFERENZA TRA PCS E PCI

Includo o meno l'energia che potrebbe essere ottenuta dalla condensazione del vapore acqueo presente nei prodotti della combustione → raffreddamento dei fumi fino a temperature inferiori ai 100°C, come avviene nelle caldaie dette appunto «a condensazione»

Nella gran parte dei processi tecnologici non è opportuno scendere troppo in basso con la temperatura dei fumi, perché:

- scarsa diffusione dei fumi in atmosfera
- formazione di condensa corrosiva se nei fumi sono presenti H_2SO_4 o HCl

Ecco perché si fa usualmente riferimento al potere calorifico inferiore (PCI) e perché oggi certe caldaie hanno rendimenti del 113% (apparentemente in contrasto con le leggi fondamentali della termodinamica).

POTERE CALORIFICO

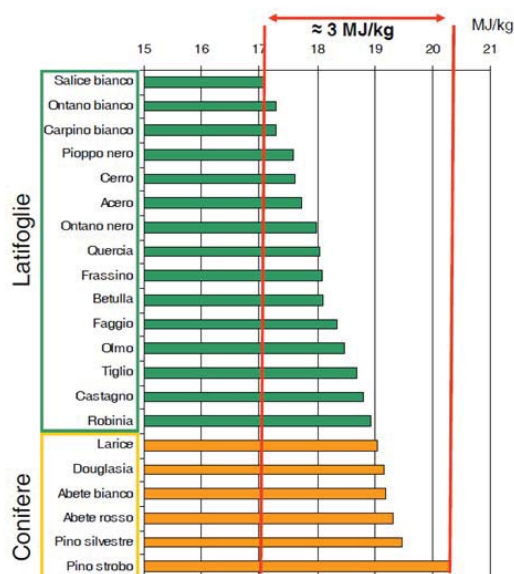
STIMA DEL PCI

Il potere calorifico anidro (pc_0) del legno nelle diverse specie varia molto poco, tra 18,5 e 19 MJ/kg, ovvero il PCI riferito all'unità di massa è praticamente costante.

ATTENZIONE PERÒ

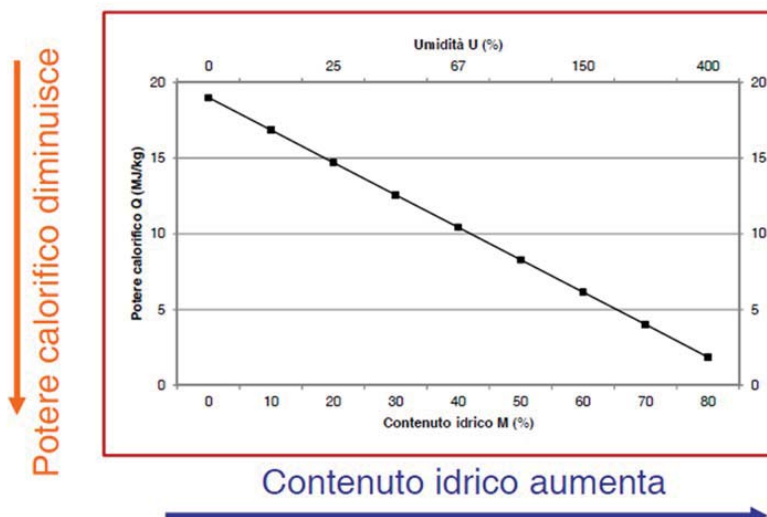
Le essenze legnose hanno masse volumiche diverse

Composto	Potere Calorifico (MJ/kg)
Lignina	26
Cellulosa	18
Resine	35
Lipidi	varo
Cere	varo
Gomme	varo



POTERE CALORIFICO

IL POTERE CALORIFICO DIPENDE DAL CONTENUTO IDRICO



POTERE CALORIFICO

FORMULA PER IL CALCOLO DEL PCI DEL LEGNO, DATO IL CONTENUTO IDRICO

$$pc_M = \frac{pc_0 \times (100 - M) - 2,44 \times M}{100}$$

CON

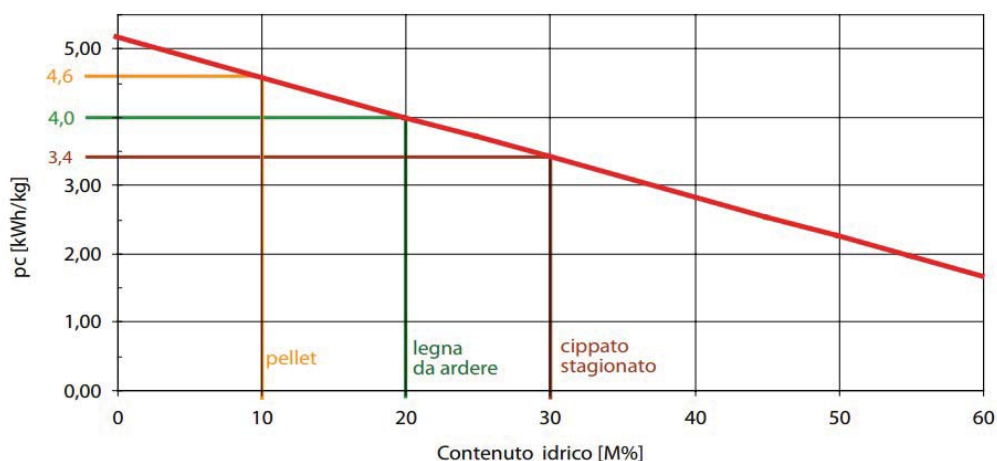
pc_M = potere calorifico del legno con contenuto idrico M

pc_0 = potere calorifico del legno anidro (18,5 MJ/kg)

M = contenuto idrico del legno

POTERE CALORIFICO

Variazione del pc in funzione di M
(con $pc_0 = 5,14 \text{ kWh/kg} = 18,5 \text{ MJ/kg}$)



POTERE CALORIFICO

Variazione del pc in
funzione di M
($pc_0 = 5,14 \text{ kWh/kg} =$
 $18,5 \text{ MJ/kg}$)

M (%)	MWh/t	GJ/t
15	4,27	15,36
16	4,21	15,15
17	4,15	14,94
18	4,10	14,73
19	4,04	14,52
20	3,98	14,31
21	3,92	14,10
22	3,86	13,89
23	3,80	13,68
24	3,75	13,47
25	3,69	13,27
26	3,63	13,06
27	3,57	12,85
28	3,51	12,64
29	3,45	12,43
30	3,40	12,22
31	3,34	12,01
32	3,28	11,80
33	3,22	11,59
34	3,16	11,38
35	3,11	11,17
36	3,05	10,96
37	2,99	10,75

M (%)	MWh/t	GJ/t
38	2,93	10,54
39	2,87	10,33
40	2,81	10,12
41	2,76	9,91
42	2,70	9,71
43	2,64	9,50
44	2,58	9,29
45	2,52	9,08
46	2,47	8,87
47	2,41	8,66
48	2,35	8,45
49	2,29	8,24
50	2,23	8,03
51	2,17	7,82
52	2,12	7,61
53	2,06	7,40
54	2,00	7,19
55	1,94	6,98
56	1,88	6,77
57	1,82	6,56
58	1,77	6,35
59	1,71	6,15
60	1,65	5,94

POTERE CALORIFICO

Nella pratica si utilizzano i seguenti valori medi per i combustibili legnosi

$pc_0 = 18,5 \text{ MJ/kg} = 5,14 \text{ kWh/kg}$	LEGNO ANIDRO	(M 0%)
$pc_{10} = 16,9 \text{ MJ/kg} = 4,6 \text{ kWh/kg}$	PELLET	(M 10%)
$pc_{20} = 14,4 \text{ MJ/kg} = 4 \text{ kWh/kg}$	LEGNA DA ARDERE	(M 20%)
$pc_{30} = 12,2 \text{ MJ/kg} = 3,4 \text{ kWh/kg}$	CIPPATO	(M 30%)

Esempi di conversione MJ-kWh

$$18,5 \text{ MJ} : 3,6 = 5,14 \text{ kWh}$$

$$4 \text{ kWh} \times 3,6 = 14,4 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ kWh/kg} = 1 \text{ MWh/t}$$

DENSITÀ ENERGETICA STERICA

Esprime il rapporto tra il contenuto energetico del combustibile e il volume sterico che occupa. Si esprime in **MJ/ms** o **kWh/ms**.

Combustibile	Quantità	Contenuto idrico	Massa	Potere calorifico	Densità energetica *		
		M%	kg	MJ/kg	MJ	kWh	litri di gasolio
Legna accatastata							
Faggio 33 cm	1 msa	15	445	15,3	6.797	1.888	189
Faggio 33 cm	1 msa	30	495	12,1	6.018	1.672	167
Abete r. 33 cm	1 msa	15	304	15,6	4.753	1.320	132
Abete r. 33 cm	1 msa	30	349	12,4	4.339	1.205	121
Cippato							
Faggio	1 msr	15	295	15,3	4.505	1.251	125
Faggio	1 msr	30	328	12,1	3.987	1.107	111
Abete r.	1 msr	15	194	15,6	3.032	842	84
Abete r.	1 msr	30	223	12,4	2.768	769	77
Pellet di legno	1 msr	8	650	17,1	11.115	3.088	309

ESERCIZIO n°1

Il cippato che serve ad alimentare una centrale termica è conferito tramite autocarri che trasportano 30 metri cubi per carico.

La tara dell'autocarro è pari a 8.000 kg.

All'atto della pesa risultano 14.750 kg.

1. Qual è la densità sterica del cippato?
2. Se il cippato è di abete rosso qual è il contenuto idrico indicativo del cippato?
3. Qual è la densità energetica del cippato conferito (in MWh ed in MJ)?

ESERCIZIO n°1

Tabelle di riferimento per i calcoli

Contenuto idrico per massa

Energia per contenuto idrico

Combustibile	Quantità	Contenuto idrico	Massa
		M%	kg
Legna accatastata			
Faggio 33 cm	1 msa	15	445
Faggio 33 cm	1 msa	30	495
Abete r. 33 cm	1 msa	15	304
Abete r. 33 cm	1 msa	30	349
Cippato			
Faggio	1 msr	15	295
Faggio	1 msr	30	328
Abete r.	1 msr	15	194
Abete r.	1 msr	30	223

M (%)	MWh/t	GJ/t
15	4,27	15,36
16	4,21	15,15
17	4,15	14,94
18	4,10	14,73
19	4,04	14,52
20	3,98	14,31
21	3,92	14,10
22	3,86	13,89
23	3,80	13,68
24	3,75	13,47
25	3,69	13,27
26	3,63	13,06
27	3,57	12,85
28	3,51	12,64
29	3,45	12,43
30	3,40	12,22
31	3,34	12,01
32	3,28	11,80
33	3,22	11,59
34	3,16	11,38
35	3,11	11,17
36	3,05	10,96
37	2,99	10,75

M (%)	MWh/t	GJ/t
38	2,93	10,54
39	2,87	10,33
40	2,81	10,12
41	2,76	9,91
42	2,70	9,71
43	2,64	9,50
44	2,58	9,29
45	2,52	9,08
46	2,47	8,87
47	2,41	8,66
48	2,35	8,45
49	2,29	8,24
50	2,23	8,03
51	2,17	7,82
52	2,12	7,61
53	2,06	7,40
54	2,00	7,19
55	1,94	6,98
56	1,88	6,77
57	1,82	6,56
58	1,77	6,35
59	1,71	6,15
60	1,65	5,94

ESERCIZIO n°2

Calcolare il potere calorifico del pellet di faggio (in kWh/kg) partendo dalla seguente formula:

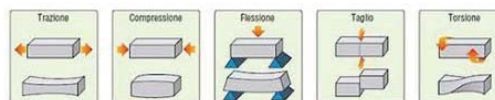
$$pc_M = \frac{pc_0 \times (100 - M) - 2,44 \times M}{100}$$

RESISTENZA MECCANICA

La resistenza meccanica è il massimo sforzo (o tensione di rottura) che un generico materiale, sotto forma di provino, è in grado di sopportare prima che sopraggiunga la sua rottura.

La resistenza meccanica ai vari tipi di sollecitazione può essere misurata con prove specifiche di compressione, trazione, flessione, taglio e torsione sul provino, che permettono di caratterizzare rispettivamente la resistenza a compressione, resistenza a trazione, ecc.

Unità di misura: Pa (sforzo = pressione)



IMPORTANZA

Caratterizza l'energia necessaria per le operazioni di taglio, cippatura, sminuzzatura di un combustibile, nell'ambito dei pretrattamenti.

PRETRATTAMENTI

Attraverso il **pretrattamento** si prepara la biomassa all'utilizzo in impianti di conversione energetica che richiedono specifiche caratteristiche fisiche, quali un determinato contenuto idrico o una precisa pezzatura.

MECCANICI

- Macinatura
- Cippatura
- Densificazione

TERMICI

- Essiccazione
- Torrefazione
- Pirolisi

Tipo di caldaia	Classe di potenza kWt	Griglia	Sistema di alimentazione	Pezzatura (P)	Contenuto idrico (M)	Ceneri (A)
Manuale a legna	< 100	fissa	manuale	P330-1000	M20	-
	< 150	fissa	coclea	P16-45	M20-M30	A1,5
Automatica a cippato	(30)150-1000	fissa/semimobile	coclea	P16-45	M20-M40	A1,5-3,0
	>1000	mobile	spintore	P16-100	M30-M55	A3,0-10,0

Quadro indicativo delle caratteristiche richieste dai generatori termici a legna e cippato

PRETRATTAMENTI MECCANICI

CIPPATURA



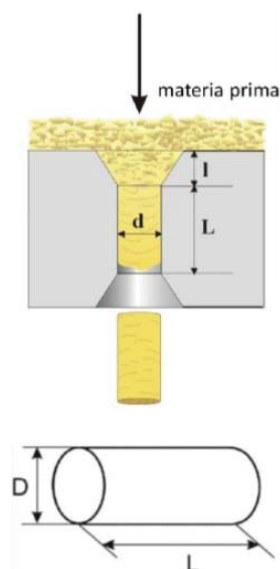
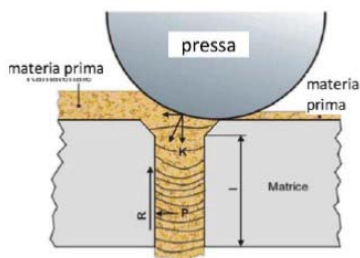
Origine e provenienza	Biomassa legnosa non contaminata (1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, 1.1.4, 1.1.6, 1.2.1.1, 1.2.1.2, 1.2.1.4)		
Tipologia commerciale	LEGNO CIPPATO 		
Dimensioni o Pezzatura			
	Frazione principale >80% (massa)	Frazione fine <5%	Frazione grossa <1%
P 16	3,15 mm ≤ P ≤ 16 mm	< 1 mm	> 45 mm, tutto < 85 mm
P 45	3,15 mm ≤ P ≤ 45 mm	< 1 mm	> 63 mm
P 63	3,15 mm ≤ P ≤ 63 mm	< 1 mm	> 100 mm
P 100	3,15 mm ≤ P ≤ 100 mm	< 1 mm	> 200 mm
Contenuto idrico (M)			
M20	≤ 20% essiccato		
M30	≤ 30% stagionato all'aria e adatto ad essere stoccato nel silo		
M40	≤ 40% non stagionato e non adatto ad essere stoccato nel silo		
M55	≤ 55%		
M65	≤ 65%		
Contenuto di cenere (%ss)			
A0.7	≤ 0,7%		
A1.5	≤ 1,5%		
A3.0	≤ 3,0%		
A6.0	≤ 6,0%		
A10	< 10,0%		

PRETRATTAMENTI MECCANICI

DENSIFICAZIONE (pellettizzazione)

FASI

1. Essiccazione (togliere acqua)
2. Pulitura (rimuovere pezzi di metallo)
3. Macinazione (omogeneizzare)
4. Pressatura (densificare)



PRETRATTAMENTI TERMICI

ESSICAZIONE

Ridurre il contenuto idrico della biomassa legnosa:

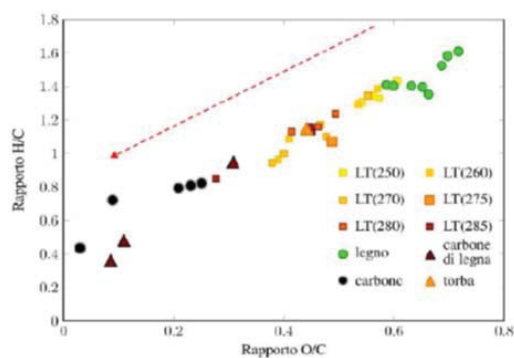
- **pellet $\approx 10\%$**
- **cippato $\approx 20\%$**
- **ciocchi di legna $\approx 30\%$**



PRETRATTAMENTI TERMICI

TORREFAZIONE

Processo di riscaldamento a bassa temperatura (fino a 200-300°C)



PRETRATTAMENTI TERMICI

TORREFAZIONE

Se condotta in assenza (con poco) ossidante, migliora le caratteristiche del combustibile:

- **aumenta il potere calorifico**



faggio



Faggio
torrefatto
a 240°C



Faggio
torrefatto
a 270°C

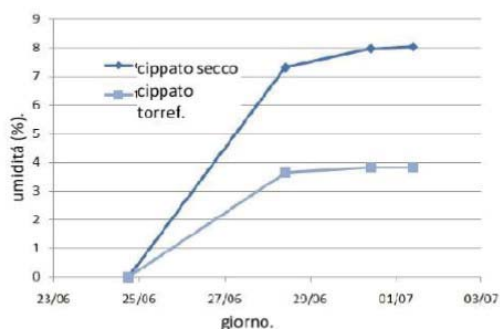
PCI [kJ/kg]	17.782	19.532	20.472
Incremento [%]	-	9,84	16,65

PRETRATTAMENTI TERMICI

TORREFAZIONE

Se condotta in assenza (con poco) ossidante, migliora le caratteristiche del combustibile:

- **diminuisce il contenuto idrico e l'igroscopicità**



PRETRATTAMENTI TERMICI: UN ESEMPIO



EQUIVALENZE ENERGETICHE

Combustibile	Potere calorifico (valori medi)	
	MJ	kWh
Gasolio extraleggero	36,17 MJ/l (42,5 MJ/kg)	10 kWh/l (11,80 kWh/kg)
Gasolio leggero	38,60 MJ/l (41,5 MJ/kg)	10,70 kWh/l (11,50 kWh/kg)
Metano*	36,00 MJ/m ³	10,00 kWh/m ³
GPL**	24,55 MJ/l (46,30 MJ/kg)	6,82 kWh/l (12,87 kWh/kg)
Carbone	27,60 MJ/kg	7,67 kWh/kg
Coke 40/60	29,50 MJ/kg	8,20 kWh/kg
Lignite (briquettes)	20,20 MJ/kg	5,60 kWh/kg
1 kWh elettrico	3,60 MJ	1 kWh
1 kg di legno (M = 20%)	14,40 MJ/kg	4,00 kWh/kg

* 1 kg = 5,8 l (20 °C, 216 bar)

** 1 m³ GPL = 4 l = 2 kg

1 kg gasolio ≈ 3 kg di legno

1 l gasolio ≈ 2,5 kg di legno

CONCLUSIONI

Quando si acquista o ci si approvvigiona di biomassa legnosa occorre considerare:

- **Tipo di conversione energetica a cui verrà destinata**
- **Contenuto idrico (M)**
- **Potere calorifico (Q)**
- **Densità energetica (MJ/kg o kWh/kg)**
- **Massa sterica (kg/m³)**
- **Dimensioni e geometria**
- **Modalità di conferimento (quantità e frequenza)**
- **Capacità di stoccaggio**
- **Modalità di stoccaggio (all'aperto o al chiuso)**
- **Tipologia e quantità di ceneri**

ESERCIZIO n°3

Calcolare il fabbisogno annuale di una caldaia alimentata a pellet partendo dai consumi di gasolio precedenti.

1. Consumo di gasolio anno 1: 3.500 litri
2. Consumo di gasolio anno 2: 3.900 litri
3. Consumo di gasolio anno 3: 3.400 litri

Rendimento medio impianto esistente = 80%

Zona climatica F → 1800 h/a di riscaldamento

Ipotizziamo, per semplicità di calcolo, di lavorare a pieno regime per tutte le ore di funzionamento dell'impianto (condizione non reale).

Infine stimare anche la potenza (Q) del generatore a pellet.

ESERCIZIO n°4

Calcolare la densità energetica (kWh/ms) dei seguenti biocombustibili:

1. legna di faggio in ciocchi (33cm) $M_s = 445 \text{ kg/ms}$
2. cippato di abete bianco $M_s = 223 \text{ kg/ms}$
3. pellet di faggio $M_s = 650 \text{ kg/ms}$

PARTE 4

MODULO 1

MATERIE PRIME E TECNOLOGIE

Pordenone, 17 settembre 2020

Filiera produttiva della biomassa e percorsi di trasformazione (tracciabilità e certificazione)

Matteo Mazzolini

APE FVG - Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia

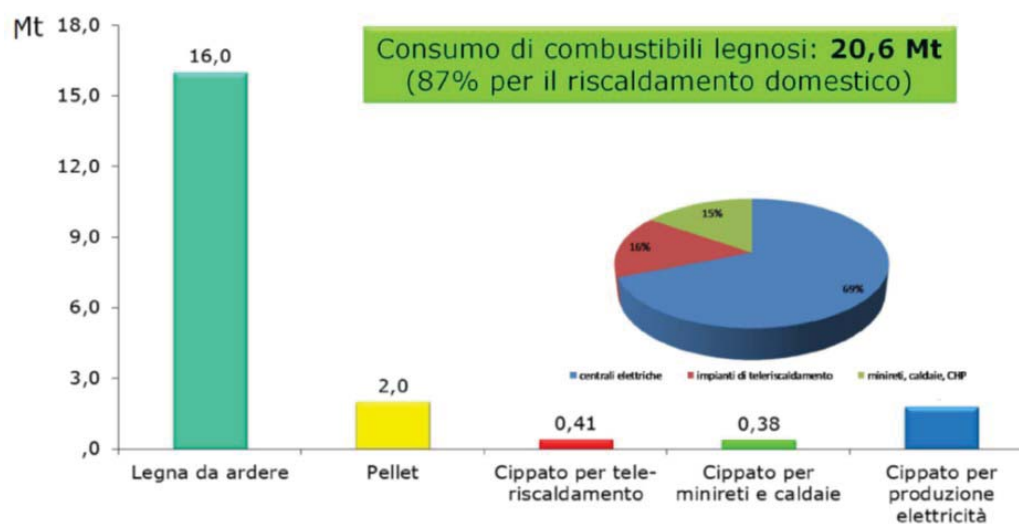
BIOMASSE LEGNOSE: CONSUMI IN ITALIA

Anno di riferimento	Valori stimati (Mt)	Consumi medi per famiglia (t/anno)	Fonte	Note
1997	21,6	3,27	ENEA-CIRM in Gerardi et al. (1998)	Consumi residenziali. Campione di 1.727 famiglie utilizzatrici
1999	14,7	3,07	ENEA-ATESIA in Gerardi e Petrella (2001)	Consumi residenziali. Campione di 6.000 famiglie
2006	19,1	4,3	ARPA Lombardia-APAT in Caserini et al. (2007)	Consumi residenziali. Campione di 5.000 famiglie
2013	24,0	n.d.	AIEL (Baù, 2014)	Stime sui consumi energetici totali (residenziali e industriali) di legna e cippato*
2013	17,7	3,2	ISTAT (2014)	Consumi residenziali. Campione di 20.000 famiglie
2013	1,9	3,3	ARPAV Veneto (2015)	Consumi residenziali. Campione di 10.000 famiglie

(*): stime sui consumi dell'Associazione Italiana Energie Agroforestali (AIEL) basate sulle vendite e la diffusione degli apparecchi domestici ed i grandi impianti civili ed industriali presenti sul territorio nazionale (Baù, 2014): 19,3 M t di legna da ardere, 4,7 M t di cippato e 3,3 M t di pellet.

FONTE: Davide Pettenella, Nicola Andrighetto, Stefano Campeotto, Agriforenergy n°1, Feb 2018

BIOMASSE LEGNOSE: CONSUMI IN ITALIA



FONTE: AIEL, 2012

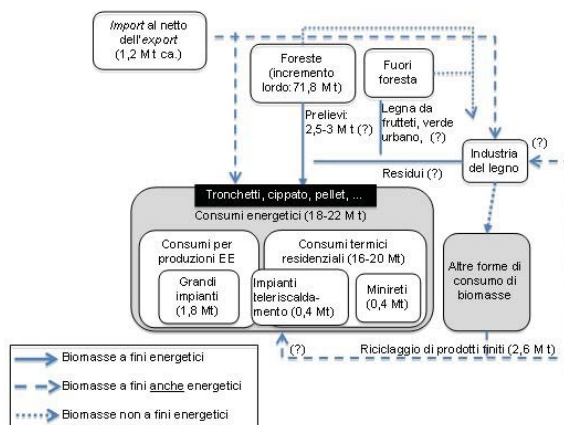
LEGNO NEL BILANCIO ENERGETICO ITALIA

Anno di riferimento		Legna (kt)	Biomasse per elettricità (kt)	Biodiesel (kt)	Totale (kt)
2012	Produzione	10.153	10.552	287	20.992
	Import-export+variaz.scorte	4.328	0	1.142	5.425
	Consumo interno	14.471	10.552	1.429	26.452
2013	Produzione	21.254	14.135	459	35.848
	Import-export+variaz.scorte	5.498	0	876	6.374
	Consumo interno	26.752	14.135	1.335	42.222

Fonte: Ministero dello Sviluppo Economico (vd. <http://dgerm.sviluppoeconomico.gov.it/dgerm/ben.asp>).

LEGNO NEL BILANCIO ENERGETICO ITALIA

Schema di sintesi i flussi di biomasse legnose (valori orientativi medi annui per il periodo 2005-09)



FONTE: Davide Pettenella e Nicola Andrighetto (UNIPD), Agriregionieuropa n°24, Mar 2011

LEGNO NEL BILANCIO ENERGETICO ITALIA

Le stime dicono che le fonti non coprono neanche metà dei consumi...

Il quadro conoscitivo è verosimilmente incompleto (non è nota, ad esempio, la quantità di scarti delle lavorazioni industriali impiegate a fini energetici), non dettagliato (ad esempio non è nota la quota parte dell'importazione di cippato e residui utilizzati nella filiera energetica), e riferito non ad un anno specifico ma genericamente ai dati medi annuali del periodo 2005-09.

Dai dati ISTAT sembra esserci un significativo gap tra l'offerta interna e il consumo di biomasse legnose in Italia.

Le biomasse legnose in Italia più che uno "sleeping giant" potrebbero quindi essere definite come un "hidden giant". Evidentemente, per una corretta programmazione energetica, questo "gigante nascosto" dovrebbe essere meglio definito e monitorato.

FONTE: Davide Pettenella e Nicola Andrighetto (UNIPD), Agriregionieuropa n°24, Mar 2011

LEGNO NEL BILANCIO ENERGETICO ITALIA

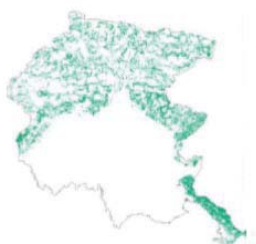
Anche ipotizzando che tutto il materiale disponibile venga utilizzato a fini energetici, escludendo cioè possibili impieghi alternativi ad uso industriale, la somma delle possibili fonti di biomassa legnosa non copre nemmeno il 50% dei consumi domestici rilevati da ISTAT.

Si suppone che il settore legno-energia italiano sia caratterizzato da un'articolata economia informale legata ad utilizzazioni su piccola scala e realizzate da operatori privati che sfuggono alle rilevazioni delle statistiche ufficiali, causando un forte sottostima dei dati ufficiali.

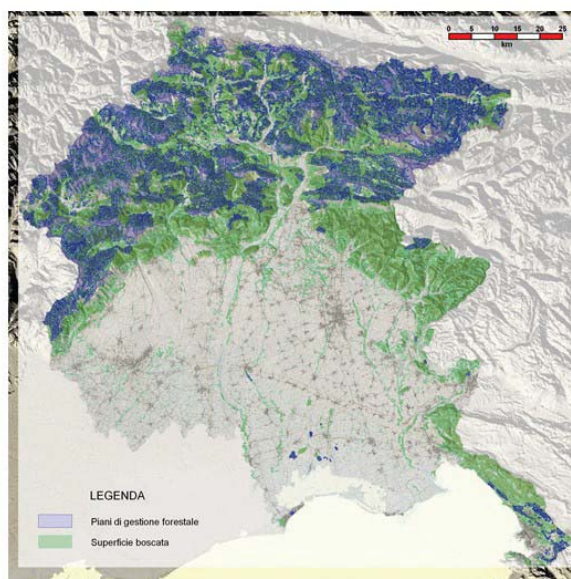
All'interno del settore legno-energia italiano alcune risorse, come i residui industriali e i prelievi fuori foresta, giocano verosimilmente un ruolo importante, finora non correttamente individuato e stimato, nel soddisfare la domanda di biocombustibili legnosi.

FONTE: Davide Pettenella e Nicola Andrighetto (UNIPD), Agriregionieuropa n°24, Mar 2011

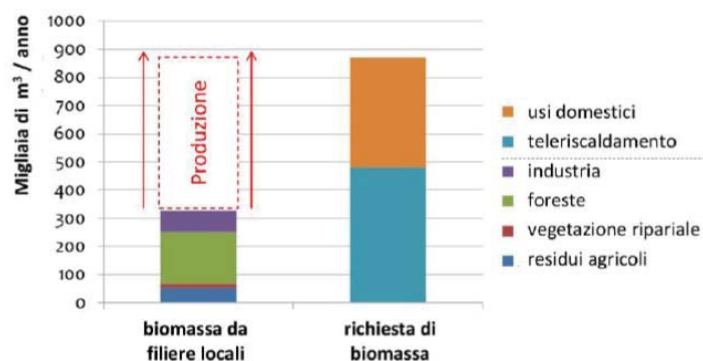
BIOMASSE LEGNOSE: PRODUZIONE IN FVG



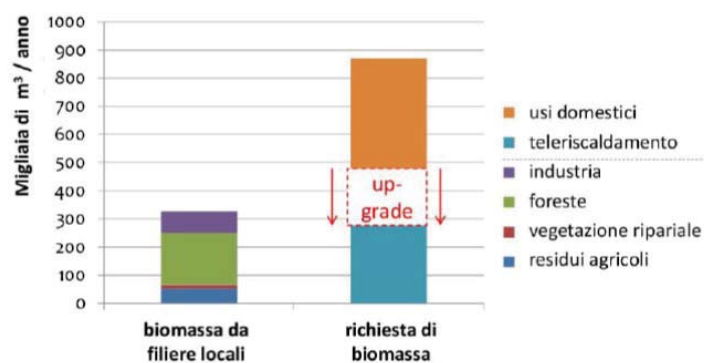
- Superficie boscata = ha 318.454
- Superficie boscata = 40% regione
- Boschi produttivi = 60% boschi
- Boschi produttivi = ha 191.072
- 45 Mm³ di legname potenziale
- 1 Mm³ di incremento/anno
- 300.000 m³ retraibili/anno
- 150.000 m³ prelevati/anno



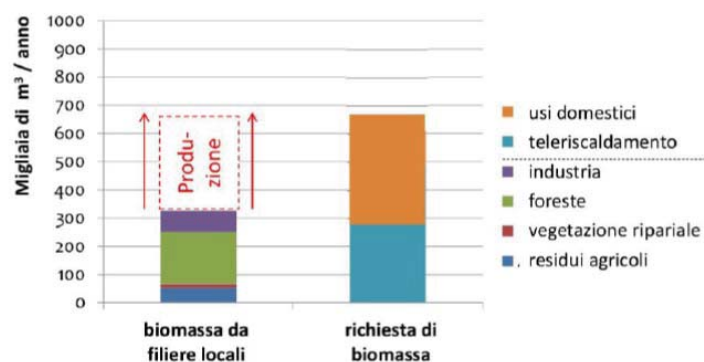
BIOMASSE LEGNOSE: L'ALTO ADIGE



BIOMASSE LEGNOSE: L'ALTO ADIGE



BIOMASSE LEGNOSE: L'ALTO ADIGE



FORESTA-LEGNO-ENERGIA

Nei lavori di utilizzazione forestale si distinguono le seguenti fasi:

1. **Abbattimento:** recisione del fusto al piede e atterramento
2. **Allestimento:** sramatura (taglio dei rami e del cimale fino alla completa pulizia del tronco) e depezzatura (divisione del fusto in assortimenti commerciali)
3. **Concentramento:** trasporto del legname dal letto di caduta alle vie di esbosco
4. **Esbosco:** trasporto del legname lungo le vie di esbosco fino all'imposto
5. **Scortecciatura:** asportazione parziale o completa della corteccia
6. **Trasporto:** movimentazione del legname attraverso strade forestali e pubbliche
7. **Trasformazione:** riduzione a misura di impiego combustibile (taglio, fenditura, cippatura)
8. **Cippatura:** è una fase che sta acquisendo sempre più importanza allo scopo di sfruttare e valorizzare biomassa altrimenti inutilizzata e scartata.

Tutte queste fasi avvengono con diversi livelli di meccanizzazione che, naturalmente, si riflettono sul costo finale dell'energia!

FORESTA-LEGNO-ENERGIA

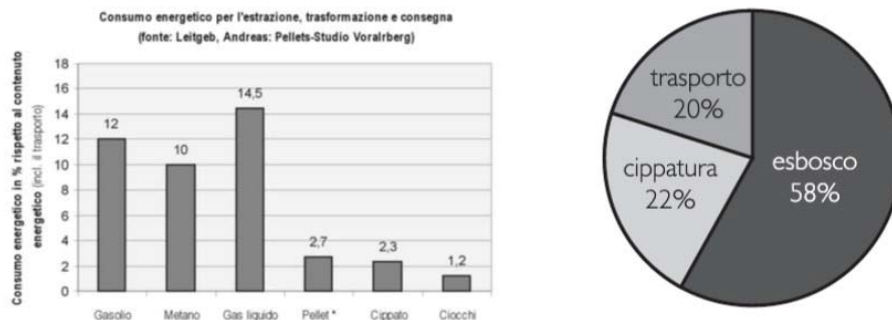


meccanizzazione

ENERGIA GRIGIA DELLA FILIERA

Nei vari ed articolati processi di produzione dei combustibili, sia fossili che legnosi, esiste ed è quantificabile una parte di energia che è impiegata per la loro produzione (EROEI...).

Questo impiego determina un rilascio di anidride carbonica nell'aria che va contabilizzata nel bilancio complessivo.



Fonte : Energie-bois Suisse, Michel Borel, Les granulés de bois, 2001

EMISSIONI DI CARBONIO DELLA FILIERA

Emissioni di carbonio nella produzione forestale in Germania (Fonte: Böswald)

Distanza di trasporto: 70 km

Specie	tronchi da sega		legno da industria	
	kgC/t _{secca}		kgC/m ³	
Picea	7,79	11,46	2,94	4,32
Pino silvestre	7,13	10,67	3,07	4,60
Faggio	5,01	8,95	2,77	4,96
Querce	5,18	9,00	2,91	5,05

(Basato su dati di WEGENER et al. 1994)

Emissioni di carbonio ed energia prodotta (Fonte: Jungmeier)

	kgCO ₂ /kWh	Tipo di Carbonio	Rapporto ⁷
residui legnosi boschivi	0,060	circolante	1,00
legno da ceduo a corta rotazione	0,104	circolante	1,73
gasolio	0,480	fossile	8,00
gas naturale	0,367	fossile	6,11

QUANTO LEGNO-ENERGIA C'È?

Tra i tanti numeri che bisogna conoscere per poter pensare in modo corretto all'uso energetico del legno, quelli sulla disponibilità della risorsa sono di importanza strategica.

Troppo spesso, infatti, anche bei progetti sono falliti per il banale motivo che non si erano fatti i conti con la realtà, ipotizzando disponibilità inesistenti, puntando ad utilizzare risorse presenti ma fuori mercato o viceversa sottovalutando risorse abbondanti ed a portata di mano.

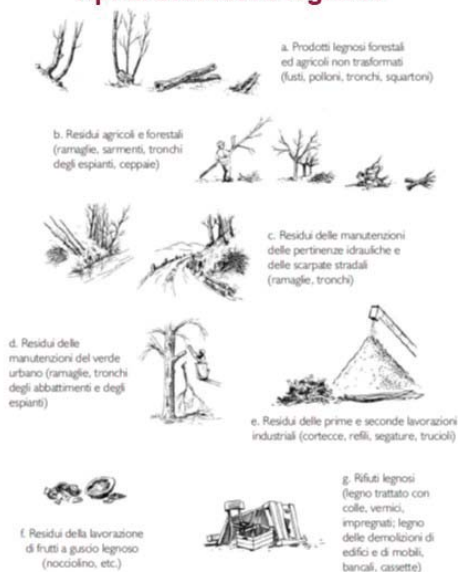
Questi numeri non sono **mai assoluti** ma **sempre relativi**, variano cioè da contesto a contesto.

A seconda dei contesti in cui viene prodotto il legno utilizzabile per fini energetici può presentarsi da un pdv merceologico sotto 3 diversi vesti:

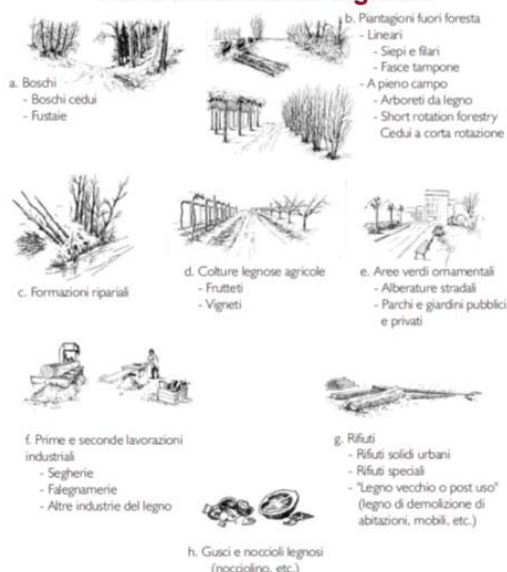
- **PRODOTTO:** la coltivazione arborea punta a produrre legno
- **RESIDUO:** il legno è ciò che resta al termine di un'attività che non ha come obiettivo la produzione di legno
- **RIFIUTO:** il legno è ciò che resta di un'attività produttiva e deve essere smaltito sostenendo dei costi

QUANTO LEGNO-ENERGIA C'È?

Tipi di biomasse legnose



Fonti di biomasse legnose



Fonte : L'energia dal legno – numeri e concetti di base, 2004

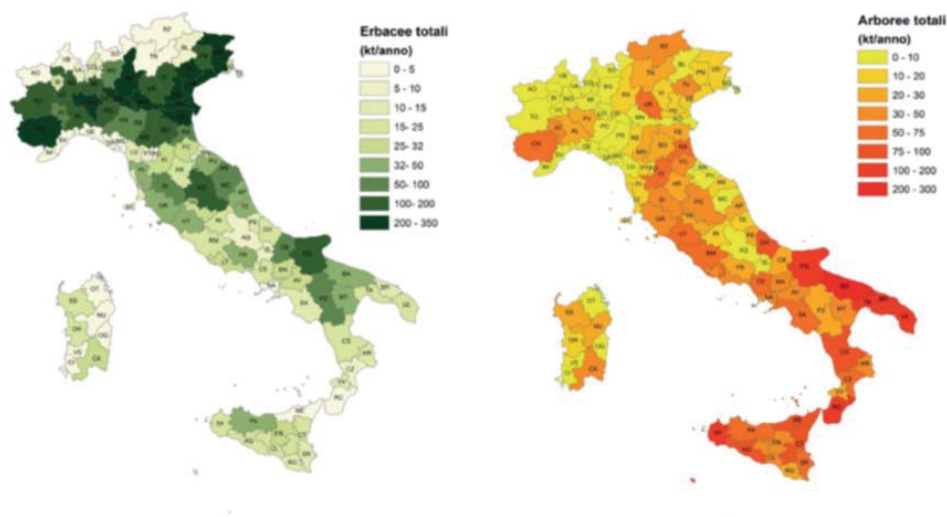
QUANTO LEGNO-ENERGIA C'È?

Stime del contributo potenziale delle diverse fonti di legno utilizzabili come combustibile in Italia

Fonte	Quantitativo (milioni di t di legno secco)
Boschi (raccolta di solo la metà dell'incremento corrente annuo)	7-8 Mt
Colture legnose a fini energetici sui terreni agricoli (stima potenziale)	5 Mt
Raccolta differenziata di rifiuti	1 Mt
Segherie ed industrie del legno	4 Mt
Residui agricoli	3-4 Mt
TOTALE	20-22 Mt

Da: Cerullo, Pellegrini (Assolegno): "Stima delle quantità di residui legnosi prodotti in Italia", 2002

ALTRE BIOMASSE: DISPONIBILITÀ



ALTRE BIOMASSE: DISPONIBILITÀ

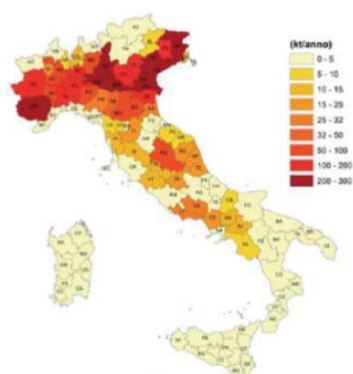
Regioni	Colture erbacee Disponibilità potenziale	Colture erbacee Disponibilità effettiva	Colture arboree Disponibilità potenziale	Colture arboree Disponibilità effettiva
Piemonte	1.474.550	589.820	124.710	59.868
Valle d'Aosta	137	55	1.512	726
Lombardia	1.691.829	676.732	44.213	21.222
Trentino Alto Adige	1.928	771	66.718	32.025
Veneto	1.496.340	598.536	147.703	70.897
Friuli Venezia Giulia	486.241	194.496	32.129	15.422
Liguria	2.751	1.100	2.751	9.627
Emilia Romagna	1.138.035	455.214	1.138.035	94.745
Toscana	395.079	158.031	225.781	108.375
Umbria	291.495	116.598	59.324	28.476
Marche	420.279	168.112	43.796	21.022
Lazio	249.687	99.875	206.165	98.959
Abruzzo	115.400	46.160	112.785	54.137
Molise	100.516	40.206	33.245	15.958
Campania	161.638	64.655	229.984	110.392
Puglia	508.453	203.381	775.809	372.389
Basilicata	217.305	86.922	72.554	34.826
Calabria	102.191	40.877	323.506	155.283
Sicilia	363.363	145.345	600.724	288.347
Sardegna	1390.254	55.702	128.115	61.495

t/anno s.s.

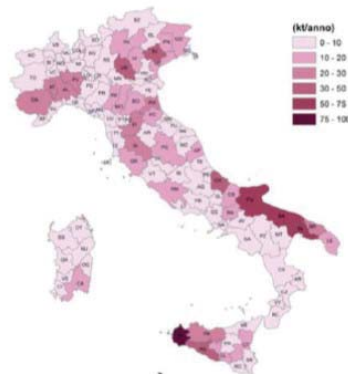
Fonte : www.atlantebiomasse.enea.it

ALTRE BIOMASSE: DISPONIBILITÀ

Stocchi di mais e residui di pannocchie



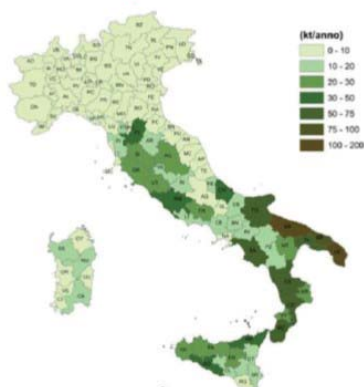
Residui di potatura della vite



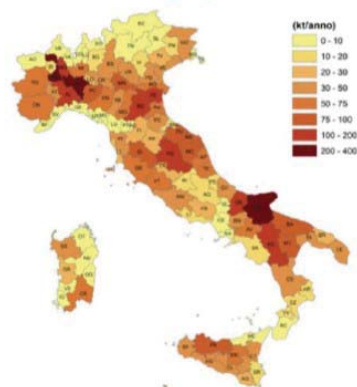
Fonte : S. Prandi - UNIBZ, 2009

ALTRE BIOMASSE: DISPONIBILITÀ

Residui della potatura di ulivo

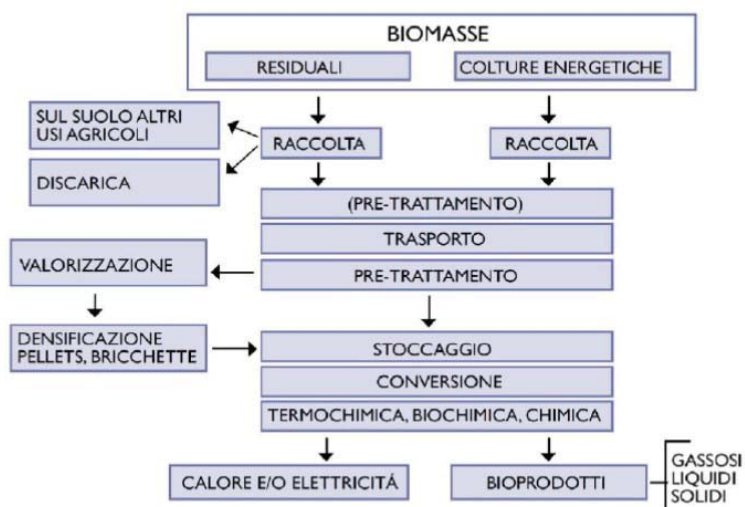


Produzione di paglia



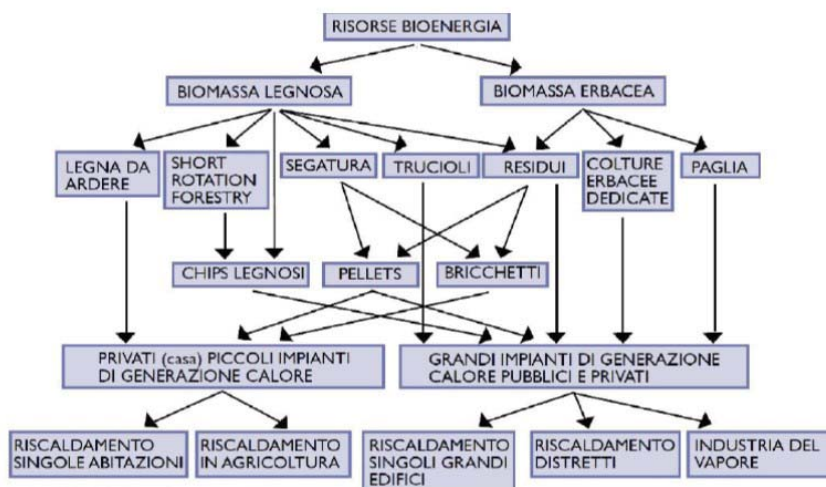
Fonte : S. Prandi - UNIBZ, 2009

BIOMASSE: FILIERA ENERGETICA



Fonte : Energia dalle biomasse, AA.VV., Area Science Park, 2006

BIOMASSE: FILIERA ENERGETICA



Fonte : Energia dalle biomasse, AA.VV., Area Science Park, 2006

ESEMPI DI COSTI DI PRODUZIONE

Cippato M30 da diradamento bosco di conifere Prezzo franco centrale 18-20 €/msr (80-90 €/t)

Fase operativa	Attrezzatura	Produttività (msr/h)	Costo (€/msr)
Abbattimento	2 motoseghe	35	0,5
Esbosco pianta intera	2 trattori con verricello	17	5,9
Allestimento meccanizzato all'imposto	processore su trattore	24,3	1,4
Carico topi su autotreno	autotreno con gru	121,5	0,6
Trasporto presso piattaforma (A+R 90 km)	autotreno con gru	36,5	2
Scarico topi da autotreno	autotreno con gru	145,8	0,5
Stagionatura	—	—	0,3
Cippatura topi	cippatrice elevata potenza	100	1,4
Conferimento cippato (A+R 90 km)	autotreno	24,4**	2,0
TOTALE			14,6

Cippato M55 da diradamento bosco di conifere Prezzo franco centrale 10-13 €/msr (29-38 €/t)

Fase operativa	Attrezzatura	Produttività (msr/h)	Costo (€/msr)
Abbattimento	2 motoseghe	35	0,5
Esbosco pianta intera	2 trattori con verricello	17	5,9
Cippatura pianta intera	cippatrice elevata potenza	60	2,4
Conferimento cippato (A+R 90 km)	autotreno	22,1*	2,4
TOTALE			11,2

Fonte : Legna e cippato, AA.VV., AIEL, 2009

BIOMASSE LEGNOSE: CERTIFICAZIONE

In Italia sono previste regole e responsabilità relativamente all'iter di certificazione di prodotto, processo e servizio in ambito volontario per le biomasse legnose quali:

- Pellet
- Bricchette
- Legna da ardere
- Cippato

Due sono gli standard volontari per la certificazione di prodotto più diffusi:

- BiomassPlus (legna da ardere, bricchette e cippato)
- ENplus (pellet)

Tra le certificazioni di origine del prodotto le più diffuse sono:

- FSC (Forest Stewardship Council)
- PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes)

Fonte : Energia dalle biomasse, AA.VV., 2006

LO STANDARD BIOMASSPLUS

BiomassPlus definisce tre ambiti qualitativi su cui si basa lo schema di certificazione:

1. **tracciabilità e legalità** - il legno di partenza ha origine legale ed è possibile rintracciarne tutte le fasi del processo produttivo;
2. **sostenibilità ambientale** - il ciclo produttivo del biocombustibile immesso sul mercato genera un risparmio di emissioni di CO₂ equivalente pari almeno al 70% rispetto al gas naturale, a parità di energia producibile;
3. **rispetto e mantenimento dei parametri qualitativi del combustibile** - la qualità del prodotto e del processo produttivo è controllata periodicamente dall'organismo di certificazione.

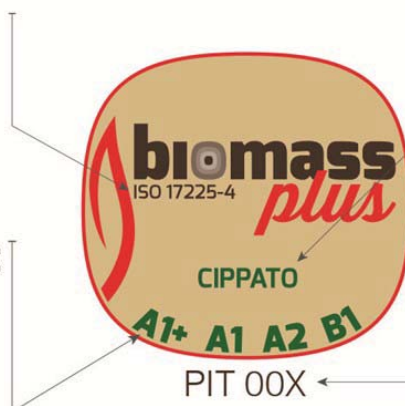


LO STANDARD BIOMASSPLUS

La norma ISO 17225 è il riferimento su cui si basano le classi di qualità previste dalla certificazione Biomassplus per i diversi biocombustibili:

- ISO 17225-5: legna da ardere
- ISO 17225-4: cippato
- ISO 17225-3: bricchette

Indicazione della classe di Qualità



Indicazione della tipo di biomassa certificato

Codice identificativo dell'azienda certificata composta da:

- (P) produttore, cioè il 1° soggetto che immette sul mercato il prodotto certificato, o (D), cioè il soggetto che acquista il prodotto da un produttore certificato per rivenderlo
- Sigla del Paese
- N° progressivo di certificazione

LO STANDARD BIOMASSPLUS

Riferimenti normativi

- EN ISO 17225-1, Biocombustibili solidi – Specifiche e classificazione del biocombustibile – Parte1: Requisiti generali;
- EN 15234-1, Biocombustibili solidi – Assicurazione della qualità del combustibile – Parte1: Requisiti generali;
- ISO/IEC 17025 (2005), Requisiti generali per test e Laboratori di taratura;
- UNI CEI EN ISO/IEC 17020:2012 Valutazione della conformità – requisiti per il funzionamento dei vari tipi di organismo che eseguono ispezioni;
- EN ISO/IEC 17025: Criteri generali per l'operazione di varie tipologie di organizzazioni di revisione;
- EN 45011, Requisiti generali per le organizzazioni che operano nella produzione del sistema di certificazione;
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale" e s.m.i.

LO STANDARD BIOMASSPLUS

I riferimenti normativi per il sistema di gestione della qualità nell'ambito della filiera produttiva dei biocombustibili solidi di origine agroforestale sono quelli legati al gruppo delle norme EN 15234.

Le procedure prevedono:

- controllo della materia prima in entrata;
- idoneità delle zone di stoccaggio e movimentazione;
- idoneità degli impianti e delle attrezzature di trasformazione;
- analisi interne di controllo del prodotto;
- corretto sistema di tracciabilità;
- corretta gestione dei criteri di sostenibilità;
- controllo qualitativo del prodotto in uscita;
- predisposizione di corrette informazioni per l'utente finale.

I riferimenti normativi per la definizione delle classi di qualità sono la norma ISO 17225:1, che definisce le caratteristiche generali, e le norme specifiche per ogni biocombustibile solido.

Fonte : Energia dalle biomasse, AA.VV., 2006

LO STANDARD BIOMASSPLUS

ENAMA è l'organismo di certificazione accreditato che provvede all'ispezione e al rilascio della certificazione secondo lo schema Biomassplus.

AIEL è il titolare esclusivo del marchio e lo rilascia alle aziende certificate dall'organismo di certificazione.

Lo schema di certificazione, oltre alle classi di qualità definite dalle norme (A1, A2 e B), può prevedere, per alcuni prodotti, una classe "plus" (A1+), con limiti più restrittivi rispetto a quelli della norma, volti a identificare prodotti di straordinaria qualità (ad esempio cippato per gassificatori, cippatino, legna da ardere molto secca).

Gli elementi qualitativi verificati dallo schema di certificazione, così come descritto nel manuale, si possono quindi raggruppare nei seguenti 3 punti:

- Qualità di prodotto
- Qualità dell'impianto
- Qualità di processo

LO STANDARD ENplus

ENplus® è una certificazione di riferimento a livello internazionale applicata ai produttori e distributori di pellet.

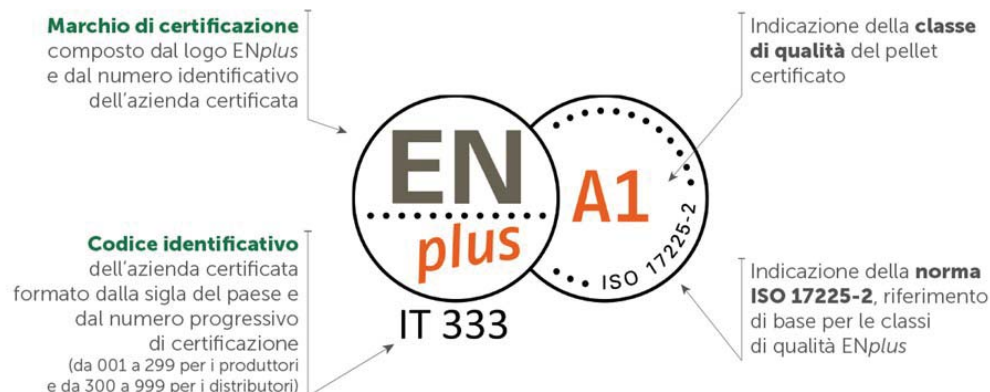
Consente il controllo dell'intera filiera, dalla materia prima fino alla vendita o alla consegna al consumatore finale.

Grazie a un sistema trasparente e rigoroso, il pellet ENplus® è prodotto con la stessa qualità (chimica, fisica, energetica) in tutti i Paesi.

La certificazione ENplus® garantisce la sostenibilità ambientale dei processi produttivi, dal produttore al consumatore, passando attraverso il rivenditore e il trasportatore.



LO STANDARD ENplus



LO STANDARD ENplus

Ciascuna classe qualitativa di pellet è contrassegnata da uno specifico marchio di qualità, il quale deve essere apposto sulle confezioni di pellet.

Lo schema di certificazione prende in considerazione i seguenti aspetti chiave, ciascuno dei quali basato sulla norma di riferimento riportata fra parentesi:

- Requisiti delle materie prime e caratteristiche di prodotto (ISO 17225-2);
- Requisiti per la gestione della qualità nel processo produttivo e nella movimentazione del pellet (ISO 9001, EN15234-2);
- Requisiti circa il controllo, la tracciabilità e la dichiarazione, dalle materie prime al prodotto consegnato all'utente finale. (EN 15234-2).



LO STANDARD ENplus

Le componenti essenziali dello schema di certificazione sono:

- Definizione delle classi di qualità e specifica delle proprietà del pellet;
- Disposizioni circa la gestione della qualità da parte dei produttori di pellet, dei distributori e dei terzisti;
- Requisiti sulle dichiarazioni di prodotto e sull'utilizzo del marchio di certificazione;
- Registrazione degli Organismi, concessione e revoca della licenza, formazione;
- ispezione e valutazione della conformità dei prodotti, processi e dei documenti previsti dagli standard di riferimento.

IL MERCATO EUROPEO DEL PELLE

European/EU-28 wood pellet consumption
(in 2016, tonnes, %)

European consumption
22,3
million tonnes in 2016

EU-28 consumption
21,7
million tonnes in 2016

Actual consumption
(in tonnes)

> 4.000.000
< 4.000.000
< 2.000.000
< 1.000.000
< 500.000
< 250.000

Source: EPC Survey



Sistemi di riscaldamento a pellet installati
nel 2016



BIOMASSE LEGNOSE: TRACCIABILITÀ



La certificazione FSC garantisce che il prodotto con etichetta FSC proviene da una foresta e da una filiera di approvvigionamento gestita in modo responsabile.

Per ottenere la certificazione FSC, è necessario rispettare una serie di regole che coprono gli aspetti essenziali della gestione forestale responsabile.

Queste regole si applicano in tutto il mondo, attraverso tutti gli ecosistemi e i sistemi culturali, politici e legali, con indicazioni specifiche fornite per l'interpretazione locale.

BIOMASSE LEGNOSE: TRACCIABILITÀ

Il PEFC garantisce che la materia prima legnosa per carta e prodotti in legno deriva da foreste gestite in maniera sostenibile.

Le foreste certificate sono regolarmente controllate da ispettori indipendenti.

I seguenti principi sono parte integrante della gestione forestale PEFC:

- conserva la foresta come habitat per animali e piante,
- mantiene la funzione protettiva delle foreste nei confronti dell'acqua, del terreno e del clima,
- tutela la biodiversità degli ecosistemi forestali,
- verifica l'origine delle materie prime legnose,
- prevede il taglio delle piante rispettando il naturale ritmo di crescita della foresta,
- prevede che le aree soggette al taglio vengano rimboschite o preferibilmente rigenerate e rinnovate naturalmente,
- tutela i diritti e la salute dei lavoratori,
- favorisce le filiere corte,
- garantisce i diritti delle popolazioni indigene e dei proprietari forestali.

In Regione FVG sono certificati PEFC 80.800 ha su 191.072 ha di boschi produttivi

BIOMASSE LEGNOSE: QUALITÀ ED ORIGINE

Quando si acquista o ci si approvvigiona di biomassa legnosa occorre quindi considerare:

- Standard: protocolli di mercato disponibili
- Qualità: certificazioni di prodotto richieste
- Provenienza: certificazioni di origine richieste



CONCLUSIONI

Più nel dettaglio, un contratto per la compravendita di biomasse legnose a contenuto energetico dovrà specificare:

- Parti contraenti
- Oggetto
- Tempi di consegna
- Fabbisogno annuale
- Provenienza
- Pezzatura
- Purezza
- Contenuto idrico e peso del carico
- Certificazioni
- Modalità e tempi di fatturazione
- Prezzo di consegna franco destinatario
- Pagamenti
- Forniture non conformi
- Durata del contratto

Ricordatevi che state comprando energia non legno!

PARTE 5

MODULO 1

MATERIE PRIME E TECNOLOGIE

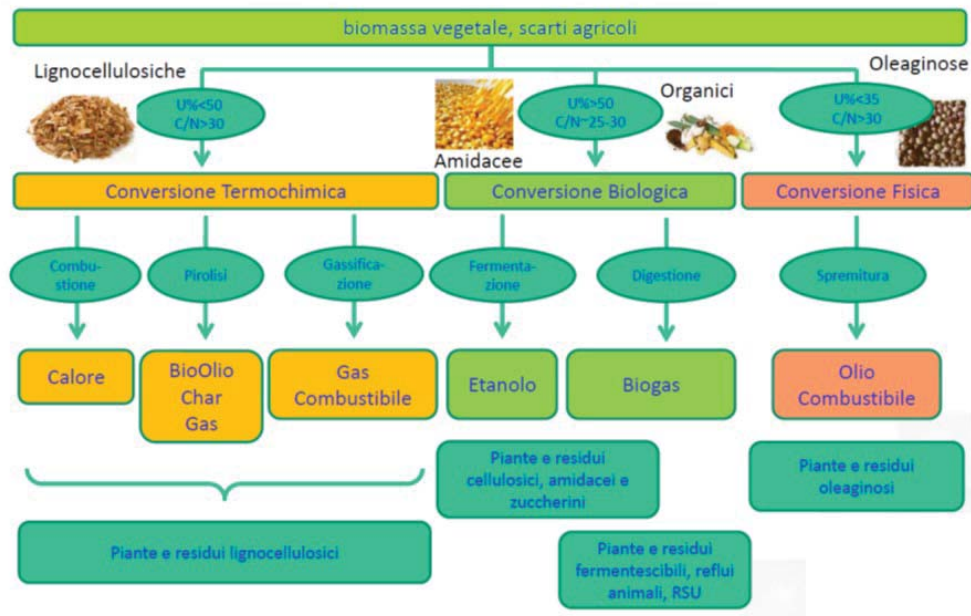
Pordenone, 17 settembre 2020

Processi di conversione energetica delle biomasse con focus sul processo di conversione termica (combustione, gassificazione, pirolisi)

Matteo Mazzolini

APE FVG - Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia

BIOMASSE: CONVERSIONE ENERGETICA



BIOMASSE: CONVERSIONE ENERGETICA

Definizione

È il processo che rende disponibile il contenuto di energia (chimica) di un biocombustibile attraverso:

- Calore
- Prodotti intermedi (combustibili intermedi)
- Vettori energetici
- Energia meccanica
- Energia elettrica

La conversione energetica tradizionale delle biomasse legnose avviene per combustione che presenta il massimo rendimento nella produzione di calore.

La produzione di energia elettrica è possibile (es. combustione + ciclo a vapore o ciclo ORC) ma con basse efficienze di trasformazione.

Esistono sperimentazioni di processi innovativi per la conversione energetica diretta di energia chimica in energia elettrica (celle a combustibile) ma l'affidabilità è ancora insufficiente per la commercializzazione.

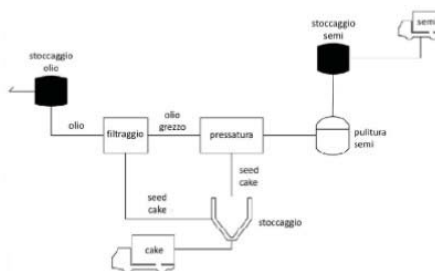
BIOMASSE: CONVERSIONE FISICA

Olio vegetale combustibile

Estrazione chimica



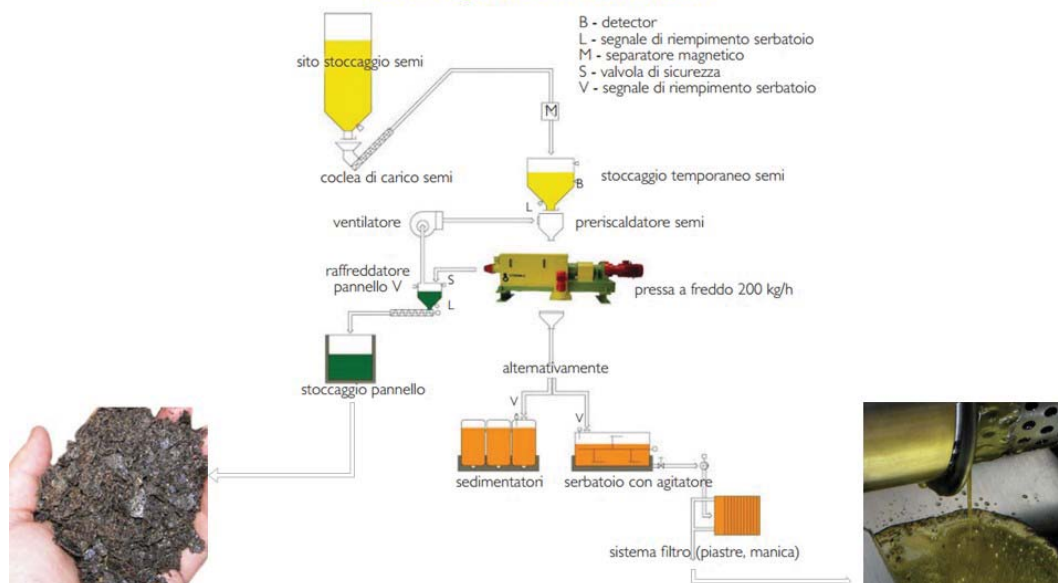
Estrazione meccanica



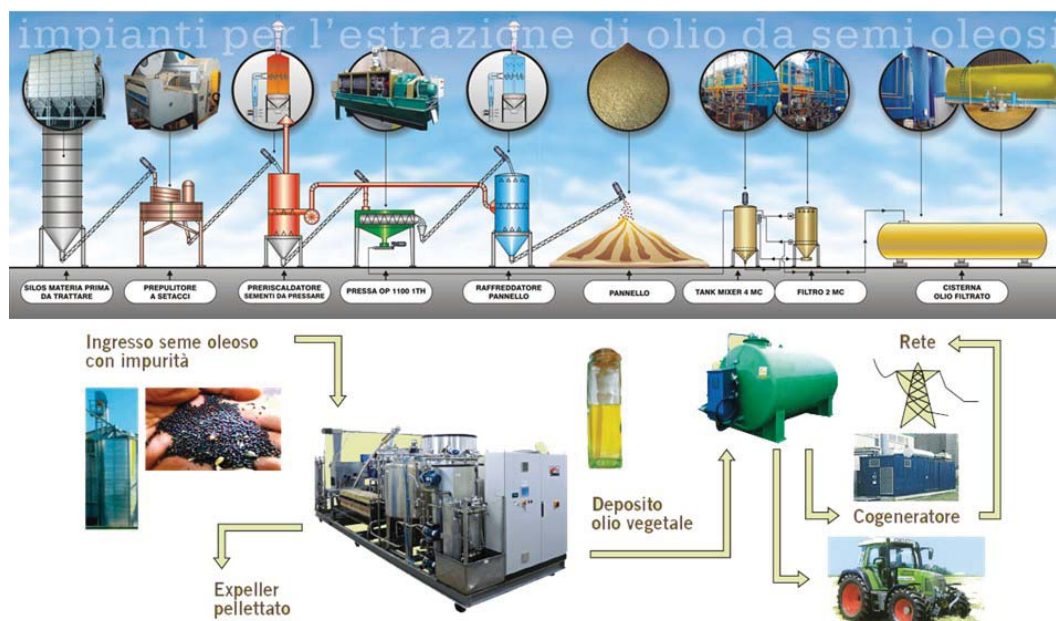
Fonte : Chiaramonti, Prussi, Int. J – Oil, Gas and Coal Technology, Vol. 2, 2009

BIOMASSE: CONVERSIONE FISICA

Olio vegetale combustibile



OLIO VEGETALE: ESTRAZIONE MECCANICA



OLIO VEGETALE: BIODIESEL

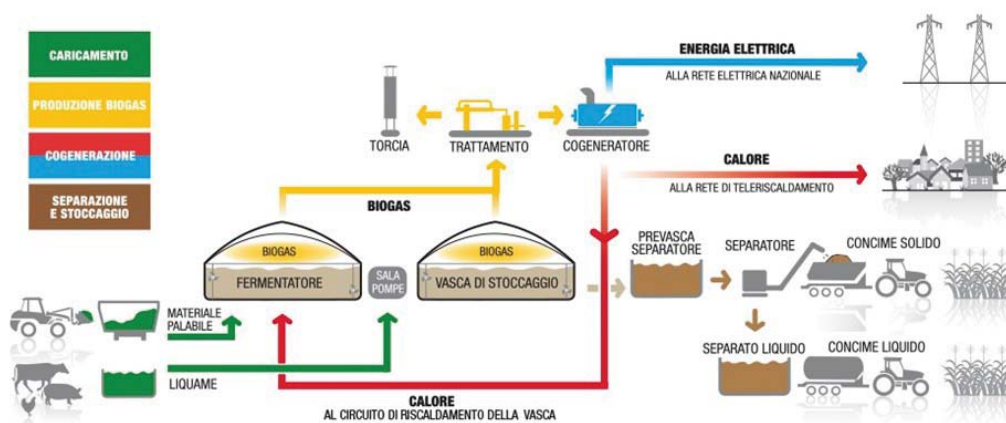


Può sostituire o integrare il
gasolio per autotrazione

Proprietà del Combustibile	Gasolio	Olio di Girasole	Metilestere di Olio di Girasole	Olio di Colza	Metilestere di Olio di Colza
Densità (Kg/dm ³)	0,835	0,924	0,88	0,916	0,88
Viscosità (cSt)					
a 20°C	5,1	65,8	-	77,8	7,5
a 50°C	2,6	34,9	4,22	25,7	3,8
Potere Calorifero	35,4	34,1	33,0	34,3	33,1
Numero di Cetano	> 45	33	45-51	44-51	52-56
Res. di Carbonio	0,15	0,42	0,05	0,05	0,02
Zolfo	0,29	0,01	0,01	0,01	0,002

BIOMASSE: CONVERSIONE BIOLOGICA

Biogas (digestione anaerobica di biomassa vegetale)



BIOMASSE: CONVERSIONE BIOLOGICA

Bioetanolo (fermentazione di biomassa vegetale)

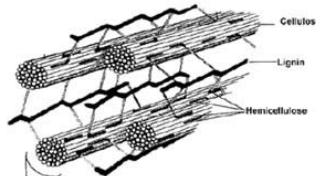
Bioetanolo di prima generazione

- Ampiamente prodotto in USA e Brasile;
- Matrici zuccherine o amilacee: è semplice ottenere zuccheri fermentabili;
- Competizione tra impiego alimentare ed energetico.



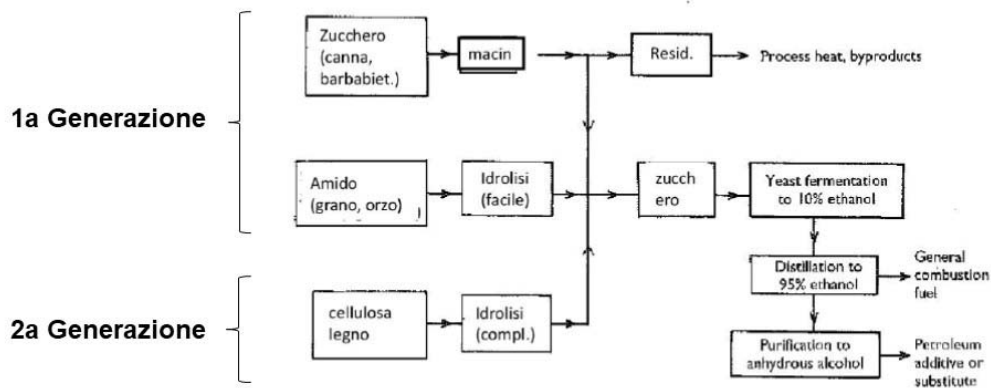
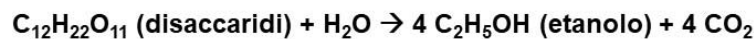
Bioetanolo di seconda generazione

- Si impiegano fibre lignocellulosiche;
- Abbondanti, economiche e facilmente reperibili;
- Recalcitranti alla bioconversione.



BIOMASSE: CONVERSIONE BIOLOGICA

Bioetanolo (fermentazione di biomassa vegetale)



Può sostituire o integrare la benzina per autotrazione

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

La biomassa solida può essere utilizzata a fini energetici in maniera diretta o indiretta.

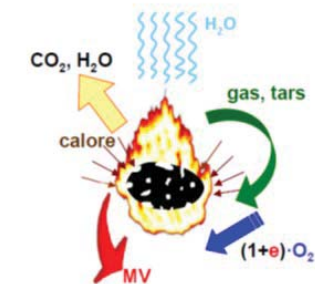
UTILIZZO DIRETTO: combustione

È il processo tradizionalmente utilizzato per ricavare energia dalle biomasse solide che vengono bruciate (ossidate) in presenza di ossigeno (eccesso di aria). È il classico processo utilizzato nelle caldaie, stufe, caminetti, etc.

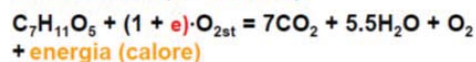
UTILIZZO INDIRETTO: gassificazione e pirolisi

Questi processi di conversione termochimica di un combustibile solido risultano più complessi rispetto ai metodi diretti e consentono di trasformare la biomassa in ingresso all'impianto in liquidi o gas tramite un processo di riduzione in scarsità o totale assenza di ossigeno.

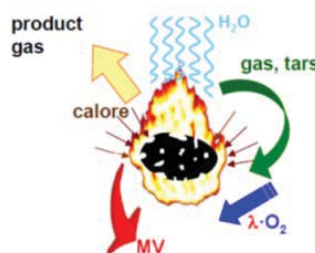
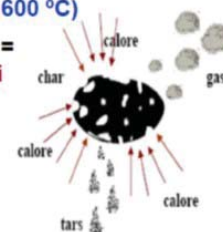
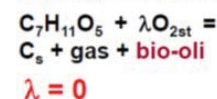
BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA



Combustione ($T > 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$)

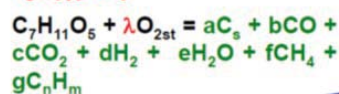


Pirolisi ($T = 500 - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Gassificazione ($T = 800 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$)

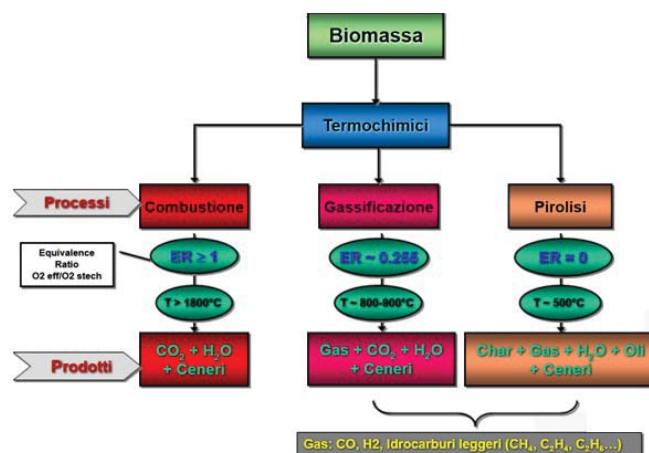
$0 < \lambda < 1$



$$\lambda = e = \frac{\text{moli } O_2 / \text{kg}_{\text{biomassa}}}{\text{moli } O_{2 \text{ tech.}} / \text{kg}_{\text{biomassa}}}$$

Fonte : ENEA, 2015

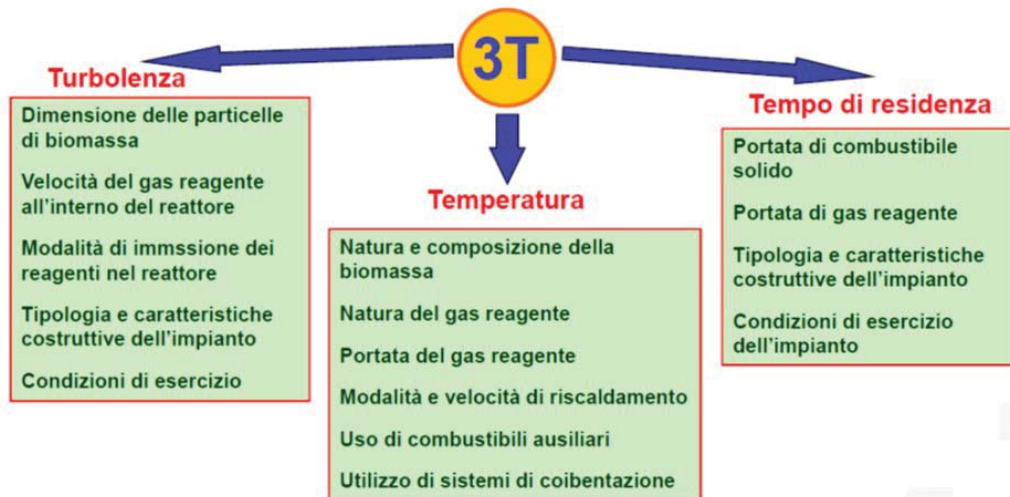
BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA



Fonte : ENEA, 2011

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

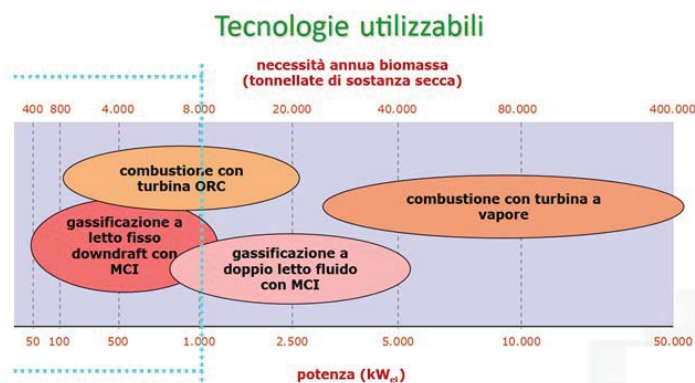
Impiantistica: regola delle «3T»



Fonte : ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

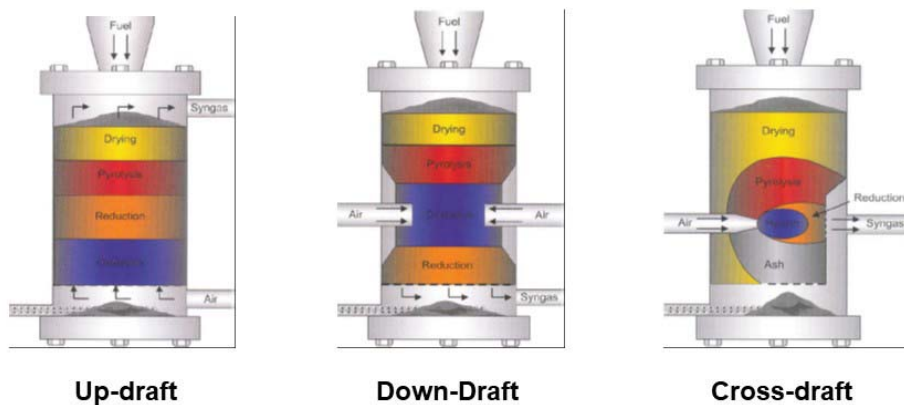
PERCHÉ GASSIFICARE LE BIOMASSE?



Fonte : ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

GASSIFICATORI A LETTO FISSO



Fonte : ENEA, 2006

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

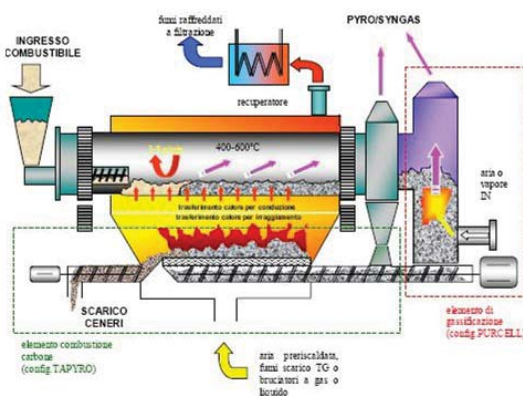
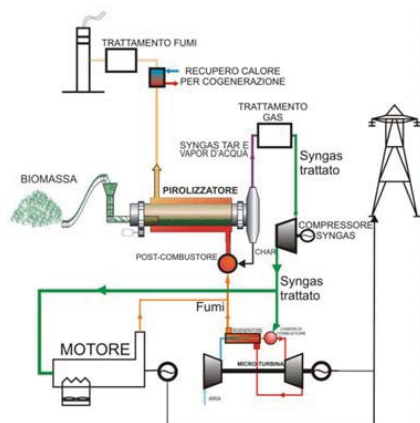
Impianti di gassificazione a letto fisso

	Downdraft	Updraft	Open core
Tenore idrico (%)	< 25	< 60	< 15
Contenuto di ceneri (% sul secco)	< 6	< 25	< 20
Dimensioni delle particelle (mm)	20 - 100	5 - 100	1 - 5
T gas in uscita (°C)	700	200 - 400	250 - 500
Tars (g/Nm ³)	< 0,5	30 - 150	2 - 10
Sensibilità ai cambiamenti di carico	sensibile	Non sensibile	Non sensibile
Hot gas efficiency (full load %)	85 - 90	90 - 95	70 - 80
Cold gas efficiency (full load %)	65 - 75	40 - 60	35 - 50
PCI del gas prodotto (kJ/Nm ³)	4.5 - 5.0	5.0 - 6.0	5.5 - 6.0

Fonte : ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

IMPIANTI A PIROLISI

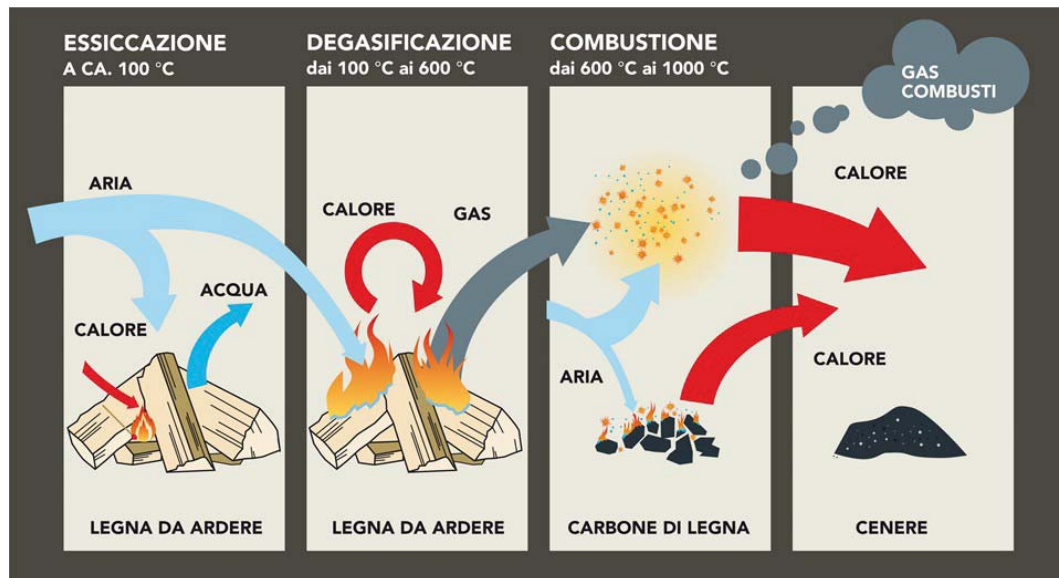


BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Pirolisi

Tipo di processo pirolitico	Temperatura massima di riscaldamento (°C)	Velocità di riscaldamento	Tempo di residenza	Prodotto principale	Potere calorifico
Carbonizzazione	400	molto bassa	Ore - giorni	Char, catrame	30 -40 MJ/kg
Convenzionale	600	lenta	5 - 30 min	Bio-olio, char, gas	15 MJ/Nm ³ (gas)
Lenta	650	abbastanza lenta	0.5 - 5 s	Bio-olio, char, gas	-
Fast	< 650	alta	<1 s	Bio-olio	20 - 30 MJ/kg
Flash	>650	alta	<1 s	Bio-olio	20 - 30 MJ/kg
Ultra	1000	molto alta	<0.5 s	Prod. chimici, gas	-
Vuoto	400	media	2 - 30 s	Bio-olio	20 - 30 MJ/kg
Idropirolisi	<500	alta	<10 s	Prod. chimici, bio-olio	-
Metano-pirolisi	>700	alta	<10 s	Prod. chimici	-

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

LE FASI DI COMBUSTIONE DELLA LEGNA

RISCALDAMENTO: la temperatura del combustibile legnoso aumenta grazie all'irradiazione della fiamma, del letto di braci e delle pareti della camera di combustione;

ESSICCAZIONE: l'acqua contenuta nel legno inizia ad evaporare a partire dai 100°C. L'evaporazione abbassa la temperatura della camera di combustione, rallentando il processo di combustione

DECOMPOSIZIONE PIROLITICA: la sostanza secca del legno si riduce per effetto della temperatura a partire da circa 150°C. Comincia la formazione del «letto di braci». Si rompono i composti a catena lunga e si cominciano a formare CO, idrocarburi gassosi ed oli pirolitici (catrami)

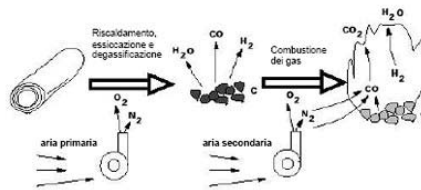
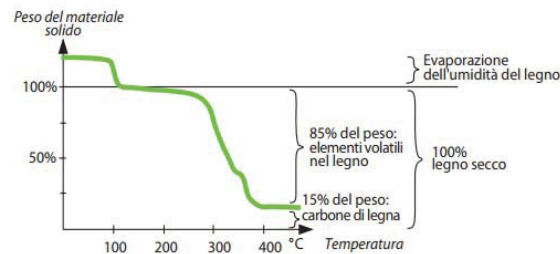
GASSIFICAZIONE S.S. (DEGRADAZIONE TERMICA): a partire da una temperatura di 250°C circa, la componente volatile presente nel legno inizia a gassificare intensamente. In massa, questa componente rappresenta circa l'85% del legno. Si degradano in ordine, emicellulose, cellulose e lignina. Si formano gas combustibili e carbone solido. A 400°C la maggior parte delle sostanze volatili è stata liberata e il processo di gassificazione decresce rapidamente.

GASSIFICAZIONE DEL CARBONE SOLIDO: con CO₂, vapore d'acqua e O₂ e formazione di CO (dai 500°C);

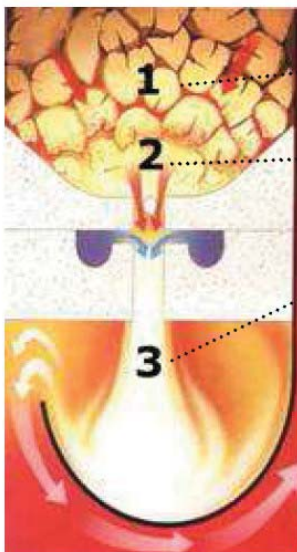
OSSIDAZIONE: dei gas combustibili con O₂ e produzione di CO₂ e H₂O in un intervallo di T tra i 600 ed i 1400°C (reali) fino a ca. 2000°C (teorici); consiste nella completa ossidazione dei gas. È la principale fase esotermica. L'unico residuo solido al termine della combustione sono le ceneri.

TRASFERIMENTO DEL CALORE: dalla fiamma allo scambiatore e in seguito al nuovo combustibile in ingresso.

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA



Riscaldamento ed essiccazione (100 °C)

(aria primaria)

Decomposizione pirolitica (150-500 °C)

Gassificazione del legno (250-500 °C)

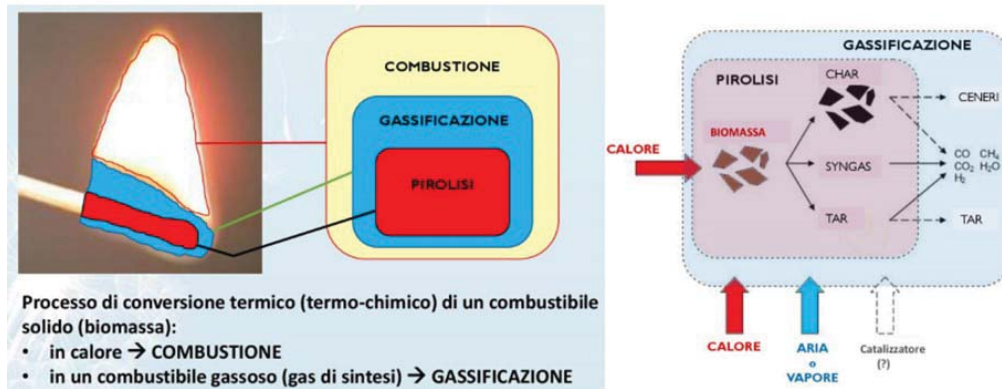
(aria secondaria)

**Ossidazione dei gas combustibili
(700-1400 °C)**

Con eccesso d'aria = 2

9 m³ di aria per kg di legna

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

QUANDO UNA COMBUSTIONE SI PUÒ CONSIDERARE COMPLETA?

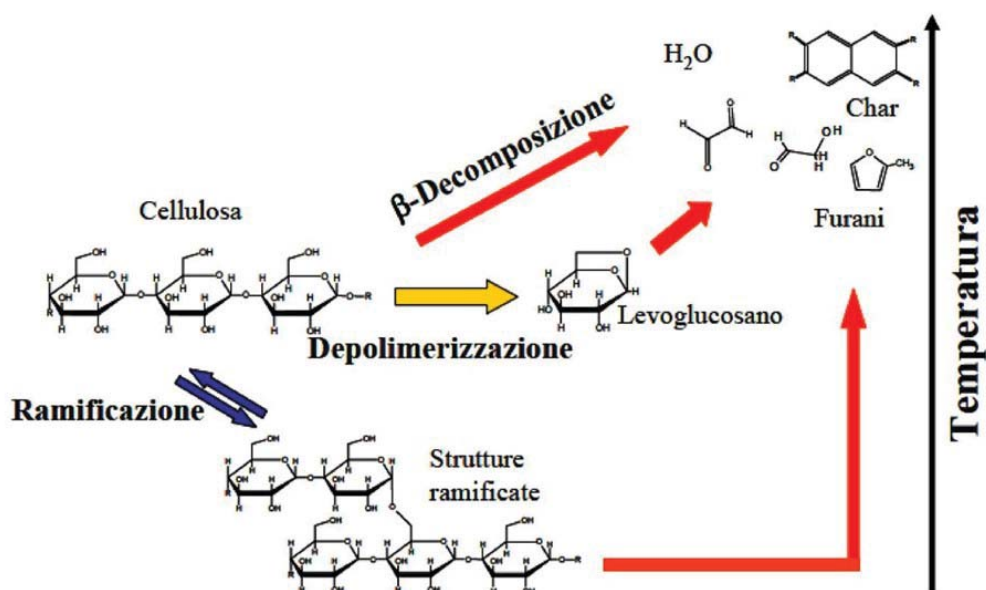
La combustione del legno è completa quando tutte le parti del combustibile hanno reagito con l'ossigeno, ossidandosi e liberando l'energia in essa contenuta (concetto teorico).

Quando vengono a mancare le condizioni necessarie (rapporto aria/combustibile) perché si realizzi la completa combustione del legno aumentano le emissioni nocive nei fumi.

Le principali cause di una combustione incompleta sono:

- inadeguata mescolanza tra aria e combustibile nella camera di combustione;
- carenza complessiva di ossigeno disponibile;
- temperatura di combustione troppo bassa;
- tempi di permanenza del combustibile in camera di combustione troppo corti.

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Nella conversione termica di biomasse legnose si possono seguire due approcci:

1. la produzione separata di calore ed energia elettrica;
2. la cogenerazione di calore ed energia elettrica.

PRODUZIONE IN COGENERAZIONE



PRODUZIONE SEPARATA



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

ATTENZIONE ALLA COGENERAZIONE: non è sempre la miglior scelta!

Quando si cogenera è importante valutare i consumi finali sia di energia elettrica che di energia termica.

Seguire strategie di produzione «ad inseguimento elettrico» può essere molto rischioso perché mentre l'energia elettrica può essere sempre conferita in rete, il calore prodotto potrebbe trasformarsi in «calore di scarto», senza un'adeguata valutazione sul suo uso finale. Una tale configurazione impiantistica potrebbe essere ulteriormente penalizzante per l'aumento di autoconsumi dovuti all'esigenza di dissipare il calore non utilizzato per mantenere un ciclo termodinamico ottimale.

Per massimizzare il rendimento energetico di un impianto di cogenerazione alimentato a biomasse legnose, è necessario considerare prioritariamente quale sia il fabbisogno di calore (quasi sempre la frazione di energia più difficile da allocare nei consumi finali) e calcolare di conseguenza la potenza elettrica ottenibile.

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

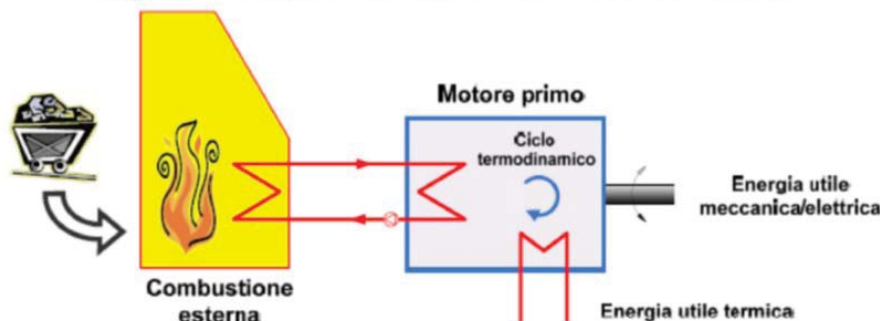
Cogenerazione a combustione interna



- Il combustibile è alimentato direttamente all'interno del motore primo
- Necessità di avere combustibili "puliti" (sistemi di purificazione e filtrazione per biogas, syngas, pyrogas, etc.)
- Maggiori rendimenti

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Cogenerazione a combustione esterna

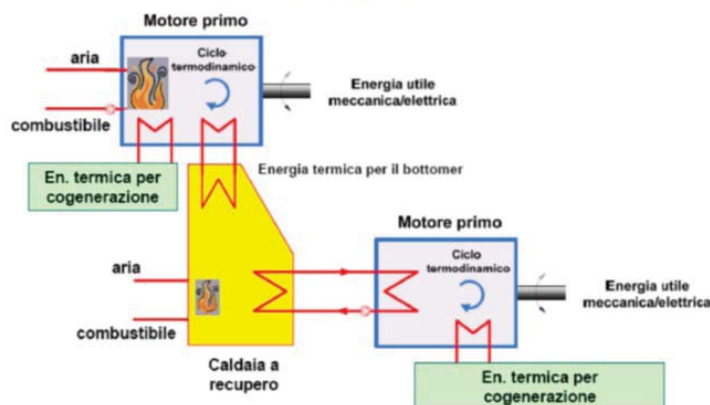


- Separa l'impianto di combustione dal motore primo per la produzione dell'energia
- Consente la combustione di combustibili di varia origine (biomasse solide, CDR, syngas, biogas, oli vegetali, ecc.)
- Richiede un **fluido termovettore** tra caldaia e motore primo

Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Ciclo combinato

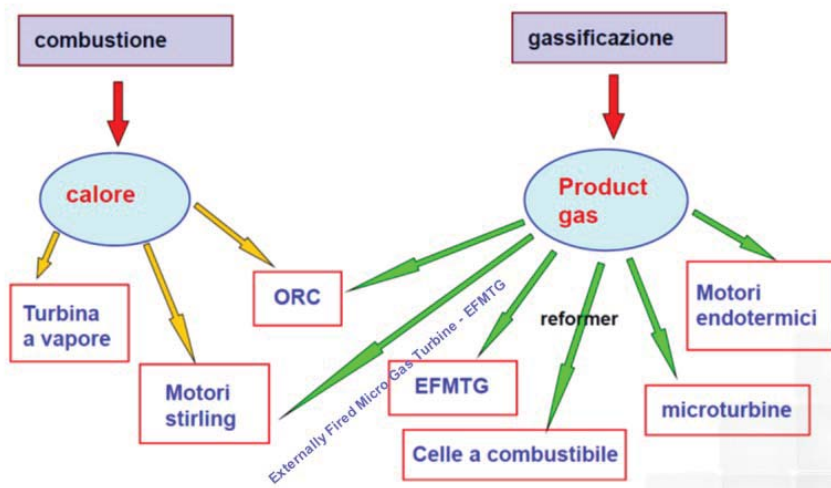


Costituito da un motore primo (topper) e da un utilizzatore dell'energia termica (bottomer), entrambi per produzione di energia elettrica. Energia termica per la cogenerazione da entrambi

Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Sistemi di cogenerazione

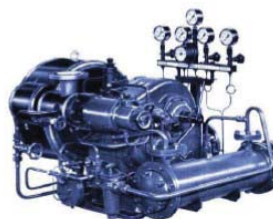


Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Ciclo Rankine – turbina a vapore

- **Potenza:** 2,5 – 100 MW
- **Funzionamento:** Ciclo Rankine base o con riscaldamento del vapore e preriscaldamento rigenerativo dell'acqua
- **Condizioni di esercizio:** Pressione fino a 100 bar
Surriscaldamento fino a 540° C
- **Tipo combustibile:** qualsiasi
- **Efficienza complessiva:** 55 – 80%
- **Rapporto elettricità/calore:** max 0,5
- **Vantaggi:** Impiego di qualsiasi combustibile
Alta affidabilità
Lungo ciclo di vita
- **Svantaggi:** Grandi dimensioni e potenze
Lenta risposta alle variazioni di carico
Alti costi di investimento
- **Periodo di installazione:** 1 – 3 anni
- **Ciclo di vita:** 25 – 35 anni



Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Motori stirling

- **Potenza:** 0.1 – 10kW
- **Funzionamento:** Conversione di energia chimica del combustibile in energia meccanica senza combustione ma con emissione di calore
- **Condizioni di esercizio:** Calore fornito esternamente al cilindro e trasmesso al gas in esso contenuto che si espande e muove il pistone. Il fluido termodinamico non partecipa alla combustione e le parti in movimento non sono esposte ai prodotti della combustione
- **Tipo combustibile:** qualsiasi
- **Efficienza complessiva:** 70 – 80%
- **Rapporto elettricità/calore:** 0.5 – 1,5
- **Vantaggi:** Impiego di qualsiasi combustibile
Buone prestazioni con ogni condizione di carico. Silenziosità
- **Svantaggi:** Basse potenze
- **Periodo di installazione:** breve
- **Ciclo di vita:** 15 – 20 anni

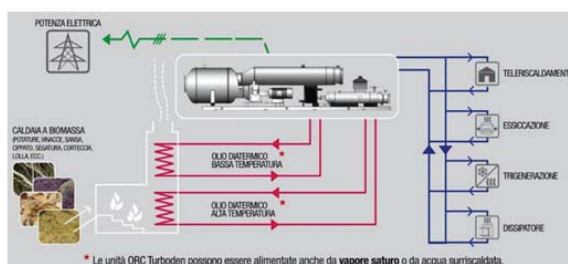
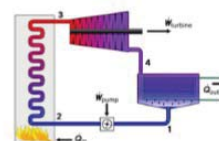


Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Organic Rankine Cycle

- **Potenza:** 10 – 2000 kW
- **Funzionamento:** Stesso principio del ciclo a vapore, con l'utilizzo di fluido di lavoro organico anziché vapore d'acqua.
- **Condizioni di esercizio:** Pressioni fino a 25 bar, massime temperature di esercizio circa 200 ° C
- **Tipo combustibile:** qualsiasi
- **Efficienza complessiva:** 50 - 70%
- **Rapporto elettricità/calore:** 0.2 – 0.4
- **Vantaggi:** Impiego di qualsiasi combustibile.
Possibilità di impiego del calore di cascata.
- **Svantaggi:** Basso rendimento elettrico.
Costi elevati
- **Periodo di installazione:** breve
- **Ciclo di vita:** 15 – 20 anni

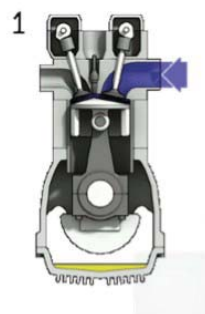


Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Motori endotermici

- **Potenza:** 1kW – 5 MW
- **Funzionamento:** Ciclo Otto
Ciclo Diesel
- **Condizioni di esercizio:** Aumento del rapporto di compressione.
De-rating del motore.
- **Tipo combustibile:** Combustibili liquidi o gassosi
- **Efficienza complessiva:** 70 – 85%
- **Rapporto elettricità/calore:** max 0.5
- **Vantaggi:** Versatilità di impiego. Buoni rendimenti
Il calore recuperato non incide sull'efficienza elettrica
Doppia possibilità di cogenerazione (raffreddamento fumi e motore). Buona affidabilità. Bassi costi di investimento
- **Svantaggi:** Macchine abbastanza complesse. Elevati costi di manutenzione. Rumorosità. Emissioni elevate
- **Periodo di installazione:** Max 1 anno
- **Ciclo di vita:** Max 10 anni

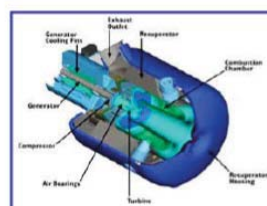
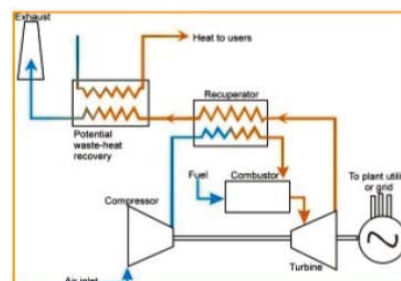


Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Microturbine

- **Potenza:** 25kW – 250kW
- **Funzionamento:** Ciclo Bryton
- **Condizioni di esercizio:** Combustione con eccesso d'aria (15 – 20%).
 $T_{max} = 1300^{\circ} C$.
 T di uscita dei fumi = 200 – 300° C
- **Tipo combustibile:** Liquido o gassoso, con alto grado di pulizia
- **Efficienza complessiva:** 70 – 85%
- **Rapporto elettricità/calore:** 0.5 - 1
- **Vantaggi:** Polialimentazione di combustibile
Buone efficienze. Ridotte emissioni
Immediata risposta alle variazioni di carico
- **Svantaggi:** Alta qualità dei combustibili utilizzati
Alte pressioni di alimentazione
Personale specializzato per il funzionamento
- **Periodo di installazione:** 1 – 2 anni
- **Ciclo di vita:** 10 anni

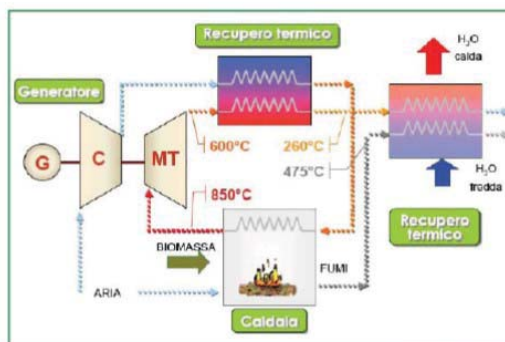


Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Microturbine a combustione esterna EFMTG

- **Potenza:** 0,5 – 100 kWe
- **Funzionamento:** la camera di combustione viene sostituita da uno scambiatore di calore aria/gas, che innalza la temperatura del fluido fino alle temperature adeguate per il ciclo di Brayton.
- **Condizioni di esercizio:** Pressioni max 4,5 bar, massime temperature di esercizio circa 900 °C
- **Tipo combustibile:** qualsiasi
- **Efficienza complessiva:** 40 - 50%
- **Rapporto elettricità/calore:** 0.3
- **Vantaggi:** Impiego di qualsiasi combustibile. Possibilità di impiego del calore di cascata.
- **Svantaggi:** Bassi rendimenti
- **Periodo di installazione:** breve
- **Ciclo di vita:** 15 anni

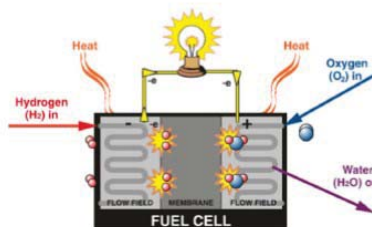


Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

Celle a combustibile

- **Potenza:** 1kW – 2MW
- **Funzionamento:** Conversione di energia chimica del combustibile in energia elettrica senza combustione ma con emissione di calore
- **Condizioni di esercizio:** Temperatura compresa tra 80 e 1000° C
- **Tipo combustibile:** Idrogeno, metanolo, etanolo
- **Efficienza complessiva:** 80 - 90%
- **Rapporto elettricità/calore:** 0.8 – 1.2
- **Vantaggi:** Silenziosità
Elevata efficienza in ogni condizione di carico
Assenza di parti in movimento
Costruzione modulare
Bassissimo impatto ambientale
- **Svantaggi:** Elevati costi iniziali
Elevati costi di gestione
- **Periodo di installazione:** breve
- **Ciclo di vita:** breve



Fonte: ENEA, 2015

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO (UNI EN 12809:2004 sostituita da UNI EN 16510-1:2019)

Apparecchi di riscaldamento domestici a combustibile solido

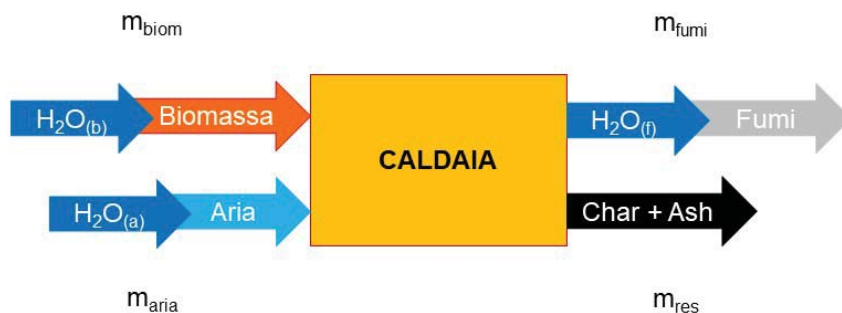
Parte 1: Requisiti generali e metodi di prova

La norma specifica i requisiti relativi alla progettazione, alla fabbricazione, alla costruzione, alla sicurezza e alle prestazioni (efficienza ed emissioni) degli apparecchi a combustibile solido. Inoltre, fornisce anche disposizioni per la valutazione della conformità, il controllo della produzione in fabbrica e la loro marcatura.

Questa norma copre anche i metodi di prova delle emissioni di CO, NO_x, OGC (idrocarburi non bruciati) e PM (particolato).

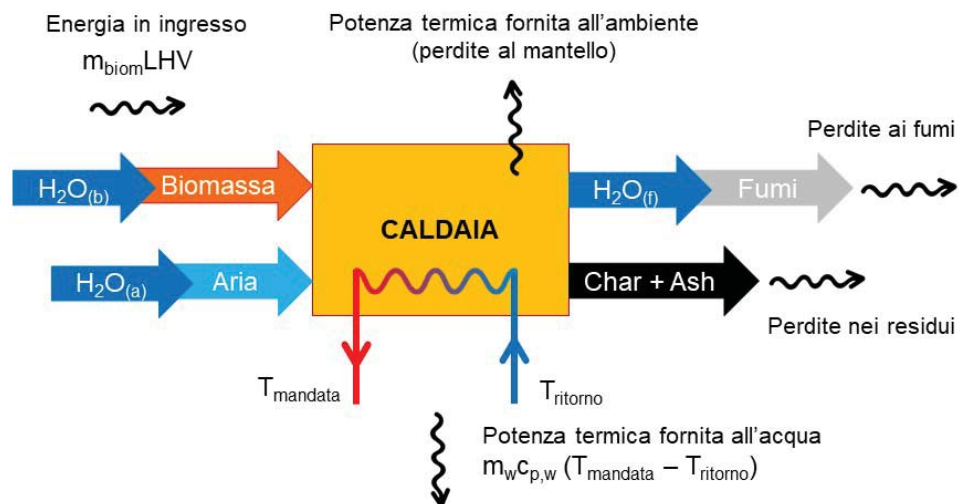
BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: FLUSSI DI MASSA



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: FLUSSI DI ENERGIA



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: nomenclatura

Biomassa in ingresso

B = biomassa in ingresso [kg_{biom}/h]

C = contenuto di carbonio nella biomassa [$\%wt_{ar}$]

H = contenuto di idrogeno nella biomassa [$\%wt_{ar}$]

W = contenuto di acqua nella biomassa [$\%wt_{ar}$]

H_u = LHV (PCI) della biomassa [kJ/kg_{ar}]

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: nomenclatura

Fumi

m = portata massiccia dei fumi [g/s]

CO = contenuto di CO nei fumi secchi [%vol]

CO_2 = contenuto di CO_2 nei fumi secchi [%vol]

C_{pmd} = calore specifico dei fumi secchi [kJ/(K.m³)]

C_{pmH_2O} = calore specifico del vapor d'acqua [kJ/(K.m³)]

t_a = temperatura dei fumi [°C]

t_r = temperatura ambiente (room) [°C]

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: nomenclatura

Residui solidi

R = residuo sottogriglia [% kg_{res}/kg_{biom}]

b = percentuale di combustibile nei residui [% kg_C/kg_{res}]

$C_r = R \times b / 100$ = carbonio nei residui sottogriglia [% kg_C/kg_{biom}]

Accumulo

M_w = portata massiccia dell'acqua [kg/h]

$N = t_{mandata} - t_{ritorno}$ = incremento di temperatura nell'accumulo [K]

C_p = calore specifico dell'acqua [kJ/(kg K)]

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: stechiometria

Si consideri una biomassa in ingresso composta da:

$$[C] + [H] + [O] + [N] + [S] + [H_2O] + [\text{elementi inorganici}] \quad [\text{kg/kg}_{\text{biom}}]$$

Si ha combustione completa del combustibile in ingresso quando tutto il combustibile viene completamente ossidato, così da avere come prodotti della combustione solamente CO_2 , H_2O ed SO_2 più le ceneri.

Queste sono le condizioni per una combustione stechiometricamente perfetta, condizione ideale diversa dalle condizioni reali in cui la combustione raramente è completa.

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: stechiometria

Tipo di combustibile	Composizione elementare [kg/kg(c)]						Potere calorifico, 15°C [kJ/kg]		Aria stechiometrica [kg(a)/kg(c)]
	[C]	[H]	[O + N]	[S]	[H ₂ O]	[ceneri]	superiore	inferiore	
Antraciti	0,845	0,02	0,035	0,01	0,03	0,06	31.500	31.000	10,4
Litantraci:									
- a corta fiamma magri	0,82	0,04	0,04	0,01	0,03	0,06	33.200	32.200	10,8
- a corta fiamma grassi	0,81	0,04	0,06	0,01	0,02	0,06	32.600	31.700	10,7
- a lunga fiamma prop. detti	0,76	0,05	0,08	0,01	0,03	0,07	31.100	29.900	10,2
- a lunga fiamma grassi	0,73	0,045	0,11	0,01	0,03	0,075	29.700	28.600	9,7
- a lunga fiamma secchi	0,69	0,055	0,135	0,01	0,035	0,075	29.500	28.200	9,4
Coke da litantrace	0,85	0,01	0,03	0,01	0,025	0,075	30.500	30.200	10,1
Ligniti picee	0,55	0,045	0,16	0,02	0,1	0,125	22.200	20.900	7,42
Ligniti xiloidi	0,40	0,04	0,15	0,01	0,25	0,15	15.900	14.400	5,48
Torbe	0,34	0,055	0,245	0,01	0,25	0,1	14.200	12.300	4,85
Legna	0,37	0,045	0,32	0,005	0,25	0,01	13.800	10.700	4,60

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: stechiometria

Nella pratica la combustione non è mai completa!

Eccesso d'aria: $\epsilon = \frac{[aria] - [aria]_s}{[aria]_s}$

Indice d'aria: $n = \frac{[aria]}{[aria]_s} = 1 + \epsilon$

Pertanto viene sempre condotta in eccesso d'aria

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: rendimento di combustione

Il rendimento è definito in generale come il rapporto tra l'energia utile (cosa voglio ottenere) e l'energia in ingresso (il «costo energetico» per ottenerlo):

$$\eta = \frac{Q_{\text{utile}}}{Q_{\text{in}}}$$

Nel caso della combustione, l'energia in ingresso può essere definita sia sulla base del potere calorifico superiore (PCS o HHV) o di quello inferiore (PCI o LHV).

In entrambi i casi il rendimento può essere calcolato a partire dalle perdite di energia.

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: come faccio a capire quando una combustione è completa o, meglio, quanto è vicino ad essere completa?

Analisi dei fumi: presenza di CO (monossido di carbonio) nei fumi

Misuro l'eccesso d'aria attraverso analizzatori dotati di sensori elettrochimici o ad infrarossi per:

- ✓ O₂, CO₂, NO, SO₂
- ✓ CO₂



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: rendimento di combustione

$$\eta_{HHV} = \frac{Q_{utile}}{PCS} = \frac{PCS - Q_{sensibili} - Q_{incombusti} - Q_{latenti}}{PCS}$$

$$\eta_{LHV} = \frac{Q_{utile}}{PCI} = \frac{PCS - Q_{sensibili} - Q_{incombusti}}{PCI}$$

Le varie perdite possono essere valutate sulla base dei prodotti di combustione:

- Fumi: CO₂, CO, SO₂, O₂, N₂, H₂O
- Residui: C_{incombusto}

BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: perdite

Le **perdite sensibili** sono quelle legate al calore contenuto nei fumi e possono essere determinate una volta note la composizione e la temperatura dei fumi

Le **perdite latenti** rappresentano il calore necessario a far vaporizzare l'acqua contenuta nella biomassa in ingresso e l'acqua di reazione

Le **perdite legate agli incombusti** sono dovute alla presenza di carbonio solido nei residui (C_{incomb}) e di CO nei fumi

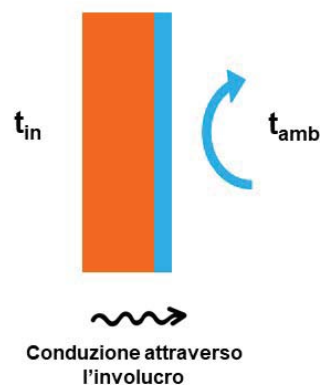
BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: perdite al mantello

Nel calcolo dell'efficienza, le perdite al mantello sono intese come effetto utile. Questo però è vero solo se la caldaia è installata in un ambiente che deve essere riscaldato.

Se invece la caldaia è installata in un vano dedicato e separato dall'area riscaldata (es. centrale termica) è più corretto conteggiare questo effetto come una perdita che va a ridurre l'efficienza globale.

Una volta stimata la perdita è interessante fare una stima, seppur grossolana, delle performance dell'isolamento del mantello.



BIOMASSE: CONVERSIONE TERMICA

PARAMETRI DI PROCESSO: emissioni (fumi)

I limiti di emissione prescritti dalla normativa sono espressi rispetto a fissate condizioni di riferimento, per evitare che si possano artificialmente «diluire» gli inquinanti aggiungendo aria di combustione in eccesso.

Il D. Lgs. n.152/2006 indica come «condizione di riferimento» un limite al tenore residuo di ossigeno nei fumi:

- 3% per i combustibili liquidi e gassosi
- 6% per il carbone
- 11% per gli altri combustibili solidi

La UNI EN 12809:2004 (ora ritirata e sostituita dalla UNI EN 16510-1:2019) usa come condizione di riferimento un tenore di ossigeno pari al 13%

GRAZIE DELL'ATTENZIONE

Matteo Mazzolini

Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
matteo.mazzolini@ape.fvg.it

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
Direzione Centrale Difesa dell'Ambiente, Energia e Sviluppo Sostenibile
via Carducci, 6 - 34133 Trieste
ambiente@regione.fvg.it

Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
via Santa Lucia, 19 - 33013 Gemona del Friuli (UD)
tel. 0432 980 322
info@ape.fvg.it



With the contribution
of the LIFE Programme
of the European Union



www.lifeprepare.eu – info@lifeprepare.eu

