

IL POTERE CALORIFICO DEL LEGNO

Hellrigl, B.*

*Dip. Te.S.A.F. - Università degli Studi di Padova

Riassunto

Il potere calorifico di una sostanza combustibile indica la quantità di energia termica che può venire ricavata nella combustione completa dell'unità di peso (o, per i combustibili gassosi, di volume) del combustibile; viene espresso in J/kg, kWh/kg o kcal/kg (o in J/m³, kWh/m³ o kcal/m³ ⁽¹⁾).

Per i combustibili che contengono acqua e/o idrogeno, come accade per il legno, la fisica distingue tra **potere calorifico superiore** (che nel prodotto della combustione considera l'acqua allo stato liquido) e **potere calorifico inferiore** (nel quale l'acqua prodotta e/o liberata nella combustione viene considerata allo stato di vapore²). In dendroenergetica, con poche eccezioni nella letteratura dei paesi nordici, si impiega quasi sempre il potere calorifico inferiore, anche quando si dice solamente "potere calorifico"³.

Per il legno il potere calorifico dipende dalla sua composizione chimica e, molto più fortemente, dallo stato idrico in cui si trova. Perciò, sembra un paradosso, per parlare di fuoco conviene iniziare dall'acqua.

1. LO STATO IDRICO DEL LEGNO

Come ben noto il legno, a causa della sua struttura e architettura istologica, è un materiale doppiamente **poroso** nel quale i "vuoti" sono principalmente formati dalle cavità dei vasi conduttori e delle cellule parenchimali (detti capillari) nonché dagli interstizi intermicellari (microcapillari), mentre i "pieni" sono costituiti dalla sostanza legnosa vera e propria (formata principalmente da cellulosa, emicellulose e lignina) che edifica soprattutto le pareti del sistema conduttore, meccanico e di riserva. Nel caso eccezionale di legni estremamente leggeri, come il balsa (peso specifico apparente medio di 0,13 g/cm³ secondo Tsoumis, 1991), la sostanza legnosa può occupare anche solo circa il 9% del volume del corpo legnoso, mentre in legni pesantissimi, come il guaiaco, la percentuale volumetrica dell'"occupazione legnosa" può superare l'87%. Per i legni italiani tale *range* è molto più contenuto e varia tra poco meno del 30% per pioppi, salici e abeti a un po' più del 60% per legni pesanti e compatti come l'ulivo, il bosso e il pero (Giordano, 1951).

Inoltre il legno è un materiale **igroscopico** nel quale molecole di acqua provenienti dall'aria possono variamente legarsi o depositarsi nella o sulla sostanza legnosa delle pareti cellulari. Il peso di questa "acqua igroscopica" (cioè dell'**acqua di saturazione** di Giordano (1951) e Cividini (1983), del *bound water* di Siau (1995), del *Quellungswasser* di Vorreiter [1949]), rapportato a quello della sostanza legnosa anidra, può variare tra quasi lo 0% (che si verifica solo nel legno completamente essiccato in laboratorio) e un valore ampiamente oscillante, per i diversi legni, attorno ad una media di 30%, che viene raggiunta al cosiddetto "punto di saturazione delle fibre", al quale le pareti cellulari (cioè la

¹ Per i combustibili liquidi il riferimento viene talvolta fatto all'unità volumica del litro. Il riferimento a un volume viene spesso fatto anche per il legno; viene cioè impiegato (raramente) il m³ massiccio e, piuttosto spesso e a ragione, un metro stereo, delle cui diverse "forme" si dirà alla nota 28.

² Per il legno anidro la differenza fra il potere calorifico inferiore e quello superiore è data dall'energia termica necessaria per evaporare l'acqua (2,44 MJ/kgH₂O) che, durante la combustione, si forma nell'ossidazione dell'idrogeno contenuto nella sostanza legnosa anidra. Ammettendo per il contenuto di idrogeno del legno anidro un valore medio del 6%, la differenza tra i due poteri calorifici ammonta a circa 1,32 MJ per kg di densromassa anidra (DA), come risulta dal seguente calcolo $0,06 \text{ kgH/kgDA} \times 9 \text{ g molH}_2\text{O/g molH} \times 2,44 \text{ MJ/kgH}_2\text{O}$.

³ In proposito però si annota che quando nei grandi moderni impianti di termoconversione buona parte dell'energia di evaporazione dell'acqua viene recuperata per ricondensazione del vapore degli effluenti esausti, il potere calorifico effettivo si avvicina a quello superiore.

sostanza legnosa del corpo legnoso) sono completamente saturate da H₂O⁽⁴⁾. La quantità di acqua igroscopica contenuta nelle fibre di un corpo legnoso non in contatto (continuo o intermittente) con acqua allo stato liquido dipende dal grado di umidità e dalla temperatura dell'ambiente in cui si trova e cambia al variare di questi due parametri⁵.

Se un legno saturato di H₂O nelle fibre viene a contatto con acqua allo stato liquido, o vi viene immerso, acqua in forma liquida penetra nel corpo legnoso e si deposita nelle cavità cellulari dove forma la cosiddetta "acqua libera" o **acqua di imbibizione** (il *free water* o *capillary water* di Siau)⁶. Nel legno sommerso questa imbibizione prosegue fino al punto di "imbibizione totale" al quale nel corpo legnoso non vi è più spazio né per aria né per ulteriore acqua igroscopica o libera. Già prima di raggiungere questo punto di imbibizione totale il corpo legnoso cessa di galleggiare sull'acqua⁷, giacché il peso specifico della sostanza legnosa saturata di acqua è superiore all'unità.

Per indicare il **tenore idrico** del legno, generalmente esprimendolo in termini percentuali, esistono due criteri e cioè:

- il criterio scientifico e di laboratorio che determina l'**umidità sul secco**, calcolandola secondo la formula:

$$u = [(\text{peso umido} - \text{peso anidro}) : \text{peso anidro}] \times 100 = [(P_u - P_0) : P_0] \times 100 \quad (8) \quad (1)$$

- il criterio pratico e del commercio che invece calcola l'**umidità sull'umido** (o "umidità del tal quale") come:

$$w = [(\text{peso umido} - \text{peso anidro}) : \text{peso umido}] \times 100 = [(P_u - P_0) : P_u] \times 100 \quad (9) \quad (2)$$

Per il passaggio da una misura del tenore idrico all'altra risultano pratiche le formule riportate da Jonas e Haneder (2001), e cioè:

$$w = (100 \times u) : (100 + u) \quad (3)$$

e

$$u = (100 \times w) : (100 - w) \quad (10) \quad (4)$$

⁴ Invece di acqua, o di molecole di acqua, si impiega qui il simbolo H₂O quando l'acqua non è (o non è in larga misura) allo stato aggregato di liquido. Lo stesso simbolo viene pure impiegato per esprimere l'insieme dell'acqua di saturazione e acqua di imbibizione.

⁵ Se in un albergo di una stazione idrotermale una scopa viene portata da una camera nel locale-piscina, dopo un certo tempo, senza che avvenga alcun contatto con acqua allo stato liquido, la quantità di H₂O contenuta nel suo manico raddoppierà. Gettato nella piscina questo manico di scopa, anche se completamente "saturato" di acqua nelle pareti cellulari, però non affonda.

⁶ Se invece il legno che viene a contatto con acqua allo stato liquido non è completamente saturato di H₂O nelle fibre, questa saturazione completa avviene presto a spese delle prime frazioni di acqua libera che penetrano nel corpo legnoso o ne lambiscono la superficie.

⁷ Questo affondamento nell'acqua si può agevolmente osservare per rametti freschi e scortecciati di diverse specie legnose in vari momenti dell'anno e talvolta anche del giorno.

⁸ Il simbolo u, per l'"umidità sul secco", è impiegato nel contesto di molte lingue, prendendo, ad esempio, la denominazione di *humidity* o *moisture* in inglese e *Feuchtigkeit* in tedesco.

⁹ Per evitare confusioni tra i simboli, per l'**umidità sul tal quale** si impiega qui il simbolo w (dal *Wassergehalt*, letteralmente contenuto idrico, del tedesco) invece dell' 'u' impiegato da Giordano. Nella versione italiana di un regolamento merceologico svizzero (www.holzenergie.ch) il contenuto idrico, siglato w nella versione tedesca, è indicato con a (= acqua). Nelle specifiche del Comitato Termotecnico Italiano www.cti2000.it è impiegata invece la lettera M, verosimilmente da *moisture*.

¹⁰ Per evitare confusioni anche sul piano lessicale sarebbe opportuno adottare la convenzione di chiamare **umidità** l'umidità sul secco (u) e **contenuto idrico** l'umidità sul tal quale (w). Come dizione generica e ambivalente si potrebbe invece impiegare il termine **tenore idrico**. Alla locuzione "legno umido" va invece riservato il significato generico di "legno non allo stato anidro", ricordando che quest'ultimo non esiste in ordinarie condizioni ambientali.

Dalle equazioni (1) e (2) si ricavano agevolmente anche le seguenti 2 coppie di espressioni ausiliarie

$$\begin{aligned} P_u &= P_0 \times [1 + (u : 100)] \\ P_0 &= P_u : [1 + (u : 100)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_u &= P_0 : [1 - (w : 100)] \\ P_0 &= P_u \times [1 - (w : 100)] \end{aligned}$$

che possono servire per la trasformazione dei due pesi base con ricorso alle due espressioni (u e w) del tenore idrico¹¹.

La quantità massima di H₂O contenibile nel legno (generalmente detta “umidità massima” e indicata con u_{max}), cioè quella che viene raggiunta al punto di imbibizione totale, è quasi sempre discretamente o notevolmente superiore a quella dello “stato fresco”. Essa varia molto tra le diverse specie legnose in relazione alla porosità (pr) del loro legno, la quale, a sua volta, dipende dal peso specifico (apparente) allo stato anidro (ρ_0), al quale è legata dalla relazione $pr = 1 - (\rho_0 : 1,53)$. Verso gli estremi di questo ampio campo di variazione si può trovare, da un lato, un legno molto pesante come quello del cerro (con $\rho_0 = 0,85 \text{ g/cm}^3$) per il quale u_{max} è pari a 81% e, dall’altro lato, un legno molto leggero come il pioppo con $\rho_0 = 0,34 \text{ g/cm}^3$) nel quale u_{max} raggiunge quota 257%.

1.1 Il potere calorifico ponderale

Se viene riferito all’unità di peso, il potere calorifico inferiore del legno delle diverse specie, a parità di umidità, varia relativamente poco, come si può rilevare dalla tabella 1, nella quale, attingendo dal testo di Kollmann (1951), si sono riportati in forma riassuntiva i valori del potere calorifico inferiore allo stato anidro della legna da ardere di 21 specie arboree. Da questi valori si può desumere che nell’ambito dei due gruppi di essenze (latifoglie e conifere) il *range* di escursione del potere calorifico è relativamente modesto e ammonta a circa 10% della media per le latifoglie e a circa 6% per le conifere fra le quali però mancano il pino nero e le nostre conifere mediterranee¹², per le quali Trabaud (1986) riporta alcuni valori notevolmente elevati, che vanno fino a 21,5 MJ/kg per il pino d’Aleppo. Il *range* complessivo, oltre 3 MJ/kg, corrispondente a circa il 16% della verosimile media generale, è, in concreto, più ampio di quanto spesso ritenuto.

Tabella 1. Poteri calorifici inferiori allo stato anidro, in MJ/kg, per la legna da ardere (spacconi e tondelli) delle più importanti specie arboree europee o coltivate in Europa. Da Kollmann (1951).

Latifoglie		Olmo	18,47
Salice bianco	17,06	Tiglio	18,70
Ontano bianco	17,29	Castagno	18,81
Carpino bianco	17,29	Robinia	18,93
Pioppo nero	17,58		
Cerro	17,62	Conifere	
Acero	17,74	Larice	19,04
Ontano nero	17,99	Douglasia	19,15
Quercia	18,04	Abete bianco	19,19
Frassino	18,09	Abete rosso	19,32
Betulla	18,11	Pino silvestre	19,47
Faggio	18,34	Pino strobo	20,28

NOTA Le denominazioni non specifiche (Acero, Quercia e Olmo) sono trascritte come riportate da Kollmann.

Fra i valori più recenti si possono ricordare quelli riportati nell’eccellente rapporto bavarese sui combustibili solidi biogeni (dedicato però principalmente alle specie erbacee) redatto da Hartmann, Böhn e Maier nel 2000, che qui si riproducono nella tabella 2.

¹¹ La massa di un campione di legno contenente H₂O viene universalmente indicata con P_u , simbolo nel quale u ha il significato di “umidità sul secco”. Altrettanto universale è la sigla P_0 per indicare il peso allo stato anidro.

¹² Per quanto riguarda la gerarchia dei valori del potere calorifico del legno anidro si può anche citare quella un po’ diversa riportata in forma di istogramma non quotato da Jonas e Haneder (2001), per i quali i legni meno calorifici sono il carpino, i pioppi e i salici, mentre fra i più energetici spiccano l’abete bianco, il pino silvestre e la betulla.

Tabella 2. Potere calorifico inferiore, in MJ/kg, del legno anidro di specie impiegate in Germania dalla selvicoltura ordinaria e accelerata.

Conifere in generale	18,84	Legno di quercia con corteccia	18,22
Latifoglie in generale	18,41	Pioppo da <i>short rotation forestry</i>	18,47
Legno di abete rosso con corteccia	18,82	Salice da <i>short rotation forestry</i>	18,39
Legno di pino silvestre con corteccia	18,23	Corteccia di conifera	19,24
Legno di faggio con corteccia	18,42		

Le differenze riscontrabili fra il potere calorifico del legno delle varie specie sono imputabili alla composizione della sostanza legnosa giacché la lignina ha un potere calorifico (circa 25,5 MJ/kg) notevolmente più elevato della cellulosa (circa 17,8 MJ/kg) e quello delle resine (35-38 MJ/kg), dei lipidi, delle cere e delle gomme è ancora maggiore; prive di potere calorifico possono invece essere considerate le "sostanze minerali"¹³. Una certa influenza deriva anche, come già segnalato, dalla (leggera) variabilità del contenuto di idrogeno della sostanza legnosa anidra (vedi nota 2). Nessuna influenza è invece esercitata dalla massa volumica allo stato anidro (ρ_0)

A causa della moderata variabilità del potere calorifico allo stato anidro del legno delle diverse specie e anche per il frequente impiego di mescolanze non chiaramente definite, per vari calcoli e/o argomentazioni, diversi Autori operano sulla base di valori medi generalizzati.

Così, ad esempio, Jonas e Haneder (2001) ritengono ammissibile un potere calorifico medio di circa 18,85 MJ/kg per il **legno anidro**, mentre Hartmann *et al.* (2000) impiegano un valore di 18,5 MJ/kg. Molto simili sono anche i valori medi riportati dal Kollmann (1951) per la legna da ardere (considerata anidra) in spacconi e tondelli (*Scheiter und Prügel*): 18,08 MJ/kg per le latifoglie e 19,32 MJ/kg per le conifere¹⁴, con media generale (aritmetica) di 18,7 MJ/kg. Un po' più bassi sono invece i valori medi calcolati nel 1951 da Giordano - indimenticato Maestro italiano della tecnologia del legno - che, rapportati allo stato anidro e espressi in Joule, risultano di circa 17,3 MJ/kg per le latifoglie e 18,4 MJ/kg per le resinose.

Per il **legno umido** il potere calorifico inferiore, come già detto, dipende fortemente dal contenuto idrico, perché nel bilancio energetico della combustione l'evaporazione di 1 kg di acqua "consuma" 2,44 MJ.

Associando questa variazione del potere calorifico in funzione del contenuto idrico alla sua relativa uniformità nell'ambito delle diverse specie legnose, sono state elaborate varie formule per un calcolo approssimato del potere calorifico dell'unità di peso di un generico legno (o miscuglio di legni con o senza corteccia) con un dato contenuto idrico.

Fra queste formule la più spesso ricordata è quella riportata da Hartmann *et al.* (2000) nella forma di:

$$pci_w = [18,5 \times (100 - w) - (2,44 \times w)] : 100 \quad (15) \quad (5)$$

in cui è :

pci_w = potere calorifico inferiore, in MJ/kg, di un generico legno con contenuto idrico w ;

18,5 (MJ/kg) = potere calorifico inferiore medio ammesso per il legno anidro¹⁶;

2,44 (MJ/kg) = calore di evaporazione dell'acqua;

w = contenuto idrico percentuale del legno calcolato con le formule (2) o (3)¹⁷.

¹³ A titolo esemplificativo si riportano qui le percentuali (sul secco) di lignina, resine e ceneri segnalate da Vorreiter (1949) per l'abete rosso e il faggio, che sono, nell'ordine 28% - 1,6% - 0,37% e 23% - 0,4% - 0,75%.

¹⁴ Questi valori, con 18,1 e 19,3 MJ/kg, sono stati più recentemente confermati da Frühwald *et al.* (1997).

¹⁵ Nonostante il fatto che la variabile indipendente sia formalmente w , quella dipendente viene spesso scritta con pci_w .

¹⁶ Essendo la (5) un'espressione particolare di una formula generale basata su un valore del potere calorifico anidro di un legno (o di un gruppo di legni), essa può venire applicata anche per singole specie per le quali si conosce un fidabile valore del potere calorifico anidro (sul tipo dei valori di tabella 1 e 2) oppure anche, per la generalità del legno, con un valore medio diverso da 18,5 MJ/kg.

¹⁷ Per calcoli rapidi, dalla (5), eliminando le parentesi, si ottiene la più agile espressione $pci_w = 18,5 - 0,2094w$.

Da questa formula che già considera intrinsecamente il calore di evaporazione dell'acqua derivante dalla bioossidazione dell'idrogeno contenuto nella sostanza legnosa anidra (circa 6%), si può agevolmente rilevare che:

- conoscendo per il legno (o per un legno) il potere calorifico inferiore allo stato anidro, quello corrispondente ad un'altra condizione idrica dipende solo da w;
- l'aumento del contenuto idrico (w) di 1 punto percentuale comporta un calo del potere calorifico uguale a circa 0,21 MJ/kg, corrispondente a circa 1,13% del potere calorifico allo stato anidro;
- il calo del potere calorifico al crescere di w è imputabile solo per il 12,4% all'aumento della spesa energetica per l'evaporazione dell'H₂O, mentre il restante 87,6% è dovuto alla diminuzione dell'aliquota di dendromassa anidra presente nel chilogrammo di legno umido;
- il potere calorifico di un legno con pci anidro uguale a 18,5 MJ/kg si annulla ad un contenuto idrico (w) pari a circa 88,35%, che corrisponde a un'umidità sul secco (u) uguale a 758%, valore quasi triplo di quello massimamente conseguibile dal più leggero dei legni nostrani¹⁸.

Per fornire un quadro facilmente percettibile della variazione (assoluta e relativa) del potere calorifico di un generico legno (con pci anidro uguale a 18,5 MJ/kg) all'aumentare del contenuto idrico, si è compilata la tabella 3 dalla quale, ad esempio, si può rilevare che il calo dell'umidità (sul secco) dal 100% (facilmente riscontrabile nei legni leggeri allo stato fresco) fino al 18% (media per legna ben stagionata in legnaia) fa aumentare il potere calorifico del 91%.

Tabella 3. Variazione del potere calorifico inferiore del legno (MJ/kg) in funzione dell'umidità sul secco (u) e del contenuto idrico (w), calcolato in base alla (5).

u	0	12	18	25	35	50	75	100	150
w	0	10,71	15,25	20,00	25,92	33,33	42,86	50,0	60,0
pci	18,50	16,26	15,31	14,31	13,07	11,52	9,53	8,03	5,94
pci (rel)	1,00	0,88	0,83	0,77	0,71	0,62	0,52	0,43	0,32
pci (rel)	1,14	1,00	0,94	0,88	0,80	0,71	0,59	0,49	0,37
pci (rel)	1,21	1,06	1,00	0,93	0,85	0,75	0,62	0,52	0,39
pci (rel)	1,29	1,14	1,07	1,00	0,91	0,81	0,67	0,56	0,42

Per la (5) ovviamente si può anche eseguire un rovesciamento delle variabili ottenendo l'espressione:

$$w = 100 \times (18,5 - pci_w) : 20,94 = (18,5 - pci_w) \times 4,7755 \quad (5a)$$

Questa nuova formula, tra l'altro, può essere utile per farsi un'idea del contenuto idrico di un legno del quale è reso noto il potere calorifico senza indicazione del suo tenore idrico. In questo senso si può, ad esempio, calcolare che al valore di 2.500 kcal/kg (= 10,45 MJ/kg) attribuito al legno nel bilancio energetico nazionale corrisponde grosso modo un contenuto idrico (w) uguale al 38,4%, ovvero un'umidità (u) pari al 62,5%.

Più in generale, con la (5a) si sono calcolati i valori di w e di u corrispondenti ai poteri calorifici "tondi" riportati nella prima riga della tabella 4.

Tabella 4. Umidità (u) e contenuto idrico (w) corrispondenti a determinati valori di potere calorifico inferiore espresso in MJ/kg.

pci	16	14	12	10	8	6	4	2	0
w	11,94	21,49	31,04	40,59	50,14	59,69	69,25	78,80	88,35
u	13,56	27,37	45,01	68,32	100,56	148,08	225,2	371,70	758,37

¹⁸ Se alla "prova del fuoco" eseguita all'aperto un qualsiasi nostro legno completamente imbibito d'acqua non brucia, ciò è dovuto al fatto che il calore che esso è in grado di sviluppare è solo in piccola parte utile all'induzione del processo di combustione. Gettato invece in una caldaia ardente un pezzo di questo legno inzuppato produrrà calore primario aggiuntivo.

Infine la (5), opportunamente trasformata, può anche servire per un grossolano esame di congruità dei valori di una coppia nota di potere calorifico (pci), espresso in MJ/kg, e contenuto idrico (w). Questo esame può venire eseguito con la seguente espressione

$$pci_0 = [(100 \times pci_w) + (2,44 \times w)] : (100 - w) \quad (5b)$$

che fornisce il potere calorifico anidro (pci_0) corrispondente alla coppia dei valori noti.

Il risultato dell'esame può essere considerato positivo se il calcolato valore di pci_0 si colloca entro la forcilla 16,5-20.5 MJ/kg¹⁹.

1.2 Il potere calorifico volumetrico

Come già detto, il potere calorifico del legno, oltre che al peso, può anche venire riferito al volume. Si ottiene così il potere calorifico volumetrico nel cui ambito, a seconda del tipo di volume considerato (metro cubo massiccio [m^3] o metro stereo [mst]), si distingue fra potere calorifico volumetrico massiccio (PCVM), esprimibile in MJ/ m^3 , MWh/ m^3 o Mcal/ m^3 , e potere calorifico volumetrico sterico (PCVS), esprimibile in MJ/ mst , MWh/ mst o Mcal/ mst .

Il **potere calorifico volumetrico massiccio**, generalmente misurato in MJ/ m^3 , è dato dal prodotto del potere calorifico ponderale (pci) e della massa volumica (ρ) del medesimo campione di conosciuto stato idrico (w ed u)²⁰. Esso, qui siglato con PCVM viene perciò calcolato secondo la formula

$$PCVM_w = pci_w \times \rho_u \quad (6)$$

con pci_w calcolato con la (5) e ρ_u uguale a:

$$\rho_0 \times [1 + (u : 100)] : [1 + (\alpha_v : 100)] \quad (7)$$

per umidità superiori a 30%;

$$\rho_0 \times [1 + (u : 100)] : [1 + (u : 100) \times (\alpha_v : 30)] \quad (7a)$$

per u minore di 30%⁽²²⁾.

Dato che, come si può agevolmente osservare nelle prime tre colonne della tabella 5, la massa volumica del legno delle diverse specie, a parità di stato idrico, può variare fortemente, anche il potere calorifico cubico subisce una variabilità molto simile. Così, riferendosi ai valori della tabella 1 e della seconda e quinta colonna di tabella 5 nonché alle formule (7) e (7a), si può calcolare - rispettivamente per l'abete rosso, il castagno e il faggio - i seguenti poteri calorifici volumetrici massicci:

- per legno anidro ($w = u = 0$) : 8.300; 11.100; 12.500 MJ/ m^3 ;
- per legno stagionato ($w = 15\%$; $u = 18\%$): 7.500; 9.300; 10.800 MJ/ m^3 ;
- per legno molto umido ($w = 50\%$; $u = 100\%$): 6.400; 7.800; 9.300 MJ/ m^3 .

¹⁹ Valori che fuoriescono leggermente da questa forcilla non sono automaticamente da considerare dovuti a "errore di coppia", ma - in prima battuta - bisognosi di razionale motivazione (specie legnosa, rapporto atipico tra legno primaverile e tardivo, legno di reazione, forte presenza di resina, ecc.).

²⁰ Senza entrare nei particolari si ricorda che la massa volumica di un legno (detta anche peso specifico apparente) è data dal rapporto fra il peso e il volume di un campione di legno, entrambi determinati per lo stesso stato idrico. Per un campione con contenuto idrico w è perciò $r_w = P_w : V_w$.

²¹ Del significato e del ruolo di a_v (rigonfiamento volumetrico totale percentuale) si dirà più avanti.

²² A proposito di queste due formule si annota sin da ora che ambedue risentono della variabilità intraspecifica dei parametri r_0 e a_v , e che la seconda risente anche del fatto che in concreto l'umidità al punto di saturazione delle fibre (al quale cessa il rigonfiamento) si verifica, per le singole specie, a valori che possono anche discostarsi sensibilmente dal 30%. Comunque, in ambedue le formule e specialmente nella prima "a fare la musica", a parità di tenore idrico, è chiaramente la massa volumica.

Per il legno da energia il potere calorifico volumetrico massiccio trova scarso impiego soprattutto per le seguenti ragioni:

- il metro cubo di legno massiccio (qui siglato come m^3) trova solo raramente impiego nel commercio del legno da energia²³ e nelle considerazioni sul suo impiego;
- la sua determinazione per i diversi assortimenti del legno da energia è, a seconda dei tipi, di laboriosa, difficile o praticamente impossibile esecuzione²⁴.

Ciò nonostante si ritiene che nell'architettura di questo studio non sia ragionevole escludere totalmente questo parametro e perciò si è proceduto alla compilazione della tabella 5 (i cui valori, ripresi da autorevoli testi di tecnologia del legno, servono anche nel contesto del potere calorifico volumetrico sterico) e della tabella 6, dai cui valori ci si può fare un'idea del potere calorifico volumetrico massiccio di tre legni per quattro percentuali di umidità.

Tabella 5. Valori di massa volumica, rigonfiamento e ritiro volumetrico totale percentuale per alcune specie legnose.

Specie legnose	Parametro e fonte						
	ρ_{12} G	ρ_0 Tr	ρ_0 Ts	α_v G	β_v Tr	β_v Ts	db Tr
Abete bianco	0,44	0,41	0,44	11,0	11,5	11,7	363
Abete rosso	0,42	0,43	0,44	12,7	11,9	12,0	379
Larice	0,63	0,55	0,60	13,8	11,4	11,8	487
Pino silvestre	0,51	0,49	0,53	13,0	12,1	12,4	431
Pino nero	0,52		0,55	12,4		12,5	
P. domestico	0,56			10,8			
Pino laricio	0,56			13,3			
Pino strobo		0,37			8,5		339
Acerò r. e m.	0,65	0,59			11,5		522
Betulla	0,63	0,61	0,73		13,7	14,2	526
Carpino bianco	0,78	0,79	0,82		18,8	19,7	641
Castagno	0,56	0,59	0,61	11,2	11,3	11,6	523
Cerro	0,87			19,2			
Faggio	0,73	0,68	0,74	17,0	17,9	17,6	558
Frassino	0,70	0,65	0,70	14,0	13,2	14,0	564
Olmo	0,60	0,64			13,2		556
Ontano b.	0,50						
Ontano nap.				12,0			
Ontano nero	0,54	0,49	0,55	11,4	12,6	12,6	428
Pioppo nero	0,48	0,43			13,7		371
Pioppo l-124	0,38		0,34	9,8		9,7	
Platano	0,67		0,63			13,7	
Robinia	0,77	0,73	0,76	10,8	11,4	10,8	647
Rovere	0,74	0,65		13,2	12,2		571
Salice	0,43	0,52	0,52		11,2	11,5	462
Salice bianco					9,6		

FONTI: G = Giordano G.; Tr = Trendelenburg R.; Ts = Tsoumis G.

L'argomento del poter calorifico volumetrico massiccio è reso complesso dal fatto che al variare (entro certi limiti) dell'umidità, assieme al peso del corpo legnoso varia pure il suo volume. Infatti, come già detto, l'aumento di acqua igroscopica nel legno determina un aumento dimensionale del

²³ Uno dei casi in cui il parametro di riferimento commerciale è il metro cubo massiccio (Festmeter) è quello del tondo di scarto o di piccole dimensioni che viene acquistato per essere spaccato o cippato.

²⁴ Le difficoltà crescono con il grado di frammentazione o sminuzzamento del legno e l'impossibilità della determinazione sul tal quale si raggiunge per il polverino.

corpo legnoso (detto rigonfiamento) specie nelle direzioni tangenziale e radiale²⁵, mentre, invece, l'aumento dell'acqua di imbibizione non induce variazioni del volume del legno²⁶.

Se non viene (o non può venire) determinato sperimentalmente, il potere calorifico massiccio di un determinato quantitativo di legno di conosciuto tenore idrico può venire calcolato, con la (7) o la (7a) ricorrendo ai valori di ρ_0 , α_v (o β_v) riportati nelle tabelle 1 e 5.

Il risultato di un siffatto calcolo sarà comunque sempre affetto da una discreta incertezza della cui misura concreta ci si può formare un'idea osservando le terne di valori nelle tre sezioni di tabella 6 che, per uno stesso valore di potere calorifico ponderale (ripreso da tabella 1) riportano il PCVM calcolato con i valori di ρ_0 e α_v ripresi da tre autori diversi.

Tabella 6. Valore di potere calorifico volumetrico massiccio, a diverse umidità, espresso in MJ/m³, calcolati con parametri ripresi della tabella 1 e 5.

Umidità	Faggio			Carpino			Abete rosso		
	G	Tr	Ts	G	Tr	Ts	G	Tr	Ts
18%	11.859	10.763	11.744	9.642	10.074	10.386	7.370	7.511	7.678
25%	11.334	10.200	11.166	9.325	9.709	10.011	7.105	7.228	7.390
50%	10.682	9.558	10.436	8.859	9.209	9.488	6.746	6.858	7.011
100%	9.921	8.877	9.692	8.244	8.570	8.829	6.291	6.395	6.538

Fonti per ρ_0 , α_v e β_v : G = Giordano, Tr = Trendelenburg, TS = Tsoumis. Per ρ_0 , Kollmann.

1.3 Potere calorifico volumetrico sterico

Quando invece, come spesso accade, gli assortimenti di legno per energia (principalmente legna da ardere e cippato) vengono commercializzati a metro stero (mst), il potere calorifico volumetrico dei diversi assortimenti delle varie specie legnose, in questo caso da denominare **potere calorifico volumetrico sterico** (o, semplicemente, potere calorifico sterico), da siglare con PCVS (oppure PCS) e da esprimere in MJ/mst, può venire calcolato moltiplicando il potere calorifico volumetrico massiccio espresso dalla (6) per un appropriato coefficiente sterico (m³/mst) desunto dalla tabella 7 o da simili indicazioni reperite in letteratura²⁷.

Il risultato di un siffatto calcolo è però ancora più incerto di quello impiegato per i valori di tabella 6 perché dei quattro elementi coinvolti nell'operazione solo uno, cioè il tenore idrico, viene determinato per campionamento, mentre i rimanenti debbono venire ripresi - come valori medi - dalla letteratura e sono pertanto, nei riguardi del lotto concreto da valutare, affetti da un'incertezza che per qualche parametro può anche arrivare al 10-12%.

Tuttavia, per dovere di completezza, nella tabella 7 si riproducono i valori di coefficienti sterici medi di una tavola dell'ITABIA, ripresa da AEBIOM²⁸.

²⁵ Nel rigonfiamento del corpo legnoso, almeno nei legni delle nostre latitudini, l'aumento di peso è superiore all'aumento di volume, cosicché anche durante il rigonfiamento il suo peso specifico apparente crescerà all'aumentare del contenuto di acqua di saturazione. Nelle pareti cellulari, invece, l'aumento di volume è superiore all'aumento di peso e perciò il peso specifico della sostanza legnosa del corpo legnoso, che allo stato anidro è di circa 1,5 g/cm³, diminuisce al crescere dell'umidità nell'intervallo compreso tra 0 e circa 30%.

²⁶ Altrettanto, in senso inverso, vale ovviamente anche per le diminuzioni dell'acqua igroscopica; avviene cioè il ritiro del legno e diventa attivo il coefficiente di ritiro volumetrico totale percentuale $b_v = a_v [1 + (\alpha_v : 100)]$

²⁷ A proposito del metro stero si ricorda che esso può essere: "accatastato" (msa) per il tondello, "impilato" (msi) per la legna da stufa e riversato, o "alla rinfusa", (msr) per la legna da stufa, il frantumato, il cippato e la segatura. Per i riferimenti al volume il C.T.I. impiega la dizione "densità energetica" (p. es. per il cippato: "kWh/m³ sfuso").

²⁸ Si annota che i coefficienti di accatastamento (impiegati per la catasta boschiva) e di impilamento (impiegati per la legna da stufa) - a parità di specie legnosa, forma di governo, caratteristiche stagionali e sezioni della legna - crescono al diminuire della lunghezza dei pezzi. Crescono pure al diminuire del contenuto idrico, ovvero del grado di stagionatura; perciò le cataste boschive di legna fresca vanno allestite con un'altezza superiore del 5% del valore nominale. Per i tratti accatastati in croce, tale altezza supplementare deve essere invece del 15%.

Tabella 7. Corrispondenze fra diverse misure volumetriche del legno. Da ITABIA.

	1m ³ tronchi	1m stero ciocchi 1 m accatastati	1m stero legna da stufa impilati	1 m stero legna da stufa alla rinfusa	1 m stero cippato <30 mm	1 m stero cippato 30-150 mm
1 m ³ tondo massiccio	1	1,40	1,20	2,00	2,50	3,00
1 m stero di ciocchi da 1 m accatastati	0,70	1	0,85	1,40	1,80	2,15
1 m stero di legna da stufa impilata	0,85	1,20	1	1,67	2,00	2,50
1 m stero di legna da stufa alla rinfusa (*)	0,50	0,70	0,60	1	1,25	1,50
1 m stero di cippato < 30 mm	0,40	0,55	0,50	0,80	1	1,20
1 m stero di cippato 30-50 mm	0,33	0,47	0,40	0,67	0,85	1

(*)Per le usuali confezioni parallelepipedo su pallet i coefficienti sono da diminuire perché ai vuoti "longitudinali" (che diminuiscono con la lunghezza dei pezzi) si aggiungono quelli "trasversali" che forzatamente si formano se più "pile" vengono affiancate nella confezione.

Nello stesso opuscolo dell'ITABIA, segnalato in bibliografia, in un'illustrazione, è pure riportato un coefficiente di 0,2 per i trucioli di pialla e di 0,59 per refili e sciaveri impacchettati. Baldini *et al.* (1999) riportano invece i seguenti coefficienti riferiti a materiale caricato su automezzo: 0,6 - 0,7 per "tronchetti da cartiera", 0,4 per "scaglie", 0,35 - 0,40 per "piante intere e sezionate" e 0,15 - 0,20 per "ramaglia e cimali". A proposito dell'"assortimento da metro" della tabella, genericamente detto "ciocchi" e verosimilmente comprendente tondelli e/o spacconi, si ricorda che Kollmann (1955) distingueva tra spacconi (*Scheiter*) con 0,7 m³/msa e tondelli con D>7cm (*Knüppel* e *Prügel*) con 0,65 m³/msa; inoltre riportava un coefficiente per il tondello minuto con 7<D<4 (*Reiserknüppel*) con 0,5 e per la ramaglia (*Astreisig*) con 0,2⁽²⁹⁾.

Per i classici assortimenti boschivi, oggi non più frequenti in Italia, Vorreiter (1949) riporta i coefficienti sterici riassunti nella Tabella 7 bis.

Tabella 7 bis. Coefficienti sterici per tondelli e spacconi di 1 metro di lunghezza. Da Vorreiter (1949)

Assortimento	Latifoglie			Conifere			Latifoglie + Conifere		
	d cm	DL m ³ /mst	SG m ³ /mst	d cm	DL m ³ /mst	SG m ³ /mst	d cm	DL m ³ /mst	SG m ³ /mst
Tondelli	7-10	0,63	0,57	7-10	0,67	0,64			
"	10-14	0,70	0,64	10-14	0,73	0,67			
"	14-18	0,75		14-18	0,78				
"	18-30	0,78		18-30	0,82				
Squartoni							10	0,68	
"							14-30	0,72	0,66
"							>30	0,75	0,69

Nota: d = diametro, DL = drittili e lisci, SG = sghembi e gropposi. Per elementi di 2 o 3 metri i coefficienti si riducono, rispettivamente, di 3-4% e di 6-7% per il tipo DL e notevolmente di più per il tipo SG.

²⁹ Fra gli altri assortimenti sono segnalati gli sciaveri (con 0,55), la segatura riversata (con 0,32) e i trucioli di pialla (con 0,2). Questi valori sono sostanzialmente confermati da Jonas e Haneder (2001) che, rispettivamente, riportano 0,65 (materiale legato in fasci), 0,33 e 0,2; inoltre aggiungono un coefficiente di 0,33 m³/msr per il cippato medio di segheria.

Vista la sopra accennata notevole insicurezza dei valori del potere calorifico sterico ottenuti per mezzo di calcoli basati su parametri di letteratura, negli impianti di una certa dimensione vengono impiegati procedimenti più diretti basati:

- sulla densità sterica (= peso, in kg, di 1 metro stero) del prodotto determinata sulla "fornitura" (ad esempio, carico di un autotreno) o su ampi campioni (se si tratta di materiale stoccato), e
- sul contenuto idrico determinato su un ben assortito campione minore con essiccamento in stufa se si tratta di legna massiccia oppure anche con dendroigrometri nel caso del cippato, della segatura o dei trucioli di pialla, limitando così i valori "esterni" al solo potere calorifico allo stato anidro (MJ/kg) desunto da valori di letteratura (sull'esempio di quelli di tabella 1)³⁰ o, se il materiale è sempre della stessa specie (o mescolanza) e provenienza, da sufficienti prove "di tanto in tanto" con bombe calorimetriche.

Il calcolo, con risultato espresso in MJ/mst, si limita all'esecuzione del prodotto della densità sterica (kg/mst) accertata per il potere calorifico allo stato igrico rilevato (MJ/kg) calcolato con la formula (5) o con la formuletta della nota 17.

Esempi di poteri calorifici sterici d'Oltralpe sono riportati nelle tabelle 8 e 9 che qui seguono.

Tabella 8 . Contenuto energetico di 1 metro stero accatastato (msa)³¹ di legna con w = 20%. Ripreso da Glettler (1999)³².

Pioppo	3.990 MJ/msa	Acero	6.020 MJ/msa
Abete rosso	4.670 MJ/msa	Betulla	6.510 MJ/msa
Abete bianco	4.920 MJ/msa	Faggio	6.650 MJ/msa
Ontano	5.030 MJ/msa	Frassino	6.720 MJ/msa
Salice	5.180 MJ/msa	Quercia	6.790 MJ/msa
Pino silvestre	5.640 MJ/msa	Robinia	7.330 MJ/msa
Larice	6.000 MJ/msa		

Tabella 9. Massa sterica (kg/mst) e contenuto energetico (MJ/mst) per diversi assortimenti da energia di legno stagionato di faggio (u = 15% e pci = 15,88 MJ/kg) e di abete bianco (u = 15% e pci = 15,05 MJ/kg). Da Kollmann, secondo Schläpfer.

Assortimento	Faggio		Abete bianco	
	m. sterica kg/mst	cont. energ. MJ/mst	m. sterica kg/mst	cont. energ. MJ/ mst
Spacconi da 1 m	480-550	7230-8280	330-400	5220-6350
Spacconi da 0,5 m	480-550	7230-8280	330-400	5220-6350
Tondelli	370-420	5560-6910	300-350	4770-5560
legno in sacco	250-300	3760-4510	200-240	3180-3970
Ramaglia fina	300-450	4510-5270	230-280	3660-4450

Nella filiera bosco-energia la conoscenza del potere calorifico sterico, che dovrebbe essere sempre accompagnata dal valore dell'umidità media del materiale, non interessa solo come unità di misura commerciale dell'energia, ma anche per altri motivi legati specialmente alla logistica. Così, per

³⁰ A proposito dei poteri calorifici riportati in letteratura è da segnalare che essi sono sempre riferiti al legno e perciò non considerano quello della corteccia (spesso un po' superiore) che è sempre compresa nei due assortimenti principali (legna da ardere e cippato di bosco) dalla dendromassa da energia.

³¹ Per "metro stero accatastato", detto anche "metro cubo accatastato", si intende il volume involuppo della legna accatastata, cioè un volume formale che comprende anche i "vuoti" che nell'accatastamento si formano tra i singoli tondelli e/o spacconi.

³² Valori identici, per un numero inferiore di specie sono riportati anche in Jonas e Haneder (2001) che, per ogni specie aggiungono pure il fabbisogno annuo di una villetta con carico calorico di 10 kW (e con specifiche caratteristiche dell'impianto di riscaldamento e del suo impiego) che va approssimativamente dai 10 msa della robinia fino ai 15 msa dell'abete rosso e corrisponde a circa 2.000 litri di olio combustibile. Dato che gli Autori segnalano che i valori sono "appoggiati" alla normativa austriaca ÖNORM 7132, potrebbe anche trattarsi di poteri calorifici "da garantire", il che spiegherebbe il loro ammontare piuttosto basso.

esempio, tanto sotto il profilo economico quanto sotto quello ambientale, non è certo privo di interesse sapere quanta acqua si trasporta con un carico di materiale legnoso o di quanto volume di silos, di magazzino o di cataste è necessario poter disporre per garantire la voluta erogazione di energia dall'impianto per un dato periodo di tempo.

Per rendersi conto che una siffatta indagine può anche riservare qualche sorpresa, nella tabella 10 si sono calcolati, per due diverse umidità di cippato di pioppo ($\rho_0 = 0,34 \text{ g/cm}^3$ $\alpha_v = 10\%$, pci anidro 17,3 MJ/kg e coefficiente sterico = $0,35 \text{ m}^3/\text{msr}$) e di faggio ($\rho_0 = 0,69 \text{ g/cm}^3$, $\alpha_v = 17\%$, pci anidro 18,4 MJ/kg e coefficiente sterico = $0,35 \text{ m}^3/\text{msr}$), i valori di massa volumica, peso della sostanza legnosa umida, peso dell'acqua, peso del legno umido e quantità di energia chimica contenuta in un metro stereo riversato di cippato.

Tabella 10. Contenuto di sostanza legnosa, acqua ed energia in 1 metro stereo riversato di cippato di pioppo e di faggio a diverse umidità³³.

Specie legnosa	Massa vol. kg/m ³		Sost. legn. kg/msr		Acqua kg/msr		Legno um. kg/msr		Cont. energ. MJ/msr	
	u30	u120	u30	u120	u30	u120	u30	u120	u30	u120
Pioppo	402	0,680	108	108	32	130	140	238	1.784	1.555
Faggio	767	1,002	206	206	62	145	268	351	3.642	3.446

Nei numeri di tabella 10 non è certo sorprendente che, a parità di umidità, un metro stereo di cippato di faggio pesi quasi il doppio di quello del pioppo, ma, per i non addetti ai lavori, può destare meraviglia che nell'ambito di una stessa specie l'energia contenuta nel metro stereo di cippato decresce solo molto leggermente al crescere sostanziale dell'umidità. In questo senso per il cippato di pioppo si può agevolmente osservare che nel passaggio da u30 a u120 il peso dell'acqua aumenta del 306%, mentre il contenuto energetico del metro stereo riversato diminuisce solo del 12,8%⁽³⁴⁾. Per il cippato di faggio, che passa da u30 a u70, all'aumento del peso dell'acqua di 134% corrisponde un calo del contenuto energetico pari solo a 5,4%³⁵.

Passando alla logistica del legno da energia (o, meglio, dell'energia da legno) bisogna anzitutto considerare i limiti di legge per la portata ponderale e volumetrica degli autoveicoli da trasporto. Facendo riferimento ad un camion con rimorchio con portata utile di 32 tonnellate e massimo volume di carico di 85 m³, dai numeri di tabella 10 si può calcolare che:

- nel trasporto di cippato fresco di pioppo (con u = 120% e massa sterica = 238 kg/msr) negli 85 m³ dei cassoni troveranno posto solo circa 20,2 t di scaglie e lo sfruttamento della portata ponderale sarà circa del 63%;
- se questo cippato invece è di media stagionatura (con u = 30% e massa sterica = 140 kg/msr) il peso delle scaglie stivabili si riduce addirittura a circa 11,9 t e la portata ponderale legale verrà sfruttata solo al 37%³⁶.

³³ I diversi parametri della tabella sono stati calcolati con le seguenti formule di calcolo sequenziale:

$$\begin{aligned} \text{kgSL/msr} &= r_o \cdot 1000 : [1 + (a_v : 100)] \cdot 0,35 \\ \text{kgH}_2\text{O/msr} &= r_o \cdot 1000 \cdot (u : 100) : [1 + (a_v : 100)] \cdot 0,35 \\ \text{kgLU/msr} &= r_o \cdot 1000 \cdot [1 + (u : 100)] : [1 + (a_v : 100)] \cdot 0,35 \\ \text{MJ/msr} &= \text{pci}_u \cdot \text{kgLU/msr}. \end{aligned}$$

³⁴ La spiegazione di questo apparente paradosso è da ricercare nella struttura dell'ultima formula della nota precedente il cui membro destro consiste nel prodotto di due funzioni di u che al variare di quest'ultimo si modificano in senso opposto quasi con la stessa intensità, fatto che, per il pioppo, nel passaggio da u30 a u120 all'aumento del 70% del peso umido si contrappongono un calo del 48,2% del potere calorifico.

³⁵ In proposito si annota che se per il faggio invece dell' $a_v = 17\%$ calcolato da Giordano si fosse adottato lo $a_v = 21,5\%$ riportato da Trendelenburg e da Tsoumis (vedi tabella 5), le due percentuali sarebbero rimaste le stesse.

³⁶ Ragionando su questi pochi numeri, per il materiale semistagionato risulta evidente un minor costo energetico (ed economico) del trasporto della tonnellata di cippato a pieno carico volumetrico, anche se tale riduzione è molto meno che proporzionale alla diminuzione del peso. Per quanto riguarda invece il basso sfruttamento della portata ponderale ammessa, risulta invece che converrebbe compattare il materiale (difficile per il cippato ma possibile per la segatura) non molto umido sul mezzo di trasporto (come una volta

Ciò significa che i bassi valori ponderali della massa sterica del cippato influiscono negativamente sui costi economici ed energetici del suo trasporto, nel cui contesto, indipendentemente dal peso del materiale trasportato, è ovviamente da computare anche il "trasporto" dell'automezzo come tale (12 tonnellate nel nostro caso), che, anche a vuoto, potrà consumare, in pianura, circa il 65% del consumo a pieno carico.

Sulla base di queste circostanze, ammettendo un consumo di gasolio (con potere calorifico di 36 MJ/litro) di 34 litri/100km per il pieno carico e di 22 litri/100 km per il viaggio a vuoto, si sono calcolati, per una distanza di trasporto di 100 km, i valori di tabella 11, fra i quali sono di particolare interesse i costi energetici assoluti e relativi dell'energia trasportata.

Tabella 11. Peso e quantità di energia del cippato trasportabile con un automezzo con portata volumica di 85 m³ (portata ponderale utile di 44 - 12 = 32 t) nonché consumo energetico assoluto e relativo per una distanza di trasporto di 100 km.

Argomento		Pioppo u=30%	Pioppo u=120%	Faggio u=30%	Faggio u=70%
Peso del carico di 85 metro steri	t	11,9	20,2	22,8	29,8
Sfruttamento della portata ponderale	%	37,2	63,1	71,2	93,1
Energia contenuta nel carico	MJ	151.640	132.175	309.570	292.910
Consumo assoluto di energia per 100 km A	MJ	954	1067	1102	1197
Consumo relativo di energia per 100 Km A	%	0,63	0,81	0,36	0,41
Consumo assoluto di energia per 100 km A+R	MJ	1746	1859	1894	1989
Consumo relativo di energia per 100 km A+R	%	1,15	1,41	0,61	0,68

Nota: (A) sta per sola andata e (A+R) per andata con ritorno a vuoto³⁷.

Dalla quinta riga di questa tabella emerge che il consumo energetico percentuale (100 J consumati/J trasportati), calcolato per la distanza standard di 100 km, considerando il solo viaggio di andata, varia tra un minimo di circa 0,36% per il cippato semistagionato di faggio (u = 30%) ad un massimo di circa 0,81% per il cippato fresco di pioppo (u = 120%), risultando così aumentato del 29% rispetto a quello dello stesso prodotto nella condizione idrica precedente (u = 20%). Inoltre si può anche osservare che questo costo energetico percentuale non varia eccessivamente con l'umidità del cippato, in quanto per il pioppo cala del 22% nel passaggio da u120 a u30, mentre per il faggio decresce del 12% nel passaggio da u70 a u30.

Se, invece, si considerasse l'energia corrispondente allo stato anidro, si potrebbe constatare che essa è uguale per carichi della stessa specie di diversa umidità (sempre 159 GJ/85msr per il pioppo e 322 GJ/85msr per il faggio), perché questi contengono lo stesso volume di cippato (85 msr di scaglie a fibre saturate, corrispondenti a 29,75 m³ di dendromassa non cippata) e perciò anche la stessa quantità di sostanza legnosa (anidra)³⁸. Il costo energetico percentuale del trasporto di energia teorica netta, a causa della differente quantità di acqua da trasportare, sarebbe diverso e ammonterebbe, per i 100 km solo andata, a 0,60% per il pioppo u30 e a 0,67% per il pioppo u120.

Tornando nuovamente un attimo al peso o al volume del possibile carico dell'autotreno considerato, si può ancora aggiungere che la portata ponderale del mezzo verrebbe integralmente sfruttata se venisse trasportata alla rinfusa legna da stufa semistagionata di faggio (u = 30%, $\rho_{30} = 0,77 \text{ g/cm}^3$ e coefficiente sterico = 0,50 m³/msr) con una massa sterica di 385 kg/msr. In questo caso, infatti, le 32 tonnellate di carico permesso formerebbero un ingombro di 83,1 m³ circa, e pertanto diverrebbe praticamente inoperante il vincolo della massima portata volumica consentita (85 m³).

si faceva per i carri di fieno) o prima del carico (come si fa oggi con le rotoballe italiane di potature o con le bales finlandesi di ramaglia).

³⁷ Per il consumo di energia della 4° riga si è ricorso a un calcolo molto semplificato considerando un consumo base (per l'automezzo vuoto), pari a 22 litriG/100 km \sim 36 MJ/litro = 792 MJ/100km, e un consumo di 13,6 MJ/100 km per ogni tonnellata di carico. Altrettanto vale, mutatis mutandis, per il rigo 6.

³⁸ Questa uguaglianza vale però solo per umidità superiori a quella di saturazione delle fibre; non vale più per umidità inferiori perché in questa caso assieme all'umidità cala anche il volume delle scaglie che aumenteranno di "compattezza" da intendere come peso di sostanza legnosa nell'unità volumica del corpo legnoso.

2. UN CONFRONTO TRA POTERE CALORIFICO PONDERALE E VOLUMETRICO

Per chiudere si riporta una tabella nella quale per due specie legnose con massa volumica molto diversa si sono calcolati - per una serie di tenori idrici - poteri calorifici ponderali (MJ/kg) e volumetrici massicci (GJ/m³), che poi sono stati relativizzati rispetto a diversi valori di umidità e fra le due specie.

Tabella 12. Variazione, in funzione del tenore idrico, del potere calorifico inferiore dell'unità di peso (MJ/kg) e di volume (GJ/m³) di legno di pioppo ($pci_0 = 17,3$ MJ/kg, $\rho_0 = 0,34$ g/m³ e $\alpha_v = 10\%$) e di faggio ($pci_0 = 18,4$ MJ/kg, $\rho_0 = 0,69$ g/m³ e $\alpha_v = 17\%$).

u	0	10	20	30	40	50	60	70	80
w	0,000	9,091	16,667	23,077	28,571	33,333	37,500	41,176	44,444
Pioppo MJ/kg	17,300	15,505	14,010	12,745	11,660	10,720	9,897	9,172	8,527
Pioppo GJ/m ³	5,882	5,612	5,359	5,121	5,046	4,970	4,895	4,819	4,744
Faggio MJ/kg	18,400	16,505	14,927	13,591	12,446	11,453	10,585	9,819	9,138
Faggio GJ/m ³	12,696	11,856	11,101	10,420	10,276	10,132	9,988	9,844	9,700
Valori relativizzati per tenore idrico									
Pioppo MJ/kg	1,000	0,896	0,810	0,737	0,674	0,620	0,572	0,530	0,493
Faggio MJ/kg	1,000	0,897	0,811	0,739	0,676	0,622	0,575	0,534	0,497
Pioppo GJ/m ³	1,000	0,954	0,911	0,871	0,858	0,845	0,832	0,819	0,806
Faggio GJ/m ³	1,000	0,934	0,874	0,821	0,809	0,798	0,787	0,775	0,764
Pioppo MJ/kg	1,357	1,217	1,099	1,000	0,915	0,841	0,777	0,720	0,670
Faggio MJ/kg	1,354	1,214	1,098	1,000	0,916	0,843	0,779	0,722	0,672
Pioppo GJ/m ³	1,149	1,096	1,046	1,000	0,985	0,971	0,956	0,941	0,926
Faggio GJ/m ³	1,218	1,138	1,065	1,000	0,986	0,972	0,959	0,945	0,931
Valori relativizzati per specie legnose									
MJ/kg F:P	1,064	1,064	1,065	1,066	1,067	1,068	1,069	1,070	1,072
GJ/m ³ F:P	2,158	2,113	2,072	2,035	2,037	2,038	2,040	2,043	2,045

I valori dei poteri calorifici volumetrici, che nella tabella 12 sono riferiti al metro cubo massiccio, sono facilmente traducibili in valori di prima approssimazione dei poteri calorifici sterici applicando i coefficienti sterici della prima colonna di tabella 7.

Le osservazioni più interessanti che si possono fare nell'ambito della tabella 12 sono le seguenti:

1. tanto per il potere calorifico ponderale quanto per quello volumetrico le serie relativizzate dei due legni hanno divergenze molto piccole (trascurabili in sede operativa) che tendono a crescere all'aumentare dell'umidità;
2. il rapporto fra il potere calorifico ponderale del faggio e quello del pioppo cresce in modo quasi impercettibile all'aumentare di u, al ritmo dello 0,01% per un punto percentuale di u;
3. il rapporto fra il potere calorifico volumetrico del faggio e quello del pioppo decresce molto leggermente all'aumentare di u, al ritmo di 0,07% per punto percentuale di u.

I valori della tabella 12, per i quali - come appena accennato - gli GJ/m³ sono concettualmente equivalenti ai corrispettivi GJ/mst, fanno tornare alla mente la *vexata questio* della vendita (o acquisto) di legno-energia a volume o a peso, sulla quale, per ragioni di spazio, non ci si può diffondere in questa sede. Tuttavia, non rientrando la domanda nella categoria dei *tertium non datur*, si può affermare che il parametro di compravendita più corretto è quello dell'energia effettivamente contenuta nella quantità di legno-energia al momento della consegna.

BIBLIOGRAFIA

- ANONIMO, 1974. *Wood handbook*. Agriculture Handbook nr. 72, by Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture..
- ASEL, 1997. *Energia dal legno*. Zürich.
- CIVIDINI R., 1983. *Elementi di tecnologia forestale*. Edagricole.
- DEL FAVERO R.
- GIORDANO G., 1951. *Tecnologie del legno*. Hoepli editore.
- GIORDANO G., 1974. *Tecnologia del legno, volume 1°*. UTET.
- GLETTLER R., 1989. *Scheitholz-Gebläsehessel*. Kammer für Land und.... Land. und Forstwirtschaft in Kärnten. Weiz.
- HARTMANN H., BÖHM T. E MAIER L. 2000. *Naturbalassene biogene Festbrennstoffe - umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten*. Volume 154, serie Umwelt & Entwicklung. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen.
- HELLRIGL B., 2001. *Numeri per la dendroenergetica*.
[www.tesaf.unipd.it/people/pettenella/index.htm- Sezione "Didattica" - "Economia delle biomasse legnose"](http://www.tesaf.unipd.it/people/pettenella/index.htm- Sezione)
- ITABIA, senza data, *Riscaldare con il legno*. ITABIA, Roma.
- JONAS A. e HANEDER H., 2001. *Energie aus Holz*. Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer, St. Pölten.
- KNIGGE W. e SCHULZ H., 1966. *Grundriss der Forstbenützung*. Paul Parey Verlag, Hamburg und Berlin.
- KOLLMANN F.F.F., 1951. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer.
- KOLLMANN F.F.P., 1951. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer. München.
- SANDERMANN W., 19.. . *Chemische Holzverwertung*. BLV München, Basel, Wien.
- SIAU J.F., 1995. *Wood: Influence of moisture physical properties*. Department of Wood Science, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- TRABAUD L., 1989. *Le feux de forêts*. France - Selection, Aubervilliers Cedex
- TRENDELENBURG R., 1955. *Das Holz als Rohstoff*. Neubearbeitung von Hans Mayer-Wegelin. Karl Hanser Verlag, München.
- TSOUMIS G., 1991. *Science and technology of wood. Structure properties and utilization*. Chapman & Hall, New York.
- TSOUMIS G., 1991. *Science and technology of wood*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- VORREITER L., 1949. *Holztechnologisches Handbuch, Band 1*. Verlag Georg Fromme, Wien.
- ZILLI M., 2001. *Bosco e energia*. Editori Associati per la Comunicazione.