



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI
UN ANALIZZATORE PORTATILE DELLA
LUNGHEZZA DEL PELLETT DI LEGNO

PERFORMANCE EVALUATION OF A
PORTABLE WOOD PELLETT LENGTH
ANALYZER

TIPO TESI: Sperimentale

Studente:
GIACOMO CICCONE

Relatore:
PROF. GIUSEPPE TOSCANO

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Alla mia famiglia che mi ha sempre sostenuto.

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	4
ELENCO DELLE FIGURE	5
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	6
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	7
CAPITOLO 2 BIOMASSE E PELLET	9
2.1 Aspetti generali delle biomasse	9
2.2 Il pellet	10
2.3 Importanza delle caratteristiche dimensionali	13
2.3.1 Metodi di misurazione dei parametri geometrici	14
CAPITOLO 3 RICONOSCIMENTO DI IMMAGINE	15
3.1 Tecniche di riconoscimento di immagine	15
3.2 Applicazioni del riconoscimento di immagine al settore biocombustibili solidi.....	17
3.3 Il rilevamento degli oggetti applicato al pellet: il caso del Metalab.....	18
CAPITOLO 4 MATERIALI E METODI	21
4.1 Campioni analizzati.....	21
4.2 Analisi dimensionale del pellet	22
4.3 Elaborazione dati.....	24
4.4 Analisi del colore del pellet.....	25
CAPITOLO 5 RISULTATI E CONSIDERAZIONI	26
5.1 Analisi dell'errore assoluto	26
5.2 Analisi dell'errore relativo	28
5.3 Analisi errore medio assoluto in relazione alla lunghezza dei pellet	30
5.4 Risultati dell'analisi del colore.....	31
CONCLUSIONI	32
BIBLIOGRAFIA.....	33
SITOGRAFIA	35

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 - Estratto della specifica tecnica per il pellet ad uso domestico	12
Tabella 2 - Tabella errore assoluto delle misurazioni tra PLD e calibro	27
Tabella 3 – Errore relativo delle misurazioni tra PLD e calibro	29

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1- Dettaglio della trafila per la produzione del pellet	13
Figura 2 - Piattaforme di telerilevamento (C. Nati et al. 2019).	17
Figura 3 - Piano di acquisizione per il rilevamento degli oggetti di MetaLab (Gasperini et al. 2022).....	20
Figura 4 - Distribuzione delle classi dimensionali ottenute tramite MetaLab (Gasperini et. al. 2022).....	20
Figura 5 - A sinistra la postazione di lavoro per le misurazioni e a destra il PLD	21
Figura 6 - Campione di laboratorio di 100 pellet di abete	22
Figura 7 - Componenti PLD, da in alto a sinistra ad in basso a destra: unità di computazione, fotocamera, ventole di raffreddamento, schermo	22
Figura 8 - Piano di acquisizione del PLD a seguito di una foto. Si osservi la presenza in alto a sinistra del quadrato di riferimento con dimensioni note	24
Figura 9 - Utilizzo del PLD dall'operatore a sinistra e visualizzazione sullo schermo a seguito di una foto a destra	24
Figura 10 - Visualizzazione della misurazione del colore con “Color Grab”	25
Figura 11 - Campione con un cilindro che ha generato un errore di 16mm.....	26
Figura 12 - Distribuzione di frequenza dell’errore assoluto	28
Figura 13 - Distribuzione di frequenza dell’errore relativo	28
Figura 14 - Relazione errore medio assoluto e lunghezza del cilindro di pellet.....	30
Figura 15 - Distribuzione delle classi di lunghezza ottenute con calibro e PLD.....	30
Figura 16 - PCA tra errore assoluto e colore dei campioni.....	31

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

UNI	Ente nazionale italiano di unificazione
EN	Normazione Europea
Fig.	Figura
ISO	Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione
Tab.	Tabella
PLD	Pellet Length Detector
LB	Laboratorio Biomasse
PCA	Analisi delle Componenti Principali

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il pellet di legno, oggetto della presente tesi, è uno dei biocombustibili solidi di più rilevanza a livello internazionale per l'uso domestico, diffuso anche nei centri di elevata popolazione. In Italia l'utilizzo di stufe a pellet, sul totale dei generatori di calore a biomasse legnose installati nel paese, è passato dal 6% al 20%¹. Nel 2020 sono stati consumati 2,7 milioni di tonnellate di pellet sia per riscaldamento (escluso quello centralizzato) che per produrre acqua calda o per la cottura dei cibi². L'utilizzo sempre più frequente dei biocombustibili, in particolare del pellet di legno, è motivato anche dall'aumento dei prezzi dei combustibili fossili. Da qui la necessità di sviluppare nuove tecnologie per il settore al fine di massimizzare l'efficienza degli impianti termici e limitare le emissioni inquinanti in atmosfera. La rapida e costante crescita della domanda di pellet di legno, che ha segnato gli ultimi due decenni, ha portato ad una standardizzazione della qualità e della produzione.

Caratteristiche geometriche dei pellet, come lunghezza e diametro, sono proprietà considerate dalla specifica tecnica UNI EN ISO 17225-2 per la definizione di classi di qualità. Tali proprietà hanno importanti ricadute nell'uso del prodotto entrando in gioco soprattutto nel rapporto tra i volumi a disposizione dei sistemi di trasporto (es. coclea) e del braciere, nel quale è fondamentale la corretta miscelazione tra il biocombustibile e l'aria comburente. La ricaduta è quindi diretta per il consumatore, che dispone di un impianto che ottimizza i consumi del prodotto, e per l'ambiente, dove occorre fare ulteriori passi avanti nella riduzione di composti quali il CO ed il particolato liberato in aria.

Attualmente, data la rilevanza della lunghezza, lo standard ISO 17829 descrive la metodologia per misurare la lunghezza dei cilindri utilizzando un calibro su un piccolo campione di pellet. Questa operazione, anche se eseguito su un numero contenuto di singoli pellet, richiede molto tempo a carico di un operatore della filiera con evidenti costi.

¹ Agriforenergy, *Speciale pellet- Mercato internazionale e nazionale, reverse charge e certificazione ENplus®*, AIELEnergia.it, 4 dicembre 2020.

² *Statistiche report, Consumi energetici delle famiglie*, ISTAT, 21 dicembre 2022

L'obiettivo della presente tesi è di testare un metodo alternativo per la misurazione dei pellet che permetta una più rapida misurazione di questo parametro rispetto al metodo definito dalla norma ISO 17829. Lo strumento proposto nel presente documento consiste nello sviluppo di una versione portatile di Meta Lab, denominato Pellet Length Detector (PLD), che permetta agli operatori del settore di applicare questo innovativo metodo di misurazione, garantendo un più facile controllo qualità del prodotto.

I test sperimentali sono stati condotti presso il Laboratorio Biomasse dell'Università Politecnica delle Marche, mentre la produzione di lotti di pellet di legno con lunghezze differenti impiegata per le prove di combustione è stata realizzata presso varie aziende dentro e fuori il territorio italiano. Il lavoro di ricerca di questa tesi fa parte di un progetto più ampio del Laboratorio Biomasse nell'ambito del progetto di ricerca Bioenergia di precisione, supportato dalla Fondazione CARITRO.

CAPITOLO 2

BIOMASSE E PELLET

2.1 Aspetti generali delle biomasse

È definita 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 urbani³. Ad oggi, le biomasse soddisfano il 15% circa degli usi energetici primari nel mondo. In Europa il contributo di questa fonte al soddisfacimento dei fabbisogni primari di energia, nei paesi industrializzati, è del 3 - 4%. Tale contributo sale al 35 - 38% nei paesi in via di sviluppo⁴. Con il termine biomassa si indica un vasto insieme di materiali di natura estremamente eterogenea. In generale, è biomassa tutto ciò che ha matrice organica, ovvero il materiale organico costituito o derivato da organismi vegetali o loro componenti, utilizzabile in processi di trasformazione termochimica o biochimica. La componente organica non è costituita unicamente dall'emicellulosa, cellulosa, lignina e sostanze quali pectine o estrattivi (resine ed altre sostanze), ma anche da sostanza inorganica. Essa è costituita da molecole complesse o sali inorganici, è la frazione che non contribuisce alla combustione, bensì tende a produrre effetti indesiderati ma in parte gestibili, come la produzione di ceneri.

La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili, ovvero trasformati in altre sostanze di più facile utilizzo negli impianti di conversione. Grazie alla sua ampia gamma di materie prime e alle tecnologie disponibili per la sua utilizzazione, la biomassa rappresenta una delle fonti rinnovabili più diversificate, ed è per questo che un importante criterio di classificazione delle biomasse fa riferimento allo stato fisico del combustibile utilizzato. In base a questo criterio, le biomasse sono suddivise in tre categorie: biomasse solide, che rappresentano la

³ Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, DIRETTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO, del 23 aprile 2009.

² *Recupero di Energia da Biomassa*, Caputo and Romer.

grande maggioranza delle biomasse utilizzate per la produzione di energia (natura lignocellulosica), biomasse liquide, prevalentemente costituite da oli vegetali estratti dai semi delle specie vegetali oleaginose, biomasse gassose, tutte ottenute attraverso processi fisici o biochimici come il biogas. Si definiscono invece biocombustibili, tutti combustibili solidi, liquidi o gassosi che derivano da questi materiali, sia in forma diretta oppure come risultato di processi di trasformazione⁵. Essendo i più utilizzati, la UNI EN ISO 17225-1 determina le specifiche e la classificazione per biocombustibili solidi costituiti da materiale naturale e trattato derivante da:

- Agricoltura e orticoltura: residui agricoli, agroindustriali, artigianali, industriali, civili (esempi: paglia, sansa di oliva, legna vecchia, vinacce, buccette, gusci di frutta secca, stocchi di mais, lolla di riso, particolari frazioni di rifiuti urbani (RU) e di rifiuti assimilabili agli urbani (A));
- Silvicoltura e colture arboree: legna da ardere, ottenuta da interi alberi senza le radici, residui di legno non trattati chimicamente, tronchi, residui di potatura. Altri prodotti ligneo-cellulosici puri come pellet, bricchette e cippato, ottenuti da bosco, piantagione e altro legno vergine, prodotti e residui dell'industria di lavorazione del legno, legno da recupero non trattato chimicamente;⁶
- Acquacoltura, come le alghe.

Tra i biocombustibili solidi più utilizzati per la produzione di energia termica, soprattutto per l'alimentazione degli impianti domestici, vi è il pellet. Si distingue dal resto dei biocombustibili legnosi per il fatto di essere prodotto in impianti industriali e, pertanto, di presentare proprietà particolarmente omogenee.

2.2 Il pellet

L'Italia è di gran lunga il primo a livello europeo per numero di apparecchi domestici a pellet installati, pari a circa 2,2 milioni. Di questi, il 99% è costituito da stufe, inserti e

⁵ Wise Society, *Biomasse ed energia e non solo: definizioni e vantaggi per l'ambiente*, AIELenergia.it, 2001.

⁶ UNI EN ISO 17225.

termocamini, cucine e caldaie⁷. Il pellet corrisponde a dei piccoli cilindri di diametro variabile da 6 a 8mm e lunghezza di 3,15-40mm, prodotto principalmente da materie prime come la segatura e sottoprodotti dell'industria del legno, attraverso un processo di pellettizzazione. I legni morbidi come abete rosso e pino sono tra le più comuni materie prime legnose utilizzate, da cui si ricava un prodotto caratterizzato da proprietà chimico-fisico, geometriche e meccaniche omogenee partendo da una materia prima altamente eterogenea. L'elevata omogeneità del pellet lo rende un prodotto ad elevata standardizzazione. Difatti i suoi parametri sono definiti dalla norma UNI EN ISO 17225-2, che ne definisce i parametri qualitativi di riferimento e le soglie entro le quali un determinato pellet deve rientrare affinché possa ritenersi conforme o meno ad una determinata classe di qualità. La norma identifica le soglie di qualità di differenti classi di pellet, sia esso ad uso domestico che ad uso industriale. Più specificatamente, stabilisce tre classi di qualità del pellet ad uso domestico, ovvero le classi A1, A2 e B; e tre classi per pellet ad uso industriale, ovvero I1, I2 e I3. Mentre nelle classi A1, A2, I1 e I2 viene ammesso unicamente l'utilizzo di legno non trattato chimicamente, le classi B e I3 consentono l'utilizzo di legno trattato chimicamente nonché di legno usato non trattato (Tab.1).

Uno dei principali parametri per la destinazione energetica del pellet è il contenuto di acqua che ne influenza il peso, quindi il trasporto, ed indirettamente il contenuto energetico. Difatti, l'acqua presente nella biomassa, sottrae sia energia in sede di combustione necessaria alla sua evaporazione che riduce la quota di sostanza organica combustibile nel pellet. Pertanto, tra i requisiti fondamentali per questa forma di biocombustibile è quello di avere un'umidità sotto al 10% sul tal quale, che garantisce un costante e potenzialmente prevedibile valore di portata termica nell'impianto oltre che una stabilità fisico-meccanica del prodotto. A questo proposito ha una grande rilevanza l'essiccazione della materia prima, processo che richiede elevati costi economici ed energetici ma che garantisce al pellet un'elevata densità energetica. Un altro vantaggio è la facilità di trasporto rispetto agli altri biocombustibili e la possibilità di stoccaggio per lunghi periodi senza perdita di sostanza organica.

Nel processo produttivo è importante la fase di pulizia della materia prima, fase che consiste nella rimozione di componenti inerti e di metalli, prima che la materia prima venga consegnata all'impianto di pellettizzazione. A queste fasi, si aggiunge quella della scortecciatura, diminuendo il contenuto di ceneri del prodotto finale. Infine, le ultime due fasi della produzione sono:

⁷ Agriforenergy, *Speciale pellet- Mercato internazionale e nazionale, reverse charge e certificazione ENplus®*, AIELenergia.it, 4 dicembre 2020.

- la pressatura, dove il materiale viene compresso con dei rulli conferendogli la forma cilindrica, su una trafilata a forma di toroide e forata da ambo i lati o su un piatto orizzontale anch'esso forato. La materia prima è precedentemente macinata ed essiccata prima di essere compressa nei fori metallici;

- il raffreddamento e vagliatura: appena uscito dalla pressa il pellet raggiunge temperature di oltre 100 °C; esso va raffreddato il più velocemente possibile, favorendone l'indurimento.

Tabella 1 - Estratto della specifica tecnica per il pellet ad uso domestico

		A1	A2	B
Origine		-Legno tondo -Residui di legno non chimicamente trattati	-Alberi interi senza radici -Legno tondo -Residui di lavorazioni boschive -Corteccia (da operazioni industriali) -Residui di legno non chimicamente trattati	-Foreste, piantagioni o altro legno vergine -Residui dall'industria di trasformazione del legno
Diametro (D) e Lunghezza (L)	<i>mm</i>	D6±1 3,15≤L≤40 D8±1 3,15≤L≤40	D 6±1 3,15≤L≤40 D 8±1 3,15≤L≤40	D 6±1 3,15≤L≤40 D 8±1 3,15≤L≤40
Umidità (M)	<i>w-% su base umida, t.q.</i>	M ≤ 10	M ≤ 10	M ≤ 10
Ceneri(A)	<i>w - % sul secco</i>	A ≤ 0.7	A ≤ 1.5	A ≤ 3.0
Resistenza meccanica (DU)	<i>w - % t.q.</i>	DU ≥ 97.5	DU ≥ 97.5	DU ≥ 96.5
Polveri (F)	<i>w - % t.q.</i>	F ≤ 1.0	F ≤ 1.0	F ≤ 1.0
Additivi	<i>w - % secco</i>	≤2% definire tipo e quantità	≤2% definire tipo e quantità	≤2% definire tipo e quantità
Potere calorifico netto (NCV)	<i>MJ/kg t.q.</i>	Q16.5(16,5≤Q≤19)	Q16.3(16,3≤Q≤19)	Q16.0(6,0≤Q≤19)
Massa volumica (BD)	<i>kg/m³</i>	BD ≥ 600	BD ≥ 600	BD ≥ 600
Azoto	<i>w - % secco</i>	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0
Zolfo	<i>w - % secco</i>	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.04
Cloro	<i>w - % secco</i>	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.03

Per la produzione del pellet si utilizzano normalmente residui della filiera della lavorazione del legno. Queste materie prime sono derivanti soprattutto da operazioni di taglio del materiale e si possono suddividere in due categorie principali: scarti di legno vergine e scarti di legno trattato. I primi includono polveri, truciolati, segatura, refili, sciaveri e cippato di grandi dimensioni, e sono principalmente prodotti dalle segherie mobili o industriali. I secondi sono i residui di legno che hanno subito un trattamento chimico per l'aggiunta di vernici, colle e preservanti, e provengono principalmente dall'industria dei pannelli o da manufatti impregnati.

Mentre con i primi, considerati biomassa combustibili, è possibile produrre pellet (Fig.1) di classi adeguate agli apparecchi termici domestici, i secondi, per la legge italiana, sono considerati rifiuti e non adatti per questo utilizzo.



Figura 1- Dettaglio della trafilatura per la produzione del pellet

2.3 Importanza delle caratteristiche dimensionali

Tra i diversi parametri che definiscono la qualità del pellet (Tab. 1) la lunghezza ed il diametro del pellet sono spesso trascurati dagli utenti, ma in realtà possono condizionare vari fattori importanti per l'utilizzazione del pellet. Il primo da tenere in considerazione è quello della durabilità, cioè la capacità del prodotto di resistere a scuotimenti e urti che ne possono provocare lo sfaldamento in polvere e segatura. L'ipotesi è che questa sarà più bassa se la

dimensione dei cilindri è minore, poiché a parità di massa c'è una maggiore probabilità di urti tra pellet, essendo il campione costituito da più elementi.

I parametri geometrici possono anche incidere sull'efficienza di combustione della stufa. In un recente lavoro scientifico si è visto come pellet lunghi tendono a ridurre l'efficienza di reazione in camera di combustione, dovuta alla maggiore quantità di aria in ingresso rispetto al combustibile presente, la quale tende a raffreddare il sistema⁸. Oltre alla portata termica va a variare anche la portata massica che, a parità di velocità della coclea (dentro alla stufa), è più elevato per pellet più piccoli, dato che le dimensioni ridotte del pellet ne facilitano il trasporto da parte della coclea. Difatti negli impianti termici vengono considerate le dimensioni per i sistemi di movimentazione e di stoccaggio del prodotto e per la tecnologia di conversione (progettazione e dimensioni camera di combustione e del bruciatore). Modificare l'efficienza di combustione significa anche condizionare le emissioni di monossido di carbonio e di possibili composti organici volatili (COV).

2.3.1 Metodi di misurazione dei parametri geometrici

La misurazione dei pellet avviene attraverso l'utilizzo di un calibro di precisione su un gruppo di pellet singoli provenienti da campioni di laboratorio. Il metodo è descritto dalla norma UNI EN ISO 17829. Questo processo richiede molto tempo e, lavorando su poco materiale, potrebbe far sollevare dubbi sulla rappresentatività del campione analizzato⁹. Vista l'importanza dei parametri di qualità, alcuni operatori e tecnici del settore stanno cercando anche di valutare metodi alternativi

Lo scopo di questa tesi è quello di testare un sistema – prodotto dal Laboratorio Biomasse dell'Università Politecnica delle Marche - che ricorre a tecniche di riconoscimento di immagini. Tale tecnica lavora su un quantitativo discreto di pellet in modo rapido aumentando così la quantità di campione analizzata e quindi la sua rappresentatività.

⁸ Renewable Energy, *Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions*, ELSEVIER, 2017

⁹ Graphical Abstract, *Automatic detection and segmentation of wooden pellet size ex-ploiting a deep learning approach*, Roberto Pierdicca, Mattia Balestra, Giulia Micheletti, Andrea Felicetti, Giuseppe Toscano

CAPITOLO 3

RICONOSCIMENTO DI IMMAGINE

Il Laboratorio Biomasse dell'Università Politecnica delle Marche sta portando avanti da alcuni anni studi sull'uso di alcune tecniche di misure di precisione caratterizzare la qualità dei biocombustibili solidi. Più nello specifico, recentemente ha avviato una linea di lavoro per lo sviluppo ed utilizzo di sistemi di riconoscimento di immagine applicato ai pellet di legno. Un sistema prototipale di recente realizzazione è il Pellet Length Detector (PLD) sviluppato per riconoscere velocemente la lunghezza dei singoli elementi posti in un piano orizzontale con sfondo colorato in verde. Questo sistema sperimentale potrebbe porre le basi per mettere a disposizione un'alternativa all'attuale tecnica di misura della lunghezza dei pellet basata sull'utilizzo del calibro. In questo capitolo, dopo una prima introduzione sui sistemi di riconoscimento di immagine si riporta lo stato dell'arte sull'utilizzo di tale tecnica nel campo dei biocombustibili solidi.

3.1 Tecniche di riconoscimento di immagine

Il riconoscimento e la classificazione delle immagini è una delle aree più attivamente perseguite nel vasto campo delle scienze e dell'ingegneria dell'immagine¹⁰. L'idea principale è quella di ispezionare una scena di immagini elaborando i dati ottenuti da dei sensori ottici, come una telecamera, un laser o infrarossi. Questi convertono i raggi luminosi in un segnale elettronico, con lo scopo di misurare una quantità fisica di luce e, a seconda del tipo di sensore, tradurlo in una forma leggibile da un dispositivo di misurazione integrato. Tali sistemi possono ridurre sostanzialmente il carico di lavoro e migliorare l'accuratezza delle decisioni prese dagli operatori umani in campi diversi, tra cui il militare e la difesa, i sistemi di ingegneria biomedica, il monitoraggio della salute, la chirurgia, i sistemi di trasporto intelligenti, la produzione, la robotica, l'intrattenimento e i sistemi di sicurezza.

¹⁰ Image Recognition and Classification Algorithms, Systems, and Applications, Javidi, University of Connecticut, Storrs, Connecticut, 2002.

Tra le tecniche più utilizzate troviamo la classificazione, la segmentazione, il rilevamento di oggetti, il riconoscimento facciale e di azioni e la modifica dell'immagine. La classificazione consente di suddividere le immagini in categorie predefinite, mentre la segmentazione le divide in parti o segmenti per analizzare le loro caratteristiche specifiche. Il rilevamento di oggetti si concentra sull'individuazione di oggetti specifici all'interno dell'immagine, mentre il riconoscimento facciale e di azioni sull'individuazione di volti ed entità all'interno dell'immagine. Tutte queste tecniche si basano sull'analisi delle caratteristiche visive delle immagini, come il colore, la forma, la texture, la dimensione e l'orientamento degli oggetti all'interno delle immagini. Poiché i dati catturati da queste tecniche possono provenire da elementi particolari e situazioni complesse, il riconoscimento digitale degli oggetti dovrebbe essere in grado di funzionare come il cervello umano, riuscendo ad andare oltre tutte le possibili eccezioni. A questo proposito vengono utilizzati degli algoritmi basati sulle IA, in particolare il Deep Learning che comprende tecniche di apprendimento automatico avanzate basate su reti neurali artificiali organizzate in livelli. Uno degli algoritmi di Deep Learning più utilizzato è rappresentato dalle Reti Neurali Convenzionali: il loro funzionamento consiste nel suddividere l'immagine in gruppi di piccoli pixel chiamati filtri, per poi analizzarli, elaborarli e confrontarli con altri pixel per trovare lo schema specifico che la rete neurale sta cercando in vari livelli. Nel primo livello cercano di rilevare i modelli analizzando i bordi, gli spigoli e le curve presenti in un'immagine. Man mano che la rete neurale esegue più convoluzioni può riuscire ad identificare entità specifiche come persone, oggetti e animali all'interno dell'immagine. Un esempio di macchina che effettua l'analisi delle distribuzioni granulometriche è la QICPIC della Sympatec, che offre la possibilità di determinare, oltre alla curva di distribuzione granulometrica, la forma delle singole particelle di campioni solidi, sospensioni ed emulsioni usando l'analisi ad immagine, coprendo un range granulometrico compreso tra $0,55\mu\text{m}$ e 34mm ¹¹.

Oltre agli ambiti già citati, il riconoscimento di immagine è già utilizzato per molteplici utilizzi a livello globale, dalla microscopia, per analizzare le immagini microscopiche di cellule, tessuti e campioni biologici, all'ecologia, per analizzare le immagini di habitat naturali, al fine di identificare e quantificare le specie vegetali e animali presenti, valutare lo stato di salute degli ecosistemi e monitorare l'impatto dei cambiamenti climatici. Il riconoscimento di immagini può essere utilizzato anche per monitorare i processi di produzione di biomasse,

¹¹ Fkv, QICPIC, *Analizzatore Granulometrico a Scansione d'immagine da laboratorio*, <https://fkv.it/prodotti/caratterizzazione-dei-materiali/analisi-granulometrica/qicpic-analizzatore-granulometrico-a-scansione-d-immagine-da-laboratorio>

come nella coltivazione di piante da energia o la produzione di biocombustibili, dove è possibile analizzare la distribuzione granulometrica e delle dimensioni delle particelle¹². In questo caso, le immagini possono essere utilizzate per monitorare la crescita delle piante, identificare eventuali malattie o infestazioni e valutare il rendimento della produzione. Inoltre, può essere utilizzato per il controllo della qualità delle biomasse, ad esempio nella selezione e classificazione delle materie prime per la produzione di biocombustibili solidi. In ambito forestale le immagini ottenute da sensori aerei o satellitari possono essere utilizzate per rilevare e quantificare la copertura di biomasse forestali e agricole. Difatti, tramite le nuove tecnologie di telerilevamento (come droni UAV e SAT) (Fig.2) e analisi d'immagine, è possibile: generare una mappa catastale classificata per le diverse specie forestali presenti in un sito¹³, stimare la biomassa rimossa a seguito di una potatura e indicare la produzione potenziale di una particella, andando a discriminare i frutti dalla copertura fogliare¹⁴.



Figura 2 - Piattaforme di telerilevamento (C. Nati et al. 2019).

Il riconoscimento di immagini è ancora un campo in evoluzione e ci sono ancora molti aspetti da migliorare: come lo sviluppo di algoritmi che siano in grado di riconoscere oggetti in diverse condizioni di illuminazione, di posizione e di sfondo, o che siano in grado di gestire la complessità delle immagini e di identificare oggetti in una scena con molte informazioni.

3.2 Applicazioni del riconoscimento di immagine al settore biocombustibili solidi

L'abbassamento dei costi di produzione dei componenti elettronici e quindi di telecamere con adeguate risoluzioni e lo sviluppo di tecniche sempre più complesse di elaborazione dei

¹² Fuel, *Analysis of standard sieving method for milled biomass through image processing. Effects of particle shape and size for poplar and corn stover*, Miguel Gil, Enrique Teruel, Inmaculada Arauzo, ELSEVIER, 2014.

¹³ ASITA, *Tecniche di telerilevamento per il riconoscimento dei soggetti arborei appartenenti al genere Platanus spp.*, Fiorillo, Villa, Marchesi, 2015.

¹⁴ ACTA Italus Hortus 25, *Sistemi di telerilevamento utili alla stima della produzione di legno e frutto in castagneti*, Carla Nati, Alessandro Matese, Riccardo Dainelli, Andrea Berton, Niccolò Brachetti Montorselli, Salvatore Filippo Di Gennaro, Castanea, 2019.

dati, che trovano spazio di lavoro in sistemi elettronici con chip sempre più veloci, permettono di elaborare immagini anche complesse. Ad oggi gli utilizzi sono diversi: un'applicazione è quella di monitoraggio in linea della quantità di pellet che vengono trasportati da sistemi di alimentazione¹⁵. Nello specifico è stato sviluppato un algoritmo per il conteggio affidabile dei pellet che, in combinazione con la pesatura dei campioni, consente di determinare con precisione il peso medio dei pellet trasportati. Inoltre, è stato sviluppato un metodo automatizzato e continuo per svolgere un controllo qualità più preciso della distribuzione delle dimensioni dei pellet su un numero di pellet più elevato e quindi rappresentativo¹⁶. Ciò si basa sull'analisi di immagini digitali 2D, combinando diversi passaggi di elaborazione delle immagini per rilevare e separare le particelle corrispondenti. Kang B. S. et al. hanno utilizzato il riconoscimento di immagine per monitorare il comportamento termogravimetrico del pellet. In particolar modo, questa tecnica ha permesso di distinguere e monitorare dettagliatamente le 3 fasi di combustione del pellet, ovvero, gassificazione, combustione dei gas e combustione della frazione carboniosa. L'analisi termogravimetrica tramite riconoscimento di immagine si è rivelata più precisa e più rapida rispetto all'analisi classica¹⁷.

Le immagini dei pellet possono essere catturate tramite fotocamere ad alta risoluzione e analizzate attraverso degli algoritmi per individuare eventuali difetti, come crepe, scheggiature, macchie o impurità. Infine, Wooten R. J. et al. hanno utilizzato la tecnica di riconoscimento di immagine per incrementare l'efficienza energetica del cippato legnoso. Difatti il cippato ottenuto da attività selvicolturale presenta una quantità considerevole di corteccia, la quale influisce negativamente sulla qualità di combustione. Il monitoraggio del rapporto corteccia/legno, attraverso l'analisi della loro forma e superficie, ha permesso di dividere le componenti così da ottimizzare la conversione in energia, con un'accuratezza del 98,3%¹⁸.

3.3 Il rilevamento degli oggetti applicato al pellet: il caso del Metalab

Per ottenere le misure di lunghezza e diametro di un oggetto a partire da una foto, è possibile utilizzare tecniche di visione artificiale, cioè l'insieme di metodi e strumenti utilizzati

¹⁵ Special Issue Article, *Monitoring of pellet coating process with image analysis—a feasibility study*, Kucheryavski, Esbensen, and Bogomolov, Journal of Chemometrics, ELSEVIER, 26 May 2010.

¹⁶ Powder Technology, *An automated and continuous method for the optical measurement of wood pellet size distribution and the gravimetric determination of fines*, S. Wirtz, V. Scherer, ELSEVIER, 1 Maggio 2020.

¹⁷ Energies, *Volume and Mass measurement of a Burning Wood Pellet by Image Processing*, Sae Byul Kang, Bong Suk Sim and Jong Jin Kim, MDPI, 2017.

¹⁸ Computers and Electronics in Agriculture, *Discrimination of bark from wood chips through texture analysis by image processing*, James R. Wooten, S.D. Filip To, C. Igathinathane, L.O. Pordesimo, ELSEVIER, 2011.

per l'analisi e l'interpretazione di immagini e video al fine di estrarre informazioni utili, che prevedono l'elaborazione dell'immagine stessa. In particolare, è possibile utilizzare algoritmi di riconoscimento degli oggetti per calcolare le dimensioni dell'elemento di interesse a partire da una misura di riferimento nota. In questo caso, si può calcolare il rapporto tra la dimensione dell'oggetto noto e la dimensione dell'oggetto di interesse, e utilizzarlo per stimare la dimensione dell'oggetto sconosciuto.

Per effettuare questa operazione, è necessario svolgere una serie di operazioni di elaborazione dell'immagine, come il rilevamento dei contorni, la segmentazione e la determinazione della posizione degli oggetti nella scena¹⁹. In particolare, la fase di segmentazione permette di separare gli elementi di interesse dal piano di acquisizione.

Il Laboratorio Biomasse dell'Università Politecnica delle Marche ha già applicato questo metodo del riconoscimento di immagini, attraverso lo sviluppo di un sistema infrarosso denominato MetaLab²⁰. Il sistema MetaLab è costituito da un box metallico (400x400x220mm) contenente i seguenti elementi:

- microcomputer Raspberry Pi 4;
- doppio Sensore: Raspberry Pi 4 Camera IR; camera RGB;
- piatto 297x210mm estraibile per il posizionamento dei pellet sui quali effettuare l'elaborazione;
- software di elaborazione necessario per l'acquisizione delle immagini e dei dati.

Lo strumento presenta una precisione di $\pm 1\text{mm}$. L'acquisizione dei dati tramite questo sistema prevede di partire dalla misurazione di un quadrato di riferimento posizionato su un piano di acquisizione di colore nero, facilmente distinguibile dagli oggetti posizionati sul piano (Fig.3), per poi confrontare le dimensioni dei cilindri di pellet con quelle del quadrato di riferimento, così da rendere possibile il calcolo della loro lunghezza e diametro. Inoltre, vengono calcolate per ogni campione la loro media, il minimo, il massimo, la deviazione standard e il coefficiente di variazione, nonché la distribuzione delle classi dimensionali (Fig.4). In seguito, viene effettuato il calcolo del volume del cilindro di ogni pellet con una stima basata su diametro e lunghezza, che rapportato con la massa del campione analizzato, inserita dall'operatore, permette la stima di parametri come la massa volumica e la densità particellare.

¹⁹ Graphical Abstract, *Automatic detection and segmentation of wooden pellet size exploiting a deep learning approach*, Roberto Pierdicca, Mattia Balestra, Giulia Micheletti, Andrea Felicetti, Giuseppe Toscano.

²⁰ IEEE, *Performance evaluation of a benchtop wood pellet length analyser based on visual imaging*, Giuseppe Toscano, Sara Di Stefano, Michele Naspì, Rino Goller, Chiara Masci, Thomas Gasperini, 2022

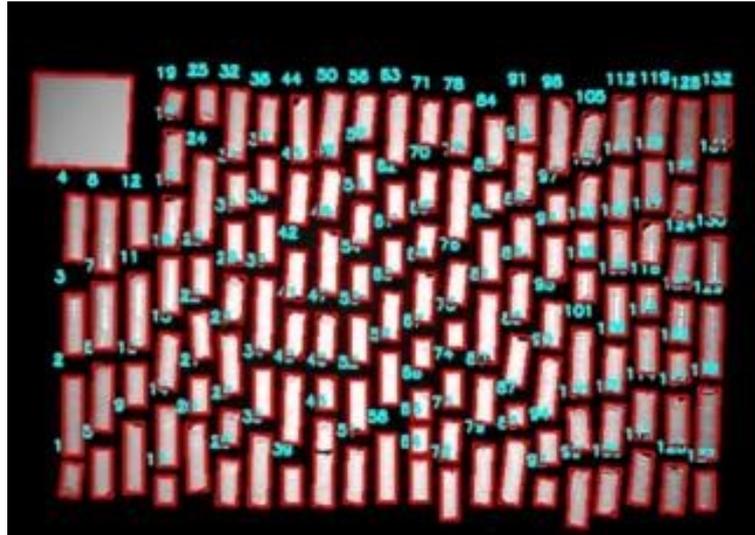


Figura 3 - Piano di acquisizione per il rilevamento degli oggetti di MetaLab (Gasperini et al. 2022).

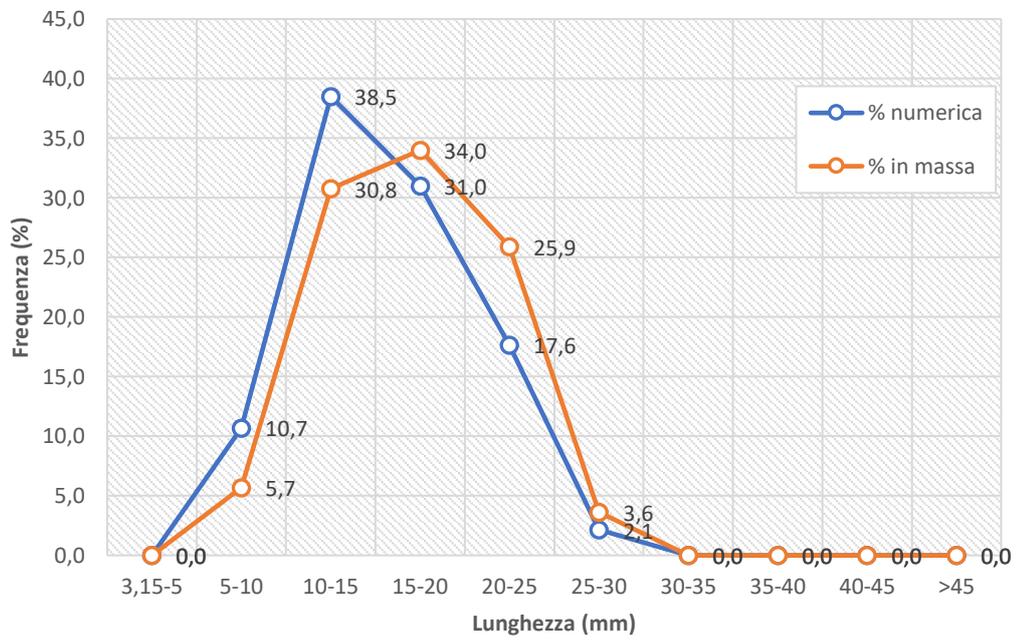


Figura 4 - Distribuzione delle classi dimensionali ottenute tramite MetaLab (Gasperini et. al. 2022).

CAPITOLO 4

MATERIALI E METODI

In questo capitolo vengono descritti i materiali, i metodi e le procedure utilizzate al fine di valutare l'accuratezza del dispositivo alternativo e prototipale di misurazione dei parametri geometrici del pellet legnoso: Pellet Length Detector (PLD). I materiali e le strumentazioni utilizzati per l'esecuzione dei test sperimentali (Fig.5) sono stati forniti dal Laboratorio Biomasse (LB) dell'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM).

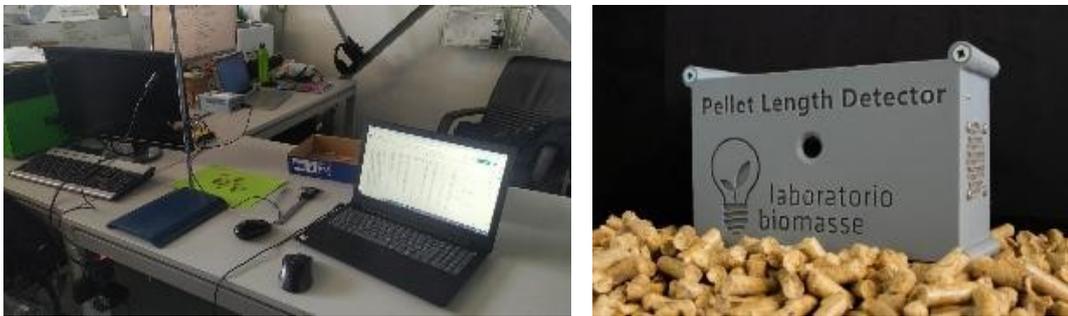


Figura 5 - A sinistra la postazione di lavoro per le misurazioni e a destra il PLD

Lo scopo dei test che si descriveranno nel seguito è di confrontare delle misure dimensionali di campioni di pellet eseguite con il calibro – seguendo il metodo a norma UNI EN ISO – con le misure effettuate dal PLD. Attraverso le differenze rilevate tra i due sistemi è possibile valutare la prestazione del sistema di misura basato sulla lettura dell'immagine.

4.1 Campioni analizzati

Il piano di lavoro della tesi è stato svolto su 20 campioni di pellet di legno forniti da diversi produttori di pellet italiani e posti in sacchi da 15 kg. I campioni di pellet sono costituiti da legni di differenti specie legnose e da società produttrici o distributrici che normalmente si rivolgono a LB per il controllo di routine della qualità del prodotto.

Da ogni sacco di 15 kg sono stati selezionati in modo casuale dei campioni di laboratorio da 100g, ovvero circa 100 pellet (Fig.6), con selezione e disposizione sul piano di acquisizione

casuale. I materiali di questi campioni che costituiscono il pellet sono il legno di conifera, principalmente di abete. Per ogni prodotto è presente una dichiarazione da parte del produttore del pellet.



Figura 6 - Campione di laboratorio di 100 pellet di abete

4.2 Analisi dimensionale del pellet

I pellet selezionati da ciascun campione sono stati analizzati tramite l'utilizzo del PLD. Questo dispositivo è stato realizzato da LB – mediante collaborazione di consulenti esterni del settore informatico - e consente di misurare le dimensioni dei pellet attraverso delle immagini scattate da una telecamera a bordo strumento. Per la misura tradizionale si è fatto uso del calibro digitale Maurer con precisione di 0,02 mm.

Il PLD è composto da diverse componenti (Fig.7). In particolare:

- unità di computazione: Raspberry Pi 4 Model B;
- camera: Pi Camera V2.1 e ventole di raffreddamento: Pi Fan Brushless;
- schermo touch OSOYOO DSI.

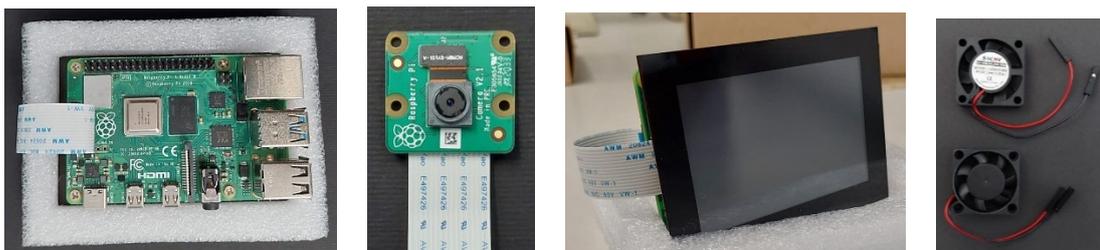


Figura 7 - Componenti PLD, da in alto a sinistra ad in basso a destra: unità di computazione, fotocamera, ventole di raffreddamento, schermo

Il PLD riesce ad ottenere un'immagine in scala di grigi rielaborata tramite il filtro Gaussiano Blur per la riduzione dei "rumori" dell'immagine, cioè la variazione del colore e della luminosità dell'immagine. La sfocatura gaussiana è un tipo di filtro passa-basso che armonizza i valori dei pixel non uniformi in un'immagine, eliminando i valori anomali estremi. Questo permette che vengano ridotti quanto più possibile gli errori provenienti dai pixel eccessivamente luminosi della foto elaborata.

L'immagine acquisita viene elaborata tramite un algoritmo di riconoscimento degli oggetti, che effettua il rapporto tra la dimensione di un oggetto noto, presente sul piano di acquisizione, e la dimensione dell'oggetto di interesse, per poi utilizzarlo nella stima della dimensione dell'oggetto sconosciuto.

Dopo l'elaborazione delle immagini, il sistema riesce a generare un foglio di calcolo contenente il numero progressivo di pellet individuati all'interno dell'immagine e le relative dimensioni - diametro e lunghezza - in millimetri.

L'applicazione del riconoscimento di immagini utilizzato in questo lavoro per la misurazione dei cilindri di pellet prevede la misurazione di un quadrato di riferimento di colore rosso - con dimensione nota - posizionato su un piano di acquisizione di colore verde, facilmente distinguibile dagli oggetti posizionati sul piano (Fig.8). La scelta di questo colore è legata alla minore riflessione della luce rispetto a piani di altri colori. Confrontando le dimensioni dei cilindri di pellet con quelle del quadrato di riferimento è possibile calcolare la loro lunghezza.

Per ogni campione da laboratorio (da 100 g) sono state effettuate 3 acquisizioni di immagini tramite PLD. Ciascuna acquisizione è stata svolta mantenendo la medesima distanza tra dispositivo e piano d'acquisizione - pari a circa 25 cm - per far sì che la telecamera non fosse influenzata dalla variabile di messa a fuoco (Fig.9). Inoltre, è stata mantenuta la stessa condizione di luminosità ambientale per evitare condizioni di riflesso od imprecisione nella misurazione, data da disturbi nell'immagine come l'effetto di sgranatura. Dopo la lettura digitale delle dimensioni dei pellet, ciascuno di questi è stato misurato con il metodo tradizionale a norma mediante il calibro (ISO 17829).

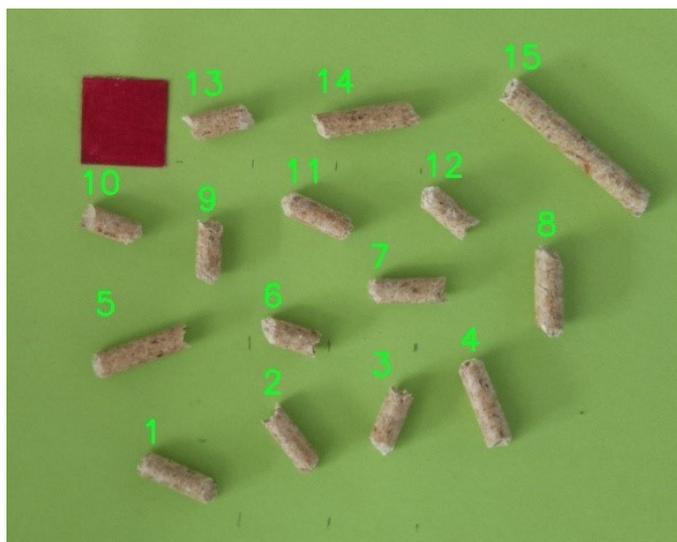


Figura 8 - Piano di acquisizione del PLD a seguito di una foto. Si osservi la presenza in alto a sinistra del quadrato di riferimento con dimensioni note

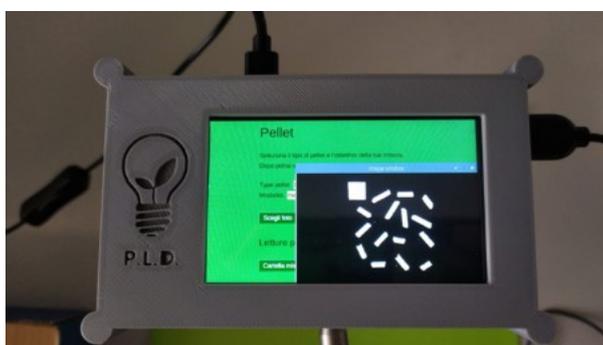


Figura 9 - Utilizzo del PLD dall'operatore a sinistra e visualizzazione sullo schermo a seguito di una foto a destra

4.3 Elaborazione dati

I dati acquisiti sono stati riportati su rispettivi fogli Excel nel quale è stato predisposto uno schema di calcolo dell'errore commesso dal PLD rispetto alla misura con calibro. In particolare, per ciascun foglio si determina:

- l'errore assoluto (mm) tra le misurazioni effettuate con il PLD e con il calibro:

$$Ea = L_c - L_{PLDn}, \text{ dove } L_{PLDn} = \sum X_i / N \text{ ed } L_c \text{ la misura presa con il calibro}$$

- l'errore relativo, espresso in % rispetto alla lunghezza ottenuta con il calibro:

$$Er = (L_{PLDn} - L_c) / L_c$$

- la deviazione standard per ogni valore ottenuto:

$$DS = \sqrt{\frac{\sum (L_{PLD} - MediaL_{PLD})^2}{100}}$$

Dei dati ottenuti è stata calcolata la media, il minimo e il massimo, così da poterli mettere in relazione nella loro analisi.

4.4 Analisi del colore del pellet

In aggiunta alle analisi dimensionali dei pellet è stata effettuata una misurazione del colore dei campioni. Da test preliminari è stato osservato che questo fattore è in grado di condizionare l'accuratezza della misura dei parametri geometrici del pellet in base alla riflessione della luce con effetti negativi sulla qualità del riconoscimento dell'immagine. Tale misura è stata fatta tramite l'utilizzo di un'applicazione per smartphone (sistema Android) denominata "Color Grab". Il suo funzionamento consiste nella cattura di un'immagine attraverso il tocco dello schermo del dispositivo, in cui viene inquadrato un corpo (pellet). Dell'elemento selezionato sono resi disponibili il nome del colore e i suoi valori (Fig.10). Questa operazione ha permesso di ricavare i valori di RGB (Rosso, Verde, Blu), ovvero valori numerici che indicano la tonalità di rosso, verde e blu che compone un determinato colore visibile all'interno di un'immagine digitale. A partire da questi valori è stata eseguita una PCA finalizzata a visualizzare la relazione tra il colore dei campioni e l'errore assoluto delle misurazioni. L'analisi del colore è avvenuta mantenendo le stesse altezze e condizioni di luce naturale per ogni campione, così da evitare discrepanze nelle misurazioni.

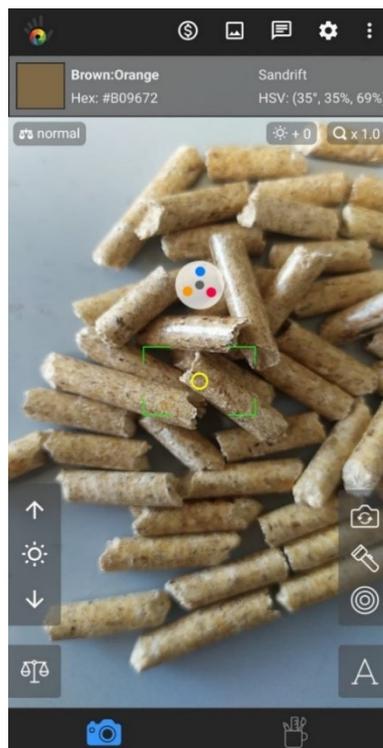


Figura 10 - Visualizzazione della misurazione del colore con "Color Grab"

CAPITOLO 5

RISULTATI E CONSIDERAZIONI

In questo capitolo sono riportati i risultati delle attività sperimentali di questa tesi. Si segnala che parte dei risultati sono ottenuti attraverso metodi ufficiali previsti dalla normativa tecnica. Le misure sperimentali sono da considerare svolte con metodi non ufficiali e, tuttavia, l'interesse di questo lavoro è valutare quanto siano applicabili nel settore in alternativa alle metodiche ufficiali.

5.1 Analisi dell'errore assoluto

In seguito alle 3 misurazioni con il PLD per ciascun campione è stato ottenuto l'errore assoluto medio dell'intero campione (Tab.2). Inoltre, dopo un'ulteriore media di tutti gli errori assoluti dei campioni, è stato evidenziato un errore assoluto di sovrastima (ΔL Cal-RaspMedia) di 0,5mm.

Nonostante siano stati osservati errori medi assoluti contenuti, è importante evidenziare che talvolta le misure con lo strumento hanno evidenziato errori non trascurabili fino a circa 16mm (Fig.11), probabilmente causati da condizioni di luminosità non ottimali.



Figura 11 - Campione con un cilindro che ha generato un errore di 16mm

Tabella 2 - Tabella errore assoluto delle misurazioni tra PLD e calibro

CODICE	L raspberry (mm)	L calibro (mm)	ΔL Cal-RaspMedia (mm)	Dev. Standard (mm)
G9576	24,2	24,4	0,2	2,5
F5211	19,2	19,5	0,3	3,6
F4809	19,7	20,1	0,4	1,4
F4821	20,7	20,5	-0,2	1,5
G9411	23,2	21,2	-1,9	2,3
G9259	23,1	19,9	-3,1	1,7
F4801	19,7	17,7	-1,9	2,4
G9010	23,9	26,5	2,6	4,2
G9725	25,1	24,0	-1,1	3,8
G8435	22,6	22,5	-0,1	2,2
G9740	24,7	25,0	0,3	2,6
G9150	21,8	21,0	-0,8	2,9
G9882	21,9	21,7	-0,2	2,4
G2076	21,6	20,2	-1,3	1,7
G4216	25,4	26,0	0,6	1,6
G9611	23,6	23,9	0,3	1,5
G9723	22,0	19,5	-2,5	2,7
G9683	25,1	23,5	-1,7	3,5
G6076	24,9	25,5	0,6	3,2
F4797	22,6	22,3	-0,3	2,8
MEDIA			-0,5	1,3

Gli errori assoluti di ogni campione sono da riportare principalmente ad un eventuale piccola variazione di luce durante la misurazione o alla loro posizione sul piano di acquisizione. In più, è stata effettuata una distribuzione dentro delle classi di frequenza dei valori assoluti dell'errore (Fig.12), dove il valore di minimo e massimo sono rispettivamente 0,1mm e 3,1mm.

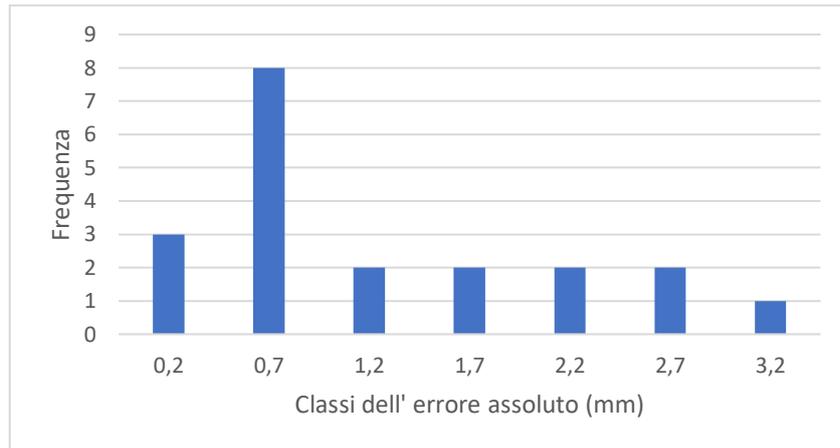


Figura 12 - Distribuzione di frequenza dell'errore assoluto

5.2 Analisi dell'errore relativo

Oltre all' errore assoluto è stato valutato l'errore relativo alle lunghezze medie di ciascun pellet (lunghezza calcolata con il PLD), per definire quanto è importante e impattante l'errore relativo sulla lunghezza effettiva del campione (Tab.3).

Dai calcoli effettuati rapportando l'errore assoluto di ogni cilindro con la sua lunghezza effettiva (L calibro), per poi farne la media tra i cilindri e poi tra i campioni, risulta un errore relativo medio di 2,6%. Anche per l'errore relativo è stata effettuata una distribuzione dentro delle classi di frequenza dei valori assoluti dell'errore (Fig.13), dove il valore massimo si attesta al 16%.

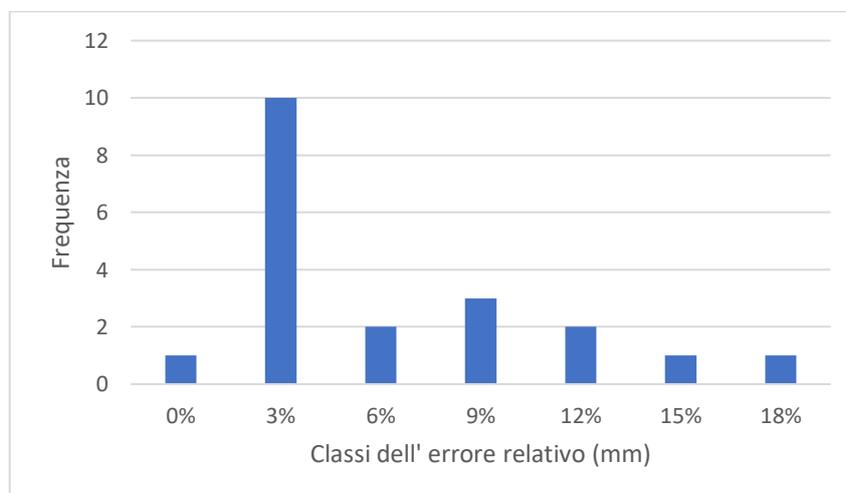


Figura 13 - Distribuzione di frequenza dell'errore relativo

Tabella 3 – Errore relativo delle misurazioni tra PLD e calibro

CODICE	L raspberry (mm)	L calibro (mm)	Errore %	Dev. Standard (mm)
G9576	24,2	24,4	-1%	0,1
F5211	19,2	19,5	-1%	0,2
F4809	19,7	20,1	-2%	0,1
F4821	20,7	20,5	0%	0,1
G9411	23,2	21,2	9%	0,1
G9259	23,1	19,9	16%	0,1
F4801	19,7	17,7	11%	0,1
G9010	23,9	26,5	-9%	0,1
G9725	25,1	24,0	5%	0,2
G8435	22,6	22,5	1%	0,1
G9740	24,7	25,0	-1%	0,1
G9150	21,8	21,0	3%	0,1
G9882	21,9	21,7	1%	0,1
G2076	21,6	20,2	7%	0,1
G4216	25,4	26,0	-2%	0,1
G9611	23,6	23,9	-1%	0,1
G9723	22,0	19,5	12%	0,1
G9683	25,1	23,5	7%	0,1
G6076	24,9	25,5	-2%	0,1
F4797	22,6	22,3	1%	0,1
MEDIA			2,6%	

5.3 Analisi errore medio assoluto in relazione alla lunghezza dei pellet

Confrontando l'errore medio assoluto e le lunghezze effettive dei campioni (L. cal.) non è stata osservata una relazione evidente tra i due parametri (Fig.14). Tuttavia, è possibile osservare che a prescindere dal metodo utilizzato i pellet si distribuiscono in maniera tendenzialmente uniforme in classi di lunghezza, con una concentrazione di errore nelle classi medio-lunghe (Fig.15).

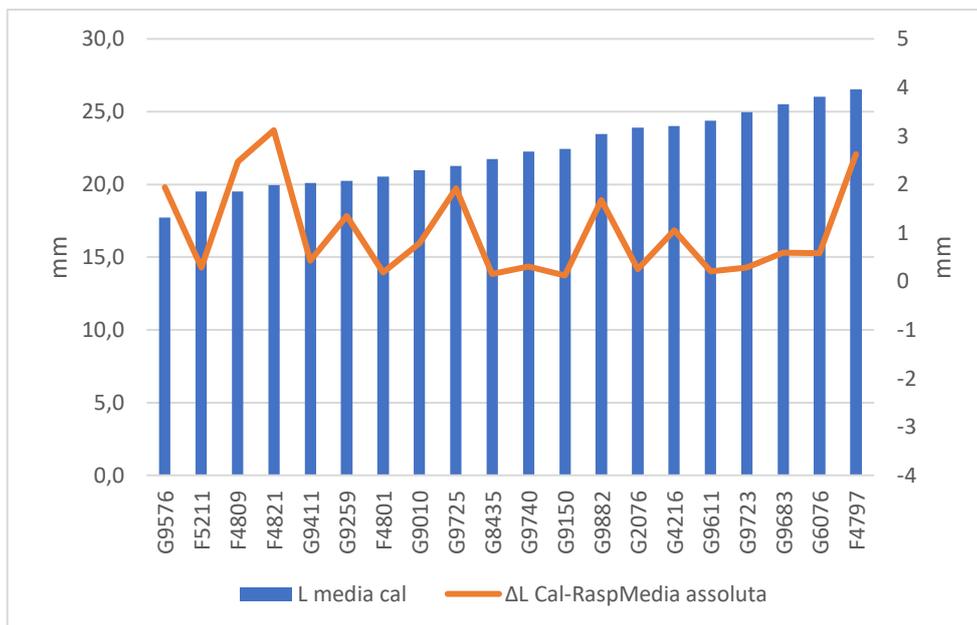


Figura 14 - Relazione errore medio assoluto e lunghezza del cilindro di pelle

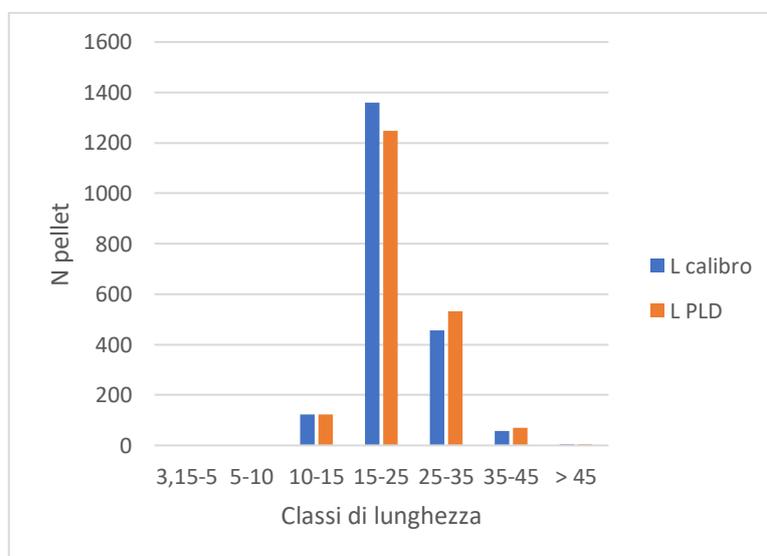


Figura 15 - Distribuzione delle classi di lunghezza ottenute con calibro e PLD

5.4 Risultati dell'analisi del colore

L'analisi delle componenti principali (PCA) non mostra una relazione evidente tra la tonalità di colore (valori di RGB) dei campioni di laboratorio ed errore nella misurazione dello strumento (Fig.16). Tuttavia, è stato possibile osservare che pellet con valori medi estremi, cioè troppo chiari o troppo scuri, non hanno permesso una corretta misurazione dei parametri dimensionali. I valori di RGB in cui sono verificate delle imprecisioni che non hanno permesso la validità dell'operazione sono quelli tendenti al nero, circa di 55, e al bianco, circa di 177.

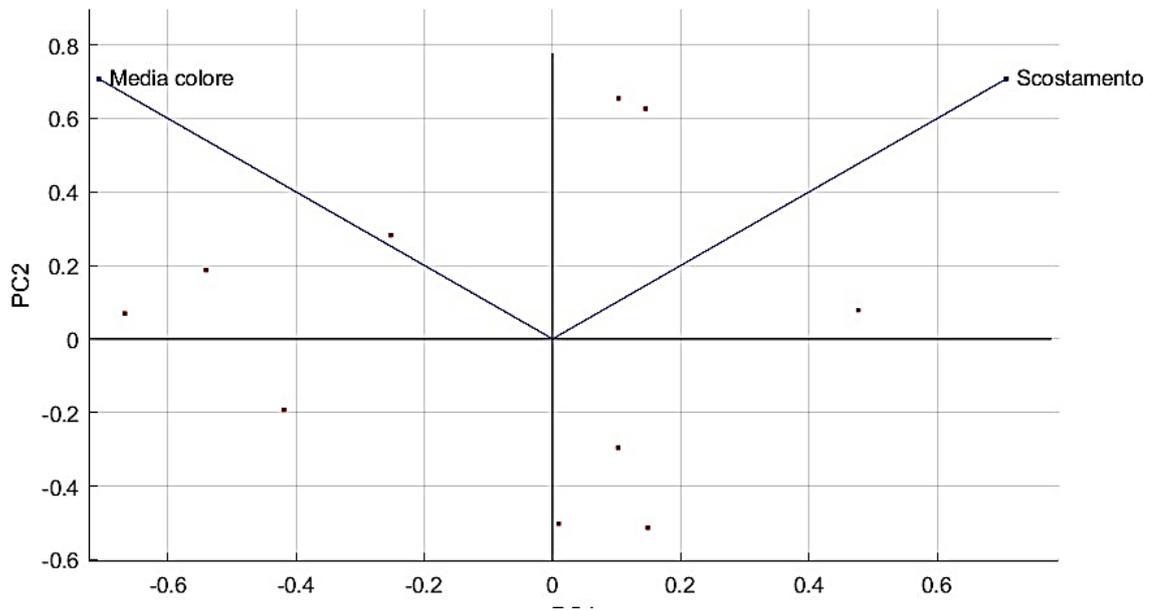


Figura 16 - PCA tra errore assoluto e colore dei campioni

CONCLUSIONI

Dal lavoro di tesi emergono prospettive interessanti relativamente alle prestazioni del Pellet Length Detector, metodo alternativo per la misurazione dei parametri dimensionali del pellet. In particolare, è emerso che:

- lo strumento utilizzato risulta essere una valida alternativa al metodo tradizionale per la misurazione dei pellet (calibro), visto l'errore medio assoluto contenuto di 0,05 mm. Questo errore si discosta di un valore medio del 2,6% rispetto alla lunghezza reale dei pellet (errore relativo);

Va evidenziato che nonostante l'errore medio sia contenuto, c'è un errore assoluto massimo di 16,3 mm. Questo valore estremo indica come sia importante rilevare un numero rappresentativo di campioni al fine di annullare singoli errori elevati;

- non sembrerebbe esserci una chiara correlazione tra lunghezza dei campioni ed entità dell'errore. Tuttavia, si evidenzia una concentrazione dell'errore sulle lunghezze medio-alte dei pellet;

- la PCA non ha evidenziato una relazione diretta tra colore ed errore dello strumento, anche se in fase di analisi è stata riscontrata un'alterazione della misura dei pellet con colorazioni estreme, tendenti quindi al bianco e al nero.

A seguito di queste considerazioni si può concludere che l'attuale prototipo di misura del pellet per riconoscimento di immagine presenta prestazioni compatibili con le attuali esigenze del settore. Gli errori possono essere mantenuti più bassi possibili aumentando il numero di misure e prestando attenzione alle condizioni di acquisizione dell'immagine.

BIBLIOGRAFIA

Agriforenergy, *Speciale pellet- Mercato internazionale e nazionale, reverse charge e certificazione ENplus®*, AIELenergia.it, 4 dicembre 2020.

Statistiche report, Consumi energetici delle famiglie, ISTAT, 21 dicembre 2022.

Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, DIRETTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO, del 23 aprile 2009.

Recupero di Energia da Biomassa, Caputo and Romer.

Wise Society, *Biomasse ed energia e non solo: definizioni e vantaggi per l'ambiente*, AIELenergia.it, 2001

Renewable Energy, *Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions*, ELSEVIER, 2017

Graphical Abstract, *Automatic detection and segmentation of wooden pellet size exploiting a deep learning approach*, Roberto Pierdicca, Mattia Balestra, Giulia Micheletti, Andrea Felicetti, Giuseppe Toscano

Image Recognition and Classification Algorithms, Systems, and Applications, Javidi, University of Connecticut, Storrs, Connecticut, 2002.

Fuel, *Analysis of standard sieving method for milled biomass through image processing. Effects of particle shape and size for poplar and corn stover*, Miguel Gil, Enrique Teruel, Inmaculada Arauzo, ELSEVIER, 2014.

ASITA, *Tecniche di telerilevamento per il riconoscimento dei soggetti arborei appartenenti al genere Platanus spp.*, Fiorillo, Villa, Marchesi, 2015.

ACTA Italus Hortus 25, *Sistemi di telerilevamento utili alla stima della produzione di legno e frutto in castagneti*, Carla Nati, Alessandro Matese, Riccardo Dainelli, Andrea Berton, Niccolò Brachetti Montorselli, Salvatore Filippo Di Gennaro, Castanea, 2019.

Special Issue Article, *Monitoring of pellet coating process with image analysis—a feasibility study*, Kucheryavski, Esbensen, and Bogomolov, Journal of Chemometrics, ELSEVIER, 26 May 2010.

Powder Technology, *An automated and continuous method for the optical measurement of wood pellet size distribution and the gravimetric determination of fines*, S. Wirtz, V. Scherer, ELSEVIER, 1 Maggio 2020.

Energies, Volume and Mass measurement of a Burning Wood Pellet by Image Processing, Sae Byul Kang, Bong Suk Sim and Jong Jin Kim, MDPI, 2017.

Computers and Electronics in Agriculture, Discrimination of bark from wood chips through texture analysis by image processing, James R. Wooten, S.D. Filip To, C. Igathinathane, L.O. Pordesimo, ELSEVIER, 2011.

Graphical Abstract, *Automatic detection and segmentation of wooden pellet size exploiting a deep learning approach*, Roberto Pierdicca, Mattia Balestra, Giulia Micheletti, Andrea Felicetti, Giuseppe Toscano.

IEEE, *Performance evaluation of a benchtop wood pellet length analyser based on visual imaging*, Giuseppe Toscano, Sara Di Stefano, Michele Naspi, Rino Goller, Chiara Masci, Thomas Gasperini, 2022

SITOGRAFIA

Fkv, QICPIC, *Analizzatore Granulometrico a Scansione d'immagine da laboratorio*,

<https://fkv.it/prodotti/caratterizzazione-dei-materiali/analisi-granulometrica/qicpic-analizzatore-granulometrico-a-scansione-d-immagine-da-laboratorio>