

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali – TESAF

Tesi di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

**Controllo e gestione della profondità di semina in una
seminatrice di precisione**

Relatore: Prof. Luigi Sartori

Correlatore: Prof. Francesco Marinello

Laureando: Stefano Zanon

Matricola: 1149642

Anno Accademico 2017/2018

INDICE

Riassunto.....	1
Abstract	2
1 - La semina.....	3
1.1 - La semina: operazione colturale di primaria importanza.....	3
1.2 - Il concetto di qualità nella semina.....	4
1.3 - Tipi di seminatrici	5
1.4 - L'uniformità di semina.....	6
1.5 - La profondità di semina	8
2 - L'ISOBUS.....	14
2.1 - Lo standard ISOBUS.....	14
2.1.1 - Il protocollo CAN-bus.....	15
2.1.2 - I frame CAN e la loro struttura	17
2.2 - Architettura del sistema ISOBUS.....	21
2.2.1 - La componentistica hardware.....	21
2.3 - Le funzionalità software.....	24
2.4 - I sistemi GNSS.....	25
2.5 - Campi di applicazione della tecnologia ISOBUS in agricoltura.....	25
2.6 - Il controllo remoto delle macchine agricole	27
2.7 - I vantaggi dell'ISOBUS	28
3 - Sensori e attuatori.....	32
3.1 - I sensori	32
3.2 - Sensori ad ultrasuoni	34
3.3 - Sensori di temperatura	37
3.3.1 - I termoresistori RTD	37
3.3.2 - I termistori a semiconduttore NTC e PTC.....	39
3.4 - Sensori di posizione analogici.....	41
3.4.1 - Sensori di posizione lineari induttivi (LVDT)	42
3.4.2 - Sensori di posizione angolari induttivi (RVDT)	45
3.4.3 - Sensori di posizione angolari ad effetto Hall.....	46
3.5 - Sensori di posizione digitali: gli encoder	46
3.5.1 - Encoder induttivi e capacitivi.....	47
3.5.2 - Encoder ottici	47

3.5.3 - Encoder potenziometrici.....	48
3.5.4 - Encoder magnetici.....	49
3.5.5 - Sistema di misura degli encoder.....	49
3.5.5.1 - Encoder assoluti.....	50
3.5.5.2 - Encoder incrementali.....	51
3.5.5.3 - Encoder tachimetrici.....	52
3.6 - Gli attuatori.....	53
3.6.1 - Attuatori pneumatici.....	54
3.6.2 - Attuatori idraulici.....	55
3.6.3 - Attuatori elettromeccanici.....	55
4 – La profondità di semina: i sistemi di controllo presenti sul mercato.....	57
4.1 - Ag Leader.....	57
4.2 - Precision Planting.....	58
4.3 – Dawn Equipment.....	59
4.4 – Agrometal.....	60
4.5 – Amazone.....	62
4.6 - John Deere.....	63
4.7 – Forigo Roter Italia.....	64
4.8 – Horsch.....	64
4.9 – Kinze.....	65
4.10 – Kuhn.....	66
4.11 – Sulky.....	67
4.12 – Väderstad.....	68
5 – Obiettivo della tesi.....	70
6 – Materiali e metodi.....	71
6.1 – Descrizione della seminatrice utilizzata nelle prove.....	71
6.2 – La componentistica utilizzata.....	72
6.3 – Organizzazione del banco prova.....	76
7 – Risultati.....	87
7.1 – Carichi e pressioni esercitati dai sistemi di regolazione a molla.....	87
7.2 – Il meccanismo di regolazione delle ruote di profondità di semina.....	91
7.3 – Il sensore di movimento angolare.....	97
7.4 - La prova in campo.....	98
8 – Conclusioni e discussioni.....	107

Bibliografia	109
Sitografia.....	114

Riassunto

La profondità di semina è un parametro molto importante che può influire, anche pesantemente, sulla resa finale di una coltura, come dimostrano molti studi condotti da diversi autori.

Una deposizione del seme troppo profonda può impedire al seme di germinare o sviluppare plantule poco vigorose che possono soffrire di tale condizione per tutto il periodo colturale successivo; al contrario, la deposizione del seme ad una profondità eccessivamente superficiale può portare a morte la giovane plantula per mancanza di umidità o divenire oggetto di predazione da parte degli uccelli.

Una possibile soluzione a questa problematica risiede nello sviluppo di seminatrici in grado di controllare costantemente la profondità di semina alla quale operano, ed in caso di necessità, correggerla attraverso sistemi automatici in grado di interagire tra di loro.

Per questo motivo si è cercato di sviluppare un sistema di controllo e gestione della profondità di semina, in una seminatrice di precisione, con lo scopo di rendere tutte le operazioni automatiche e di elevata precisione senza che sia necessario l'intervento dell'operatore.

In questo lavoro sono stati condotti degli studi sulla componentistica considerata appropriata per tale applicazione al fine di verificare la stabilità e l'affidabilità del sistema, con l'obiettivo di realizzare un sistema di controllo semplice ed affidabile anche in condizioni operative difficoltose.

Abstract

The depth of sowing is a very important parameter who can affect, even heavily, the final yield of an agronomic culture, as shown by many studies conducted by several authors.

A too much deep seed deposition can prevent the seed germination or develop weak seedlings who can suffer of this weak condition for all the next cultural period; in reverse, a shallow seed deposition can conduct the young seedling to die, due a limited humidity rate or predispose the seed to the bird predation.

A possible solution to this problem resides in the development of seeders who have faculty to control, constantly, the sowing depth, and if necessary fix it through automatic systems able to interact with each other.

To this reason we tried to develop a control and management system of the sowing depth, in a precision seeder, with the aim to make all the automatic operations with a high precision level, without the operator intervention is necessary.

In this work they were conducted studies about the appropriate and eligible hardware to this application, verifying the stability and the system reliability even in hard operative conditions.

1 - La semina

1.1 - La semina: operazione colturale di primaria importanza

La semina è l'operazione che permette di distribuire i semi nel terreno, simulando la naturale diffusione degli stessi da parte della pianta. Questa lavorazione ricopre un ruolo di importanza primaria tra tutte le varie operazioni che si svolgono durante il ciclo colturale, infatti, questa operazione colturale ha lo scopo di mettere a dimora le sementi dalle quali, successivamente, origineranno le piante che andranno a comporre la coltura che fornirà, da un punto di vista economico, il prodotto utile vendibile (Nauva, 2016).

Per questo motivo la semina è un'operazione chiave che influisce in maniera molto importante sull'esito finale della coltura definendone la resa complessiva, in quanto non è possibile porre rimedio ad eventuali problematiche che si verificano in questa fase, se non in maniera molto contenuta e a seconda della specie coltivata.

I vari fattori che influenzano la buona riuscita di questa operazione colturale sono: la qualità del letto di semina ottenuto attraverso le lavorazioni primarie e complementari del terreno, le condizioni ambientali durante il processo di semina stesso, le caratteristiche genetiche e di vitalità delle sementi, ed in particolar modo, le caratteristiche delle macchine seminatrici (Nauva, 2016).

La seminatrice è l'attrezzo tramite il quale si esegue meccanicamente la semina; le funzioni che essa può svolgere sono molteplici, ma tutte presentano tre compiti fondamentali. Il primo di questi è l'apertura di un solco nel terreno, il secondo è la deposizione della semente all'interno di tale solco, ed infine il terzo compito riguarda la chiusura del solco e la costipazione del terreno al fine di favorire il contatto dello stesso con il seme per facilitarne la germinazione.

La capacità di eseguire questa operazione colturale, rispettando tutti gli aspetti che garantiscono una buona qualità di semina, permette di sfruttare al meglio tutte le potenzialità genetiche che le piante sono in grado di esprimere. In questo modo, garantendo un'ottima germinazione della plantule, nonché un equilibrato investimento per metro quadro (e di conseguenza lo spazio per ogni singola pianta) si pongono le basi per un eccellente sviluppo della coltura, permettendo alla stessa di mettere in pratica la competizione nei confronti delle malerbe e la resistenza a stress imputabili a squilibri idrici e nutrizionali cui le piante potrebbero andare incontro (Nauva, 2016).

1.2 - Il concetto di qualità nella semina

Il concetto di qualità ricopre all'interno di questa operazione colturale una fondamentale importanza, e con essa si intendono tutta una serie di caratteristiche e parametri che nell'insieme portano ad avere un'emergenza totale, veloce ed uniforme.

Un'elevata qualità di semina si ottiene ponendo attenzione ad aspetti come:

- *Posizione del seme nel fondo del solco:* è importante che il seme non sia depositato fuori solco pena il fatto che possa essere predato dagli uccelli o che, trovandosi in condizioni ambientali avverse (scarsa umidità, presenza di luce, eccessive escursioni termiche), sia inibito alla germinazione.
- *Buon contatto tra suolo e seme:* questo permette al seme di potersi idratare con facilità e di avviare così le necessarie reazioni metaboliche per poter germinare, nonché di essere protetto dalle escursioni termiche e di poter accedere con immediatezza alle sostanze nutritive contenute nel suolo circostante.
- *Posizionamento della semente a profondità uniforme rispetto alla superficie del terreno:* permette di avere un'uniformità di emergenza nell'unità di tempo ed evita che vi siano eccessive differenze in termini di vigoria tra le piante dovute allo stress che la plantula sopporta per poter emergere in caso di eccessiva profondità di collocamento del seme.
- *Buona spaziatura longitudinale e trasversale:* molto importante affinché le piantine si sviluppino regolarmente e non entrino in competizione tra di loro per quanto riguarda la radiazione luminosa, l'acqua e le sostanze nutritive, come avverrebbe in caso di deposizione delle sementi troppo ravvicinata. Evita anche situazioni di fallanze dovute ad una mancata deposizione del seme od ad un'eccessiva spaziatura tra due semi.
- *Riducendo il danneggiamento dei semi:* si evitano problematiche quali fallanze o germogliamenti che poi possono culminare con la morte della plantula.
- *Utilizzando seminatrici polivalenti e di facile regolazione:* permette all'operatore di effettuare le dovute regolazioni con semplicità ed efficacia ottimizzando la distribuzione e deposizione delle sementi nel terreno.
- *Tempestività d'intervento:* i semi si trovano in condizioni ambientali quali temperatura e contenuto d'umidità del suolo ottimali per la germinazione e l'emergenza, evitando così, situazioni di stress termico e/o idrico in un momento del ciclo molto delicato. Si ottengono vantaggi anche da un punto di vista della struttura del terreno in quanto avendo modo di rispettare le giuste finestre temporali d'intervento si può evitare di dover entrare in campo con le macchine quando il terreno è troppo umido, creando problemi di costipamento che andrebbero ad influenzare la facilità di emergenza da parte della plantula (Sartori, 2016b).

Il mancato rispetto di queste norme può comportare perdite di resa, dovuta ad una scarsa germinazione ed emergenza delle plantule, più o meno accentuata a seconda delle componenti interessate.

Al fine di rispettare tutti i parametri inerenti la qualità si semina, un ruolo di fondamentale importanza è svolto dalla tipologia di macchina seminatrice utilizzata in questa operazione; le caratteristiche costruttive, infatti, sono in grado di modificare tali fattori.

1.3 - Tipi di seminatrici

Esistono diverse tipologie di seminatrici classificate in base al sistema di semina che esse utilizzano, ovvero:

- *Seminatrici a spaglio*: sono utilizzate per la distribuzione randomizzata di una dose prestabilita di sementi sulla superficie di terreno. Questa tecnica di semina è la più antica e la meno precisa. Essa simula l'azione manuale compiuta dall'agricoltore. Con queste seminatrici non è possibile ottenere una regolare deposizione dei semi, né all'interno della fila di semina, né tra le file stesse. Per tali caratteristiche ed il mancato interrimento del seme, qualora non fosse eseguito in un secondo momento ed in modo grossolano, è necessario incrementare la dose di sementi da distribuire per cercare di raggiungere un investimento finale il più possibile ottimale.
- *Seminatrici a righe*: sono chiamate anche seminatrici tradizionali od universali grazie alla loro polivalenza d'impiego. Consentono la deposizione delle sementi in solchi paralleli. In passato erano impiegate per tutte le colture, ma attualmente il loro utilizzo si è ridotto alle colture autunno-vernine e specie foraggere, in quanto colture che risentono meno di eventuali densità di semina non ottimali. Queste macchine permettono soltanto di determinare la distanza tra due file adiacenti di semina, ovvero dell'interfila: all'interno della fila stessa (intrafila) la semente è depositata in fila continua con distanza del tutto irregolare.
- *Seminatrici di precisione*: appartengono alla categoria di seminatrici di più recente realizzazione e sono caratterizzate da un'elevata complessità costruttiva ed operativa. Queste macchine eseguono una deposizione delle sementi a intervalli regolari all'interno della fila di semina, le quali sono a poste a determinate distanze a seconda della coltura; in questo modo le piante presentano una corretta spaziatura trasversale e longitudinale, permettendo loro uno sviluppo ottimale. Questo tipo di seminatrice è utilizzata per la semina di colture a ciclo primaverile-estivo e per le specie ortive, sia a seme nudo che

eventualmente confettato, colture caratterizzate da elevate esigenze colturali in quanto ad elevato reddito (Nauva, 2016).

Nonostante sia possibile apportare dei miglioramenti tecnologici - ad eccezione delle seminatrici a spaglio ove questo oramai non avrebbe molto senso al giorno d'oggi, dato lo scarso utilizzo di queste macchine in un'agricoltura sempre più moderna e competitiva - sia nelle seminatrici a righe che a precisione, sono proprio quest'ultime a beneficiare maggiormente dello sviluppo e dell'implementazione di sistemi altamente tecnologici che permettano il controllo e la gestione di parametri fondamentali durante il processo di semina. È proprio a tale scopo che, attualmente, la tecnologia offre i mezzi e le opportunità per sviluppare sistemi automatici atti a consentire una semina sempre più "di precisione" in grado di garantire una buona uniformità, curando tutti quegli aspetti necessari a garantire elevatissime qualità di semina, con conseguenti ricadute positive sulle rese finali e sul risparmio che si può ottenere proprio in questa operazione colturale grazie all'ottimizzazione di tutti i fattori produttivi chiamati in causa.

1.4 – L'uniformità di semina

L'uniformità di semina è un aspetto molto importante che deve essere opportunamente considerato, in quanto le ricadute che esso ha sulla resa finale della coltura possono essere anche di notevole entità, sia da un punto di vista di incremento che di decremento. Al fine di garantire una buona uniformità bisogna garantire una buona precisione in fase di semina. Essa deve poter assicurare la capacità di raggiungere determinati parametri di fondamentale importanza per lo sviluppo della coltura quali:

- distanza dell'interfila a seconda della coltura
- spaziatura tra i semi di una stessa fila il più possibile vicina a quella teorica ricercata
- profondità di semina ottimale per la specie coltivata

Tali obiettivi permettono di raggiungere un investimento finale ottimizzato, con lo scopo di sfruttare al meglio la capacità produttiva della coltura e di tutti i fattori produttivi impiegati durante il processo di coltivazione. Tutto ciò, sostanzialmente, dipende dalla seminatrici utilizzate, le quali devono essere costruite in modo tale da mantenere costanti questi parametri durante l'intero periodo di svolgimento dell'operazione e avere dei sistemi di regolazione che ne permettono la loro correzione qualora fosse necessario (Nauva, 2016).

È importante, infatti, porre l'attenzione non soltanto sulla precisione del sistema di distribuzione, bensì anche sui sistemi di trasporto della semente sino agli organi assolcatori, in quanto una non ottimale conformazione dei tubi adduttori può ostacolare la discesa dei semi portando a rimbalzi del

seme stesso con conseguente variazione della traiettoria di discesa ideale. Tali problemi possono condurre a distanze di semina irregolari non imputabili al solo apparato distributore.

Deposizioni delle sementi irregolari e non ottimali nell'intrafila portano ad avere una densità di semina finale che non assicura la massima produttività della coltura, dovuta al numero ridotto di piante per unità di superficie o, al contrario, all'insorgere di fenomeni di competizione tra le stesse piante della coltura causata da un'eccessiva presenza di individui per unità di superficie (Wade et al., 1988). Quest'ultimo caso porta anche ad uno spreco di sementi che in molte colture è un'importante voce di spesa.

Ne sono un esempio le fallanze e le doppie deposizioni. Le fallanze si verificano quando, durante la deposizione delle sementi lungo la fila di semina, la distanza che intercorre tra due semi ha valori superiori a 1,5 volte la distanza di semina. Questo evento può essere dovuto sostanzialmente a due fattori; la depressione esercitata sul disco di semina e la caduta del seme lungo il tubo adduttore.

Le doppie deposizioni, invece, si verificano quando nello stesso punto del letto di semina invece di essere presente un solo seme si trovano due o più sementi. Da un punto di vista pratico si parla di doppia deposizione quando la distanza reale ha valori inferiori alla metà della distanza teorica di semina. Le cause che possono dare origine alle doppie deposizioni sono la presenza nello stesso foro del disco di due o più sementi. In realtà quando sono presenti due semi per foro del disco di semina si parla di doppia deposizione, quando ne sono presenti tre di tripla deposizione e così via dicendo (Nauva, 2016).

Una distribuzione delle sementi molto irregolari possono portare a perdite di resa anche dell'ordine del 30% (Wade et al., 1990).

Una regolare e adeguata spaziatura tra le sementi all'interno della fila di semina, in base alla specie coltivata, permette di migliorare la resa (Nielsen, 1996) e di ottenere un adeguato sviluppo dell'apparato radicale, evitando situazioni di competizione (Griepentrog, 1998; Karayel et al., 2002) con altre piante nelle immediate vicinanze qualora la distanza tra esse fosse insufficiente a tal proposito (Panning et al., 2000). È infatti noto che la distanza che intercorre tra le sementi influenza la struttura della canopy con conseguente utilizzo più o meno efficiente della radiazione luminosa e conseguente impatto sulla resa (Mattera et al., 2013); studi dimostrano infatti che la possibilità da parte delle piante di assorbire la lunghezza d'onda del rosso lontano influenza l'accumulo di fotosintati all'interno delle cellule (Kasperbauer et al., 1994), con ricadute sulla crescita e lo sviluppo.

La densità di semina ottimale è studiata, per ogni singola coltura, proprio per garantire alle piante la massima disponibilità di acqua, luce, aria e nutrienti, al fine di ottenere la massima efficienza di tutti i fattori produttivi.

Anche la distanza tra le file è da considerare con dovuta attenzione in quanto tale aspetto, se malamente gestito, può influenzare la competizione tra le piante, favorendone l'insorgere a discapito della produttività (Worku et al., 2011).

Per tutti questi motivi l'esecuzione della semina di precisione è un'operazione molto delicata che varia in base alla coltura trattata; di conseguenza le seminatrici di precisione sono dotate di diversi meccanismi che consentono di regolare, con più o meno precisione, diversi parametri, permettendo di eseguire una semina di qualità che rispetta i requisiti di ogni singola coltura e tipo di terreno (Nauva, 2016). I sistemi di regolazione presenti nelle seminatrici possono essere di tipo manuale, elettrico o anche completamente automatici e sono prevalentemente incentrati sul controllo del sistema di distribuzione e deposizione del seme. Per quanto riguarda il sistema di distribuzione della semente, particolare attenzione è stata posta a soluzioni tecniche che permettono di regolare la velocità di rotazione del disco porta-seme in base alla velocità di avanzamento della macchina. È stato, infatti, ampiamente dimostrato che eccessive o irregolari velocità di semina sono tra le principali responsabili di errate deposizioni che danno origine a doppie deposizioni, fallanze e distanza tra le sementi non concorde con quella ricercata, portando ad una irregolare uniformità di semina che si traduce in una perdita di resa (Nielsen, 1995; Staggenborg et al., 2004). Piante che crescono troppo vicine le une alle altre hanno un'elevata probabilità di entrare in competizione ed allo stesso modo anche gli individui eccessivamente distanziati portano ad un calo della resa finale in quanto non permettono di ottimizzare lo sfruttamento della superficie coltivabile a disposizione (Krall et al., 1977; Nielsen, 1997; Vanderlip et al., 1988).

Per quanto riguarda il controllo della profondità di semina, nonostante l'enorme importanza che questa ricopre, le soluzioni ad oggi adottate sono minori e probabilmente meno avanzate rispetto a quelle adottate per il controllo della distribuzione del seme.

1.5 - La profondità di semina

Ogni coltura ha una profondità ideale di semina; nonostante tutto essa può subire delle variazioni in base alla tessitura del terreno che influenza parametri molto importanti per il seme quali, ad esempio, l'umidità. È noto che semine troppo superficiali solitamente inferiori a 30 mm (il normale modello di semina prevede, per il gran numero delle colture, che la semente venga deposta ad una profondità variabile da 30 a 50 mm) possono esporre le sementi alla predazione da parte degli uccelli, nonché ad un livello di umidità troppo basso per permettere al seme di germinare, ponendo la plantula in condizioni di stress idrico. D'altro canto anche una semina troppo profonda porta a numerosi svantaggi (Gan et al., 1995; Romanekas et al., 2009; Cao et al., 2015).

Durante la semina infatti la semente dovrebbe essere depositata in un ambiente nel quale essa avrà facilità di germinazione ed emergenza (Choudhary et al., 1985; Stockton et al., 1996; Chen et al., 2004). Al fine di massimizzare la resa di una coltura il posizionamento del seme deve essere mantenuto vicino alla profondità di semina ottimale (Janelle et al., 1993; Altikat et al., 2013).

Prerequisiti per la germinazione dei semi sono un'adeguata temperatura (Miedema, 1982), un sufficiente livello di umidità e di ossigeno per la respirazione (Sartori et al., 2016a).

L'agricoltore può influenzare la temperatura solo scegliendo il miglior periodo dell'anno in cui seminare. Il controllo di parametri come acqua ed ossigeno è possibile solo attraverso la profondità di semina, in modo tale da fornire questi fattori nella migliore proporzione possibile.

Un adeguato livello di umidità solitamente si riscontra incrementando la profondità di semina, ma in questa maniera il rischio di resistenza meccanica da parte del suolo, nei confronti dei semi, aumenta; al fine di ottimizzare questi parametri, l'operatore deve posizionare il seme ad una profondità sufficiente ad assicurare il giusto livello di umidità ed allo stesso tempo abbastanza superficiale per poter permettere alla semente di poter emergere dal suolo prima che essa termini le sostanze nutritive a sua disposizione, utilizzate per la crescita sotto il profilo della superficie del suolo. È infatti noto che, all'interno del suolo, non essendo presente radiazione luminosa, la piantina non è in grado di avviare la fotosintesi per produrre l'energia necessaria ad incamerare risorse nutritive (Özmerzi et al., 2002).

Molti ricercatori hanno dimostrato l'importanza di deporre il seme ad una profondità ottimale; una semina troppo superficiale o profonda infatti si traduce in una perdita di performance e di resa da parte della coltura.

McGahan et al. (1992) hanno dimostrato come la variazione della profondità di semina influenzasse la resa delle colture di cereali. Anche altri autori (Hadjichristodoulou et al., 1977; Loeppky et al., 1989) hanno condotto studi sull'influenza della profondità di semina riguardo la resa finale della coltura constatando che tale parametro, se eccessivo, può influenzarla negativamente.

Allo stesso modo, Morrison et al., (1985) hanno evidenziato che l'emergenza di frumento, sorgo e soia è relazionata con la profondità di semina, focalizzando l'attenzione sul fatto di come vi sia una profondità di semina ottimale alla quale si verifica la massima emergenza delle sementi.

Kirby, (1993) ha svolto un lavoro che aveva lo scopo di approfondire l'impatto che la profondità di semina ha sull'emergenza, sulla crescita e sullo sviluppo delle plantule di orzo e di frumento. In questa prova un orzo a semina primaverile è stato seminato a profondità di 50, 100 e 200 mm all'interno di una serra e sono stati rilevati parametri quali la crescita del coleoptile, l'allungamento degli internodi apicali e lo sviluppo di foglie e radici, a partire dalla germinazione sino all'emergenza della quarta foglia.

Il frumento è invece stato seminato in campo con un gradiente di profondità continua dal range di 0-150 mm in un terreno sabbioso-argilloso. Si è poi provveduto alla raccolta di dati quali l'emergenza delle plantule e la conta delle foglie sino alla comparsa della foglia bandiera. Sono inoltre state misurate la lunghezza del coleoptile, degli internodi apicali e delle foglie; è stato inoltre valutato lo sviluppo delle piantine.

I risultati ottenuti hanno dimostrato che il tempo di emergenza delle plantule di frumento incrementava con l'aumentare della profondità di semina.

Sia nell'orzo che nel frumento si è notato che l'accrescimento dei primi internodi e delle prime foglioline è stato minore con le maggiori profondità di semina. È stato inoltre notato che anche la massa secca delle radici embrionali di orzo subiva una riduzione con l'aumentare della profondità; anche nel frumento l'aumentare dell'interramento del seme aveva riscontri sull'accrescimento dell'apice e sull'allungamento dell'intero culmo (Kirby, 1993).

Un'ulteriore prova, effettuata da Özmerzi et al. (2002), ha esaminato le differenze che intercorrono tra diverse profondità di semine (40, 60, 80 mm) per quanto riguarda il mais. La sperimentazione ha evidenziato un effetto negativo che ha una profondità di 40 mm sull'emergenza delle plantule, al contrario di una profondità di 60 mm che riporta la migliore uniformità di emergenza sulla superficie oggetto di studio. In conclusione la posizione del seme nel profilo verticale del suolo influenza il tempo necessario all'emergenza ed il tasso d'emergenza stesso (Özmerzi et al., 2002).

Yagmur et al. (2009), tramite una sperimentazione eseguita nell'est Turchia, investigarono l'effetto che una differente profondità di semina ha sulla resa in granella in frumento tenero in condizioni di scarsa disponibilità idrica. Tale prova prevedeva la semina a differenti profondità di 30, 50, 70 e 90 mm. I risultati ottenuti mostrarono che il frumento seminato ad una profondità di 50 mm ottenne una resa maggiore rispetto a quello seminato alle altre profondità (30, 70 e 90 mm). Nel complesso, l'incremento di resa che ha avuto il frumento seminato ad una profondità di 50 mm è stato pari al 24,8% rispetto alla profondità di 30 mm, del 28,7% rispetto alla profondità di 70 mm e del 167% rispetto alla profondità di 90 mm.

Aikins et al. (2008) hanno condotto una sperimentazione nella quale si è indagato l'impatto della profondità di semina sull'emergenza delle plantule, sulla loro crescita e sulla resa finale. La coltura oggetto di studio è stato il fagiolino dall'occhio nero (*Vigna unguiculata*). Le sementi sono state poste a profondità di 20, 30, 50, 70 e 90 mm. Successivamente si è provveduto alla rilevazione dei vari parametri, tra i quali la resa di quantità in sostanza secca espressa in kg/ha. I risultati mostrano che, nonostante non vi sia una differenza significativa da un punto di vista statistico, la resa più alta è stata ottenuta dalle piante che sono state seminate ad una profondità di 50 mm, con un incremento del 30% rispetto alle sementi deposte a 30 mm. La semina a 90 mm di profondità ha riportato i

valori più bassi in assoluto in termini di produzione di sostanza secca (in questo caso l'incremento di resa delle sementi deposte a 50 mm è stato pari al 134%). Tutto questo a dimostrazione che un'uniforme profondità di semina è essenziale per ottenere le più elevate rese che massimizzano il potenziale produttivo delle colture. Anche l'altezza della pianta è stata oggetto di studio; nonostante l'analisi della varianza abbia mostrato che, statisticamente parlando, non vi sia una differenza significativa tra le varie profondità di semina, si è comunque osservato che le piante le cui sementi erano state seminate alla profondità di 50 mm hanno riportato i più alti valori di altezza, seguite dalle piante seminate rispettivamente a 30, 20 e 70 mm; anche in questo caso la profondità di semina di 90 mm ha fatto osservare le taglie più contenute in assoluto (Aikins et al., 2008).

La profondità dipende dalla resistenza del suolo, la quale viene a sua volta influenzata dalla velocità di avanzamento: tanto maggiore è la resistenza del terreno e la velocità e tanto minore è la profondità di deposizione del seme. A velocità costante e con terreni caratterizzati da resistenza variabile, gli assolcatori depositano il seme più in profondità nei suoli cedevoli rispetto a quelli più compatti. Considerando inoltre l'umidità del terreno, essa influenza la resistenza del suolo, determinando un approfondimento della deposizione della semente proprio nei casi in cui non è necessario, mentre viene ridotta nei suoli più secchi, ove invece, sarebbe necessario attuare una deposizione più approfondita proprio per evitare che il seme vada incontro a situazioni di stress idrico durante la delicata fase di germogliamento. Tutto questo porta ad un'emergenza irregolare della coltura.

Il controllo della profondità può essere eseguito attraverso le ruote di profondità oppure attraverso il controllo della pressione degli organi assolcatori (Sartori et al., 2016a).

Il controllo attraverso le ruote di profondità, che devono essere installate quanto più possibile vicino agli assolcatori, garantisce il mantenimento costante della profondità, ma il problema risiede nel fatto che questa regolazione deve essere eseguita manualmente per ogni singola unità di semina ed esclude di fatto la possibilità di un controllo in tempo reale.

Una possibile soluzione può essere l'introduzione di sensori ad ultrasuoni posizionati sull'unità di semina che permettono di determinare esattamente la profondità di lavoro dell'assolcatore. Nonostante alcune problematiche debbano essere ancora risolte, il sistema sembra promettente in quanto, costituisce la base per la regolazione automatica della profondità e di conseguenza l'adozione della semina a profondità variabile.

La prima soluzione per la variazione continua della profondità di semina è quella di avere a disposizione sensori in grado di rilevare le caratteristiche del suolo come la tessitura o la sostanza organica, in modo tale che la profondità venga aumentata quando il terreno è più sciolto, mentre al contrario, venga ridotta su terreno argilloso. In tal modo si applica una VRA basata su mappe di

tessitura, in quanto proprio quest'ultime sono il punto di partenza, create ad esempio con sistemi geoelettrici.

La seconda soluzione si basa sull'umidità del terreno, partendo dal presupposto che la deposizione venga approfondita sino a che non sia raggiunto un ottimale livello di umidità caratteristico per ogni coltura.

In questo modo la profondità di lavoro viene regolata applicando dei martinetti idraulici comandati da opportuni sensori installati a monte delle ruote di profondità. I sensori per la rilevazione del livello di umidità nei prismatici strati di terreno sono generalmente basati su sistemi di analisi della riflettanza nell'infrarosso vicino (NIR) (Sartori et al., 2016a).

Il controllo della profondità attraverso la regolazione della pressione esercitata dagli elementi seminanti, in base alle caratteristiche del terreno, ha lo scopo di limitare le problematiche derivanti dalla semina a profondità irregolari che deriva da fattori come la velocità di avanzamento della macchina, dalle caratteristiche fisiche del terreno (struttura e tessitura) e dal contenuto idrico del suolo.

Tradizionalmente, la regolazione della pressione dell'elemento seminante è compiuta da una molla di carico che consente una regolazione manuale di ogni singola unità di semina e che rimane invariata durante il lavoro, oppure da ammortizzatori pneumatici regolabili, ma centralizzati.

Di recente, sul mercato, sono comparsi degli attuatori di tipo idraulico che permettono di variare il carico che agisce su ogni corpo di semina, secondo le specifiche caratteristiche del terreno e che permettono di mantenere costante la profondità di semina. Questi martinetti idraulici vengono installati in sostituzione o ad integrazione delle molle di carico che rilevano le sollecitazioni subite dall'unità di semina durante il lavoro.

Sensori posti a livello delle ruote di profondità dell'unità di semina stessa raccolgono dati sulla pressione di lavoro. Tali dati vengono confrontati con le pressioni impostate ed il sistema agisce aumentando o diminuendo il carico sull'utensile in modo automatico, in base alle condizioni incontrate che possono essere la differente tessitura del terreno, le linee di traffico od una superficie non perfettamente livellata. Le zone compatte o che presentano una maggiore densità apparente necessitano di un livello di carico superiore per garantire la corretta profondità, mentre in terreni più sciolti od umidi la pressione esercitata sull'elemento viene diminuita, in quanto esso altrimenti tenderebbe a lavorare più in profondità. Ogni singola unità di semina può essere settata in modo indipendente (Sartori et al., 2016a).

Data l'importanza, come sopra riportato, della profondità di semina, è necessario migliorare con opportune implementazioni tecniche gli organi caratterizzanti la seminatrice. A tal proposito

particolare attenzione va posta nell'elettronica e nella meccanica, affinché quest'ultime lavorino in forte sinergia tra di loro.

La soluzione a questa problematica si ha applicando sistemi di monitoraggio e correzione meccatronici, che permettono di monitorare costantemente la profondità di semina, avvalendosi di specifici sensori e, qualora fosse necessario, correggerla mediante opportuni meccanismi denominati attuatori.

Affinché questo sia possibile, i vari sottosistemi di una seminatrice devono essere in grado di dialogare ed interagire tra di loro; a tal scopo ci si avvale della tecnologia ISOBUS, uno standard che permette di mettere in comunicazione tutti i sistemi di un attrezzo e del binomio trattatrice-operatrice, in modo tale da consentire una maggiore automazione, precisione e tempestività d'intervento con tutte le positive ricadute a ciò connesse.

2 – L’ISOBUS

2.1 – Lo standard ISOBUS

ISOBUS è uno standard universale che permette la comunicazione elettronica tra attrezzi agricoli, trattori e computer ed è la naturale conseguenza della rivoluzione elettronica che in questo periodo interessa il mondo dell’agricoltura sotto vari aspetti ed in particolar modo sotto il profilo di un’automazione sempre più spinta.

ISOBUS è regolamentato dallo standard internazionale ISO 11783 denominato “Trattori e macchinari per agricoltura e silvicoltura – Comando seriale e reti dati per comunicazioni”. Questo standard fa riferimento alla normativa SAE J1939 (SAE-Society of Automotive Engineers) la quale è stata concepita originariamente per la comunicazione e la diagnostica tra le varie componenti di veicoli quali automobili e autoveicoli per lavori pesanti come movimentazione terra o autotrasporti. Il principale obiettivo di questa tecnologia è standardizzare le comunicazioni tra trattori ed attrezzi ad essi collegati, assicurando la piena compatibilità dei trasferimenti dati tra i sistemi mobili ed il software facente parte del sistema informativo aziendale, che ha il compito di gestire ed elaborare tali dati con il fine di ricavarne informazioni utili alla gestione degli input produttivi all’interno dell’azienda.

ISOBUS adotta una soluzione plug-and-play, ovvero una tecnologia che permette di accoppiare la trattrice e la relativa attrezzatura tramite il semplice collegamento di appositi cavi per un uso immediato delle macchine operatrici senza che sia necessario alcun intervento di installazione e/o di configurazione. Ad ulteriore semplificazione tutto il complesso trattore-attrezzatura può essere gestito da un unico terminale presente in cabina chiamato Universal Terminal (UT).

Questa necessità nasce dal fatto che in passato ogni costruttore utilizzava soluzioni costruttive proprie, le quali dovevano essere appositamente adattate alle varie combinazioni tra trattore e attrezzature. Ciò rendeva semplici operazioni, come lo scambio di dati sulla velocità ad esempio, difficili ostacoli da superare.

La norma ISO 11783 nasce a metà degli anni ’90 dalla necessità di standardizzare e centralizzare il sistema di controllo e l’interfaccia uomo-macchina nei sistemi composti da trattrice e macchinari da lavoro. Prima dell’introduzione di questo standard ogni attrezzo di lavoro dotato di controllo elettronico portava con sé uno o più dispositivi di comando da collocare in cabina.

Strutturalmente lo standard ISOBUS è composto da 14 parti che ne definiscono il funzionamento a vari livelli che nel corso degli anni hanno avuto un costante sviluppo. Le parti in oggetto che compongono la norma ISO 11783 sono le seguenti:

- ISO 11783-1: General standard for mobile data communication
- ISO 11783-2: Physical layer
- ISO 11783-3: Data link layer
- ISO 11783-4: Network layer
- ISO 11783-5: Network management
- ISO 11783-6: Virtual terminal
- ISO 11783-7: Implement messages application layer
- ISO 11783-8: Power train messages
- ISO 11783-9: Tractor ECU
- ISO 11783-10: Task controller and management information system data interchange
- ISO 11783-11: Mobile data element dictionary
- ISO 11783-12: Diagnostics services
- ISO 11783-13: File server
- ISO 11783-14: Sequence control

Nell'insieme queste regole costituiscono la norma che regola ISOBUS, definendone i principi di funzionamento di ogni singola sezione all'interno del sistema stesso.

Questo permette di mettere in comunicazione ECU di diverse case costruttrici e di garantirne la piena compatibilità ed interoperabilità purché siano quest'ultime progettate per essere ISOBUS compatibili.

Da un punto di vista prettamente elettronico gli standard sopra citati utilizzano per lo scambio dati un protocollo di comunicazione denominato CAN-bus e standardizzato dalla normativa ISO 11898-1 (Mattetti et al., 2012).

2.1.1 - Il protocollo CAN-bus

CAN-bus è l'acronimo Controller Area Network-bus, ed è uno standard seriale per bus di campo di tipo multicast principalmente utilizzato in ambiente automotive, introdotto nel mercato nel 1986 dalla Robert Bosch GmbH per collegare diverse unità di controllo elettronico (ECU). Tra le varie peculiarità spiccano l'elevato livello di sicurezza e di integrità dei dati trasmessi che tale protocollo offre.

Con il termine seriale, in elettronica ed informatica, si identifica uno standard EIA (Electronic Industries Alliance) che definisce un'interfaccia a bassa velocità di trasmissione che permette lo scambio di dati tra dispositivi digitali. Con la parola bus invece si identifica un canale di comunicazione che permette a diverse periferiche e componenti di un sistema elettronico di

comunicare tra loro scambiandosi informazioni o dati di sistema attraverso la trasmissione di segnali elettrici, facendo così colloquiare le differenti componenti o dispositivi di una rete.

Come descritto la tipologia di trasmissione delle informazioni è di tipo multicast; questo significa che tali informazioni vengono distribuite simultaneamente a più dispositivi, evitando così di dover comporre dei pacchetti dati per ogni dispositivo interessato.

Fisicamente il CAN, nella sua forma tradizionale, è composto da un bus lineare realizzato tramite una coppia intrecciata di fili (che possono essere schermati o meno) e da un numero teoricamente infinito di nodi (o interfacce) collegate tra di loro.

Tutti i dispositivi collegati al bus “ascoltano”, secondo una struttura parallela, (Figura 2.1) tutti i messaggi che vengono trasmessi nella rete.

Tali dispositivi sono sempre in attesa di ricevere dati e di trasmetterli nel caso che nessun altro componente stia occupando il canale di trasmissione con propri pacchetti dati in invio. Dal momento che il protocollo CAN non descrive la propria struttura da un punto di vista prettamente fisico, sono nati diversi standard, in base alle diverse esigenze applicative, che sopperiscono a questo.



Figura 2.1. Struttura schematica di una rete CAN.

Strutturalmente parlando la linea fisica del bus può essere realizzata con coppie di cavi conduttori intrecciate (c.d. twisted pair), singolo cavo conduttore, fibre ottiche, cavo coassiale, sistemi wireless a radio-frequenza e qualsiasi altra soluzione atta ad assolvere a tale scopo.

Indipendentemente dalla sua realizzazione fisica si tratta comunque di un bus di tipo lineare. Le specifiche CAN (ver. 1.2 e ver. 2.0) forniscono una descrizione del protocollo che interessa limitatamente i livelli più bassi del modello ISO/OSI, ovvero i livelli Physical Layer e Data Link.

Il CAN è definito un protocollo *Message-based* in quanto i dati trasmessi sono rivolti a tutti i nodi collegati alla rete e di conseguenza tutti i dispositivi possono ricevere dati ed allo stesso modo possono anche inviarli. Il discriminante che permette ad un nodo di riconoscere quando una serie di dati è di propria competenza si trova nel cosiddetto campo *identifier* contenuto all'interno del frame trasmesso.

Non essendoci all'interno del protocollo CAN uno schema predefinito che regoli la priorità di accesso al canale bus è stato necessario implementare un sistema di arbitraggio che definisca la priorità di accesso di ogni singolo messaggio nel caso che si verifichi una richiesta di accesso contemporanea da parte di più nodi.

2.1.2 - I frame CAN e la loro struttura

La comunicazione che avviene tra i vari dispositivi collegati ad una rete CAN nel binomio trattore-attrezzatura è composta dai cosiddetti frame, ovvero dei “messaggi” che portano al loro interno delle informazioni. I frame che vengono utilizzati sono principalmente di quattro tipi ai quali segue una sequenza di bits che vengono impropriamente classificati con il nome di INTERFRAME space (Maggi):

- DATA frame
- REMOTE frame
- ERROR frame
- OVERLOAD frame
- INTERFRAME space

DATA frame

Questi frame eseguono l'effettiva trasmissione dei dati e sono suddivisibili in due formati:

- *Data frame standard*
- *Data frame extended*

Il protocollo CAN deve obbligatoriamente riconoscere il formato *standard* e può opzionalmente riconoscere anche il formato *extended* che nonostante tutto deve comunque essere tollerato.

La Figura 2.2 riporta le differenze strutturali tra data frame di tipo *standard* ed *extended*.



Figura 2.2. Differenza tra un data frame in formato standard ed uno in formato extended. Come evidenziato dal riquadro blu all'interno del campo "Arbitration field", nel formato extended sono presenti ulteriori 18 bits nel ruolo di identifier, per un totale di 29 bits. L'identifier di un frame in formato standard contiene invece solo 11 bits.

A loro volta i pacchetti data frame sono suddivisi in più campi quali:

- *Arbitration field*
- *Control field*
- *Data field*
- *CRC field*
- *Acknowledge field*
- *End of frame*

Arbitration field: questo campo contiene tutte le informazioni necessarie per assegnare la priorità dei messaggi all'interno del bus, determinando così, quali saranno i dati che avranno precedenza di trasmissione. Questo campo ha dimensioni differenti (Figura 2.2) a seconda che si tratti del formato standard (11 bits) o del formato extended (29 bits). Oltre all'identifier all'interno di questo campo è anche presente l'RTR (Remote Transmission Request), composto da un solo bit che ha la funzione di discriminare un frame Data da un frame Remote (l'RTR del frame Data assume valore 0, mentre nel frame Remote assume valore 1).

Control field: questo campo è composto da 6 bits. Il primo bit (IDE, Identifier Extension) identifica il tipo del formato del Data frame (se il bit IDE assume valore 0 identifica il formato standard, al contrario il valore 1 specifica trattasi del formato extended); qualora si tratti di un Data frame extended il bit IDE si trova all'interno dell'Arbitration field.

Gli ultimi quattro bits, invece, compongono il campo DLC (Data Length Code) che specifica la dimensione, ovvero il numero di byte del dato che sono contenuti nel messaggio (da 0 a 8 byte).

Data field: questo campo contiene i bytes che identificano il dato trasmesso con il frame e può avere un'estensione che varia da 0 a 64 bits (esclusivamente multipli di 8) in base a quanto riportato dalla voce DLC presente nel campo Control field.

CRC (Cyclic Redundancy Check) field: questo campo svolge una funzione di rilevazione errori di trasmissione. È composto complessivamente da 16 bits di cui 15 (denominati CRC Sequence) che vengono calcolati tramite appositi algoritmi in base al valore dei precedenti campi che costituiscono il frame e da un bit (che assume valore 1) chiamato CRC Delimiter che ha la funzione di indicare che la trasmissione del CRC è terminata.

Acknowledge field: questo campo serve al nodo trasmittente per verificare la corretta ricezione del frame da parte di almeno un nodo collegato alla rete. Semplificando, il nodo che trasmette il Data frame invia un bit recessivo (con valore pari a 1) e qualora il messaggio sia stato ricevuto in maniera corretta, il nodo ricevente risponde a sua volta con un bit dominante (con valore di 0) che sovrascrive il bit recessivo precedentemente inviato dal nodo trasmittente. A questo punto il nodo trasmittente appurata la corretta ricezione del messaggio termina la trasmissione inviando un ulteriore bit recessivo che costituisce l'Ack Delimiter.

End of frame: questo campo è composto da sette bits recessivi (sequenza 1111111) che identifica la fine del Data frame.

La Figura 2.3 schematizza in modo dettagliato la struttura di un Data frame e la differenza tra il formato standard ed extended.



Figura 2.3. Formati standard ed extended dei Data frame. Il valore 0 identifica un bit dominante, mentre il valore 1 identifica un bit recessivo.

REMOTE frame

La funzione di questo frame risiede nel fatto che una delle peculiarità del protocollo CAN consiste nel fatto che un dispositivo della rete oltre a trasmettere o restare in attesa di informazioni è in grado di richiederne ad altri nodi.

Il Remote frame ha la stessa struttura di un Data frame ad eccezione delle seguenti differenze:

Il bit RTR all'interno di questi tipi di frame assume un valore recessivo, ovvero 1. Questa differenza è necessaria affinché il nodo ricevitore riconosca il tipo di messaggio e si comporti di conseguenza.

Non è presente il campo Data field in quanto non avrebbe senso prevederlo. La voce DLC all'interno del campo Control field non identifica il numero di bytes che compongono il campo Data field in quanto non presente, bensì possono essere utilizzati per definire il tipo di dato od il numero di informazioni che sono richieste dal nodo

ERROR frame

Questi frame sono generati da qualsiasi dispositivo collegato alla rete che rileva un errore. Gli errori possono essere i seguenti: Bit Error, Stuff Error, Form Error, Ack Error e CRC Error.

Il frame in questione è composto da due campi (Figura 2.4) denominati Error Flag field ed Error Delimiter field.

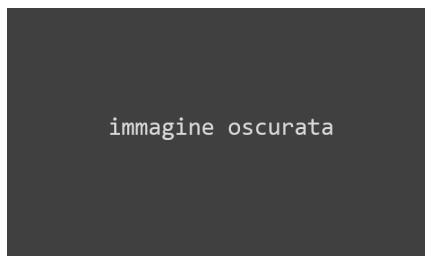


Figura 2.4. Struttura dell'ERROR frame. Nota: "d" identifica un bit dominante che nel codice binario assume valore 0, mentre "r" identifica un bit recessivo con valore 1.

OVERLOAD frame

Questo frame ha una struttura identica a quella di un ERROR Active frame. Ciò nonostante questa tipologia di frame può essere generata soltanto durante un INTERFRAME Space e a differenza di un ERROR frame non causa la ritrasmissione dei messaggi, infatti un messaggio che sia stato ricevuto prima di un OVERLOAD frame, è ritenuto valido rispetto ad uno che invece precede un ERROR frame.

Tale frame viene generato per ritardare l'istante in cui il bus ritorni in condizione Idle, ovvero sia nuovamente pronto a gestire altro traffico.

INTERFRAME space

Con questo termine viene identificata una sequenza di bits (minimo 3 bits) che hanno il compito di separare un frame qualunque da un altro di tipo DATA o REMOTE.

2.2 – Architettura del sistema ISOBUS

Un moderno sistema ISOBUS è costituito da diversi componenti, sia di tipo hardware che di tipo software (Figura 2.5). Le componenti hardware sono identificabili in tutti quei congegni, oggi elettronici o mecatronici (come connettori, centraline elettroniche, terminali di cabina), che possono essere installati sia a bordo delle trattrici che delle attrezzature ad esse collegate e comunicando tra loro possono aiutare il conducente nella gestione o nella automazione di alcune lavorazioni. Le componenti software invece riguardano i vari programmi che sono installati all'interno dei terminali di cabina e all'interno dei microchip presenti nelle varie centraline elettroniche (ECU e TECU) (Foundation AEF).

Una parte fondamentale della componentistica software sono i cosiddetti Task Controller (TC), ovvero delle parti di software che opportunamente configurati permettono di automatizzare alcune sequenze di controlli ed operazioni che si attuano normalmente durante lo svolgimento di un'operazione colturale o di arricchire le informazioni che si raccolgono sul campo ad esempio con dati di georeferenziazione.

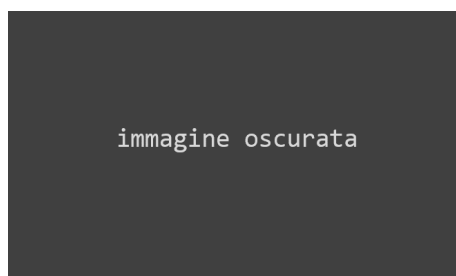


Figura 2.5. Struttura di un sistema ISOBUS del binomio trattore-operatrice.

2.2.1 - La componentistica hardware

Sono componenti, sviluppate dalle varie case costruttrici, che equipaggiano trattrici ed attrezzature e che tramite il protocollo di comunicazione CAN-bus e lo standard ISOBUS si scambiano dati indispensabili per il compimento di determinate operazioni ed il monitoraggio dello stato di lavoro. Le varie componenti che vanno a costituire un sistema ISOBUS sono: connettori, ECU, TECU e Universal Terminal.

Connettori

La connessione che collega il bus del trattore a quello degli attrezzi, così come quello all'interno del trattore e dell'attrezzo stesso, avviene tramite connettori standard. Forma e dimensione dei plug (Figura 2.6) e delle prese sono specificate dalla normativa ISOBUS.

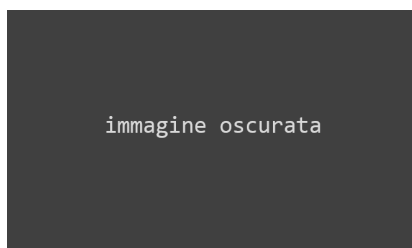


Figura 2.6. Connettore ISOBUS. Permette di connettere il trattore alle varie attrezzature ISOBUS compatibili.

ECU (Electronic Control Unit)

Spesso chiamate centraline elettroniche e sono le componenti nelle quali risiede l'intelligenza della tecnologia ISOBUS.

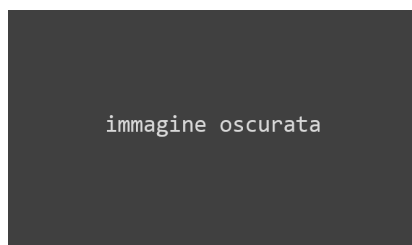


Figura 2.7. Electronic Control Unit o ECU.

All'interno di ogni trattore, ma spesso anche in uno stesso attrezzo, sono installate molteplici ECU (Figura 2.7), ciascuna delle quali controlla un determinato sottosistema. Si tratta di semplici computer di dimensioni ridotte. Sono costituite da una scheda elettronica che esegue un software registrato all'interno di un microchip. È infatti il software presente all'interno a determinare le funzionalità dell'ECU. È spesso sufficiente aggiornare il software con adeguati componenti (stack ISOBUS), senza bisogno di riprogettare la centralina, affinché quest'ultima supporti lo standard ISOBUS (Sartori, 2016c).

TECU (Tractor Electronic Control Unit)

Le TECU sono le centraline elettroniche installate all'interno del trattore e che mettono in comunicazione la rete ISOBUS con il bus del trattore stesso. Vengono distinte in tre classi:

- *Classe 1*: trasmettono le informazioni di base (come velocità, regime della pdp e altri dati basilari) che riguardano il trattore a tutte le ECU che sono connesse al bus attrezzo e al terminale presente in cabina.
- *Classe 2*: svolgono la funzione delle TECU di classe 1, ma in aggiunta trasmettono informazioni più dettagliate riguardo lo stato del trattore e dei suoi sottosistemi.
- *Classe 3*: TECU che in aggiunta alle funzioni della classe 2 ricevono ed eseguono alcuni comandi che vengono loro inviati dalle ECU degli attrezzi connessi.

Le TECU di ultima generazione possono inoltre supportare ulteriori opzioni (come ad esempio la funzione Tractor Remote Control) le quali ampliano l'insieme dei parametri del trattore che possono essere controllati; un esempio sono le rotopresse per la raccolta del fieno dove sono proprio quest'ultime a comandare la velocità e l'arresto del trattore nel momento in cui deve essere scaricata la rotoballa.

Universal Terminal (UT)

Trattasi di un terminale grafico (Figura 2.8) che è installato nella cabina del trattore e permette all'operatore di interagire con le ECU degli attrezzi ISOBUS compatibili e gestire le mappe a distribuzione variabile comunicando alla ECU lato macchina operatrice, in maniera automatica, le indicazioni di variazione di dosaggio di distribuzione quando l'attrezzatura si sposta da una zona ad un'altra con differente prescrizione (Gatto, 2013).



Figura 2.8. Universal Terminal ISOBUS.

All'interno dell'UT possono essere caricate delle mappe di prescrizione, precedentemente elaborate con l'ausilio di specifici software, attraverso una memoria SD; questo permette di avvalersi della

distribuzione a dose variabile. Affinché tutto questo sia possibile è necessario che il trattore sia dotato di un sistema GNSS (Global Navigation Satellite System), il quale permette alla macchina di poter rilevare all'interno dell'appezzamento la propria posizione.

L'UT è costituito da un monitor per la visualizzazione delle informazioni e da alcuni dispositivi di input (quali pulsanti, schermo touch, selettori) ed il suo compito principale è quello di visualizzare le informazioni che riceve dalle ECU collegate al bus attrezzo, nonché di trasmettere a quest'ultime i comandi dell'operatore senza però eseguire alcuna elaborazione: è puramente un dispositivo di interfaccia.

Infatti, quando l'operatore tramite i comandi situati sull'UT modifica alcuni parametri visualizzati, essi non sono modificati dall'UT stesso, bensì dall'ECU dell'attrezzo che una volta ricevuto il comando aggiorna i valori visualizzati. Sono le ECU collegate al bus attrezzo che tramite elaborazione modificano le informazioni ed i parametri (Sartori, 2016c).

2.3 - Le funzionalità software

La tecnologia ISOBUS mette a disposizione protocolli per la messa in essere, da parte degli utenti, di funzioni di controllo personalizzate dei trattori e delle macchine operatrici. Tali funzionalità sono denominate:

- Sequence Controller (SC)
- Task Controller, che a sua volta è ulteriormente suddivisa in tre livelli quali Task Controller Basic (TC-BAS), Task Controller Section Control (TC-SC) e Task Controller Geo-Based (TC-GEO)

Le funzioni SC sono state le prime ad essere implementate nello standard ISOBUS e permettono la realizzazione in automatico di sequenze di operazioni ripetitive come ad esempio quelle che si eseguono in capezzagna (Figura 2.9) quando il trattore procede da una passata all'altra. In genere gestiscono funzioni che interessano principalmente la TECU e vengono definite ed attivate mediante l'UT o specifici Comandi Ausiliari (AUX) solitamente attraverso un joystick.



Figura 2.9. Esempio di una funzione SC.

Le funzioni TC, a differenza delle SC, coinvolgono anche le centraline ed i relativi attuatori delle macchine operatrici. I comandi agli attrezzi possono essere impartiti per rispettare una sequenza temporale (ad esempio funzioni TC-BUS che sono del tutto analoghe alle SC) e/o per modificare il comportamento di un attuatore in base alla posizione rilevata tramite un sistema GNSS (funzioni TC-SC e TC-GEO).

Basandosi su queste procedure standard si stanno sempre più diffondendo forme di controllo diretto delle macchine operatrici, ove la misura della posizione in campo attraverso un ricevitore GNSS risulta determinante.

Nella versione che controlla la variabilità agronomica, con operatrici equipaggiate per realizzare forme di lavoro a rateo variabile (tipo VRT), queste funzioni sono la base per poter realizzare la cosiddetta meccanizzazione di precisione (Sartori, 2016c).

2.4 - I sistemi GNSS

La diffusione dell'ISOBUS ha consentito un forte potenziamento dell'Agricoltura di Precisione, la quale sta riscuotendo un interesse sempre crescente, in quanto consente di attuare un'agricoltura sempre più sostenibile ed economica.

Questo perché l'Agricoltura di Precisione si avvale di sistemi satellitari di posizionamento globale (GNSS) e di sensori, tecnologie attraverso le quali è possibile strutturare un'agricoltura che mira ad eseguire interventi agronomici considerando le effettive esigenze colturali e le caratteristiche biochimiche e fisiche del suolo.

I sensori vengono installati in modo tale da poter valutare le condizioni del terreno, ed affiancati a sistemi GNSS che permettono di creare mappe georeferenziate, grazie alle quali è possibile inviare (attraverso la rete CAN-bus e lo standard ISOBUS) specifici segnali che intervengono su determinati attuatori installati nelle operatrici.

Questo ha permesso, ad esempio, di costruire delle seminatrici dotate di dosatori variabili in maniera tale da poter ottimizzare la posa delle sementi in funzione dello stato del terreno (Mattetti et al., 2012).

La complessa struttura di questi sistemi si basa sulla tecnologia ISOBUS.

2.5 - Campi di applicazione della tecnologia ISOBUS in agricoltura

Lo standard ISOBUS, grazie alle sue peculiarità è diventato all'interno del settore dell'agricoltura e della meccanizzazione, una tecnologia che trova applicazione in tutte le operazioni che vengono effettuate in campo durante un ciclo di produzione colturale.

Esso può essere utilizzato nelle lavorazioni del terreno per ottimizzare operazioni come aratura, erpicatura e ripuntatura per citarne alcune. Attraverso l'utilizzo di sistemi di controllo della profondità di lavorazione del terreno si possono eseguire lavorazioni solo negli strati interessati effettivamente dallo sviluppo dell'apparato radicale della pianta o rispettare una costante profondità di lavorazione, anche qualora le caratteristiche del terreno siano variabili all'interno dello stesso appezzamento (dovuto ad una differente struttura e tessitura del terreno), garantendo così uniformità del lavoro svolto ed in taluni casi ottenere un risparmio in termini di consumo di carburante dovuto ad una minore richiesta di potenza da parte dell'attrezzo collegato al trattore (Adamchuk et al., 2004).

Per quanto riguarda le operazioni di semina l'utilizzo di attrezzature ISOBUS è di fondamentale importanza per ottenere una semina omogenea. Grazie a questa tecnologia infatti è possibile ricorrere all'utilizzo di attrezzature in grado di garantire un'elevata uniformità di semina, cosa assai importante per avere germinazione ed emergenza ottimali con conseguenti ricadute positive sulla resa finale (McGahan et al., 1992).

Alcune tra le operazioni colturali, ove i sistemi ISOBUS apportano sicuramente un fortissimo valore aggiunto, sono quelle che riguardano la distribuzione a dose variabile o VRA (Variable Rate Application) di fertilizzanti e prodotti chimici fitosanitari, ovvero l'applicazione in base alle esigenze delle varie aree omogenee dell'appezzamento interessato dal trattamento. In questo modo fertilizzanti e prodotti fitosanitari vengono erogati in base alla reale necessità della zona da trattare, in quanto per diversi motivi, date le numerosissime variabili in gioco fortemente interconnesse tra di loro, è effettivamente molto difficile che si verifichi una situazione dove tutte le piante in campo richiedano la medesima dose. Erogando alla pianta le effettive quantità di cui essa necessita si ottengono molteplici benefici mantenendo l'individuo in una fitness ottimale: a beneficiarne saranno la resa e la qualità finali, nonché l'ambiente circostante e tutti gli esseri viventi dell'ecosistema ad esso collegato.

Un altro campo dove questa tecnologia incontra un forte utilizzo è l'irrigazione a dose variabile (VRI). Attraverso la creazione di mappe di prescrizione con l'integrazione di una rete di sensori di umidità wireless installati in campo, si possono progettare sistemi automatici di irrigazione che integrando i dati, provvedono ad irrigare gli appezzamenti distribuendo l'esatta quantità di acqua necessaria in base alle caratteristiche del terreno ed alle necessità della coltura, evitando così l'incorrere di stress idrici, o di eventuali dannosi ristagni che comprometterebbero la fitness e la produttività della coltura (Sadler et al., 2005).

In questo modo è possibile programmare il sistema affinché esso intervenga quando l'umidità del terreno raggiunge una determinata soglia critica preimpostata, ripristinando immediatamente un tenore di umidità del suolo ottimale (Zhou et al., 2008).

Nelle operazioni di raccolta i sistemi ISOBUS vengono utilizzati per creare mappe di produzione attraverso le quali, nel corso degli anni, è possibile istituire un registro elettronico dello storico di produzione di un appezzamento. In questo modo è facile capire quali sono le zone del campo che hanno una più alta resa e di conseguenza calibrare tutte le successive operazioni colturali degli anni a venire con lo scopo di ottimizzare l'apporto di input riducendo gli sprechi.

È possibile avvalersi di questi strumenti, durante la fase di raccolta, anche per definire il corretto contenuto di umidità o per attuare una divisione della granella in base ad alcune caratteristiche qualitative, come ad esempio la separazione in differenti tramogge (la macchina raccogliitrice deve essere opportunamente configurata a tal scopo) in base al contenuto di proteina (Montes et al., 2006). In questo modo in fase di consegna è possibile conferire alle strutture riceventi un prodotto uniforme per uno o più parametri, potendo rivendere la granella con elevato tenore proteico ad un prezzo superiore rispetto ad una con un contenuto inferiore. Così facendo si ottimizzano i ricavi, in quanto mescolando due prodotti, uno di elevata qualità con uno di scarsa qualità, quest'ultimo andrebbe ad abbassare il livello qualitativo complessivo posizionandosi sul mercato ad un prezzo inferiore.

2.6 - Il controllo remoto delle macchine agricole

Un'innovativa ed interessante applicazione della tecnologia ISOBUS consiste nel fatto che essa, attraverso l'apposito hardware, consente di poter accedere ai parametri della macchina agricola (sia trattore che operatrice), da remoto. Attraverso l'installazione di appositi moduli GSM che sfruttano una connessione GPRS, è possibile connettere la macchina in rete, permettendo di visionare i parametri operativi in tempo reale, e se necessario, intervenire su di essi per ripristinare il corretto funzionamento in caso di problematiche, avvalendosi di un semplice computer o dispositivo quale smartphone o tablet. L'unico aspetto vincolante è dato dal fatto che è necessaria una copertura da parte delle rete telefonica mobile.

Questo permetterebbe di aumentare l'efficienza d'uso della macchina e monitorare in tempo reale la posizione della singola macchina o di un'eventuale flotta.

2.7 - I vantaggi dell'ISOBUS

Indubbiamente la tecnologia ISOBUS è in grado di apportare numerosi vantaggi sotto diversi profili, quali:

- Economici
- Ambientali
- Tecnologici
- Gestionali
- Qualitativi

Vantaggi economici

L'applicazione di questa tecnologia porta particolari benefici da un punto di vista economico. Basti pensare al vantaggio che ne deriva dal fatto di poter avere a disposizione una moltitudine di dati aziendali come la variabilità spaziale e temporale di alcune caratteristiche fisico-chimiche del terreno, la possibilità di creare delle mappe di produzione in fase di raccolta per poter definire quali sono le zone più produttive di un appezzamento in modo tale da poter "personalizzare" le concimazioni, piuttosto che le lavorazioni, solo per citare alcuni esempi. Questo permetterebbe di risparmiare sugli input produttivi come i fertilizzanti in quanto si può ottimizzare la distribuzione degli stessi in modo tale da evitare sprechi e distribuendo così solo la dose effettivamente necessaria, risparmiando di conseguenza sull'acquisto del materiale.

Anche nel processo di semina ci si può avvalere delle informazioni acquisite durante la raccolta: è infatti possibile distribuire una quantità di seme maggiore, aumentando così l'investimento a metro quadro, nelle aree del campo che si dimostrano più produttive, dal momento in cui non avrebbe senso distribuire più sementi in quelle zone dotate di scarsa fertilità, in quanto non si otterrebbe la stessa resa rispetto alla zone più produttive.

Un'ulteriore vantaggio deriva dal fatto che è possibile effettuare delle irrorazioni o dei trattamenti fitosanitari regolando la dose distribuita in base alle reali necessità delle piante in campo. È possibile acquisire informazioni, attraverso opportuni sensori ottici, sullo stato fitosanitario delle piante in modo tale da apportare, in fase di trattamento, solo la reale quantità di prodotto fitosanitario.

Vantaggi ambientali

Sotto il profilo ambientale i vantaggi che derivano dall'applicazione della tecnologia ISOBUS sono diverse. Durante le fasi di lavorazione del terreno i benefici che ne derivano per il comparto ambientale sono dati dal fatto che attuando delle lavorazioni solo negli strati di terreno più

superficiali la potenza motrice richiesta è minore, portando così ad un consumo di carburante inferiore da parte del trattore, con una minore emissione di gas ad effetto serra come la CO₂.

Nelle operazioni di concimazione, come è noto, ottimizzando la distribuzione dei fertilizzanti si riduce la quantità immessa nel terreno, diminuendo una delle principali fonti di inquinamento nel settore dell'agricoltura. Basti pensare all'azoto che, essendo scarsamente trattenuto dal terreno, può essere distribuito in maniera più ragionevole e consenziente; in questo modo è possibile limitare le quantità di questo elemento nutrizionale che percolano in falda, facilitando il rispetto di determinate normative come quelle che regolano la distribuzione di sostanze come i nitrati nelle aree a maggiore rischio.

Vi è poi da evidenziare l'assoluto beneficio che l'applicazione dello standard ISOBUS apporta durante i trattamenti con prodotti fitosanitari. Anche in questo caso, essendo possibile controllare e minimizzare le dosi distribuite in campo, le quantità di prodotti chimici come insetticidi, fungicidi ed erbicidi immessi nell'ambiente possono essere limitate evitando problematiche di accumulo di sostanze tossiche per l'essere umano e altre specie animali, garantendo il rispetto delle comunità di organismi utili che si trovano all'interno dei delicati ecosistemi che si instaurano negli ambienti agricoli.

Vantaggi tecnologici

Un primo importante vantaggio sotto questo aspetto è dovuto al fatto che sia possibile gestire e controllare le operatrici tramite un unico dispositivo (UT), evitando così l'installazione all'interno della cabina del trattore di una moltitudine di apparati, solitamente uno per attrezzo, riducendo di fatto i cablaggi (Figura 2.10) e lasciando di conseguenza maggior spazio all'operatore per muoversi e garantendo una migliore visuale.



Figura 2.10. a) interno di una cabina dotata di collegamenti dedicati a singola interfaccia e b) interno di una cabina dotata di UT con tecnologia ISOBUS.

Altro aspetto non trascurabile è dovuto alla facilità di utilizzo del singolo terminale da parte dell'operatore, il quale è facilitato nell'esecuzione di operazioni ripetitive tramite le funzioni SC e TC. L'impiego poi di TECU di classe 3 consente un'elevata automazione di tutte le operazioni.

Anche la sicurezza intrinseca del binomio attrice-operatrice aumenta, così come l'efficienza, sia da parte della macchina che dell'uomo dovuta ad una migliore prestazione qualitativa (lavori eseguiti con maggiore precisione e costanza) e quantitativa (meno tempi morti) (Sartori, 2016c).

Vantaggi gestionali

L'impiego di tecnologie ISOBUS affinché possa essere sfruttato pienamente deve essere supportato dai cosiddetti sistemi informativi aziendali (SIA). Un sistema informativo è un insieme di strumenti fisici ben definiti che interagendo tra loro permettono al soggetto incaricato di assumere una decisione di raccogliere dati a livello di ogni singolo processo produttivo, di elaborare ed archiviare i dati raccolti mediante modelli e database specificamente progettati e di utilizzare tali dati, opportunamente elaborati, per ottenere tutte le informazioni necessarie ad assumere una ben specifica decisione.

Di conseguenza un SIA include componenti hardware e software che permettono di assolvere a quanto sopra detto (Mazzetto et al., 2016).

Solitamente, nella loro forma più semplice, tali sistemi sono costituiti da computer, strutture di archiviazione dati (se parliamo di grandi quantità di dati) e software specifici che hanno la funzione principale di elaborare i dati raccolti, in modo tale da fornire utili indicazioni che possano portare ad oculate e sensate scelte da attuare nei processi produttivi aziendali. Grazie a questi sistemi così strutturati è possibile avere una visione d'insieme ed al contempo molto dettagliata della situazione aziendale per quanto riguarda la gestione degli appezzamenti (è possibile creare delle mappe storiche che riportano ad esempio le rese) e, qualora l'azienda sia sufficientemente estesa da giustificare l'impiego, monitorare ad esempio il lavoro delle macchine attraverso l'ausilio dei sistemi di tracciamento satellitare. Questa utile funzione è già utilizzata da tempo dai grandi terzisti che dispongono di molte macchine da controllare, avendo così la possibilità di ottimizzarne l'impiego e lo sfruttamento nel campo, senza aver tempi morti che si traducono inevitabilmente in una perdita di denaro. Un'ulteriore utile funzione data da questi sistemi è la possibilità di conoscere in tempo reale da remoto, attraverso l'ausilio di un terminale (computer, tablet o smartphone), lo stato delle attrici e delle macchine operatrici, monitorandone lo stato di salute, l'efficienza di lavoro e la produttività.

Una dettagliata visione d'insieme si traduce in una facilità di gestione delle risorse presenti in azienda, incrementando la bontà delle scelte effettuate e permettendone un più razionale impiego,

facendo risparmiare tempo, che può essere così utilizzato in ulteriori e diversi rami dell'azienda, permettendo di aumentare la produttività.

Tali vantaggi gestionali hanno di conseguenza anche delle positive ricadute in termini di vantaggi economici in quanto permettono di ottimizzare l'impiego delle macchine e dei fattori produttivi aumentandone l'efficienza e la produttività.

Vantaggi qualitativi

In ultima analisi bisogna considerare i vantaggi che si ottengono da un punto di vista qualitativo. Intervendo in maniera specifica e dettagliata all'interno di una coltura, garantendo corretti ed equilibrati apporti nutrizionali e la riduzione delle dosi di prodotti chimici nocivi, piuttosto che una efficiente lavorazione del terreno che apporti benefici di crescita e sviluppo alla pianta e garantisca il rispetto del suolo, è possibile incrementare il livello qualitativo del prodotto finale. Qualora il prodotto finale sia di interesse edibile è facile intuire come sia possibile migliorarne la salubrità piuttosto che le caratteristiche organolettiche, portando sugli scaffali dei supermercati degli alimenti che riscontrano un maggiore successo e siano maggiormente apprezzati dal consumatore finale che è ben disposto ad affrontare, in fase di acquisto, una piccola spesa in più purché di avere un prodotto di qualità superiore.

Anche le materie prime indirizzate al comparto industriale possono beneficiare di un incremento di qualità. Aspetti molto importanti, che possono essere migliorati curando le pratiche agricole produttive tramite le tecnologie ISOBUS, possono essere ad esempio l'incremento del contenuto di amido all'interno delle cariossidi di mais destinato alla produzione di sostanze da esso derivate come ad esempio la bioplastica.

3 – Sensori e attuatori

3.1 - I sensori

I sensori sono dei dispositivi che rilevano i valori di una grandezza fisica o chimica (ad esempio pressione, temperatura, pH, radiazione luminosa, distanze), o i suoi cambiamenti, per trasmetterli successivamente o ad un sistema di registrazione per attività di monitoraggio, oppure ad un sistema di regolazione e di controllo (solitamente costituito da una o più ECU), ed è il primo elemento di una catena di misura.

Nella letteratura comune il termine *seniore* viene spesso utilizzato in sostituzione del più appropriato termine *trasduttore*, il quale è più indicato per descrivere i dispositivi di misurazione (Figura 3.1).



Figura 3.1. Rappresentazione schematica del “concetto” di sensore e trasduttore.

Con il termine *seniore* si identifica l’elemento che interagisce e si interfaccia con la grandezza da osservare. In quanto parte sensibile, il sensore (o captatore) esegue propriamente l’operazione di captazione della grandezza oggetto di misurazione, ed è definito dallo IEC (International Electrotechnical Commission) come l’elemento primario di una catena di misura, il quale converte la variabile in ingresso in un segnale adatto per la misura. Per *trasduttore*, invece, si intende quel dispositivo che accetta un’informazione in ingresso, in forma di una variabile fisica, e la converte in una variabile di uscita della stessa o di diversa natura (Massignan, 2011).

Fermo restando la discussione inerente il diverso significato che i termini *trasduttore* e *seniore* assumono all’interno del loro specifico campo di applicazione tecnica, nell’ambiente industriale il termine *seniore* ha acquisito il più generale significato di dispositivo il cui segnale d’uscita racchiude tutta l’informazione relativa alla misura della grandezza. Di fatto, nel linguaggio comune, il termine *seniore* viene utilizzato per indicare sia il solo elemento sensibile, sia l’intero dispositivo di misura, mentre il termine *trasduttore* identifica o l’intero dispositivo di misura o soltanto il dispositivo di trasduzione (Massignan, 2011).

Da un punto di vista pratico un sensore effettua le misure convertendo le variazioni di una determinata grandezza fisica da misurare in opportuni segnali elettrici più facilmente misurabili ed interpretabili.

Tali segnali sono solitamente rilevati in forma analogica, ma per essere utilizzati all'interno di un sistema completamente informatizzato, devono essere trasformati in segnali digitali attraverso specifici convertitori analogico-digitali che possono essere integrati nella struttura che contiene il sensore oppure trovarsi all'interno delle unità di controllo elettronico del sistema (ECU) (Gasparetto).

Le principali caratteristiche di un sensore si distinguono in (Laracca):

- *progettuali*: specificano come il sensore è o dovrebbe essere.
- *prestazionali*: indicano le caratteristiche metrologiche, le quali definiscono i limiti entro i quali è possibile fare una misura e concorrono nella definizione della precisione strumentale.
- *di affidabilità*: caratteristiche ambientali e d'uso che influenzano la vita utile del sensore.

Vi sono poi altri elementi di caratterizzazione importanti da considerare nella scelta di un sensore, in base all'utilizzo che se ne vuole fare, che sono relative all'ingresso e all'uscita. Le caratteristiche relative all'ingresso sono (Laracca; Massignan, 2011):

- *specie*: natura della grandezza fisica in entrata.
- *campo di misura o input range*: è l'intervallo di valori della grandezza fisica sottoposta a misurazione (noto anche con il nome di *misurando* come indicato nel Vocabolario Internazionale di Metrologia) entro il quale, se sono rispettate le condizioni fisiche, il sensore funziona secondo le specifiche; il suo limite superiore è la portata.
- *campo di sicurezza del misurando*: è l'intervallo di valori del misurando all'interno del quale il funzionamento del sensore viene mantenuto senza essere compromesso. I valori estremi sono detti *overload* o *overrange*, ed indicano il massimo valore che si può applicare in ingresso al sensore senza comprometterne le sue prestazioni, mentre si sotto intende che il limite inferiore coincida con il limite inferiore del campo di misura.

Per quanto riguarda le caratteristiche relative all'uscita esse si differenziano in (Laracca; Massignan, 2011):

- *specie*: natura della grandezza fisica che costituisce il segnale d'uscita. Solitamente si tratta di un segnale di tipo elettrico al quale l'informazione è associata in modo analogico o digitale.
- *output range o campo di normale funzionamento*: è l'insieme di valori che assume il segnale in uscita quando il misurando in ingresso varia all'interno dell'input range.

- *output overload values o valori di sovraccarico dell'uscita*: sono i valori più elevati assunti dal segnale in uscita quando il misurando varia entro il campo di sicurezza. È importante valutarne l'ordine di grandezza per essere in grado di proteggere il sistema utilizzatore collegato.
- *output power o potenza erogabile*: è il valore limite della potenza che il sensore può fornire al sistema utilizzatore a valle. A volte si parla di corrente massima erogabile (nel caso il segnale d'uscita sia una tensione), o di tensione massima in uscita, o di valore massimo dell'impedenza di carico (load impedance) se il segnale d'uscita è una corrente.
- *output impedance o impedenza di uscita*: è l'opposizione di un circuito al passaggio di una corrente elettrica alternata. Nei circuiti a corrente continua si parla di resistenza elettrica.
- *incertezza di uscita*: l'ampiezza del range che comprende tutti i valori che potrebbero essere assunti, con la stessa validità, a rappresentare la grandezza d'uscita corrispondente ad una certa condizione di funzionamento. Si tratta di un'incertezza legata alla natura stessa di grandezza fisica dell'uscita ed alle caratteristiche dell'interfaccia di collegamento del sensore con il sistema utilizzatore a valle.
- *power supply o alimentazione ausiliaria*: indica il valore di tensione o corrente che deve essere fornito tramite una sorgente esterna.

Una prima suddivisione che permette di identificare i vari sensori in due grandi gruppi può essere la seguente (Iaconis, 2015):

- *sensori passivi*: hanno bisogno di essere alimentati da una sorgente esterna per poter funzionare.
- *sensori attivi*: non hanno bisogno di sorgenti di alimentazione esterne per funzionare.

I sensori impiegati nelle seminatrici possono essere di vario tipo in base alla grandezza fisica da misurare ed alle condizioni nelle quali il sensore stesso si trova ad operare.

Di seguito particolare attenzione sarà posta sui sensori maggiormente utilizzati per misurare parametri direttamente o indirettamente collegati alla profondità di semina, quali: sensori ad ultrasuoni, sensori di posizione lineari e angolari analogici e digitali.

3.2 - Sensori ad ultrasuoni

I sensori ad ultrasuoni sono presenti nel mercato da circa 30 anni. Inizialmente il loro costo era elevato, come anche la loro dimensione, ma oggi grazie ai progressi della tecnologia questi dispositivi sono di dimensioni ridotte, più economici e dispongono di prestazioni elevate e molto

affidabili. Per questo motivo il loro utilizzo è andato sempre crescendo nel tempo e, ad oggi, sono impiegati in numerose applicazioni e di grande versatilità (Lazzari).

Questi sensori funzionano mediante l'emissione di onde acustiche che si propagano attraverso una soluzione emittente (gas, fluidi o materiale solido). Il loro impiego principale consiste nella misurazione del tempo di funzionamento o l'ampiezza degli impulsi degli ultrasuoni che si propagano nell'aria.

Gli ultrasuoni consistono in onde sonore ad altissima frequenza che vanno al di là del limite sonoro udibile dall'essere umano, comprese in un intervallo dai 20 KHz (frequenza che si usa convenzionalmente per discriminare le onde soniche da quelle ultrasoniche) sino a 10 MHz (frequenza utilizzata nella diagnosi in medicina). Le frequenze ultrasoniche utilizzate in questo ambito sono comprese in un intervallo che varia da 40 KHz a quasi 1 MHz (Bedin, 2013).

Le onde sonore subiscono fenomeni generali di riflessione, rifrazione, diffrazione, diffusione, assorbimento e propagazione che possono essere definiti mediante parametri come la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità di propagazione, l'intensità (misurata in decibel) e l'attenuazione (dovuta all'impedenza acustica del mezzo attraversato) (Bedin, 2013).

Il sensore emette un pacchetto di impulsi ultrasonici e misura il tempo che trascorre dall'emissione di tali impulsi al ricevimento di un echo di risposta (ovvero quando il ricevitore che si trova nel sensore riceve degli impulsi di risposta che sono riflessi da un determinato oggetto) (Figura 3.2).

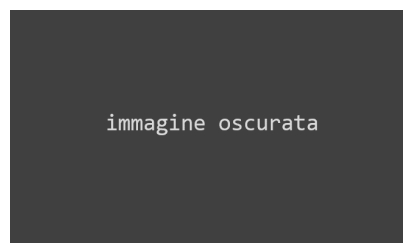


Figura 3.2. Principio di funzionamento di un sensore ad ultrasuoni.

Solitamente i sensori ad ultrasuoni sono composti da un singolo convertitore a ultrasuoni che svolge la funzione di trasmettitore e ricevitore, ma esistono anche sensori che sono composti da convertitori che svolgono funzione di sola trasmissione e ricezione, installati all'interno di un medesimo alloggiamento oppure collegati separatamente. Questi convertitori sono collegati ad un circuito elettronico di controllo che elabora i dati acquisiti dal convertitore (Lazzari).

La formula che permette di calcolare la distanza tra il sensore ultrasonico ed un oggetto od una superficie è la seguente (Lazzari):

$$s = c \cdot \left(\frac{t}{2}\right)$$

dove:

s = distanza tra sensore e superficie

c = velocità degli ultrasuoni (331,45 m/s nell'aria a temperatura di 0°C)

t = tempo che intercorre tra l'emissione degli impulsi ed il ricevimento di un echo di risposta

Dal momento che la velocità di propagazione delle onde sonore nell'aria è correlata alla temperatura ci si può avvalere di una semplice formula per calcolare appunto la velocità di propagazione in funzione della temperatura dell'aria ove la macchina si trova ad operare.

La formula è (Ferrari, 2014):

$$c = 331,45 + (0,62 \cdot t)$$

dove:

c = velocità di propagazione delle onde sonore in m/s

331,45 = velocità delle onde sonore nell'aria ad una temperatura di 0°C

0,62 =costante

t = temperatura dell'aria espressa in gradi Celsius

Generalmente le distanze misurabili da questi tipi di sensori possono variare da pochi centimetri sino ad una decina di metri. Dal momento che la velocità di propagazione del suono nell'aria è quasi mille volte più lenta di quella della luce, la misurazione della distanza tramite sensori ultrasonici è relativamente lenta (Lazzari). Nonostante questo, tenendo conto che il tempo di trasmissione degli ultrasuoni tra un sensore ed un oggetto che dista da quest'ultimo 10 metri è di 60 ms (millisecondi), questa tecnologia trova riscontro in molte applicazioni.

Un altro aspetto molto importante da tenere in considerazione oltre alla funzione principale svolta dai convertitori precedentemente menzionata, è la configurazione hardware ed in particolar modo l'elaborazione dei segnali da parte del micro controller che si trova all'interno del sensore in quanto sono caratteristiche decisive per le prestazioni del sensore stesso.

Ad oggi, infatti, invece di installare dei semplici controller a 8 bit che offrono solo funzionalità rudimentali, si preferisce installare come opzione standard, potenti micro controller a 32 bit i quali sono in grado di riprodurre algoritmi complessi in tempo reale portando così ad una riduzione dello

spazio necessario favorendo la riduzione delle dimensioni dei sensori stessi ed al contenimento dei costi di produzione (Lazzari).

3.3 - Sensori di temperatura

Esistono differenti tipi di sensori di temperatura, ognuno adatto ad una certa tipologia d'impiego. Quelli più comunemente utilizzati sono le termocoppie, i termoresistori a filamento metallico (conosciuti anche come RTD) ed i termistori a semiconduttori (i quali si suddividono a loro volta in NTC e PTC). Di seguito saranno trattati i termoresistori (particolarmente adatti all'utilizzo della misurazione della temperatura dell'aria per determinare la corretta velocità di propagazione delle onde ultrasoniche in tale fluido) e i termistori; entrambe queste tipologie di sensori di temperatura basano il loro funzionamento sul principio resistivo (Picco, 2010), l'unica differenza che intercorre tra termoresistori e termistori risiede nel materiale con cui sono realizzati. I termoresistori sono composti da materiali conduttori metallici (tipicamente platino), mentre i termistori sono composti da materiali semiconduttori.

3.3.1 - I termoresistori RTD

Un sensore RTD (Resistance Temperature Detector) è un dispositivo di temperatura resistivo che incrementa la propria resistenza al variare della temperatura; consiste di un filo metallico o di un film sottile su cui viene depositato il materiale metallico (Fenzi, 2005). In un materiale conduttore, un aumento della temperatura, induce un aumento dell'agitazione termica degli atomi, la quale a sua volta ostacola il movimento degli elettroni di conduzione. La temperatura influenza anche le dimensioni geometriche del materiale conduttore provocando di conseguenza un'ulteriore variazione di resistenza a volte non trascurabile. Affinché l'influenza della temperatura sia sufficientemente importante da poter utilizzare tali dispositivi come sensori di temperatura, per la loro realizzazione vengono utilizzate particolari leghe, le quali conferiscono le prestazioni che interessano, sia come sensibilità alla temperatura, sia come intervallo di temperatura all'interno del quale possono essere impiegati (Picco, 2010).

Il materiale maggiormente utilizzato per realizzare gli RTD è il platino, in quanto esso possiede un vasto intervallo di temperatura in cui la sensibilità ad essa è molto lineare. La resistenza dei termoresistori al platino, alla temperatura di riferimento, può variare da 25 Ω a 200 Ω , a seconda delle modalità costruttive adottate. Sono largamente utilizzati i sensori RTD al platino che hanno una resistenza nominale alla temperatura di riferimento pari a 100 Ω e che convenzionalmente vengono indicati con la sigla Pt100.

Nel caso del platino la relazione tra resistenza e temperatura viene descritta dall'equazione di Callendar (Picco, 2010):

$$R = R_0 \cdot (1 + At + Bt^2)$$

dove:

R = resistenza alla temperatura t (°C)

R₀ = resistenza a 0°C

t = temperatura in °C

A e **B** sono coefficienti ricavati sperimentalmente dalle misure di **R₀** e **R₁₀₀**

La formula sopra riportata vale per il solo range di temperatura che va da 0°C a 661°C.

La resistenza sensibile alle variazioni di temperatura inizialmente veniva applicata su un supporto adatto sotto forma di spire avvolte, ma oggi, per soddisfare i moderni requisiti rivolti a misure più precise e valori di resistenza più alti, la fase di costruzione impone che siano applicati sottilissimi strati di platino su un substrato di ceramica (Picco, 2010).

Da un punto di vista tecnico, in realtà, la misura della temperatura tramite RTD presenta una certa difficoltà, in quanto la resistenza relativamente bassa (100 Ω) varia molto lentamente al variare della temperatura (0.4 Ω/°C). Per ottenere delle misure di precisione di queste piccole variazioni di temperatura sono necessarie particolari configurazioni. Dal momento che un RTD è un sensore passivo è necessario far passare corrente (di qualsiasi entità misurabile) per il suo funzionamento; questo causa la produzione di una certa quantità di calore da parte dell'RTD, calore che altera la misura da effettuare. Una prima approssimazione stima tale errore in 1°C. Dal momento che eliminare questo errore è praticamente impossibile è necessario comunque minimizzarlo (Fenzi, 2005).

Di seguito una panoramica dei vantaggi e svantaggi dei termoresistori RTD (Picco, 2010).

Vantaggi:

- lineari su un ampio intervallo operativo
- ampio intervallo operativo di temperatura
- intercambiabilità su un ampio intervallo
- migliore stabilità ad alte temperature

Svantaggi:

- bassa sensibilità
- costi maggiori
- non misura punti singoli
- influenzata da urti e vibrazioni
- richiede funzionamento a tre o quattro cavi
- può essere influenzata dalla resistenza di contatto

Quando usare i termoresistori RTD (Picco, 2010):

- quando precisione e stabilità sono l'obiettivo principale dell'applicazione
- quando va mantenuta la precisione su un ampio intervallo di temperatura
- quando la misurazione su un'area piuttosto che su un punto migliora il controllo
- quando è desiderabile un alto livello di standardizzazione

Alcune applicazioni: microelettronica, condizionamento dell'aria, misura di temperatura di liquidi, aria e gas e misura delle temperature dei gas di scarico.

3.3.2 - I termistori a semiconduttore NTC e PTC

La suddivisione in NTC (Negative Temperature Coefficient) e PTC (Positive Temperature Coefficient) si basa sull'andamento della resistenza all'aumentare della temperatura.

La differenza di funzionamento consiste nel fatto che nei termistori NTC la resistenza decresce con l'aumentare della temperatura, mentre nei PTC la resistenza aumenta esponenzialmente con l'aumentare della temperatura (questo avviene non appena superato il valore T_{Ref} del materiale). La Figura 3.3 mostra la differenza di funzionamento tra queste due tipologie di termistori (Picco, 2010).

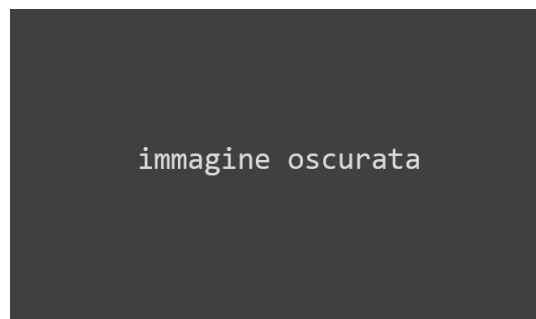


Figura 3.3. Differenza che intercorre tra termistori NTC e PTC. Evidenziato in rosso il valore T_{Ref} , punto in cui la resistenza inizia ad aumentare esponenzialmente con l'aumento della temperatura.

I termistori (sia gli NTC che i PTC) sono componenti ceramici costituiti da una struttura policristallina, ottenuta per sinterizzazione di ossidi metallici e non, opportunamente miscelati.

I dispositivi NTC sono ottenuti dalla sinterizzazione di ossidi metallici drogati come Mn_2O , NiO , Co_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 , mentre i dispositivi PTC vengono realizzati utilizzando materiale ceramico a base di titanio e bario con l'aggiunta di piombo o zirconio. In commercio esistono anche dispositivi PTC composti da silicio drogato, generalmente con boro, con una concentrazione dell'ordine dei 10^{16} cm^{-3} , i quali hanno una caratteristica resistenza-temperatura più regolare.

I vantaggi della sinterizzazione risiedono nella possibilità di utilizzare sensori di qualsiasi forma e dimensione (Figura 3.4) e con costanti di tempo bassissime (che sono dovute alle piccole dimensioni).

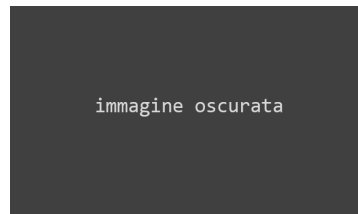


Figura 3.4. Schema generale della composizione di un termistore.

Vantaggi e svantaggi dei termistori possono essere così riassunti (Picco, 2010):

Vantaggi:

- risposta rapida (1÷10s)
- piccole dimensioni
- l'alta resistenza elimina molti dei problemi legati alla resistenza dei cavi
- solido, non influenzato da urti o vibrazioni
- costo inferiore

Svantaggi:

- non lineare
- intervallo ristretto per ciascuna unità
- intercambiabilità limitata salvo che non si usino elementi accoppiati

Quando usare i termistori (Picco, 2010):

- quando l'applicazione richiede un'alta risoluzione su un intervallo stretto
- quando il basso costo è una considerazione primaria
- quando si richiede rilevazione su un punto singolo o miniaturizzazione

Alcune applicazioni dei termistori sono: termostati, attrezzature per laboratori, processi che richiedono un'alta risoluzione su un intervallo ristretto e processi che richiedono miniaturizzazione.

3.4 - Sensori di posizione analogici

La tipologia di questi sensori si suddivide in due grandi gruppi in base alla loro struttura: sensori di posizione lineare ed angolare. Il loro principio di funzionamento può essere di diverse tipologie.

Sensori a principio di funzionamento induttivo

I sensori elettronici induttivi sfruttano il fenomeno dello smorzamento di un campo elettromagnetico per effetto delle correnti indotte (correnti di Foucault) in materiali conduttori che si trovano nelle loro vicinanze. La bobina che si trova in un circuito oscillante genera un campo elettromagnetico ad alta frequenza il quale, induce in azionatori metallici posti nelle vicinanze, delle correnti parassite.

Queste correnti provocano una perdita di energia nell'oscillatore determinando uno smorzamento dell'ampiezza del segnale. Tale riduzione dell'ampiezza dell'oscillazione viene rilevata da un amplificatore di soglia con isteresi¹ che, a sua volta, comanda uno stadio amplificatore finale per l'azionamento di un carico esterno (Rapisarda, 2004).

I suddetti sensori si suddividono in due categorie, ovvero auto-amplificati e non auto-amplificati.

I sensori auto-amplificati possono essere a loro volta suddivisi in sensori a corrente continua o a corrente alternata, mentre quelli non auto-amplificati sono costituiti da un oscillatore e vengono utilizzati per ottenere dei segnali a basso livello atti a comandare un amplificatore separato.

Un grande vantaggio di questa tipologia di sensori è dato dall'assenza di contatto meccanico fra azionatore e sensore, che consente una durata nel tempo ed un numero di operazioni illimitate se posti a confronto con altre tipologie, riducendo così ogni problema di manutenzione (Rapisarda, 2004).

Sensori a principio di funzionamento capacitivo

I sensori che si basano su questo principio di funzionamento sono detti anche sensori capacitivi e sfruttano la variazione di capacità parassita che si crea tra sensore ed oggetto. In corrispondenza di una determinata distanza dell'oggetto o superficie dalla faccia sensibile del sensore, entra in oscillazione un circuito e l'insorgere od il cessare di tale oscillazione viene "letta" da un rilevatore di soglia che comanda un amplificatore per l'azionamento di un carico esterno (Rapisarda, 2004).

¹ Fenomeno per cui il valore istantaneo di una grandezza che è determinata da un'altra dipende non soltanto dal valore di questa allo stesso istante, ma anche dai valori che essa ha avuto in istanti precedenti.

Dato il principio di funzionamento dei sensori capacitivi è evidente che tali sensori sono in grado di misurare i cambiamenti della capacità parassita che si viene a creare anche qualora il materiale con cui il sensore si trova ad interagire sia di natura differente da quella metallica come ad esempio legno, liquidi o materiali plastici (Rapisarda, 2004).

Sensori ad effetto Hall

L'effetto Hall (così chiamato in onore del suo scopritore Edwin Herbert Hall nel 1879) si verifica in un materiale solido che conduce corrente, come ad esempio un semiconduttore, attraversato da una corrente elettrica quando è immerso in un campo magnetico. In questa situazione la forza di Lorentz agente sul moto dei portatori di carica (che tipicamente sono elettroni, lacune², ioni o entrambi) ne altera la normale direzione, provocando così un addensamento del loro fluire su un lato del materiale piuttosto che sull'altro e provocando in questo modo una differenza di potenziale.

Le variazioni nel campo magnetico o elettrico inducono correnti nei conduttori; quest'ultime possono essere rilevate ed utilizzate per misurare i cambiamenti nei campi magnetici (Nehmzow, 2008; Zanobini et al., 2013).

3.4.1 - Sensori di posizione lineari induttivi (LVDT)

Un sensore LVDT (Linear Variable Differential Transformer) o trasformatore lineare variabile differenziale è un sensore passivo induttivo che grazie alle sue caratteristiche trova numerosissime applicazioni. È composto di un singolo avvolgimento primario posizionato tra due identici avvolgimenti secondari avvolto in un tubo ferromagnetico (Figura 3.5).



Figura 3.5. Struttura di un trasformatore lineare LVDT.

² In elettronica la lacuna elettronica, chiamata anche semplicemente lacuna, è, insieme all'elettrone, uno dei due portatori di carica che contribuiscono al passaggio di corrente elettrica nei semiconduttori. La lacuna ha in valore assoluto la stessa carica dell'elettrone, ma contrariamente a quanto accade a questa particella, la sua carica è positiva.

L'avvolgimento primario viene alimentato da una tensione a corrente alternata di frequenza variabile tra i 50 ed i 20.000 Hz. Le due bobine secondarie hanno lo stesso numero di spire e la stessa geometria e sono pertanto identiche; vengono connesse in opposizione (controserie) in modo tale che le tensioni di uscita indotte si oppongono l'una con l'altra (Massignan, 2011). Se il nucleo o core è posizionato al centro allora si verifica una condizione di equilibrio, ovvero un uguale accoppiamento tra gli avvolgimenti primari e secondari; questa posizione di equilibrio funge da punto di riferimento per il sensore. Fino a quando il core resta vicino alla parte centrale della bobina l'uscita del segnale elettrico è molto lineare.

Il nucleo ferromagnetico si muove liberamente all'interno della cavità del corpo del sensore, alterando la mutua induttanza³ tra avvolgimenti primari e secondari, al contrario di quello che accade quando il core è posizionato al centro in posizione di riferimento. In questa condizione infatti, le forze elettromotrici indotte nelle bobine secondarie sono uguali e, dal momento che si oppongono a vicenda la tensione d'uscita risulta nulla.

Nel momento in cui il core si muove, ad esempio verso sinistra rispetto alla posizione centrale di riferimento, un flusso magnetico maggiore si concatena con la parte sinistra della bobina rispetto a quella di destra. In questo modo la tensione indotta nella bobina di sinistra è maggiore e di conseguenza la tensione d'uscita è più grande di quella che si ha nella posizione di riferimento ed è uguale alla differenza delle tensioni dei due avvolgimenti secondari (Massignan, 2011). Come conseguenza il segnale d'uscita (generalmente un segnale sinusoidale con frequenza compresa tra i 60 e 20.000 Hz) del dispositivo indica lo spostamento che compie il nucleo all'interno dell'alloggiamento (solitamente in acciaio), rispetto alla posizione centrale di equilibrio. Allo stesso modo un movimento del core nella direzione opposta rovescia di fatto l'effetto. A seconda della direzione della quale si muove il core ferromagnetico, il segnale in uscita dal dispositivo assumerà un determinato valore, permettendo così di misurare e definire l'entità e la direzione dello spostamento (Massignan, 2011).

Nelle applicazioni pratiche la frequenza con cui alimentare la bobina primaria viene scelta in modo tale che, nella posizione centrale di riferimento del core, lo sfasamento dell'intero sistema sia nullo, infatti le ampiezze delle tensioni in uscita delle bobine secondarie dipendono dalla posizione del core stesso. Le tensioni in uscita possono essere direttamente elaborate per ogni spira dell'avvolgimento secondario permettendo di rilevare così anche piccoli spostamenti del nucleo. Per spostamenti veloci del core, tuttavia, i segnali dovrebbero essere convertiti in corrente continua; in questo modo è anche possibile rilevare la direzione di spostamento (Figura 3.6). A tale scopo è

³ L'induttanza è la proprietà dei circuiti elettrici tale per cui la corrente (intesa variabile nel tempo) che li attraversa induce una forza elettromotrice che, per la legge di Lenz, è proporzionale alla variazione del flusso magnetico concatenato dal circuito.

possibile utilizzare un demodulatore sensibile alla fase seguito da un filtro passa-basso⁴ od un semplice circuito raddrizzatore. Il demodulatore viene utilizzato al fine di ottenere segnali proporzionali allo spostamento dell'LVDT e da altri tipi di sensori a principio induttivo e serve per convertire il segnale d'uscita da corrente alternata a corrente continua, potendo così definire la direzione di movimento del core rispetto alla sua posizione di riferimento (Massignan, 2011).



Figura 3.6. Rappresentazione schematica del segnale in uscita dal demodulatore.

La risposta di un sensore LVDT è determinata principalmente dalle caratteristiche d'inerzia del dispositivo. In generale la frequenza della tensione applicata dovrebbe essere 10 volte la frequenza desiderata nel segnale di risposta. Gli LVDT commerciali sono disponibili in una larga gamma di dimensioni e sono largamente impiegati per effettuare misure di spostamenti in varie applicazioni. Questi sensori sono sufficientemente sensibili per rispondere a spostamenti al di sotto di 0,0005 mm e presentano intervalli di temperatura operativa che variano da 265 a 600°C. Solitamente la corsa dei più comuni sensori LVDT in commercio varia da $\pm 0,125$ mm a ± 100 mm e la tensione di alimentazione raccomandata compresa tra i 3 e 6 V. Diversi modelli commerciali sono in grado di produrre una tensione di uscita di 300 mV per un millimetro di spostamento del core (Massignan, 2011).

Un importante vantaggio dell'LVDT consiste nel fatto che non esiste un contatto fisico tra il core e la bobina, di conseguenza non si hanno attrito ed usura. Nonostante questo, sono comunque sempre presenti forze magnetiche radiali e longitudinali sul nucleo le quali, possono essere considerate alla stregua di molle magnetiche che tentano di discostare il nucleo dalla sua posizione di equilibrio costituendo un fattore critico in alcune applicazioni.

Una problematica del trasformatore differenziale è che non è sempre facile costruire due bobine secondarie completamente identiche, e di conseguenza le loro induttanze, resistenze e capacità possono essere differenti. Un ulteriore problema di cui soffrono gli LVDT è associato alle

⁴ Un filtro passa-basso è un sistema che permette il passaggio di frequenze al di sotto di una data soglia, detta frequenza di taglio, bloccando le alte frequenze.

regolazioni della posizione di riferimento del nucleo, in quanto le correnti armoniche originate dalla tensione di alimentazione e le capacità parassite provocano una piccola tensione diversa da zero; questa tensione può essere ridotta avvalendosi di un'appropriata messa a terra che riduce gli effetti capacitivi.

Riassumendo i vantaggi dei sensori LVDT sono:

- l'assenza di contatto fisico tra core e bobine che permette di avere solo piccole forze resistive
- trascurabile isteresi magnetica e meccanica
- bassa impedenza di uscita
- costruzione solida e robusta
- bassa suscettibilità al rumore ed alle interferenze
- possibilità di ottenere una risoluzione infinitesimale

Alcune caratteristiche negative, invece, di questa tipologia di sensori sono il peso e l'ingombro e la sensibilità alle vibrazioni (Donini et al., 2003).

3.4.2 - Sensori di posizione angolari induttivi (RVDT)

I sensori RVDT (Rotary Variable Differential Transformer) sono dei trasformatori differenziali che permettono di misurare un movimento angolare in maniera molto precisa. Sono dispositivi analogici necessitano di alimentazione in corrente alternata. Il principio di funzionamento di questi sensori è analogo a quello dei sensori LVDT precedentemente descritti e si differenziano da quest'ultimi per il fatto di essere a rotazione: un core, solidale con un albero, ruotando accoppia in misura diversa a seconda della posizione la bobina primaria con i due avvolgimenti secondari (Figura 3.7). In questo caso, il nucleo deve essere sagomato in maniera opportuna, in modo tale da garantire una buona linearità della risposta (Donini et al., 2003). Considerando il fatto che in questi sensori non vi è contatto fra le parti mobili, l'attrito può essere considerato nullo; sono però presenti delle forze magnetiche radiali e longitudinali.



Figura 3.7. a) rappresentazione schematica del funzionamento di un sensore RVDT e b) immagine di un RVDT.

Alcune caratteristiche metrologiche di questa tipologia di sensori sono una corsa fino a $\pm 60^\circ$ con una sensibilità che varia da 10 a 20 mV/grado, a seconda della frequenza della tensione di alimentazione e della corsa. Sono dotati di una risoluzione nominale infinita.

Un importante vantaggio che caratterizza i sensori RVDT è il fatto che possano essere utilizzati in ambienti dalle condizioni estreme (Kessler, 1994).

3.4.3 – Sensori di posizione angolari ad effetto Hall

Questa tipologia di sensori è utilizzata in diverse applicazioni, ma quella che interessa il settore delle macchine agricole, vede l'utilizzo di questi dispositivi come sensori di posizione. Sono sensori prevalentemente analogici, il cui segnale di uscita può essere un segnale in tensione (espressa in Volt) o in corrente (tipicamente mA); questo significa che a seconda della posizione che viene registrata dal sensore il valore di tensione o di intensità di corrente del segnale di output varia, aumentando o diminuendo, a seconda della direzione del movimento angolare rispetto allo “zero” del sensore.

Il funzionamento di un sensore ad effetto Hall prevede che non ci siano parti mobili a contatto, riducendo così l'usura e garantendo una durata superiore.

Le principali caratteristiche che hanno questi sensori sono (Petrella, 2007):

- eccellente precisione
- buona linearità
- bassa deriva termica
- bassi tempi di risposta
- buona risposta in frequenza
- non producono alterazioni sul circuito da misurare
- sopportano sovraccarichi elevati

3.5 – Sensori di posizione digitali: gli encoder

Gli encoder sono dei sensori di posizione e di velocità in grado di convertire la posizione e la velocità in un segnale elettrico in formato digitale anziché analogico; si può così evitare l'inserimento di convertitori A/D. Il segnale d'uscita così ottenuto è direttamente fruibile dai sistemi di controllo ed elaborazione (come ad esempio centraline elettroniche) che operano in formato digitale. Gli encoder possono essere di tipo lineare o angolare (Sgarbossa; Donini et al., 2003). Di seguito saranno trattati in particolar modo gli encoder angolari.

Diversi sono i principi di funzionamento di questi dispositivi ed ognuno di essi dispone di particolari caratteristiche che lo rendono più o meno adatto ad essere utilizzato in un determinato

ambito. Tali principi di funzionamento sono cinque: principio induttivo, capacitivo, ottico, potenziometrico e magnetico.

3.5.1 - Encoder induttivi e capacitivi

Essi sfruttano gli stessi principi precedentemente descritti. Esteriormente possono apparire molto simili ma il loro funzionamento è diverso. Entrambi utilizzano una tecnica di non contatto tra le parti per la misurazione della posizione ed entrambi possono essere costruiti utilizzando circuiti stampati.

Negli encoder capacitivi, data la necessità intrinseca di avere una distanza tra le facce del sensore molto contenuta rispetto alle dimensioni delle facce stesse, l'assemblaggio comporta una grande precisione meccanica; per questo motivo gli encoder capacitivi non sono adatti a lavorare in condizioni ambientali estreme, in particolar modo la temperatura potrebbe comprometterne il funzionamento come conseguenza alla dilatazione od al restringimento del materiale che compone il sensore stesso.

Per quanto riguarda gli encoder induttivi essi necessitano, da un punto di vista dell'assemblaggio meccanico, di minore precisione in quanto le bobine possono essere distanziate in modo rilevante, visto che gli elementi che lo compongono hanno tolleranze di montaggio abbastanza elevate. Ciò aiuta a ridurre i costi di assemblaggio. Gli encoder induttivi, a differenza di quelli capacitivi, sono meno influenzati dagli agenti esterni come acqua e particelle (Zettlex, 2017).

3.5.2 - Encoder ottici

Gli encoder ottici possono essere incrementali od assoluti. Il principio di funzionamento su cui si basano questi tipi di encoder è la trasmissione di energia luminosa tra una sorgente (denominato anche diodo emettitore) ed un fotosensore di ricezione (chiamato anche fotorecettore o fotorilevatore o fototransistor). Gli encoder sono composti da un disco calettato sull'albero del sensore stesso su cui si vuole rilevare lo spostamento angolare (Figura 3.8). Tale disco (detto anche maschera mobile) è costituito da aree scure, impenetrabili al flusso luminoso emesso dal diodo emettitore e da aree trasparenti, che lasciano invece passare il segnale luminoso. I fotorilevatori ricevono il segnale luminoso di input e lo inviano ad un circuito elettronico che convertirà quanto ricevuto in output logico (1 se passa luce, 0 se non passa) (AREA Laboratory).



Figura 3.8. Principio di funzionamento di un encoder ottico.

Le coppie sorgenti (diodi LED)-fotodiodi rilevatori sono tante quante sono le piste del nastro o del disco a seconda che si tratti di encoder ottici lineari o angolari (Donini et al., 2003).

3.5.3 - Encoder potenziometrici

Il loro principio di funzionamento si basa sulla caratteristica di un potenziometro, ovvero di emettere un segnale elettrico proporzionale alla posizione che assume il suo rotore. Il potenziometro è un dispositivo a tre terminali, equivalente ad un partitore di tensione resistivo variabile (ovvero due resistori collegati in serie, aventi la somma dei due valori di resistenza costante, ma di cui può variare il valore relativo), costituito da un elemento resistivo sul quale è possibile far scorrere un contatto strisciante (Figura 3.9). Due terminali sono collegati agli estremi dell'elemento resistivo R , mentre il terzo terminale è collegato al contatto che si muove sull'elemento resistivo (Donini et al., 2003). Il concetto che sta alla base di un potenziometro deriva dal fatto che esso converte una variazione di distanza (lineare od angolare) in una variazione di resistenza. Tale variazione non è di per sé direttamente misurabile, ma impone l'uso di un circuito di condizionamento. I dispositivi potenziometrici soffrono di problemi che sono legati all'attrito meccanico che si instaura tra la pista fissa (o resistenza) ed il contatto mobile, alla limitata risoluzione ed al rumore termico (Laracca). Quando agli estremi del potenziometro si applica una determinata tensione, si manifesta tra il terminale centrale e quello di riferimento una differenza di potenziale; tale differenza di potenziale è il valore utilizzato dall'encoder per decifrare la posizione. Gli encoder potenziometrici possono essere soltanto di tipo assoluto (Donini et al., 2003).



Figura 3.9. a) rappresentazione schematica di un potenziometro e b) illustrazione di un potenziometro e dimostrazione grafica del principio di funzionamento.

3.5.4 - Encoder magnetici

Questi tipi di encoder possono basare il loro funzionamento sul sistema a riluttanza magnetica o sul sistema a banda magnetica (Figura 3.10). Il sistema a riluttanza magnetica è basato sulla misura dei cambiamenti di resistenza del circuito magnetico in esso presente. Tali cambiamenti sono causati dal passaggio dei denti della ruota calettata sull'albero del motore (Ferri, 2010).

Tale sistema fornisce una bassa risoluzione angolare pari a circa 200 impulsi per ogni giro. Il sistema a banda magnetica, invece, utilizza un sensore magnetico il quale rileva il campo proveniente da un tamburo ricoperto superficialmente con un materiale per registrazioni sul quale sono stati incisi i segnali di posizione. I sensori magnetici, a differenza di quelli ottici, garantiscono una migliore risposta in frequenza e una maggiore affidabilità data dal fatto che sono soggetti ad una minore usura degli elementi utilizzati (Ferri, 2010).



Figura 3.10. 1) encoder magnetico con sistema a riluttanza magnetica e 2) encoder magnetico con sistema a banda magnetica.

3.5.5 - Sistema di misura degli encoder

In base a come un encoder effettua la misurazione del parametro in considerazione, essi possono essere suddivisi in tre principali gruppi: encoder assoluti, incrementali e tachimetrici.

3.5.5.1 - Encoder assoluti

Gli encoder assoluti sono principalmente basati su funzionamenti di tipo ottico. Questo sensore di posizione può sembrare essere dotato, a causa della discretizzazione costitutiva, di un potere risolutivo inferiore rispetto ai tradizionali sensori di posizione di tipo analogico (come potenziometri e trasformatori differenziali), ma in realtà il potere risolutivo viene definito in base al numero di piste dell'encoder stesso. Avvalendosi di 8 piste è possibile discriminare ben 2^8 , ovvero 256 posizioni (risoluzione di $1,4^\circ$) (Donini et al., 2003; AREA Laboratory).

Per quanto riguarda invece la risoluzione che caratterizza i sistemi analogici, essa resta limitata dal rapporto segnale rumore degli amplificatori elettronici utilizzati. Una problematica di cui gli encoder a codice binario naturale soffrono si ha quando il sensore, passando da una posizione alla successiva, determina la commutazione di almeno due bit. Qualora il sistema di lettura non fosse perfettamente allineato alle piste si genererebbe un codice errato durante il passaggio da una posizione all'altra (la cosiddetta corsa critica). Per citare un esempio, nel passaggio tra il codice 5 (101 in codice binario naturale) e 6 (110), si potrebbe generare, per un breve istante, il codice 100 oppure 111. Al fine di ovviare a questo inconveniente è possibile codificare il nastro od il disco con un codice binario a distanza di Hamming⁵ unitaria, come ad esempio il codice Gray (il codice Gray è un codice binario a lunghezza fissa) (Figura 3.11) (Donini et al., 2003).



Figura 3.11. Differenza tra un disco per encoder assoluto rotativo in codice binario puro ed uno in codice Gray (risoluzione 4 bit).

Altri svantaggi di un encoder assoluto sono l'elevato costo dovuto alla maggiore complessità rispetto agli encoder incrementali ed il fatto che nel qual caso si vogliono eseguire misure maggiori ad un giro completo è necessario usare comunque un circuito esterno in grado di contare i giri. Per

⁵ Nella teoria dell'informazione, la distanza di Hamming tra due stringhe di ugual lunghezza è il numero di posizioni nelle quali i simboli corrispondenti sono diversi. In altri termini, la distanza di Hamming misura il numero di sostituzioni necessarie per convertire una stringa nell'altra, o vista in altro modo, il numero minimo di errori che possono aver portato alla trasformazione di una stringa nell'altra.

quanto riguarda, invece, i vantaggi di questa tipologia di encoder bisogna segnalare che essi non necessitano di azzeramento e non perdono informazioni in caso di mancanza di alimentazione (AREA Laboratory).

3.5.5.2 - Encoder incrementali

Anch'essi possono essere di tipo lineare o angolare e sono costituiti da fenditure equidistanti praticate sul nastro lineare o su un disco circolare; basano il loro funzionamento principalmente su un principio ottico. Vengono chiamati incrementali in quanto i segnali di uscita sono proporzionali, in modo incrementale, allo spostamento effettuato (Rapisarda, 2004). Questi dispositivi non danno un'immediata informazione della posizione (Donini et al., 2003). Un dispositivo di conteggio digitale incrementa la configurazione numerica ad ogni impulso che viene generato. Dal momento che l'encoder può muoversi o ruotare in entrambe le direzioni, al fine di rilevare il senso del movimento, è necessario che sia presente un sistema in grado di svolgere questo compito; per questo motivo il contatore deve essere di tipo bidirezionale. Negli encoder incrementali viene praticata un'altra serie di fenditure in modo tale da risultare sfalsata di $\frac{1}{4}$ (ovvero di 90°) di posizione rispetto alla prima (Figura 3.12).

Il sistema di lettura dispone quindi di due fotodiodi, supportati da un circuito elettronico, in grado di fornire coppie di forme d'onda quadra sfasate tra di loro in due differenti modi in base al senso di movimento (Donini et al., 2003).



Figura 3.12. Funzionamento di un encoder incrementale angolare ottico. Il sistema di lettura, grazie allo sfasamento dei segnali A e B, permette di discriminare il senso del movimento.

Talvolta, oltre alle due tracce A e B, è presente anche una terza traccia denominata traccia di zero (o posizione di zero); è quindi presente un ulteriore coppia sorgente-ricevitore. La tacca di zero è una striscia trasparente posta in corrispondenza dello zero convenzionale dell'angolo di rotazione dell'encoder (Figura 3.13). Lo scopo di questa traccia è molto importante in quanto consente di stabilire lo stato iniziale necessario per il circuito di conteggio (Secchi). Affinché questo sia

possibile è necessario inizializzare il sistema, ovvero muovere il dispositivo collegato all'encoder sino a quando non sia rilevata la posizione di zero.



Figura 3.13. Rappresentazione schematica di un encoder incrementale angolare ottico con traccia di zero.

Gli encoder incrementali come del resto tutti i sensori dispongono di punti di forza e di punti deboli. Tra i principali punti deboli vi è il fatto che essi possono fornire errori nella fase di misurazione, e di conseguenza posizioni non corrette, a causa del conteggio errato provocato da disturbi (Rapisarda, 2004). Vi è inoltre la necessità di inizializzare il sensore e la necessità di installare un contatore di giri ed il fatto che in caso di mancanza di alimentazione elettrica essi perdono il dato che costituisce la posizione; per questo motivo è previsto che in alcuni encoder incrementali sia presente una batteria tampone per ovviare a questa problematica (Sgarbossa). Tra i principali vantaggi degli encoder incrementali vi è il fatto che essi permettono anche di stimare la velocità di spostamento.

3.5.5.3 - Encoder tachimetrici

L'encoder tachimetrico è il più semplice tipo di encoder ed è in grado di rilevare la velocità e lo spostamento angolari in situazioni nelle quali il senso del movimento non cambia. Questi dispositivi sono costituiti da una barriera fotoelettrica composta da una coppia emettitore-ricevitore (formata da un diodo all'infrarosso ed un fototransistor), ove nel mezzo è collocato un disco che presenta una serie uniforme di settori opachi e trasparenti (Figura 3.14). Il disco è solidale all'asse di rotazione e può essere di metallo, di vetro o di materiale plastico (Bianconi, 2009).



Figura 3.14. Schema di funzionamento di un encoder tachimetrico.

Quando il fototransistor riceve un segnale luminoso in uscita si avrà uno 0 logico, mentre quando tra il diodo emettitore ed il fotoricettore si frappone un settore oscurato che interrompe di conseguenza il flusso luminoso, il segnale d'uscita sarà 1 logico (Bianconi, 2009). Questo tipo di encoder è principalmente utilizzato per rilevare la velocità.

3.6 - Gli attuatori

Gli attuatori sono gli organi finali di un sistema automatico e la loro funzione è quella di eseguire le operazioni controllate e definite dal sistema. In ogni caso sono dei dispositivi che rispondono ai segnali elettrici provenienti dalle unità di controllo e che compiono un lavoro meccanico, a seguito di traslazione o rotazione di uno specifico organo (Belforte, 2005). Esistono attuatori di vario tipo che sfruttano principi di funzionamento differenti.

Normalmente si tratta di dispositivi pneumatici, idraulici o elettromeccanici dotati della potenza meccanica necessaria per intervenire sull'apparato regolato, apportando le correzioni previste nei tempi prefissati, i quali solitamente sono misurabili in frazioni di secondo (tipicamente si tratta di millisecondi, ma possono essere utilizzati intervalli di tempo anche inferiori). Il loro comportamento è integralmente impostato dal microprocessore integrato nella centralina elettronica di controllo (Gasparetto). In base al loro campo d'impiego, alcune tipologie di attuatori sono più indicate di altre; nella Figura 3.15 è riportato il costo in funzione del carico sviluppato. Come si può osservare, i dispositivi pneumatici, a parità di carico movimentato, risultano i mezzi più economici (Belforte et al., 1998).



Figura 3.15. Diagramma del rapporto carico/costo dei vari tipi di attuatori.

3.6.1 - Attuatori pneumatici

Fanno parte della grande famiglia di attuatori a fluido, ove quest'ultimo può essere acqua, olio, miscele con acqua e glicoli o gas; nel caso di attuatori pneumatici, il fluido, solitamente è aria compressa, anche se a volte possono essere utilizzate altre tipologie di gas come ad esempio l'azoto. Le funzioni che essi compiono sono di diverso tipo e possono corrispondere sia a movimenti limitati in ampiezza, ovvero intermittenti, sia a movimenti continui.

Gli attuatori che compiono spostamenti o rotazioni intermittenti e che sono di conseguenza adatti a compiere moti alternativi, sono costituiti da varie tipologie di cilindri che possono essere lineari o rotativi (Belforte, 2005). Ci sono poi attuatori in grado di eseguire rotazioni continue; si tratta di cilindri dotati di veri e propri motori rotativi. Questa particolare soluzione si basa sull'uso di una coppia dentata e rocchetto che permettono di trasformare un movimento lineare in un movimento rotativo. Altri cilindri rotativi, invece, sono dotati di uno statore e di un rotore e sono chiamati cilindri rotativi a palette (Belforte, 2005). Infine, per usi più particolari, sono stati realizzati attuatori specializzati che permettono di eseguire operazioni particolari in base alla loro applicazione (Belforte, 2005).

Gli attuatori pneumatici operano con pressione che varia da 4 a 10 bar; per questo motivo sono in grado di sviluppare forze piccolo/medie, tipicamente da 2 a 4.000 daN (decanewton). Hanno un buon rapporto tra peso e potenza sviluppata, minore dei sistemi idraulici, ma superiore a quello dei sistemi elettrici. Questi dispositivi hanno un costo contenuto e sono ideali nei sistemi di automazione a basso costo (Belforte et al., 1998).

3.6.2 - Attuatori idraulici

Sostanzialmente per gli attuatori idraulici vale la stessa suddivisione fatta per quelli pneumatici. Anch'essi, infatti, si suddividono in cilindri e motori rotativi, in grado di eseguire rispettivamente movimenti lineari e rotativi. Solitamente il fluido che viene utilizzato all'interno di questi sistemi è olio idraulico, appositamente studiato e realizzato per tali scopi (Allotta et al., 2017).

I sistemi di attuazione oleodinamica possiedono buone capacità di controllabilità, potendo pertanto, eseguire leggi del moto variabili. Sono utilizzati, soprattutto, per elevate potenze dato che lavorano a pressioni molto elevate (da 80 a 500 bar); le forze sviluppate, tipicamente, variano da 500 a 200.000 daN. Inoltre, hanno un rapporto potenza sviluppata e peso molto grande, maggiore dei corrispondenti motori elettrici di pari potenza, per questo motivo sono utilizzati, in maniera vantaggiosa, in modo particolare in applicazioni a bordo di mezzi mobili. Sono sistemi di costo sempre piuttosto elevato (Belforte et al., 1998).

I cilindri idraulici eseguono un moto lineare, con corsa finita, e sono costituiti da due principali parti mobili quali il pistone ed il cilindro: il pistone si muove all'interno del cilindro per effetto della pressione del fluido nelle camere. I cilindri possono essere ad effetto semplice o doppio, a seconda che esso possa eseguire il movimento lineare in una sola od entrambe le direzioni.

I motori idraulici consentono di mettere in rotazione continua un'utenza ad essi collegata; in questo caso la tecnologia utilizzata ricalca, analogamente, quella impiegata per la costruzione delle pompe idrauliche. Quest'ultimi, in base alla tipologia di realizzazione, si possono suddividere in motori ad ingranaggi, motori a palette, motori a pistoni assiali e pompe a pistoni radiali (Allotta et al., 2017).

3.6.3 - Attuatori elettromeccanici

Questa tipologia di attuatori sono classificabili come motori elettrici e si suddividono in motori rotativi e motori lineari. I motori elettrici altro non sono che macchine che operano una trasformazione energetica: partendo dall'energia elettrica in ingresso viene prodotta energia meccanica. Questa trasformazione è resa possibile dai fenomeni elettromagnetici che interessano i circuiti elettrici e magnetici che costituiscono questi motori. In alcuni casi può verificarsi anche una trasformazione inversa. Indipendentemente dalla tipologia costruttiva dei singoli motori il principio fisico che si trova alla base del loro funzionamento sfrutta l'azione meccanica (o coppia) che è prodotta dall'interazione tra campi elettromagnetici (Legnani et al., 2016). I motori elettrici, in base alla loro conformazione, possono essere alimentati sia a corrente continua, sia a corrente alternata. Di seguito una breve e semplice panoramica dei motori rotativi e lineari.

I motori elettrici rotativi: costituiscono la tipologia di motore più conosciuta e diffusa. Questi motori sono sempre costituiti da una parte fissa (denominata statore) e da una parte mobile che compie un moto rotativo (denominata rotore); quest'ultimo può avere una superficie liscia o a "poli salienti". Questi due componenti sono separati da uno spazio chiamato traferro (Figura 3.16).

Il principio di funzionamento prevede che ad ognuno di questi elementi (rotore e statore) sia associato un campo magnetico: il campo applicato allo statore è anche noto con il nome di campo magnetico statorico, mentre quello applicato al rotore si chiama campo magnetico rotorico.

I vari campi magnetici chiamati in causa nel funzionamento di questi attuatori possono essere prodotti da magneti permanenti oppure da elettromagneti; nel caso di elettromagneti l'intensità del campo magnetico dipende dal materiale del nucleo, dal numero di spire del solenoide e dall'intensità della corrente elettrica applicata.

Agendo sulla corrente fornita agli elettromagneti è possibile regolare il campo elettromagnetico da questi ultimi prodotto.



Figura 3.16. Rappresentazione schematica di un motore elettrico rotativo con rotore liscio e con rotore a "poli salienti".

I motori elettrici lineari: in questi tipi di motori il principio base non cambia ed è lo stesso dei motori rotativi. In questo caso però, l'elemento mobile, anziché essere libero di ruotare, può soltanto traslare in una direzione prefissata (Figura 3.17). Nel caso di motori lineari l'azione da essi prodotta è una forza, invece di una coppia come accade nei motori rotativi (Legnani et al., 2016).

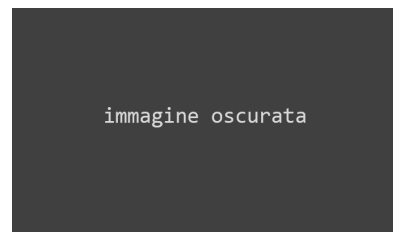


Figura 3.17. Principio di funzionamento di un motore elettrico lineare.

4 – La profondità di semina: i sistemi di controllo presenti sul mercato

Sono diversi i sistemi di semina di precisione in grado di garantire una certa profondità di semina costante sino ad oggi realizzati dalle diverse case costruttrici. Di seguito sarà effettuata una panoramica di differenti soluzioni studiate ed applicate da alcune delle principali case del mercato internazionale.

4.1 - Ag Leader

La casa statunitense ha messo a punto un sistema denominato *Hydraulic Down Force System* (Figura 4.1) che prevede, attraverso l'utilizzo di un attuatore idraulico, il mantenimento della costante profondità di semina anche quando il terreno riporta delle irregolarità come avvallamenti o quando la struttura cambia aumentando la resistenza nei confronti della penetrazione dei coltri delle unità di semina dando origine ad irregolarità nella profondità di deposizione del seme.

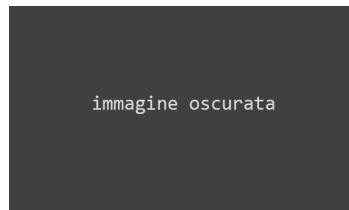


Figura 4.1. Attuatore idraulico che interviene sulla pressione esercitata sull'unità di semina.

Questo sistema prevede che gli attuatori siano collegati ad un terminale installato in cabina dal quale è possibile monitorare lo stato di avanzamento ed i relativi parametri di semina.

Questo sistema di controllo si sostituisce ai convenzionali sistemi pneumatici e a differenza di questi ultimi ha il grosso vantaggio di ridurre fortemente i tempi di risposta (Figura 4.2).

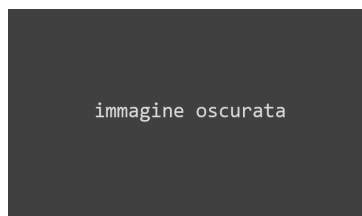


Figura 4.2. Confronto tra il sistema Ag Leader basato su attuatore idraulico (a) e un convenzionale sistema di regolazione pneumatico (b).

Il tempo di reazione è quasi immediato; è infatti necessario solo un secondo, affinché l'attuatore intervenga sull'unità di semina, ripristinando la corretta profondità di semina anche ad elevata velocità ed evitando così un'eccessiva eterogeneità di deposizione (Figura 4.3) (www.agleader.com).

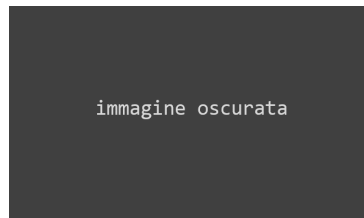


Figura 4.3. Differenza di qualità di semina sotto l'aspetto della corretta profondità di deposizione della semente tra il sistema Hydraulic Down Force ed un comune sistema di regolazione pneumatico.

4.2 - Precision Planting

La casa Precision Planting attraverso la sua componentistica studiata ad hoc dispone di due sistemi per il controllo della profondità di semina: *AirForce*TM e *DeltaForce*TM.

Sistema *AirForce*TM

Il sistema *AirForce*TM utilizza l'aria per aumentare o ridurre automaticamente la forza trasmessa ai corpi di semina che viene esercitata da quest'ultimi sul suolo, al fine di mantenere un'adeguata profondità di semina.

Si tratta di un dispositivo che consiste in un polmone d'aria ubicato nel parallelogramma della seminatrice e di un compressore (Figura 4.4), che ha il compito di generare l'aria compressa utilizzata per gonfiare il polmone pneumatico. Questo sistema include dei sensori intelligenti che misurano la forza che il corpo di semina esercita sul suolo e calcola il peso in eccesso da ridurre diminuendo la pressione del polmone pneumatico e mantenendo così la profondità di semina costante.

È sufficiente selezionare dal terminale di cabina le condizioni del suolo ed i parametri di semina affinché il sistema, durante la fase di semina, attui tutte le correzioni necessarie agendo sulla pressione del polmone pneumatico in base al tipo di terreno ed alle relative irregolarità per mantenere la profondità di semina costante (www.precisionplanting.com; Vélez et al.).



Figura 4.4. a) polmone pneumatico e b) compressore per generare l'aria compressa.

Sistema DeltaForce™

Il sistema *DeltaForce*™ consiste in un cilindro idraulico (Figura 4.5) in grado di intervenire sulla forza esercitata dall'organo seminatore al fine di evitare semine troppo superficiali. All'interno della seminatrice sono installati tanti dispositivi quante sono le file di semina.



Figura 4.5. a) dispositivo idraulico DeltaForce™ in grado di “leggere” la forza esercitata sull'organo di semina ed intervenire su di esso e b) terminale SeedSense®.

Esso è in grado di modificare automaticamente ed istantaneamente la profondità di semina precedentemente settata. I cilindri idraulici comunicano con il terminale *SeedSense*® installato in cabina. All'interno del dispositivo *DeltaForce*™ si trova un sensore (sotto forma di perno) che legge la pressione; il terminale è in grado di inviare un comando al dispositivo idraulico per poter regolare la pressione che quest'ultimo esercita sull'organo di semina (www.precisionplanting.com).

4.3 – Dawn Equipment

Questa azienda è specializzata nella progettazione e produzione di utensili principalmente per seminatrici, come unità di semina, sistemi di fertilizzazione e di minima lavorazione.

Il sistema più evoluto prende il nome di *Rfx-D* (Figura 4.6); è un dispositivo automatizzato che utilizza un attuatore idraulico modulare, il quale esercita una determinata pressione sul terreno, permettendo la deposizione della semente ad una certa profondità. A differenza dei tradizionali dispositivi meccanici a molla esso garantisce la stessa forza di carico durante tutto l'arco di tempo

dell'operazione colturale. È dotato anche di un controllo manuale che ne permette la configurazione e l'utilizzo anche in caso di guasti elettronici (www.dawnequipment.com).



Figura 4.6. a) visione di profilo del dispositivo Rfx-D e b) particolare dell'attuatore idraulico.

4.4 – Agrometal

Agrometal è una casa costruttrice di seminatrici argentina. La soluzione adottata da quest'azienda consiste di un attuatore idro-pneumatico che permette di deporre le sementi ad una profondità più uniforme.

Questo particolare dispositivo, denominato *Baratec*® (Figura 4.7), svolge una doppia funzione: permette una pressione costante e funge da ammortizzatore nei confronti delle oscillazioni che sollecitano le unità di semina.



Figura 4.7. Dispositivo idro-pneumatico Baratec®.

Questi dispositivi sono installati sopra il corpo di semina e sono in grado di controllare la profondità di semina, intervenendo sulla forza esercitata dalle ruote sopra il terreno e mantenendo il corretto posizionamento degli organi di semina nonostante le irregolarità del terreno.

La forza esercitata dall'attuatore può essere regolata in funzione della tipologia del terreno su cui si esegue la semina.

In tal modo le unità di semina che sono provviste di questo sistema possono adattarsi alle irregolarità del suolo, mantenendo sempre un regolare contatto con il terreno ed esercitando una pressione costante, mantenendo così una regolare profondità di semina.

Questo si traduce in una maggior stabilità da parte dei corpi di semina con conseguente miglioramento anche sul funzionamento del sistema di distribuzione delle sementi; ne deriva che i semi sono depositi con maggiore regolarità in termini di distanza tra di essi in quanto, diminuendo le oscillazioni dei corpi di semina, diminuiscono anche i rimbalzi delle sementi all'interno del tubo di discesa, le quali vengono depositate all'interno del solco con maggiore fluidità e subendo minori danni.

Le prove effettuate dimostrano che l'uniformità e la profondità di semina sono maggiormente garantite e rispettate con il sistema idro-pneumatico rispetto al tradizionale sistema di regolazione a molla.

In una prova dove è stata scelta una profondità di semina di 6 cm, con il sistema idro-pneumatico il 94% delle sementi è stato depositato in un range di profondità compreso tra 45,8 e 54,2 mm, mentre con il sistema a molla tradizionale le sementi deposte ad una profondità nel range ritenuto accettabile è stato del 55%.

Le sementi depositate superficialmente o ad una profondità eccessiva sono state praticamente nulle con il sistema di regolazione idro-pneumatico, mentre con il sistema di regolazione tradizionale a molla la quantità di sementi deposte troppo superficialmente o troppo profondamente è stata pari al 10% (di cui il 5% depositato ad una profondità inferiore a 29,2 mm e il 5% depositato ad una profondità superiore a 70,83 mm), dimostrando così che il sistema idro-pneumatico è in grado di mantenere una più precisa e costante profondità di semina (Vélez et al.).

L'aria di cui necessita questo dispositivo per il funzionamento è fornita da un compressore funzionante con tensione di 12 volt installato nella seminatrice e alimentato con l'elettricità proveniente dalla trattrice.

Questo attuatore può essere comandato a distanza attraverso un monitor di controllo installato nella cabina del trattore.

Tale sistema permette, inoltre, di poter aumentare la velocità di esecuzione dell'operazione di semina rispetto ad una seminatrice tradizionale (www.agrometal.com; Vélez et al.).

4.5 – Amazone

La casa madre tedesca Amazone propone modelli di seminatrici di precisione ISOBUS compatibili che danno la possibilità di monitorare il lavoro svolto (www.amazone.net).

Al fine di controllare la profondità di semina la soluzione utilizzata si chiama *ConTeC Pro* (Figura 4.8), e consiste di un coltro studiato per mantenere costante la profondità di semina; questo sistema viene particolarmente utilizzato nelle seminatrici per semina diretta o precedute da minima lavorazione.



Figura 4.8. Sopra: rappresentazione del coltro ConTeC, sotto: punte del coltro con diverso angolo d'attacco.

Il coltro possiede una punta con un angolo di attacco di 68° per assicurare la miglior penetrazione possibile nel suolo garantendo di conseguenza la profondità di deposizione delle sementi. Con condizioni del suolo molto difficoltose viene utilizzata una punta del coltro con un angolo di attacco di 50° che garantisce anch'essa, date le condizioni del terreno, una buona penetrazione.

Le punte dei coltri sono dotate di uno strato di metallo duro che garantisce un'elevata durata ed un livello di penetrazione anche nelle condizioni più difficili.

L'innovativo coltro *ConTeC Pro* è in grado di adattarsi in maniera accurata al profilo del suolo sul quale si ritrova ad operare grazie alla ruota di cui è dotato. Per ottimizzarne il funzionamento in tutte le condizioni nelle quali la seminatrice può trovarsi ad operare e, a seconda dei suoli, il coltro può essere dotato di quattro differenti tipologie di ruote:

- *ruote ad aria*: sono pneumatici riempiti con aria utilizzati per una grande varietà di condizioni operative.
- *ruote riempite di schiuma*: grazie al loro robusto design questo tipo di ruota è adatta ad essere utilizzata in condizioni operative difficili, in condizioni di estrema siccità ed in forte presenza di residui colturali. Questo tipo di ruota garantisce un ottimo costipamento del solco di semina.
- *ruote riempite di schiuma a profilo triangolare*: grazie alla sua forma a cuneo questo ruotino offre la massima pressione di contatto, specialmente in condizioni asciutte e su terreni

leggeri. Questa sua caratteristica risulta particolarmente utile quando si effettuano semine in presenza di molti residui vegetali.

- *ruota semi-pneumatica*: questo tipo di ruotino è composto da un profilo del pneumatico di spessore maggiore rispetto alla normale versione riempita ad aria. La sua parete in gomma spessa la rende estremamente resistente anche verso i residui colturali più tenaci. In condizioni asciutte questo pneumatico garantisce un ideale costipamento del terreno all'interno del solco di semina. La camera d'aria fornisce a questa tipologia di ruotino una buona flessibilità che impedisce l'attaccamento del suolo bagnato alla ruota.

La connessione flessibile tra le sezioni del telaio ed il coltro è realizzata con elementi in gomma; questa soluzione costruttiva permette di compensare le vibrazioni derivanti dalle ondulazioni del suolo, garantendo un'uniforme profondità di semina. Agendo sulle sezioni del telaio è possibile raggiungere pressioni sino a 120 kg per ogni singolo coltro.

Questo tipo di coltro permette una regolazione della profondità di semina che varia da 0 a 10 cm (www.amazone.net).

4.6 - John Deere

Diverse sono le soluzioni costruttive che John Deere utilizza nelle proprie seminatrici per il controllo della profondità di semina.

Il sistema pneumatico *Downforce* garantisce una regolazione semplice, attraverso un polmone pneumatico, della forza di carico esercitata sui corpi di semina. Il sistema permette una regolazione del carico che varia da 0 a 181 kg e offre una uniformità ed elasticità di gestione della forza di carico superiore ai tradizionali sistemi meccanici a molla. Qualora il sistema *Downforce* sia affiancato dal sistema *SeedStar™ XP*⁶, la gestione della profondità di semina risulta migliorata.

Un'evoluzione del sistema *Downforce*, denominato *Active Pneumatic Downforce*, facilita ulteriormente il processo di semina automatizzandolo e curando con maggior precisione la profondità di semina. Questo sistema prevede che a bordo della seminatrice sia installato un compressore azionato idraulicamente affiancato dal sistema *SeedStar™ XP* al fine di automatizzare completamente il sistema *Downforce*. Dal terminale presente in cabina è sufficiente impostare il valore di profondità di semina ed il sistema automatico provvede a garantire una precisa penetrazione e la profondità impostata.

⁶ *SeedStar™ XP* è un sistema di monitoraggio che, attraverso un terminale, fornisce informazioni sul processo di semina all'operatore che si trova in cabina.

In questo modo l'operatore non è più gravato dall'onere di dover cambiare manualmente le impostazioni al variare delle condizioni del suolo, permettendogli così di concentrarsi su altri fattori.

Un'ulteriore evoluzione del sistema *Active Pneumatic Downforce* deriva dalla collaborazione che John Deere ha messo in atto con Down Equipment Company e che ha dato vita al sistema *Rfx* (www.deere.com).

4.7 – Forigo Roter Italia

Forigo produce macchine principalmente per il settore orticolo, ed ha messo a punto un sistema elettroidraulico denominato TDC (Total Distance Control) che controlla automaticamente la profondità di lavoro del macchinario al quale è applicato e ne notifica la correttezza. Ad esempio nelle baulature orticole questo dispositivo garantisce il mantenimento di un'altezza uniforme ed omogenea per tutta l'estensione del campo.

Il sistema TDC utilizza un sensore ad ultrasuoni (Figura 4.9), il quale, leggendo costantemente l'altezza della baulatura, determina passo dopo passo la profondità di lavoro del macchinario (www.forigo.it).

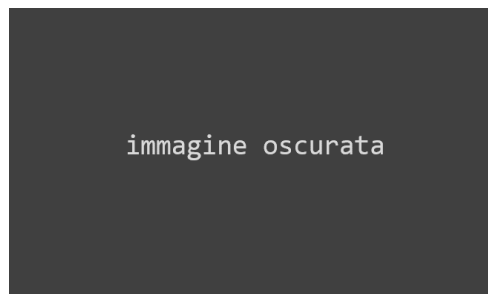


Figura 4.9. Sistema TDC ad ultrasuoni.

4.8 – Horsch

Horsch ha progettato un sistema denominato *AutoForce* che permette di controllare e correggere automaticamente la pressione esercitata sul coltro dell'unità di semina che influisce sulla profondità di semina (Figura 4.10).

La funzione di questo sistema consiste nel mantenere la pressione di contatto costante tra le ruote di profondità ed il terreno indipendentemente dalle condizioni del suolo in cui la macchina si trova ad operare.

Il risultato è che il coltro si adatta alle differenti condizioni del terreno per assicurare una profondità di deposizione della semente sempre costante ed uniforme.

La regolazione della pressione è operata da pistoni idraulici che operano su ogni singola sezione che costituisce l'unità di semina nelle macchine di maggiori dimensioni, mentre nelle macchine di dimensioni ridotte, il sistema di regolazione si compone di una singola sezione.



Figura 4.10. Sistema AutoForce. A) attuatore idraulico, B) forza esercitata dal peso dell'unità di semina, C) forza tra il suolo e le ruote di profondità e D) forza tra il suolo ed il coltro a disco.

Gli attuatori idraulici sono controllati da un software che è in grado di apportare le modifiche di pressione su ogni singola sezione, correggendola in tempo reale.

Grazie al sistema AutoForce è possibile garantire una pressione uniforme su tutte le singole unità di semina, ottenendo così, una semina a profondità costante e regolare.

Tutte le informazioni inerenti lo stato del sistema AutoForce della macchina seminatrice possono essere controllate da un terminale installato all'interno della cabina della trattrice (www.horsch.com).

4.9 – Kinze

Kinze ha sviluppato un kit, denominato *Down Pressure System*, da installare nelle proprie seminatrici che permette di controllare la profondità di semina (Figura 4.11). Si tratta di un sistema pneumatico che è in grado di mantenere costante la pressione agendo su ogni singola unità di semina al variare della resistenza del suolo. I valori di pressione rilevati dal sistema sono visualizzati in un monitor di cabina.

Un'altra soluzione che Kinze utilizza nelle proprie seminatrici, al fine di regolare e controllare la profondità di semina, consiste in un sistema idraulico di trasferimento del peso della seminatrice stessa. Questo sistema, tramite dei martinetti idraulici, distribuisce il peso della seminatrice uniformemente lungo tutto il telaio dell'attrezzo, trasferendo il carico dalla sezione centrale ai lati. Si evita così un eccessivo carico gravante solo su alcune unità di semina centrali che potrebbe

portare ad un eccessivo costipamento del terreno attorno alla semente, riducendone così, l'accrescimento e la resa finale (www.kinze.com).

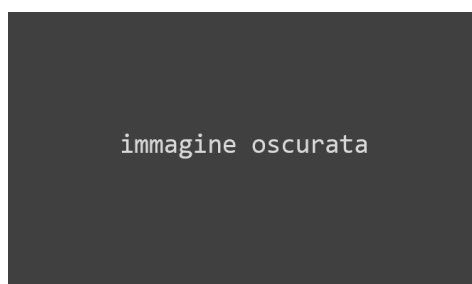


Figura 4.11. Particolare della camera pneumatica, cuore del sistema di controllo della pressione.

4.10 – Kuhn

Kuhn ha sviluppato un gruppo assolcatore, denominato *PRO*, dotato di due ruote di profondità allo scopo di rendere la deposizione della semente da parte dell'unità di semina più uniforme e regolare anche in presenza di irregolarità del letto di semina.

È stata sviluppata anche una versione (denominata *HR PRO*) da utilizzare in presenza di una grande quantità di residui colturali (Figura 4.12).

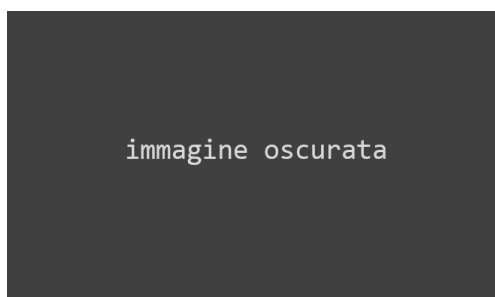


Figura 4.12. a) gruppo assolcatore PRO e b) gruppo assolcatore HR PRO per la presenza di grandi quantità di residui colturali.

Inoltre, un'ulteriore accorgimento per il mantenimento della profondità di semina, consiste nella barra di semina CROSSFLEX (Figura 4.13): è composta da un tubo dal profilo particolare sul quale sono montati gli elementi di semina mediante quattro elastomeri in poliuretano che agiscono in compressione, permettendo all'elemento di semina di riprendere rapidamente e con precisione la sua posizione iniziale. Oltre agli elastomeri nel telaio dell'attrezzo sono stati installati anche degli attuatori idraulici.



Figura 4.13. a) elastomeri poliuretanicici e b) attuatore barra di semina CROSSFLEX.

In questo modo si ottiene una profondità di semina precisa ed uniforme su tutto il campo, anche ad alta velocità. La pressione d'interramento è così omogenea e garantita dalla penetrazione degli elementi di semina.

Grazie alla compatibilità ISO 11783 è possibile gestire la seminatrice tramite un terminale ISOBUS installato all'interno della cabina del trattore. Si può così intervenire su elementi operativi come le ruote di compattamento, i dischi di preparazione e la barra di semina CROSSFLEX (www.kuhn.it).

4.11 – Sulky

Sulky applica due differenti sistemi di controllo delle profondità: *UNISOC 3R* e *UNIDISC*.

Sistema UNISOC 3R

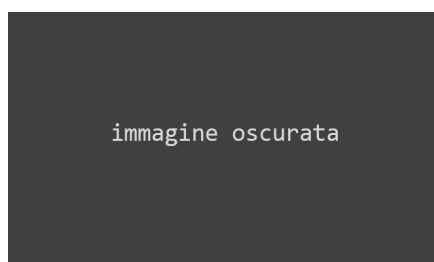


Figura 4.14. Il sistema UNISOC 3R permette di regolare la profondità di semina a seconda della coltura da seminare intervenendo sulla pressione che la molla esercita sull'organo di semina. In figura è riportato il sistema di regolazione meccanico, ma è disponibile anche un kit basato su un pistoncino idraulico. In verde è evidenziato il meccanismo che permette tale regolazione.

Il Sistema UNISOC 3R consiste sostanzialmente di una molla che in base alla regolazione è in grado di aumentare o diminuire la pressione sull'organo di lavoro a contatto con il terreno. La Figura 4.14 rappresenta una soluzione standard, ma è possibile installare opzionalmente un sistema a controllo idraulico, ove la pressione sull'organo di semina viene regolata tramite un pistoncino

idraulico. Per le semine superficiali è possibile regolare tale sistema affinché il meccanismo eserciti una pressione pari a 0 kg.

Sistema UNIDISC

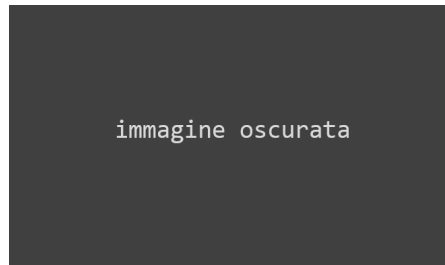


Figura 4.15. 1) cuscinetto a sfera, 2) molla a “doppio-effetto” posizionata al di sopra del braccio dell’organo seminatore, 3) braccio extra rigido con Ø di 43 mm, 4) coltro con controllo di profondità integrato che svolge anche funzione di pulitura del disco, 5) sistema anti-intasamento, 6) il complesso a forma di “V” disco arrotondato/coltro permette di depositare il seme alla profondità desiderata, 7) angolo di attacco di 5,5° permette al disco di avere una buona guidabilità anche in terreni sciolti.

In Figura 4.15 è riportato lo schema delle parti che compongono il sistema di controllo delle profondità di semina. Questa soluzione è basata sull’utilizzo di dischi di grande diametro i quali possono esercitare una pressione al suolo di 30 kg per ogni disco, permettendo così alla seminatrice di avanzare nel terreno senza fatica anche se in presenza di detriti culturali (www.sulky-burel.com).

4.12 – Väderstad

Le seminatrici Tempo sono la nuova generazione di seminatrici di precisione polivalenti ad alta velocità grazie all’unità di semina denominata *Gilstring Seed Meter*.

Queste seminatrici, inoltre, si avvalgono della tecnologia *PowerShoot* che utilizza la pressione dell’aria per mantenere il pieno controllo del trasporto del seme sino al suolo, evitando così, deposizioni imprecise causate da variazioni di velocità e/o direzione di discesa del seme attraverso il tubo adduttore dell’unità stessa causate dalla forza di gravità.

Ogni unità di semina è dotata di un motore elettrico che permette di disattivare l’erogazione delle sementi singolarmente, un’unità di semina alla volta, in modo tale da evitare sprechi di sementi in caso di sovrapposizione delle file (tipico caso che si verifica in testata all’appezzamento). Inoltre, questo azionamento elettrico, permette di calibrare l’erogazione delle sementi di ogni singola unità di semina in base alla necessità, ottimizzando così la distribuzione dei semi.

La profondità di semina è garantita da una corretta pressione, esercitata sugli appositi organi, da dispositivi idraulici (Figura 4.16) che sono in grado di lavorare in entrambi i sensi, incrementando o diminuendo la pressione esercitata in base al tipo di sementi (www.vaderstad.com).



Figura 4.16. Attuatore idraulico che regola la pressione esercitata sugli organi della seminatrice.

5 – Obiettivo della tesi

Il presente lavoro ha come scopo ideare e realizzare una seminatrice meccatronica che sia in grado di controllare e gestire la profondità di semina.

Al fine di raggiungere questo obiettivo si intendono installare una serie di sensori e di attuatori che siano in grado di misurare e correggere in tempo reale la profondità alla quale deve essere posto il seme.

L'obiettivo di tale sistema di automazione è quello di poter permettere all'operatore di intervenire sulla profondità di semina semplicemente inserendo tale parametro direttamente nel terminale ISOBUS installato in cabina, senza dover intervenire manualmente per configurare la seminatrice; tali settaggi infatti saranno apportati dagli attuatori che sono controllati dalla centralina elettronica.

6 – Materiali e metodi

6.1 – Descrizione della seminatrice utilizzata nelle prove

La seminatrice utilizzata nelle prove è una seminatrice pneumatica monogerme di precisione (modello █████) fornita dalla casa madre █████ (Figura 6.1).

Dispone di quattro elementi di semina con distribuzione della trasmissione a catena. Tali elementi di semina sono collegati al telaio e sono provvisti di un sistema di appesantimento a molla a regolazione manuale per variare il carico esercitato sul singolo elemento di semina.

Ogni unità di semina ha un serbatoio per le sementi. La seminatrice inoltre è dotata di due capienti tramogge per contenere i prodotti da distribuire per la concimazione durante la fase di semina.

Gli elementi di semina sono equipaggiati con un disco premi seme installato dietro all'assolcatore che ha lo scopo di assestare il seme all'interno del solco. Le ruote di profondità sono indipendenti e sono regolate da un meccanismo a vite azionato manualmente.

La parte terminale degli elementi di semina presentano un gruppo chiudi solco composto da due ruotini in gomma inclinati la cui funzione è quella di coprire il solco di semina e premere il terreno all'interno di esso, in modo tale da garantire alla semente una buona copertura.

Il gruppo chiudi solco dispone di un sistema di regolazione del carico espresso per ottimizzare la chiusura del solco in base alla tipologia di terreno su cui viene effettuata la semina.

Il cuore del sistema pneumatico è un ventilatore che provoca una depressione all'interno dell'elemento di semina, permettendo così di allocare il seme all'interno del disco di semina.



Figura 6.1. Seminatrice pneumatica di precisione █████.

6.2 – La componentistica utilizzata

La realizzazione del sistema di automazione ha richiesto l'utilizzo di componentistica quale un sensore di movimento angolare, attuatori elettrici e una centralina elettronica.

Il sensore di movimento angolare

Al fine di rilevare la variazione della profondità di semina si è scelto di utilizzare un sensore di posizione angolare da installare nell'apparato chiudi solco: il sensore utilizzato è un AB Elektronik modello Hall 70° Serie 91732 (Figura 6.2).

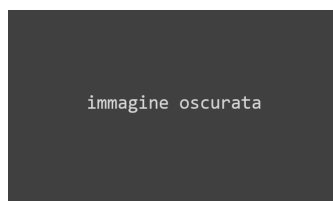


Figura 6.2. Sensore angolare AB Elektronik modello Hall 70° Serie 91732.

Il principio di funzionamento di tale dispositivo si basa sull'effetto Hall ed è realizzato dalla casa tedesca AB Elektronik. Ha una tensione di alimentazione di 5 V e l'output in uscita è un segnale analogico erogato in tensione che varia da 0.5 a 4.5 volt, a seconda dell'angolazione misurata. L'angolo complessivo in cui il sensore effettua la misurazione è di 70°, suddivisi nella seguente maniera: lo zero del sensore corrisponde ad un voltaggio di 2.5 V ed il movimento utile rilevato si discosta dallo zero di $\pm 35^\circ$, ovvero 35° verso una direzione e 35° verso la direzione contraria sempre rispetto al punto zero. La Figura 6.3 meglio illustra l'intervallo di spostamento angolare di funzionamento ed il relativo voltaggio corrispondente al segnale in uscita.



Figura 6.3. Intervallo di funzionamento del sensore di movimento angolare (linea rossa) e relativa corrispondenza del voltaggio del segnale di output nella posizione di "zero" e negli estremi dell'intervallo di misurazione ($\pm 35^\circ$).

Gli attuatori

Gli attuatori utilizzati per il controllo e la regolazione delle ruote di profondità e l'appesantimento dell'unità di semina sono dei motori elettrici a movimento lineare della casa costruttrice Linak (modello LA25) (Figura 6.4).



Figura 6.4. Attuatore elettrico a movimento lineare Linak LA25.

Questo robusto attuatore è stato appositamente ideato e realizzato per trovare impiego in ambienti avversi come avviene nel settore agricolo. Per ogni unità di semina sono stati utilizzati due di questi attuatori lineari; uno installato sul meccanismo di appesantimento a molle del parallelogramma ed un secondo che gestisce il meccanismo di regolazione a vite delle ruote di profondità (Figura 6.5).

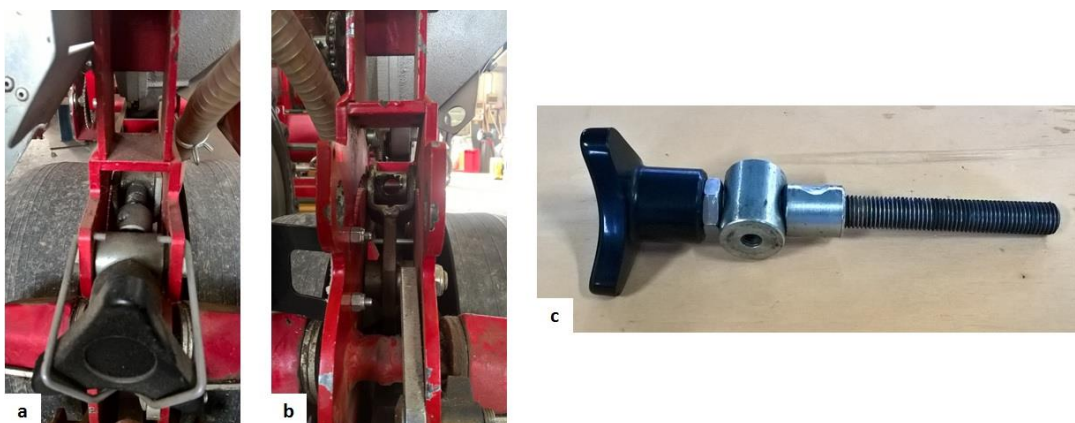


Figura 6.5. Meccanismo a vite di regolazione della profondità di semina. L'immagine "a" riporta il meccanismo normalmente installato, mentre le immagini "b" e "c" illustrano le principali parti del meccanismo. Nello specifico l'immagine c rappresenta la vite di regolazione che viene sostituita dall'attuatore lineare Linak LA25.

Tale attuatore dispone di una spinta massima di 2500 Newton ed una velocità massima di 25 mm/sec, con una corsa complessiva che varia da 20 a 300 mm; la tensione di funzionamento può essere di 12 o 24 Volt in tensione continua. Le classi di protezione di cui è dotato (IP66 e IP69K) ne fanno un dispositivo ideale all'utilizzo in campo, in quanto lo rendono immune all'infiltrazione di polvere e particelle solide in generale e all'acqua, anche se sottoposto a lavaggio ad alta pressione. La Figura 6.6 schematizza le componenti e la loro installazione all'interno dell'unità di semina.



Figura 6.6. Illustrazione schematica che riporta la posizione di installazione del sensore angolare e degli attuatori lineari.

Come osservabile nella Figura 6.6 l'attuatore installato nel parallelogramma ha lo scopo di movimentare la molla variando il carico esercitato sull'unità di semina. A tal scopo l'attuatore usufruirà di binari che gli consentiranno il movimento lineare.

Il secondo attuatore invece ha la sola funzione di regolare la profondità di semina, impostandola in base ai comandi impartiti dall'operatore tramite il terminale ISOBUS presente in cabina.

La centralina elettronica

La centralina elettronica ha la funzione di gestire tutti i dati inviati dal sensore di movimento angolare e dagli attuatori elettrici ad essa connessa.

All'interno della centralina sarà installato un software che interpreterà tali dati e che invierà agli attuatori i comandi necessari per correggere la profondità di semina. La Figura 6.7 riassume in modo schematico il funzionamento del software.

Alla centralina sarà collegato anche un terminale installato in cabina che visualizzerà i parametri ed eventuali messaggi di malfunzionamento; in questo modo l'operatore può essere costantemente informato sullo stato e sull'andamento della semina.

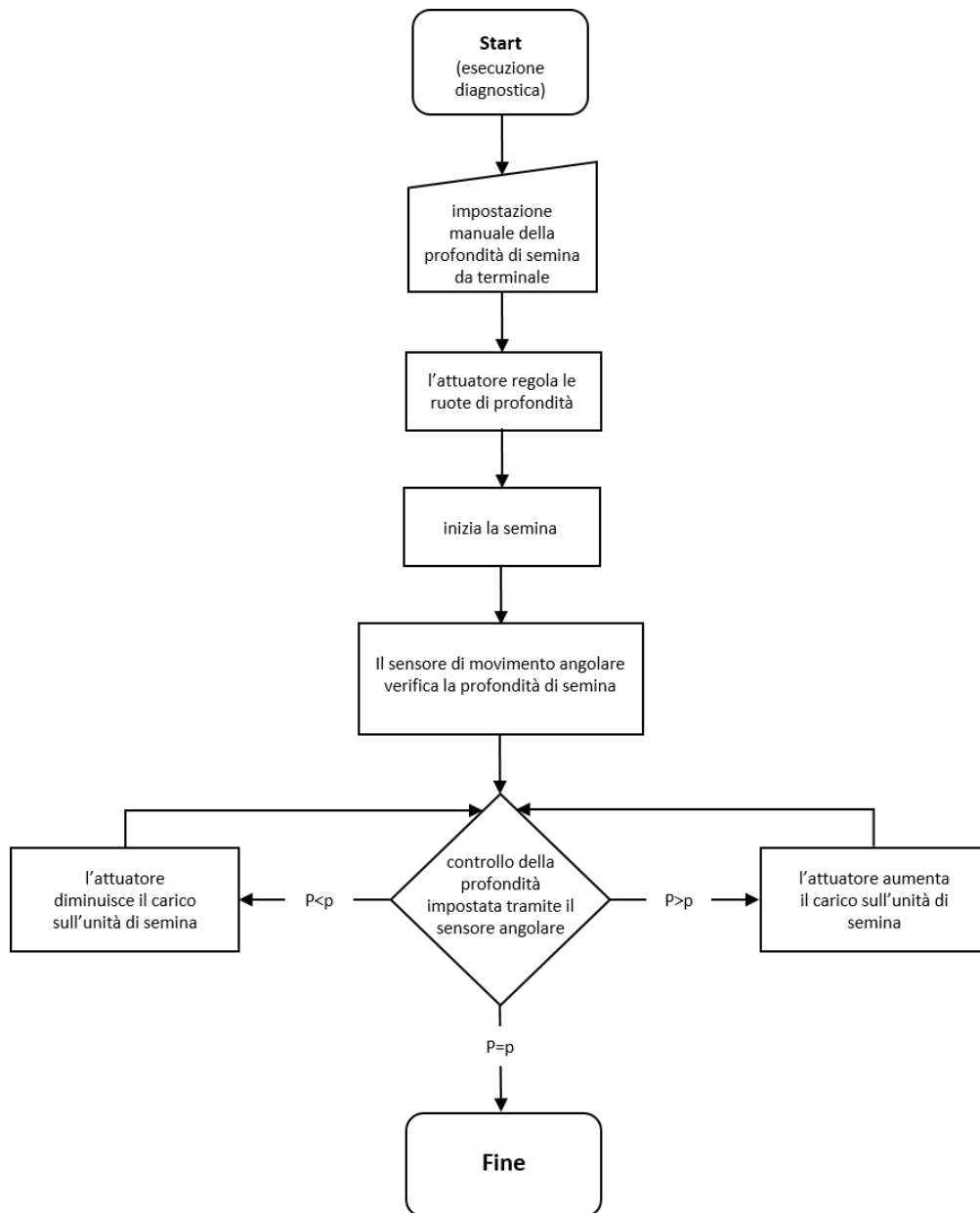


Figura 6.7. Descrizione schematica della struttura del software che sarà installato sulla centralina elettronica di controllo. Nota: P = profondità di semina impostata manualmente da terminale e p = profondità di semina rilevata dal sensore di movimento angolare.

6.3 – Organizzazione del banco prova

Il banco prova è stato allestito presso il laboratorio di meccanica del dipartimento TeSAF dell'Università di Padova, presso il Campus Agripolis (Legnaro -PD-), mentre le prove in campo sono state effettuate presso l'azienda agraria sperimentale "Lucio Toniolo" adiacente al complesso Agripolis.

Carichi e pressione degli organi di semina

Inizialmente si è provveduto a rilevare la pressione esercitata sul terreno da parte degli organi di semina interessati dal processo di automazione. Nello specifico sono stati misurati i valori dei carichi esercitati dal sistema di appesantimento sul terreno da parte dell'unità di semina e dell'apparato chiudi solco. Per misurare tali valori è stata utilizzata una bilancia (Laumas, modello ISC600A0A) (Figura 6.8).

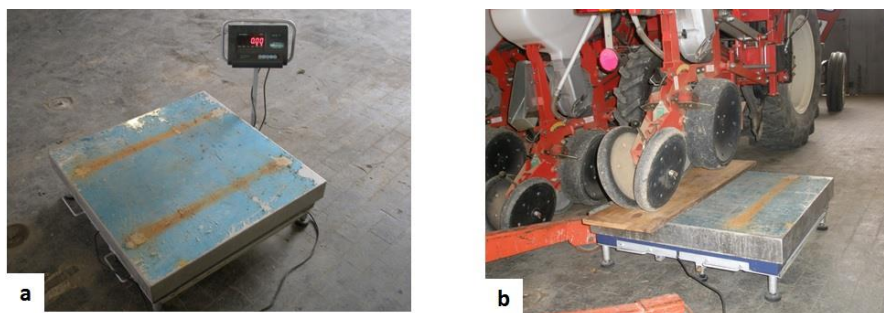


Figura 6.8. a) bilancia utilizzata per la misura dei carichi e b) misurazione del carico esercitato dal sistema di appesantimento sul terreno dall'unità di semina.

Nel caso del carico esercitato dall'unità di semina le misurazioni sono state effettuate inizialmente privando l'elemento del meccanismo di appesantimento a molla installato nel parallelogramma, per determinare il peso della singola unità di semina, e successivamente sono state effettuate tre ripetizioni per ogni singola posizione della scala di regolazione (Figura 6.10a). È stata rilevata anche la distanza che intercorre tra le varie posizioni di regolazione della scala al fine di inserire tale dato nel software di controllo degli attuatori lineari che avranno il compito di regolare l'appesantimento che tale meccanismo eserciterà sull'unità di semina; la distanza che intercorre tra uno step di regolazione e l'altro è pari a 3 cm (Figura 6.9).

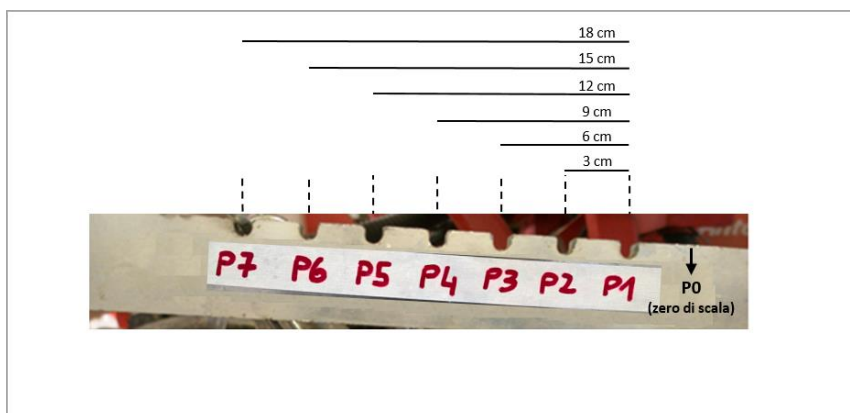


Figura 6.9. Dettaglio della scala del meccanismo di appesantimento dell'unità di semina e distanze che intercorrono tra la posizione di scala P1 ed i successivi settaggi di regolazione. La distanza è stata misurata dal centro di ogni posizione di regolazione. Lo zero di scala identifica il sistema di appesantimento privo di molla (settaggio P0). Passando dalla posizione P1 alla posizione P7 il carico esercitato dal sistema di appesantimento incrementa.

Per quanto riguarda le misurazioni effettuate sull'apparato chiudi solco si è provveduto ad effettuare tre misurazioni del carico esercitato per ogni posizione assunta all'interno della scala di regolazione (Figura 6.10b); anche in questo caso il valore rilevato è stato ottenuto calcolando la media delle tre ripetizioni.



Figura 6.10. a) scala del meccanismo di appesantimento dell'unità di semina e b) scala del meccanismo di regolazione del carico esercitato dal gruppo chiudi solco.

La superficie di appoggio delle ruote di profondità

Oltre al carico espresso dall'unità di semina in base alla regolazione del sistema di appesantimento installato nel parallelogramma è stata determinata anche la pressione esercitata sulla superficie del terreno dalle ruote di profondità.

Tali dati sono stati ottenuti riempiendo una cassetta di terreno (Figura 6.11) e posandovi sopra l'unità di semina; questa prova è stata effettuata regolando il sistema di appesantimento nelle posizioni P1, P4 e P7 (minima pressione, pressione intermedia e massima pressione rispettivamente).

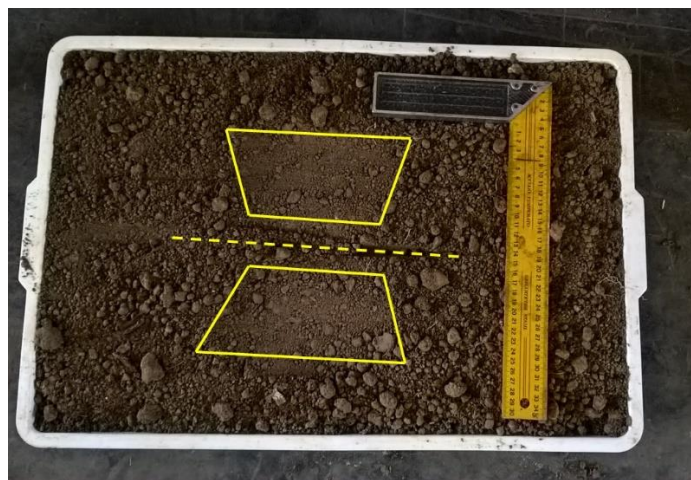


Figura 6.11. Cassetta riempita di terreno per rilevare l'impronta lasciata dalle ruote di profondità sulla superficie del suolo. Le forme trapezoidali evidenziano la forma dell'impronta, mentre la linea tratteggiata indica la posizione dell'assolcatore e del disco premi seme.

La profondità di semina

Una volta determinati i valori di carico e di pressione dell'unità di semina si è provveduto a rilevare l'intervallo di profondità di semina nel quale la seminatrice è in grado di operare. Dato che l'unità di semina dispone di un sistema di regolazione della profondità manuale, basato su una scala alfabetica (Figura 6.12), è stato necessario associare a tale scala di riferimento dei valori numerici che la suddividessero in maniera più dettagliata, tralasciando entrambe le posizioni di fondo scala in quanto il meccanismo di regolazione delle ruote di profondità non agiva in queste posizioni.

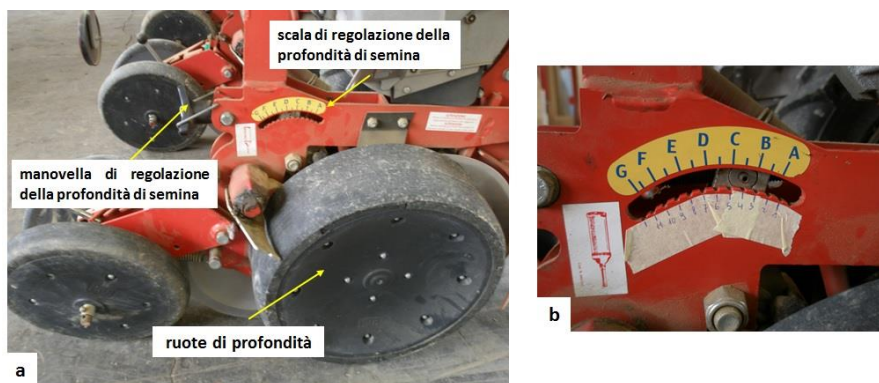


Figura 6.12. a) panoramica del meccanismo di regolazione delle ruote di profondità e b) dettaglio della corrispondenza tra la scala di regolazione alfabetica e numerica.

Il sensore angolare

Dato che l'apparato chiudi solco si muove, abbassandosi od alzandosi, in base alla profondità di semina, il sensore di movimento angolare è in grado di rilevare questa variazione. Per questo motivo il sensore angolare è stato collegato all'apparato chiudi solco (Figura 6.13) tramite un apposito braccetto metallico. Il sensore effettua una misurazione continua del movimento dell'apparato chiudi solco ed il segnale di uscita che restituisce varia al variare della profondità di semina.



Figura 6.13. Sensore di movimento angolare collegato all'apparato chiudi solco tramite apposito braccetto.

Attraverso l'utilizzo di spessori in legno opportunamente realizzati, è stata misurata la variazione del voltaggio del segnale in uscita dal sensore utilizzando, come riscontro della correttezza dei valori misurati, un multimetro (Fluke, modello 75). Nel complesso le misurazioni hanno interessato un intervallo di profondità compreso tra lo zero (ovvero quando l'apparato chiudi solco risulta semplicemente adagiato sulla superficie del terreno) e la massima corsa dello stesso (pari a 16 cm); oltre a questi due valori estremi sono stati misurati i valori del segnale d'uscita del sensore partendo dalla profondità di 1 cm sino a 11 cm, con intervalli regolari di 0,5 cm (Figura 6.14).

I valori del voltaggio del segnale in uscita dal sensore sono stati misurati attraverso un data logger realizzato con una scheda elettronica (Fishino UNO) compatibile con la piattaforma Arduino (Figura 6.15). A tal scopo è stato sviluppato un software che è in grado di leggere il valore di tensione del segnale di output del sensore e salvarlo in un file in formato testo all'interno di una scheda di memoria (microSD) installata nell'apposito slot della scheda elettronica.

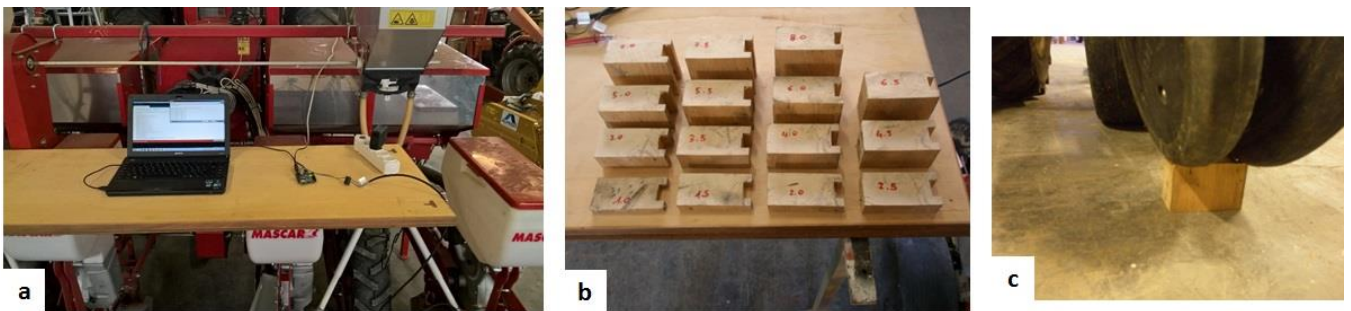


Figura 6.14. a) strumentazione utilizzata per alimentare il sensore di movimento angolare e misurare la tensione del segnale in uscita, b) gli spessori realizzati e c) spessore collocato sotto le ruote dell'apparato chiudi solco.

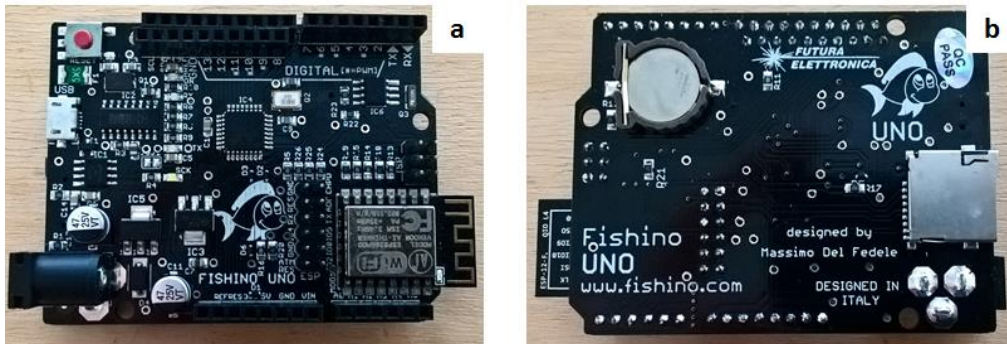


Figura 6.15. Scheda elettronica Fishino UNO compatibile con la piattaforma Arduino utilizzata come data logger.

Il meccanismo di regolazione delle ruote di profondità

Per quanto riguarda il settaggio della profondità di semina è stata adottata una soluzione che prevede l'installazione di un attuatore elettrico a movimento lineare il cui scopo è quello di controllare il meccanismo a vite che agisce sulle ruote di profondità.

Al fine di installare un attuatore opportunamente dimensionato si è provveduto a misurare la coppia necessaria per azionare il meccanismo a vite (Figura 6.16). Per questa misurazione la vite di regolazione manuale del meccanismo che regola le ruote di profondità è stata integrata con una puleggia in metallo (con un braccio di 5 cm) (Figura 6.17).



Figura 6.16. Meccanismo a vite che regola la profondità di semina.

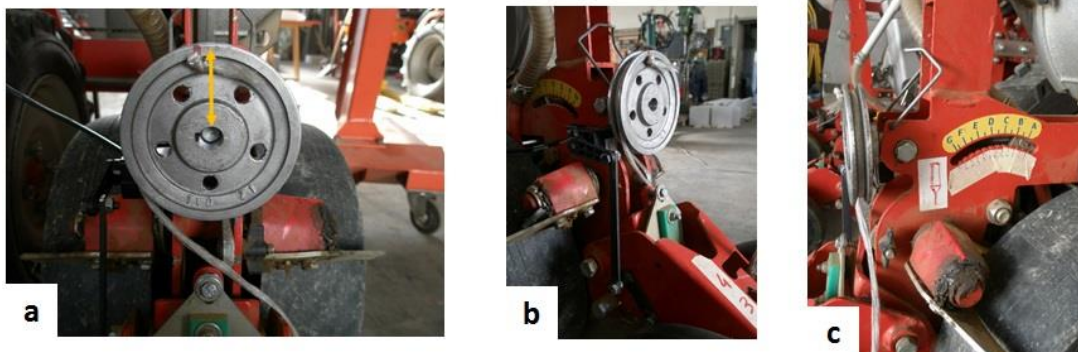


Figura 6.17. a) vista frontale della puleggia installata per eseguire le misurazioni del picco di sforzo, b) e c) vista laterale della puleggia installata.

A tale puleggia è stato collegato un cordino agganciato ad un dinamometro (Sauter, modello FH 500) (Figura 6.18).

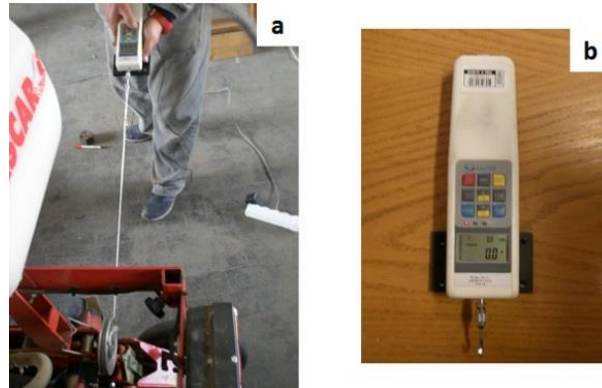


Figura 6.18. a) misurazione del picco di sforzo richiesto per l'azionamento del meccanismo e b) dinamometro utilizzato nella misurazione.

Il dinamometro è stato settato per registrare il picco (espresso in Newton) di sforzo necessario per l'azionamento del meccanismo a vite per la regolazione delle ruote di profondità di semina. Per ottenere una curva di coppia sufficientemente precisa, la misurazione dei picchi di sforzo è stata effettuata ogni due giri completi della puleggia. L'intera escursione utile della scala (dalla posizione 1 alla posizione 10) così partizionata ha portato ad avere 17 misure (escursione/numero giri).

Oltre alla coppia sono stati misurati anche parametri come il numero di giri che devono essere effettuati per variare la posizione della scala di riferimento delle ruote di profondità da una posizione all'altra e la relativa variazione della profondità di semina. Tutti questi parametri sono stati rilevati per ogni posizione della scala, sino ad arrivare al fine corsa del meccanismo.

È stato misurato anche lo spostamento che il movimento della vite imprime al meccanismo ad ogni singolo giro.

Per effettuare queste misurazioni è stata creata una scala, riportata su un disco in metallo che è stato poi montato sul meccanismo di regolazione (Figura 6.19a). Tale scala ha lo scopo di permettere di quantificare con precisione il numero di giri che compie la vite del meccanismo di regolazione delle ruote di profondità.

Al fine di permettere all'assolcatore e al disco premi seme un libero movimento che non influenzasse i dati raccolti, l'unità di semina è stata adagiata su dei supporti in legno, con la funzione di spessori sufficienti a questo scopo (Figura 6.19b).

In questa fase di test sono stati raccolti anche i dati riguardanti la variazione della profondità di semina in seguito al movimento del meccanismo, utilizzando due squadre metalliche graduate (Figura 6.19c), di cui una fissata all'unità di semina e la seconda adagiata in maniera stabile al pavimento. Alla squadra metallica infissa all'unità di semina è stato assegnato un punto di riferimento casuale; in questo modo attuando una semplice differenza matematica tra i valori indicati dalla squadra poggiata a terra si è provveduto a rilevare la profondità di semina con precisione millimetrica.

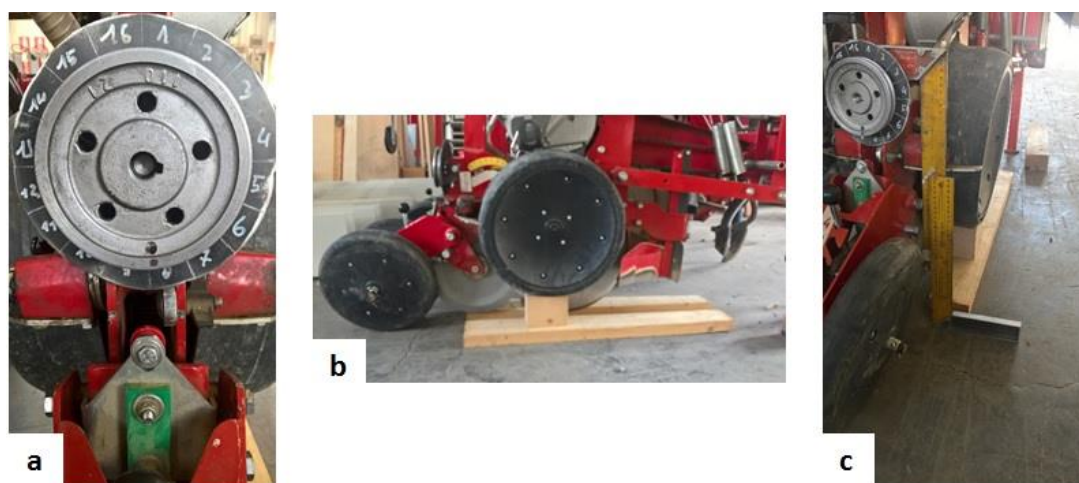


Figura 6.19. a) disco metallico con scala per quantificare il numero di giri impressi alla puleggia, b) spessori in legno utilizzati per garantire all'assolcatore e al disco copri seme il libero movimento e c) sistema di misurazione della profondità di semina.

La prova in campo

Terminato di rilevare i dati nelle prove di banco è stato effettuato un test in campo per determinare la risposta del sensore angolare in condizioni operative reali.

La prova di campo è stata eseguita in un appezzamento di terreno all'interno dell'azienda agraria sperimentale "Lucio Toniolo" presso il complesso Agripolis di Legnaro (Figura 6.20).



Figura 6.20. Prova di campo presso l'azienda agraria sperimentale "Lucio Toniolo". Prima di eseguire l'operazione di semina il terreno, in precedenza arato, è stato sottoposto ad erpicatura con erpice rotante.

Al sensore di movimento angolare è stato collegato il data logger; tale dispositivo è stato impostato per registrare i valori in tensione del segnale di output con una frequenza di 2 Hertz.

Sono stati effettuati vari test di campo, eseguendo una reale semina (sementi di mais) ed impostando la seminatrice a diverse profondità di semina (0, 2, 4, 6 e 8 cm). Tali profondità di semina sono state ripetute a differenti settaggi del sistema di appesantimento dell'unità di semina (posizione P1, P4 e P7).

Per ogni profondità di semina sono state eseguite delle strisciate di 10 metri circa; tale distanza è stata segnalata avvalendosi di marcatori in ferro posti nel terreno a bordo campo (Figura 6.21).

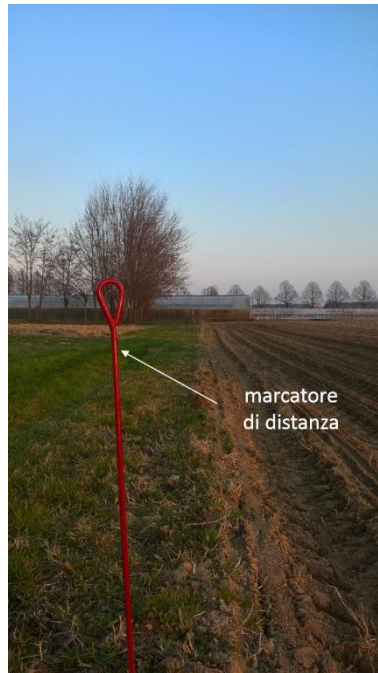


Figura 6.21. Marcatori utilizzati a bordo campo per definire la lunghezza della fila di semina alla medesima profondità. La distanza che intercorreva tra i marcatori era di circa 10 metri.

Successivamente è stata rilevata la reale profondità di semina (Figura 6.22) avvalendosi di un calibro digitale e considerando 5 misurazioni a random.

Per eseguire la misurazione di deposizione del seme è stato necessario scavare a mano nella linea di deposizione della semente sino a scoprire il seme (Figura 6.23).



Figura 6.22. Misurazione della reale profondità di semina alla quale la seminatrice ha effettivamente depositato la semente.

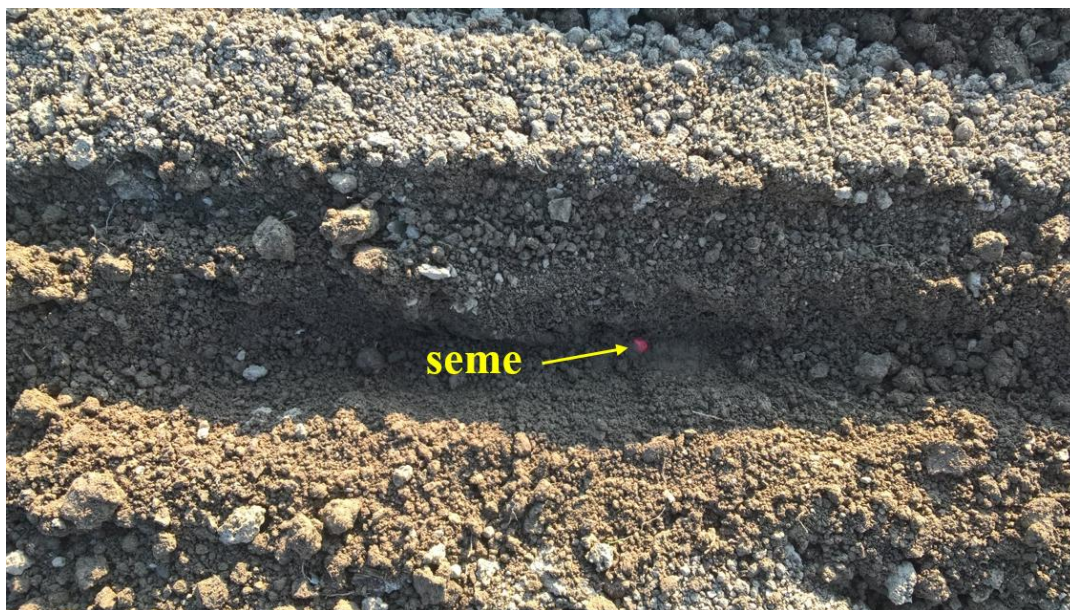


Figura 6.23. Il seme posto nel fondo del solco di semina è stato dissotterrato rimuovendo delicatamente la terra al di sopra di esso per non interferire nel rilevamento dell'effettiva profondità di deposizione.

I dati acquisiti dal data logger sono poi stati trasformati in profondità di semina tramite la retta di taratura del sensore angolare precedentemente ottenuta in fase di test su banco prova; la profondità così calcolata è stata successivamente confrontata con quella reale misurata in campo.

È stato effettuato anche un test atto a verificare l'eventuale variazione dei dati ottenuti dal sensore angolare a differenti velocità, per determinare se tale sensore sia sottoposto ad effetti negativi in tal senso provocati dalle differenti velocità di avanzamento durante l'operazione di semina.

Tale test è stato effettuato impostando la scala del sistema di appesantimento dell'unità di semina nelle posizioni P4 e P7; in entrambe le prove la profondità di semina è stata impostata a 4 centimetri. Sono stati effettuati 5 differenti avanzamenti ad altrettante velocità, incrementando di volta in volta la velocità (1,8 - 2,4 - 3,6 - 6,7 e 8,5 km/h).

7 – Risultati

7.1 – Carichi e pressioni esercitati dai sistemi di regolazione a molla

Inizialmente sono stati raccolti i dati inerenti il carico esercitato dal sistema di appesantimento a molle presente sul parallelogramma, il quale ha lo scopo di appesantire o alleggerire il carico esercitato sull'unità di semina.

Questo sistema è composto da una scala suddivisa in sette livelli di regolazione, ove attraverso la regolazione manuale della molla può essere modificato il carico espresso; incrementando la tensione della molla si incrementa di conseguenza il carico che il sistema di appesantimento esercita sull'elemento di semina (Tabella 7.1).

Il Grafico 7.1 mostra l'andamento, in termini di linearità, del carico che il sistema di appesantimento dell'unità di semina esercita in base alla posizione della scala di regolazione.

Posizione scala	Corsa vite (cm)	Rip. 1	Rip. 2	Rip. 3	Media (kg)
P0	-	84,46	84,56	84,54	84,52
P1	0	85,00	85,00	85,06	85,02
P2	3	86,88	86,90	86,92	86,90
P3	6	89,46	89,44	89,40	89,43
P4	9	92,90	92,80	92,80	92,83
P5	12	97,56	97,54	97,58	97,56
P6	15	103,32	103,22	103,22	103,25
P7	18	110,00	110,22	110,22	110,15

Tabella 7.1. Valori dei carichi esercitati sull'unità di semina dal sistema di appesantimento a molla. P0 identifica il solo peso dell'unità di semina, in quanto il sistema di appesantimento, privato della molla, non esercita nessun carico. La media è stata ottenuta dai valori rilevati in tre ripetizioni. Tutti i valori sono espressi in chilogrammi.

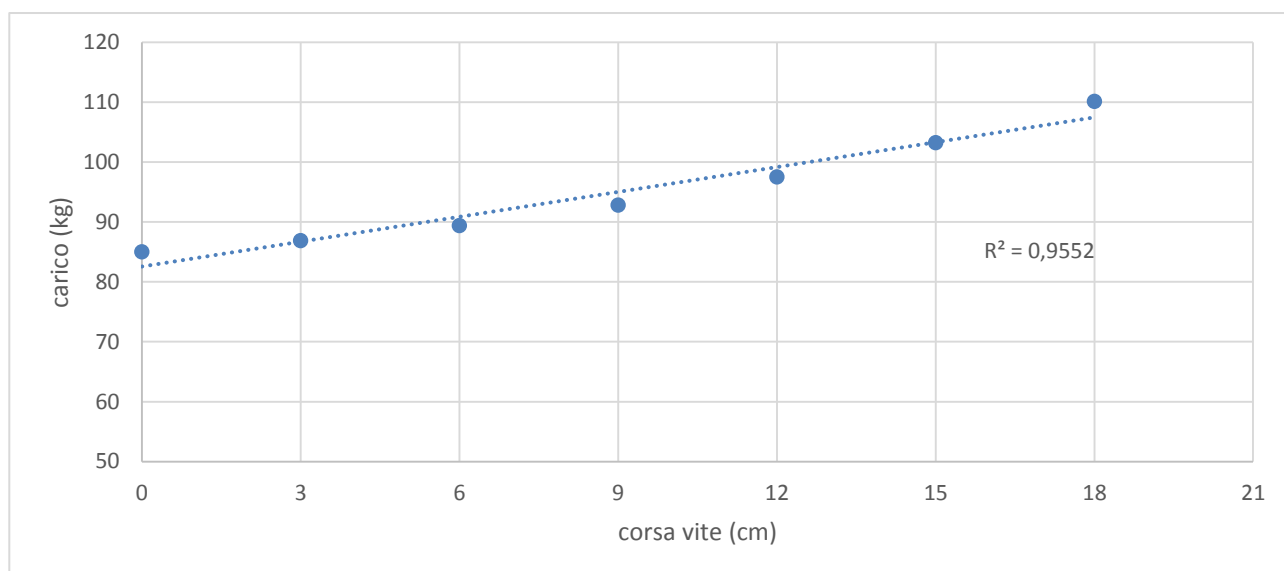


Grafico 7.1. Carichi del sistema di appesantimento dell'unità di semina. Il punto P0 non è stato riportato in questo grafico in quanto si riferisce al sistema di appesantimento privato della molla di carico.

Oltre ai carichi esercitati dal sistema di appesantimento dell'unità di semina sono stati rilevati anche i carichi esercitati dal sistema di regolazione a molla dell'apparato chiudi solco. Sono state effettuate due misurazioni; una con il premi seme a profondità zero e la seconda con il premi seme settato alla massima profondità consentita dal sistema di regolazione delle ruote di profondità (Tabella 7.2).

Il Grafico 7.2 mostra la linearità dei carichi sviluppati dal meccanismo di pressione a molla dell'apparato chiudi solco in base alla posizione della scala di regolazione. Si osserva che i carichi espressi dimostrano un incremento molto lineare, sia con il disco premi seme a profondità zero sia a profondità massima.

Posizione scala	Rip.1	Rip.2	Rip.3	Media (kg)
premi seme a profondità zero				
P1	33,96	33,88	33,88	33,91
P2	28,04	28,06	28,00	28,03
P3	22,14	22,10	22,10	22,11
P4	17,44	17,46	17,46	17,45

Posizione scala	Rip.1	Rip.2	Rip.3	Media (kg)
premi seme a profondità massima				
P1	33,16	33,10	33,14	33,13
P2	26,94	26,84	26,82	26,87
P3	20,56	20,60	20,62	20,59
P4	15,88	15,94	15,94	15,92

Tabella 7.2. Carichi (espressi in kg) esercitati dal sistema di regolazione dell'apparato chiudi solco. La media è stata ottenuta da tre ripetizioni.

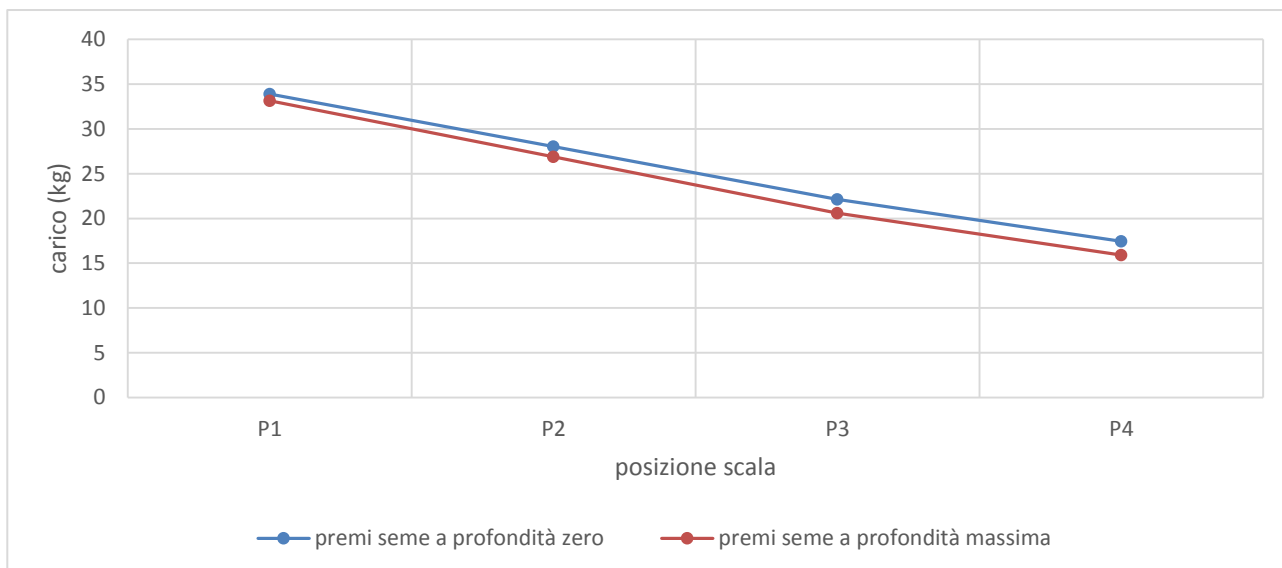


Grafico 7.2. Carichi espressi dal gruppo chiudi solco.

La Tabella 7.3 ed il grafico il Grafico 7.3 riportano i valori e l'andamento della superficie di appoggio che le ruote di profondità hanno sul terreno, mentre la Tabella 7.4 ed il Grafico 7.4 riportano i valori di profondità e l'andamento dell'impronta lasciata sul terreno.

La Tabella 7.5 ed il Grafico 7.5 mostrano i valori di pressione esercitata (espressa in kPa) dalle ruote di profondità sul terreno a differenti settaggi del sistema di appesantimento.

Osservando il Grafico 7.5 si nota come la pressione esercitata sul terreno dalle ruote di profondità con il sistema di appesantimento settato in posizione P4 non si discosti di molto dalla pressione esercitata dal settaggio P1.

Posizione scala	Corsa vite (cm)	Area ruote (cm ²)
P1	0	321,46
P4	9	353,31
P7	18	389,24

Tabella 7.3. Superficie dell'impronta delle ruote di profondità esercitata sulla superficie del terreno. Le posizioni P1, P4 e P7 sulla scala di regolazione del sistema di appesantimento sono espresse in termini di distanza (in centimetri) dalla posizione P1.

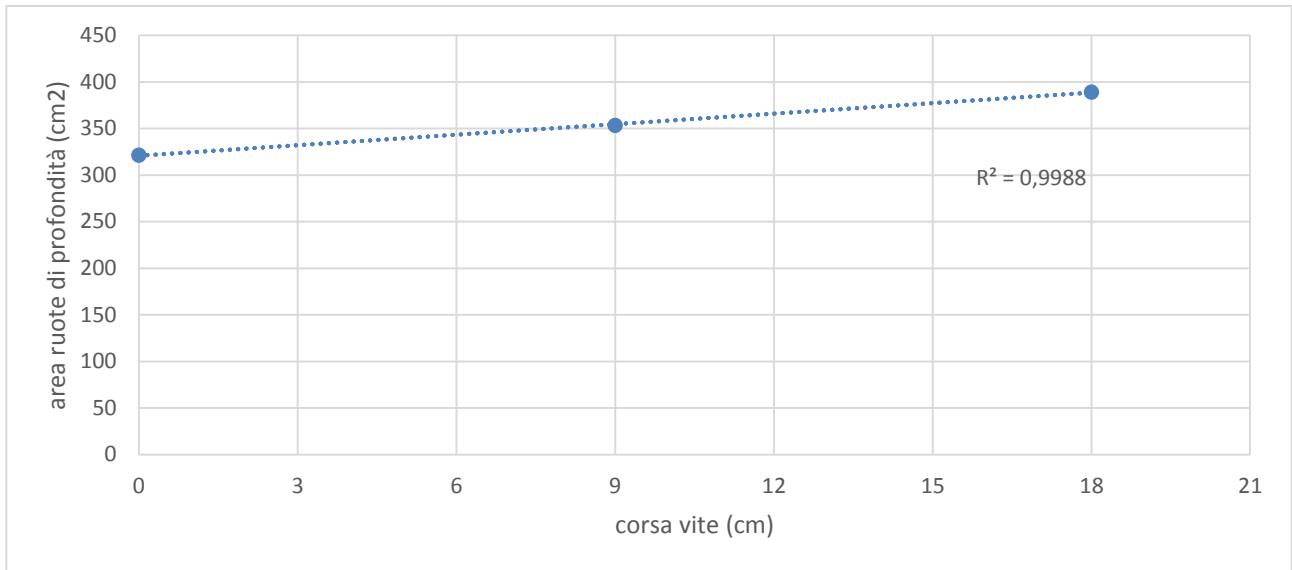


Grafico 7.3. Superficie dell'impronta delle ruote di profondità sul terreno. I valori considerati corrispondono alla posizione di scala P1 (0 cm), P4 (9 cm) e P7 (18 cm).

Posizione scala	Corsa vite (cm)	Profondità impronta (mm)	
		Ruota sx	Ruota dx
P1	0	10	12
P4	9	17	17
P7	18	18	19

Tabella 7.4. Profondità dell'impronta impressa sul terreno da parte delle singole ruote di profondità. I valori sono espressi in millimetri. Le posizioni P1, P4 e P7 sulla scala di regolazione del sistema di appesantimento sono espresse in termini di distanza (in centimetri) dalla posizione P1.

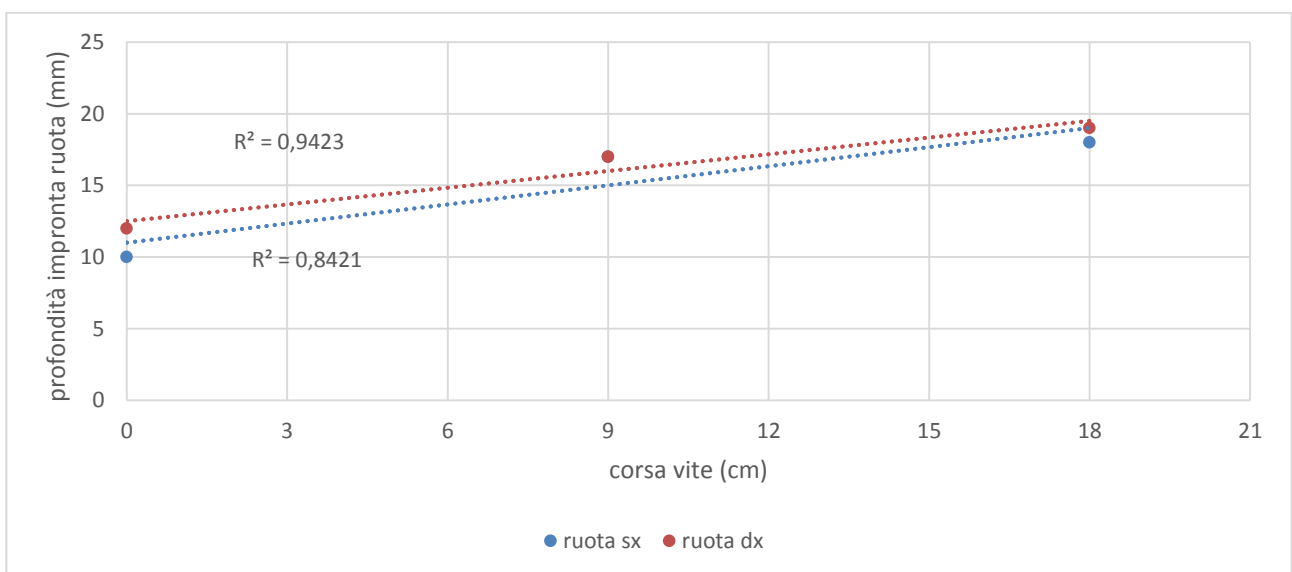


Grafico 7.4. Profondità dell'impronta impressa dalle ruote di profondità sulla superficie del terreno. I valori considerati corrispondono alla posizione di scala P1 (0 cm), P4 (9 cm) e P7 (18 cm).

Posizione scala	Corsa vite (cm)	kPa
P1	0	25,92
P4	9	25,75
P7	18	27,73

Tabella 7.5. Pressione esercitata dalle ruote di profondità dell'unità di semina. Le posizioni P1, P4 e P7 sulla scala di regolazione del sistema di appesantimento sono espresse in termini di distanza (in centimetri) dalla posizione P1.

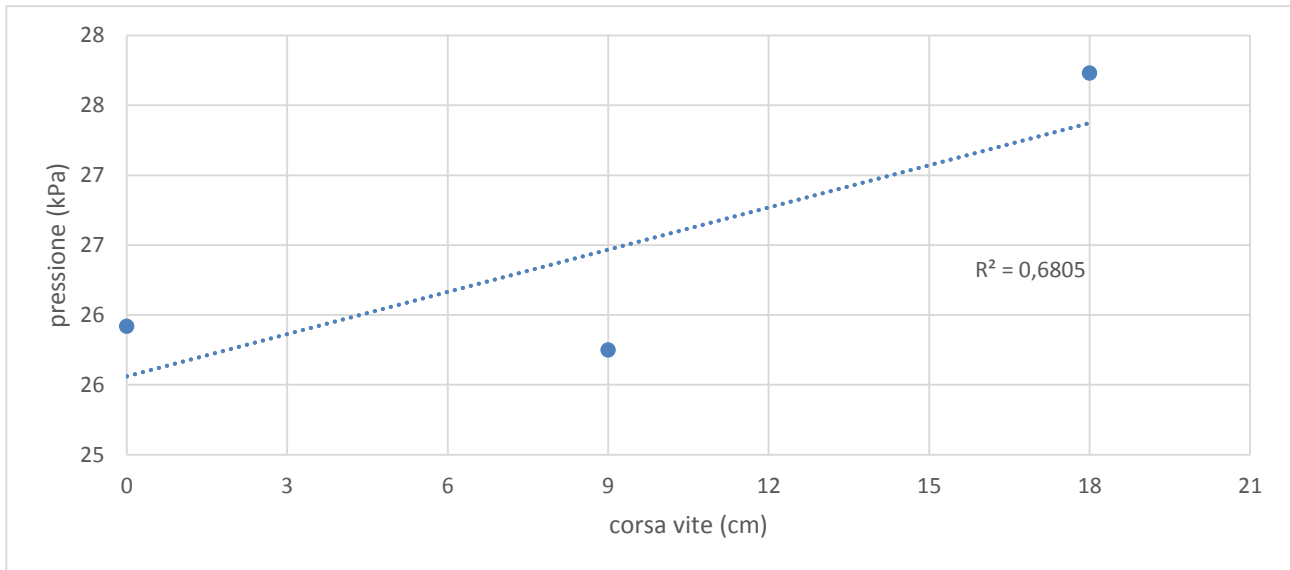


Grafico 7.5. Pressione esercitata dalle ruote di profondità sulla superficie del terreno. I valori considerati corrispondono alla posizione di scala P1 (0 cm), P4 (9 cm) e P7 (18 cm).

7.2 – Il meccanismo di regolazione delle ruote di profondità di semina

Nella Tabella 7.6 sono riportati il numero di giri che bisogna compiere tramite la vite di regolazione delle ruote di profondità per spostarsi da una posizione all'altra della scala e la relativa variazione della profondità di semina.

Il Grafico 7.6 riporta l'andamento dell'incremento della profondità di semina al corrispondere dello spostamento della scala da una profondità minima sino alla massima profondità che il meccanismo di regolazione delle ruote di profondità riesce ad esprimere. Nel complesso il meccanismo di regolazione a vite dimostra di avere un'elevata linearità ($R^2=0,9971$).

Il Grafico 7.7 illustra l'andamento della profondità di semina in base alla posizione della scala di regolazione; anche in questo caso il coefficiente di determinazione R^2 indica una buona linearità.

Posizione scala	Numero giri registro di profondità					Media relativa	Media cumulata	Profondità semina in cm					Media relativa (cm)	Posizione scala	Media cumulata (cm)
	Rip 1	Rip 2	Rip 3	Rip 4	Rip 5			Rip 1	Rip 2	Rip 3	Rip 4	Rip 5			
1-->2	3,50	3,00	3,00	3,00	3,00	3,10	3,10	1,00	0,9	0,90	0,90	0,90	0,92	1	0
2-->3	3,50	3,75	3,75	3,75	3,50	3,65	6,75	1,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	2	0,92
3-->4	3,75	3,75	3,75	3,75	4,00	3,80	10,55	0,90	1,00	1,00	1,00	1,10	1,00	3	1,94
4-->5	3,50	3,75	4,00	4,00	4,00	3,85	14,40	0,90	1,10	1,20	1,20	1,10	1,10	4	2,94
5-->6	4,50	4,50	4,00	4,00	4,00	4,20	18,60	1,30	1,20	1,10	1,10	1,10	1,16	5	4,04
6-->7	3,75	3,75	3,75	3,75	4,25	3,85	22,45	1,10	1,00	1,10	1,00	1,20	1,08	6	5,20
7-->8	3,75	3,75	4,00	4,00	4,00	3,90	26,35	1,00	1,00	1,00	1,10	1,00	1,02	7	6,28
8-->9	4,00	4,00	3,75	4,00	4,00	3,95	30,35	1,00	1,00	1,00	1,10	1,10	1,04	8	7,30
9-->10	4,00	4,00	4,00	4,00	4,75	4,15	34,50	0,70	0,70	0,70	0,60	0,50	0,64	9	8,34
TOT	34,5	34,75	34,5	34,5	35,5	34,75	-	9,00	8,90	9,00	9,00	9,00	8,98	-	8,98
Media	3,81	3,81	3,78	3,81	3,94	3,83	-	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	-	-
Dev.ST	0,33	0,39	0,32	0,33	0,48	0,32	-	0,17	0,14	0,14	0,17	0,21	0,15	-	-

Tabella 7.6. La tabella riporta il numero di giri necessari per modificare la profondità di semina, regolando la scala da una posizione ad un'altra e la variazione (espressa in centimetri) che tale regolazione apporta.

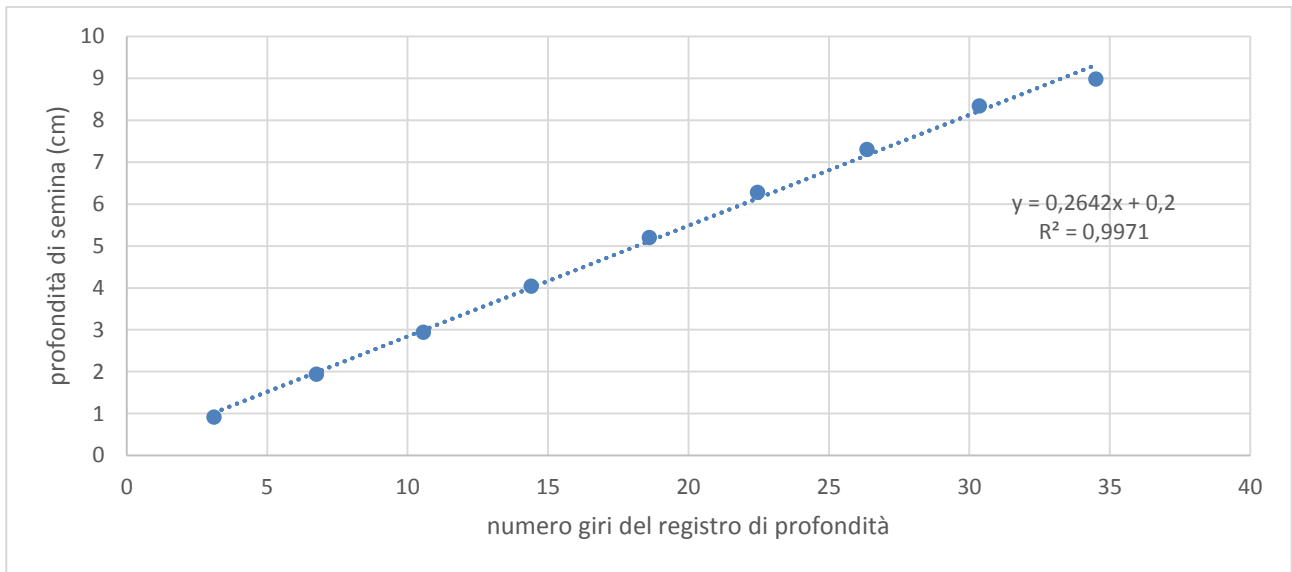


Grafico 7.6. Incremento cumulativo di profondità raggiunta dall'unità di semina in base al numero di giri della vite di regolazione della profondità di semina.

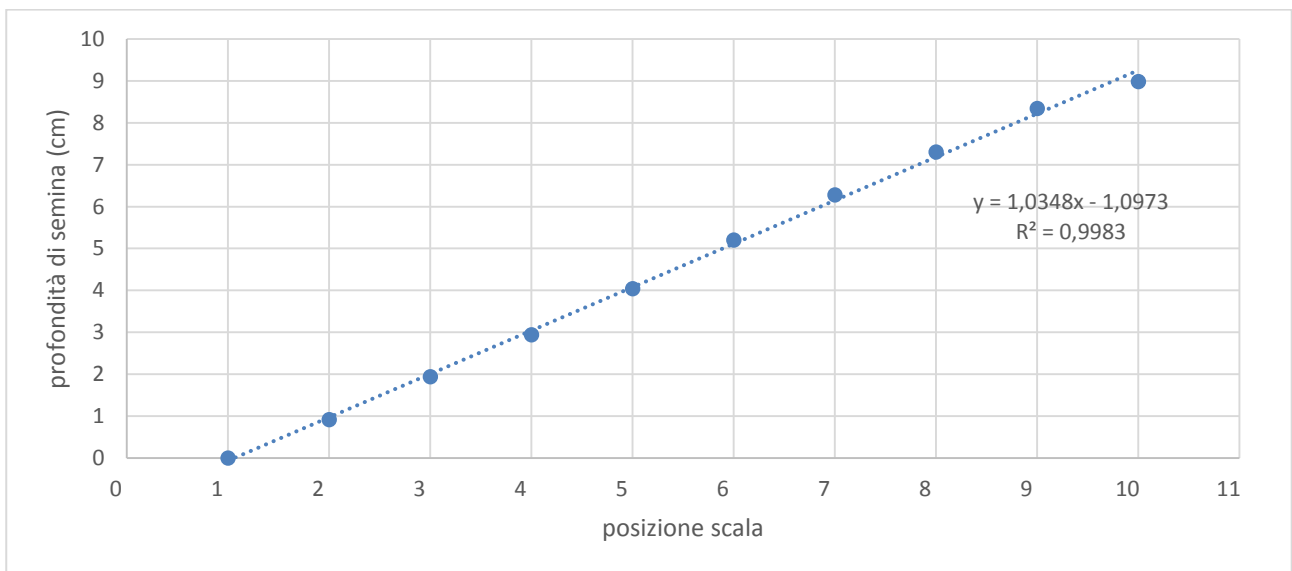


Grafico 7.7. Incremento cumulativo di profondità raggiunta dall'unità di semina in base alla posizione della scala di profondità di semina.

La Tabella 7.7 riporta i valori dello spostamento che compie il meccanismo di regolazione a vite delle ruote di profondità.

		Inizio	Fine	corsa (mm)			Inizio	Fine	corsa (mm)
Senso orario (tot di 5 giri)	Rip 1	66,33	56,32	2,00	Senso antiorario (tot di 5 giri)	Rip 1	46,34	56,26	1,98
	Rip 2	56,32	46,32	2,00		Rip 2	56,26	66,35	2,02
	Rip 3	66,39	56,34	2,01		Rip 3	36,34	46,41	2,01
	Rip 4	56,34	46,41	1,99		Rip 4	46,41	56,41	2,00
	Rip 5	46,41	36,34	2,01		Rip 5	56,41	66,41	2,00
Media				2,00	Media				2,00

Tabella 7.7. Corsa che compie la vite del meccanismo di regolazione delle ruote di profondità per ogni singolo giro. I dati sono stati ottenuti misurando la corsa tra due punti noti facendo compiere alla vite 5 giri per diminuire l'errore cumulato. La filettatura della vite ha un diametro nominale di 16 mm a passo grosso pari a 2 mm. Tutti i valori sono espressi in millimetri.

La Tabella 7.8 e la Tabella 7.9 riportano i valori di coppia necessari per impostare la profondità di semina, sia in senso orario che in senso antiorario. La coppia è stata calcolata solamente facendo riferimento alle prime due ripetizioni, in quanto come facilmente osservabile in tabella, i valori rilevati all'interno della terza ripetizione risultano discostati da quelli ottenuti nelle prime due ripetizioni. I valori sono espressi in Newton per metro (N·m).

Una possibile spiegazione a riguardo potrebbe risiedere nell'usura (Figura 7.1) cui il meccanismo a vite è stato soggetto durante le svariate sollecitazioni meccaniche.

Rif. scala	Rip 1	Rip 2	Rip 3	Media rip 1-2	Coppia N·m (media 1-2)	Media rip 1-2-3
	Newton					
1	102,3	169,3	197,2	135,80	6,79	156,27
1,5625	55,9	65,7	58,5	60,80	3,04	60,03
2,125	50,6	67,1	71,3	58,85	2,94	63,00
2,6875	46,8	64,7	66,7	55,75	2,79	59,40
3,25	50,5	73,7	60,8	62,10	3,11	61,67
3,8125	55,2	67,3	59,7	61,25	3,06	60,73
4,375	55,0	57,9	57,5	56,45	2,82	56,80
4,9375	58,4	62,0	56,8	60,20	3,01	59,07
5,5	59,1	54,3	61,6	56,70	2,84	58,33
6,0625	54,6	62,4	62,3	58,50	2,93	59,77
6,625	54,9	58,6	74,4	56,75	2,84	62,63
7,1875	58,1	60,7	76,5	59,40	2,97	65,10
7,75	55,5	56,2	72,0	55,85	2,79	61,23
8,3125	52,9	64,1	79,7	58,50	2,93	65,57
8,875	48,5	59,4	79,4	53,95	2,70	62,43
9,4375	49,2	54,7	65,2	51,95	2,60	56,37
10	43,5	52,0	69,4	47,75	2,39	54,97

Tabella 7.8. Valori della coppia necessaria per azionare il meccanismo di regolazione a vite (senso di rotazione orario) aumentando la profondità di semina. I dati considerati attendibili sono stati ottenuti dalla media delle ripetizioni 1 e 2. La media delle tre ripetizioni mostra la differenza imputabile all'usura del meccanismo stesso. Il braccio della puleggia è pari a 5 cm. Le misure sono state rilevate ogni due giri della puleggia, ottenendo così 17 misurazioni.

Rif. scala	Rip 1	Rip 2	Rip 3	Media rip 1-2	Coppia N·m (media 1-2)	Media rip 1-2-3
	Newton					
10	103,2	101,1	135,2	102,15	5,11	113,17
9,4375	84,4	94,5	124,6	89,45	4,47	101,17
8,875	95,5	90,3	114,6	92,90	4,65	100,13
8,3125	96,1	90,4	108,6	93,25	4,66	98,37
7,75	94	98,2	107,4	96,10	4,81	99,87
7,1875	95,1	96,9	112,2	96,00	4,80	101,40
6,625	97,9	102,9	138,7	100,40	5,02	113,17
6,0625	100,5	110,1	178,6	105,30	5,27	129,73
5,5	99,9	102,5	157,8	101,20	5,06	120,07
4,9375	100,7	110,9	189,7	105,80	5,29	133,77
4,375	94,7	116,2	157	105,45	5,27	122,63
3,8125	103,5	102,7	146,9	103,10	5,16	117,70
3,25	105,9	107,4	168,5	106,65	5,33	127,27
2,6875	110,4	118	168,6	114,20	5,71	132,33
2,125	112,2	119,9	191,5	116,05	5,80	141,20
1,5625	121,5	142,4	227,8	131,95	6,60	163,90
1	171,7	193,3	323,4	182,5	9,13	229,47

Tabella 7.9. Valori della coppia necessaria per azionare il meccanismo di regolazione a vite (senso di rotazione antiorario) diminuendo la profondità di semina. I dati considerati attendibili sono stati ottenuti dalla media delle ripetizioni 1 e 2. La media delle tre ripetizioni mostra la differenza imputabile all'usura del meccanismo stesso. Il braccio della puleggia è pari a 5 cm. Le misure sono state rilevate ogni due giri della puleggia, ottenendo così 17 misurazioni.

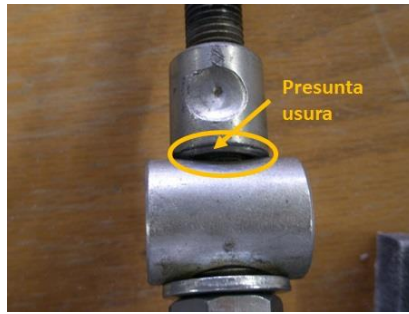


Figura 7.1. Presunta usura per il continuo attrito a cui le parti meccaniche interessate sono sottoposte.

Il Grafico 7.8 riporta l'andamento della coppia che deve essere erogata dall'attuatore elettrico per attuare il movimento del meccanismo di regolazione per modificare la profondità di semina. Come si osserva la coppia necessaria per diminuire la profondità di semina è maggiore rispetto alla coppia necessaria per aumentarla. Questo perché nel diminuire la profondità di semina le ruote di profondità devono abbassarsi, contrastando il peso dell'elemento di semina.

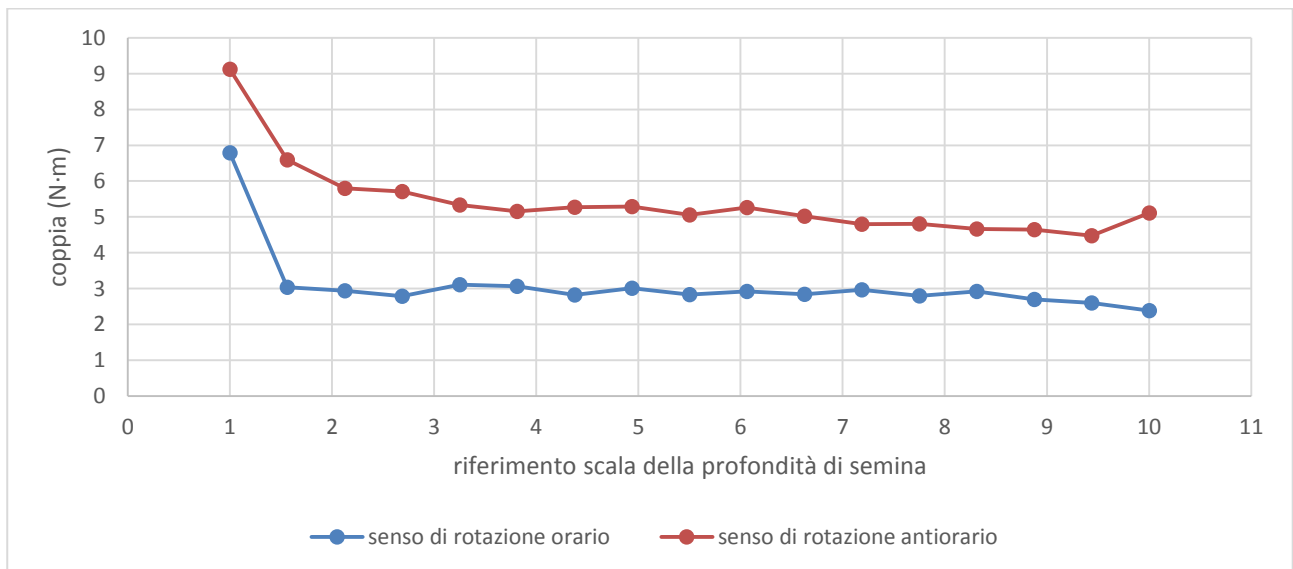


Grafico 7.8. Coppia sostenuta dall'attuatore elettrico a movimento lineare per modificare la profondità di semina. I dati riportati in grafici derivano dalla media delle ripetizioni numero 1 e numero 2. Il senso di rotazione orario incrementa la profondità di semina, mentre il senso di rotazione antiorario diminuisce la profondità di semina. I valori sono espressi in N·m.

7.3 – Il sensore di movimento angolare

Una volta installato il sensore di movimento angolare sono stati raccolti i dati inerenti ai valori di tensione del segnale di output (Tabella 7.10). Sono state effettuate cinque ripetizioni al fine di avere dei valori medi il più possibile precisi ed accurati. Il sensore angolare è stato sottoposto anche a test termico, per osservare eventuali variazioni nel segnale di uscita, sottoponendolo a temperature di 40, 50 e 60°C. Tale test termico non ha evidenziato variazioni, dimostrando che la variazione termica, anche consistente (purché all'interno dell'intervallo di funzionamento del sensore dichiarato nella scheda tecnica), non influisce sui valori che il segnale di output assume.

Profondità (cm)	Segnale di output (Vdc)					Media
	Rip. 1	Rip. 2	Rip. 3	Rip. 4	Rip. 5	
1	2,54	2,55	2,54	2,54	2,54	2,54
1,5	2,47	2,49	2,48	2,48	2,48	2,48
2	2,40	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
2,5	2,36	2,37	2,36	2,36	2,37	2,36
3	2,27	2,28	2,27	2,27	2,28	2,27
3,5	2,21	2,21	2,2	2,22	2,21	2,21
4	2,14	2,14	2,13	2,14	2,14	2,14
4,5	2,08	2,08	2,07	2,07	2,08	2,08
5	2,00	2,01	2,00	2,01	2,00	2,00
5,5	1,93	1,94	1,94	1,94	1,94	1,94
6	1,88	1,88	1,88	1,87	1,88	1,88
6,5	1,81	1,82	1,81	1,81	1,81	1,81
7	1,74	1,75	1,74	1,74	1,73	1,74
7,5	1,67	1,68	1,67	1,67	1,67	1,67
8	1,63	1,63	1,62	1,62	1,62	1,62
8,5	1,56	1,56	1,54	1,54	1,54	1,55
9	1,48	1,48	1,47	1,47	1,47	1,47
9,5	1,44	1,45	1,43	1,43	1,43	1,44
10	1,37	1,36	1,34	1,35	1,34	1,35
10,5	1,30	1,30	1,28	1,29	1,28	1,29
11	1,24	1,23	1,21	1,22	1,22	1,22
16	0,61	0,62	0,61	0,60	0,60	0,61

Tabella 7.10. Valori del segnale di uscita del sensore di movimento angolare. Il valore di profondità massima (16 cm) è stato ottenuto portando l'apparato chiudi solco a fine corsa. La media è stata ottenuta dai valori rilevati in cinque ripetizioni. Il segnale in uscita dal sensore di movimento angolare è espresso in tensione continua (Vdc). Il valore della posizione di zero è pari a 2,68 Volt.

Il Grafico 7.9 illustra come il sensore di movimento angolare disponga di una linearità molto alta ($R^2=0,9994$).

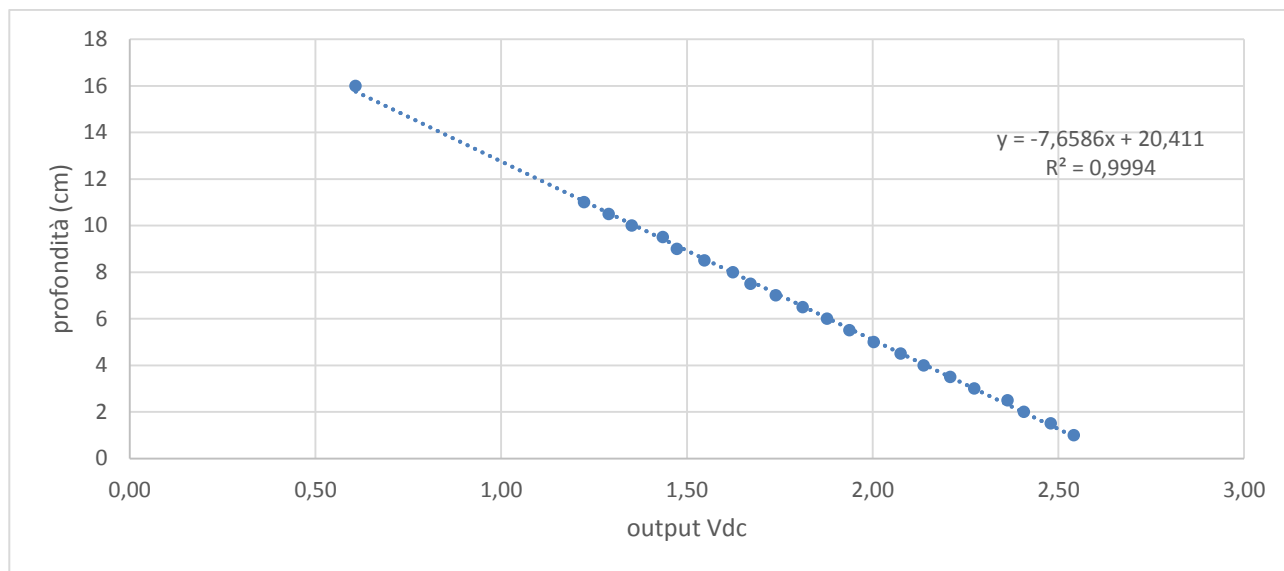


Grafico 7.9. Correlazione che intercorre tra il segnale di output in uscita dal sensore di movimento angolare e la profondità misurata nei test eseguiti al banco prova.

7.4 - La prova in campo

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti nelle prove di campo. Le tabelle sottostanti (Tabella 7.11, Tabella 7.12 e Tabella 7.13) riportano i valori della profondità di semina rilevata dal sensore di movimento angolare e la profondità di semina effettiva ottenuti effettuando la semina a varie profondità (0, 2, 4, 6 e 8 cm) con il sistema di appesantimento dell'unità di semina settato alle posizioni P1, P4 e P7 rispettivamente. I valori di profondità di semina reale rilevati sono stati incrementati di 1 centimetro, valore che identifica lo spessore medio di una semente di mais.

Tale incremento è stato fatto in quanto la misura della profondità reale di semina è stata effettuata rilevando la distanza tra la superficie del terreno e la superficie superiore del seme. Dal momento che in letteratura la profondità di semina si considera come distanza che intercorre tra la superficie del terreno ed il solco aperto dagli organi assolvatori, per rendere veritieri i dati raccontati in questa fase è stato necessario apportare questa correzione.

	Prof. impostata (cm)	Media Vdc	Prof. sensore (cm)	DevST	Prof. reale (cm)	Diff.
P1	0	2,45	1,64	1,04	1	-1,64
	2	2,16	3,90	0,32	3,42	-1,90
	4	1,96	5,40	0,40	4,94	-1,40
	6	1,78	6,75	0,45	6,32	-0,75
	8	1,77	6,83	0,68	5,92	1,17

Tabella 7.11. Valori ottenuti dal test di campo effettuando una semina a differenti profondità con meccanismo di appesantimento in posizione P1. Il valore “Prof. reale” è stato incrementato di 1 cm (spessore medio semente di mais). La colonna con la voce “Diff.” Riporta la differenza di profondità tra la profondità rilevata dal sensore e la profondità impostata sull’unità di semina.

	Prof. impostata (cm)	Media Vdc	Prof. sensore (cm)	DevST	Prof. reale (cm)	Diff.
P4	0	2,46	1,54	1,08	1	-1,54
	2	2,10	4,29	0,42	3,2	-2,29
	4	1,93	5,63	0,47	5,22	-1,63
	6	1,77	6,89	0,77	5,66	-0,89
	8	1,64	7,88	0,70	6,62	0,12

Tabella 7.12. Valori ottenuti dal test di campo effettuando una semina a differenti profondità con meccanismo di appesantimento in posizione P4. Il valore “Prof. reale” è stato incrementato di 1 cm (spessore medio semente di mais). La colonna con la voce “Diff.” Riporta la differenza di profondità tra la profondità rilevata dal sensore e la profondità impostata sull’unità di semina.

	Prof. impostata (cm)	Media Vdc	Prof. sensore (cm)	DevST	Prof. reale (cm)	Diff.
P7	0	2,50	1,23	1,70	1	-1,23
	2	2,11	4,23	0,50	3,42	-2,23
	4	1,89	5,92	0,27	4,98	-1,92
	6	1,69	7,49	0,59	6,92	-1,49
	8	1,55	8,52	0,60	8,14	-0,52

Tabella 7.13. Valori ottenuti dal test di campo effettuando una semina a differenti profondità con meccanismo di appesantimento in posizione P7. Il valore “Prof. reale” è stato incrementato di 1 cm (spessore medio semente di mais). La colonna con la voce “Diff.” Riporta la differenza di profondità tra la profondità rilevata dal sensore e la profondità impostata sull’unità di semina.

Il Grafico 7.10 riporta tutti i dati derivanti dalla prova di campo, ovvero i valori delle cinque profondità (0, 2, 4, 6 e 8 cm) rilevati per ognuna delle tre posizioni della scala di settaggio del carico dell'unità di semina (P1, P4 e P7); nonostante il coefficiente di determinazione R^2 (maggiore di 0,98) indichi una buona linearità, si nota come la profondità rilevata dal sensore sovrastimi in media del 2,69% i valori di profondità di semina reale, con un Δ fisso di circa 0,57 cm. Questo indica che il sensore tende a dare un valore di profondità sempre sovra stimato di oltre mezzo centimetro e all'aumentare della profondità tenda ad aumentare il valore rilevato di circa un 3%.

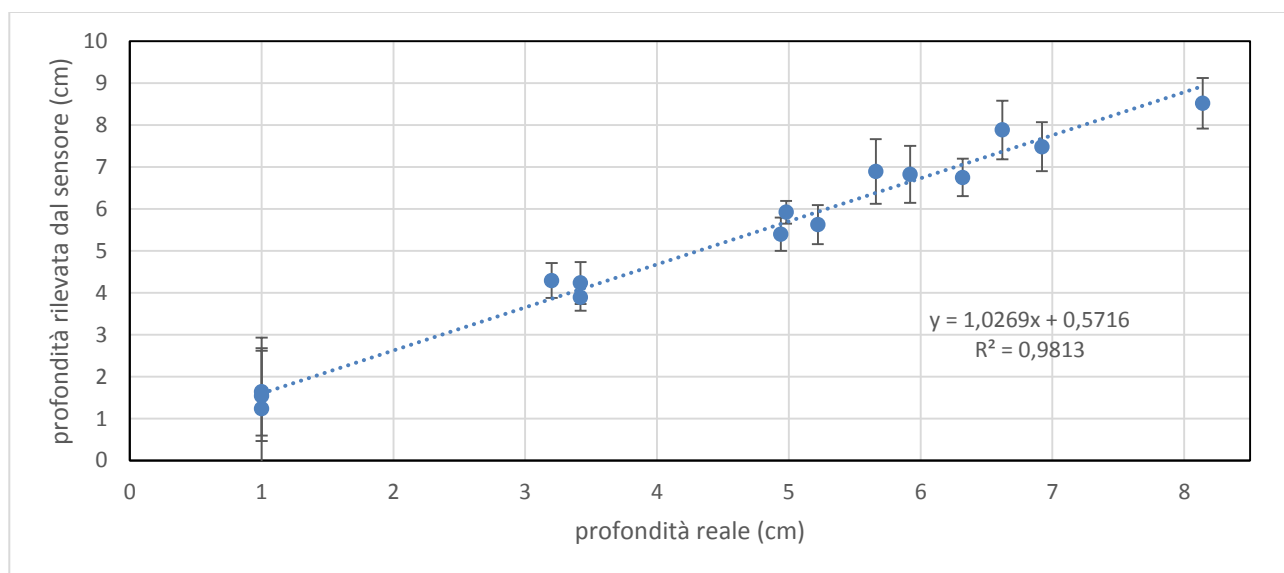


Grafico 7.10. Correlazione tra i valori di profondità rilevata dal sensore di movimento angolare e profondità di semina reale. L'illustrazione grafica mette in correlazione tutti i valori delle cinque differenti profondità di semina (0, 2, 4, 6 e 8 cm) e dei tre differenti settaggi del sistema di appesantimento dell'unità di semina (posizione di scala P1, P4 e P7). Le barre d'errore rappresentano la deviazione standard calcolata sulle cinque differenti profondità di semina (0, 2, 4, 6 e 8 cm) per ognuno dei tre carichi esercitati dal meccanismo di appesantimento (P1, P4 e P7).

Il Grafico 7.11 rappresenta i dati in funzione della correlazione tra le profondità impostate ed il Δ calcolato come differenza tra la profondità impostata e la profondità rilevata dal sensore angolare.

Si nota infatti, come all'aumentare della profondità di semina impostata, il Δ di profondità incrementi tra i diversi settaggi del sistema di appesantimento.

Nello specifico questo significa che la profondità determinata dal sensore tende a ridursi, o comunque ad assumere un valore inferiore rispetto alla profondità impostata.

Questo fenomeno si osserva attenuarsi all'incrementare del carico, in particolar modo nei settaggi del sistema di appesantimento P4 e P7, dove la profondità del sensore si avvicina maggiormente a quella impostata nell'elemento di semina.

Al contrario in condizione di minor carico esercitato sull'unità di semina (settaggio P1) il sensore di movimento angolare tende a rilevare valori di profondità che si discostano maggiormente da quelli impostati.

Questo spostamento ed in particolare i valori negativi possono, indicare una profondità di semina effettiva maggiore rispetto a quella reale; molto probabilmente tale spostamento verso valori negativi è dovuto al fatto che la posizione di zero⁷ risulta sfalsata a causa dell'effetto di ondulazione presente sulla superficie del terreno, irregolarità che tende a sollevare le ruote di profondità, spostando così la posizione di zero (Figura 7.2).

Di conseguenza un'apparente sollevamento della posizione di zero tende a dare un'apparente incremento di profondità rilevato dal sensore angolare.

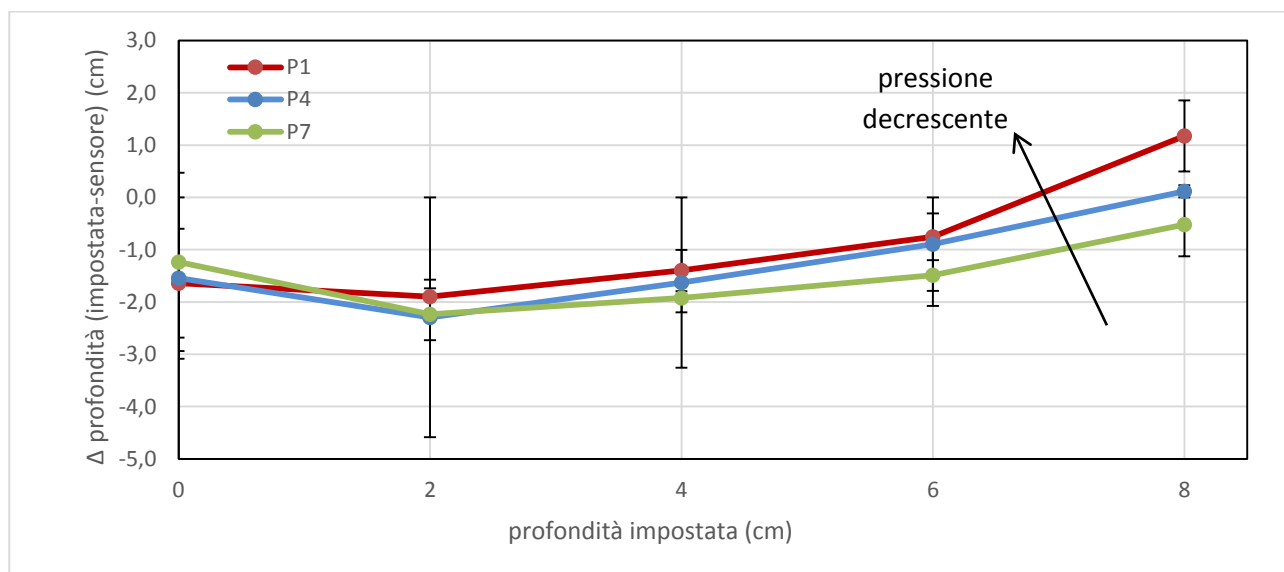


Grafico 7.11. Correlazione tra i valori di profondità impostata sull'elemento di semina attraverso il meccanismo di regolazione manuale ed il Δ di profondità ottenuto dalla differenza tra la profondità impostata e la profondità rilevata dal sensore di movimento angolare.

⁷ Con il termine "posizione di zero" si intende la posizione in cui il sensore di movimento angolare rileva una profondità di semina pari a zero, la quale corrisponde effettivamente con la reale profondità di semina in quanto l'elemento di semina è correttamente adagiato sulla superficie del letto di semina.



Figura 7.2. Creste di lavorazione derivanti dalla preparazione del letto di semina. Come si osserva in figura le ruote di profondità dell'unità di semina esterna (unità esposta alle irregolarità del terreno) non sono allineate. Questo fenomeno è imputabile alle irregolarità del suolo.

L'irregolarità del letto di semina è stata determinata dal rullo posteriore dell'erpice (Figura 7.3) che ha lasciato sul terreno un andamento sinusoidale, il quale provocava un sollevamento periodico e ripetuto della ruota di profondità esterna, non bilanciato dalla ruota interna. Questo movimento delle ruote di profondità ha portato, molto probabilmente, ad un'apparente aumento di profondità di semina rilevata dal sensore di movimento angolare.

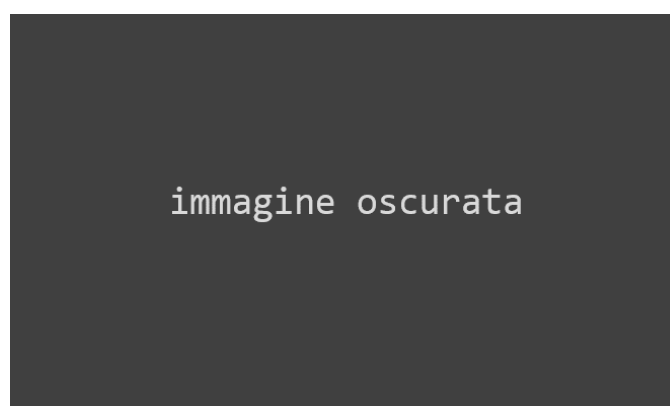


Figura 7.3. Erpice rotante utilizzato nella preparazione del letto di semina. Le creste di lavorazione lasciate sulla superficie di lavorazione dal rullo posteriore dell'erpice sono sospettate di aver influenzato la profondità di semina rilevata dal sensore di movimento angolare causando dei movimenti anomali sussultori sulle ruote di profondità dell'unità di semina.

Va poi notato che l'azzeramento e la curva di linearità del sensore di movimento angolare sono state effettuate con la seminatrice appoggiata a terra (pavimento in cemento) non attaccata all'attacco a tre punti della trattrice.

Probabilmente un'ulteriore contributo di incertezza è dato dal fatto che l'azzeramento della macchina così eseguito è leggermente diverso dallo zero di tensione fatto in campo.

Questo ovviamente deve tener conto delle condizioni di orizzontalità dell'appezzamento, per cui è opportuno ricorrere ad un azzeramento della profondità di semina direttamente in campo in modo tale di poter "ignorare" tutti gli eventuali disturbi che altri menti possono portare ad errate letture della profondità di semina da parte del sensore di movimento angolare.

Un altro aspetto legato alle irregolarità del terreno dell'appezzamento risiede nel fatto che, un'ulteriore attenuazione delle imprecisioni di lettura della profondità da parte del sensore di movimento angolare, dovrebbe verificarsi nel momento in cui il sensore viene installato su più elementi di semina e non unicamente sull'elemento esterno (come nel caso dei test eseguiti in campo) per un motivo dovuto principalmente al calpestamento ripetuto del terreno.

L'andamento sinusoidale percepito dalla ruota di profondità si può notare anche su una prova di semina fatta a profondità costante in cui si vede il segnale rilevato dal sensore, come mostrato dall'andamento nel Grafico 7.12.

Come si vede lavorando a profondità costante si osserva un andamento sinusoidale con la profondità che varia tra i 4,8 cm e 6,3 cm indicativamente e un periodo di 1,5 m.

L'andamento sinusoidale del Grafico 7.12 corrisponde all'andamento sinusoidale del letto di semina lavorato con l'erpice rotante. Infatti, tale andamento sinusoidale segue la direzione di semina con un periodo di circa 1,5-1,6 m e con una dimensione delle creste (Figura 7.2) che arriva fino a circa 5 cm.

La ruota premi seme è posta in mezzeria rispetto alle due ruote di profondità per cui il Δ di profondità è circa di 1,5-1,6 cm. Questo dato deriva dal fatto che le irregolarità del terreno interferiscono in modo differente con le due ruote di profondità; la ruota interna risente meno delle creste di lavorazione in quanto tali irregolarità del terreno vengono quasi azzerate dalla ruota della trattrice, mentre la ruota di profondità esterna risente pienamente del terreno irregolare.

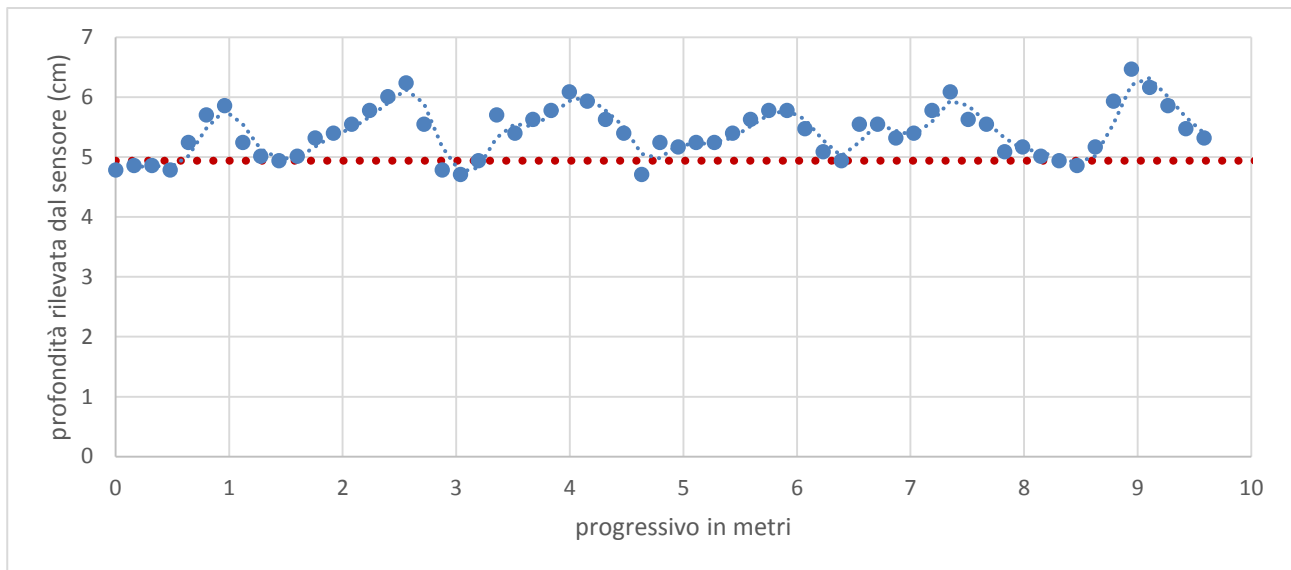


Grafico 7.12. Andamento sinusoidale percepito dalla ruota di profondità esterna posta in condizione di lavoro sulla superficie del terreno irregolare in seguito a lavorazione con erpice rotante. Nell'asse delle ascisse è riportato l'avanzamento progressivo delle seminatrice espresso in metri, mentre nell'asse delle ordinate è riportata la profondità di semina rilevata dal sensore. La retta evidenziata in rosso indica la profondità media reale di semina, pari a 4,94 cm. La profondità impostata tramite il meccanismo di regolazione dell'unità di semina è di 4 cm.

Molto probabilmente queste condizioni hanno influenzato la rilevazione delle reale profondità di semina da parte del sensore di movimento angolare in quanto causa di apparente sollevamento dell'elemento di semina, causando di conseguenza un'apparente aumento della profondità di semina.

Va notato però che questo fenomeno può essere utilizzato come elemento di indagine o di diagnostica per mandare degli alert all'operatore nel caso di una condizione di semina non ottimale come quella verificata in questo caso nel test in campo.

Questo effetto probabilmente tende a ridursi qualora si vada a lavorare con una macchina più pesante. Si nota infatti che probabilmente c'è una certa difficoltà da parte della macchina ad affondare i dischi dell'assolcatore soprattutto alle profondità più alte come si osserva probabilmente nei test eseguiti a profondità di semina e carico costanti.

La Tabella 7.14 riporta i risultati ottenuti eseguendo un test per indagare l'influenza della velocità di semina sulla rilevazione della profondità da parte del sensore angolare.

Velocità km/h	P4 - 4 cm		DevST	Velocità km/h	P7 - 4 cm		DevST
	Volt	Profondità (cm)			Volt	Profondità (cm)	
1,8	1,92	-5,68	0,78	1,8	1,93	-5,66	0,75
2,4	1,93	-5,63	0,48	2,4	1,87	-6,10	0,41
3,6	1,92	-5,72	0,30	3,6	1,88	-5,98	0,35
6,7	1,93	-5,67	0,67	6,8	1,88	-6,04	0,58
8,5	1,92	-5,72	0,56	8,5	1,85	-6,27	0,54

Tabella 7.14. Profondità rilevata dal sensore di movimento angolare a differenti velocità e con due differenti settaggi del sistema di appesantimento dell'unità di semina (P4 e P7). La profondità di semina impostata attraverso il meccanismo di regolazione delle ruote di profondità è costante ed è pari a 4 cm.

Il Grafico 7.13 mostra la correlazione che intercorre tra la velocità di avanzamento della trattrice e la profondità di semina rilevata dal sensore di movimento angolare.

Come si nota a fronte di una profondità di semina impostata pari a 4 centimetri, i valori di profondità misurate da sensore angolare siano superiori rispetto alla profondità impostata di circa 1,5-2 centimetri.

Anche in questo caso, molto probabilmente, le maggiori profondità rilevate dal sensore non sono dovute tanto ad una effettiva maggiore profondità di semina, quanto piuttosto ad un maggiore o minore galleggiamento delle ruote di profondità sulle creste di lavorazione del terreno che determinano uno spostamento del livello di zero.

Si nota inoltre che la curva che riporta l'andamento della profondità di semina rilevata dal sensore illustra come al settaggio cui corrisponde il maggior carico esercitato sull'unità di semina (P7) ha una maggiore profondità rispetto alla curva di carico inferiore (P4). Questo dimostra che, indipendentemente dalla posizione di zero con il settaggio P7 si ha maggiore efficacia nella creazione del solco di semina.

Appare inoltre evidente come, con l'incrementare della velocità di avanzamento, la divergenza tra le curve P4 e P7 aumenti. Questo indica che al crescere della velocità di avanzamento si verifica un effetto dinamico che porta ad un incremento del Δ di profondità tra le condizioni P4 e P7, dovuto molto probabilmente, al fatto che il carico espresso sull'unità di semina dal settaggio P4 causa un effetto di maggiore galleggiamento rispetto al carico del settaggio P7.

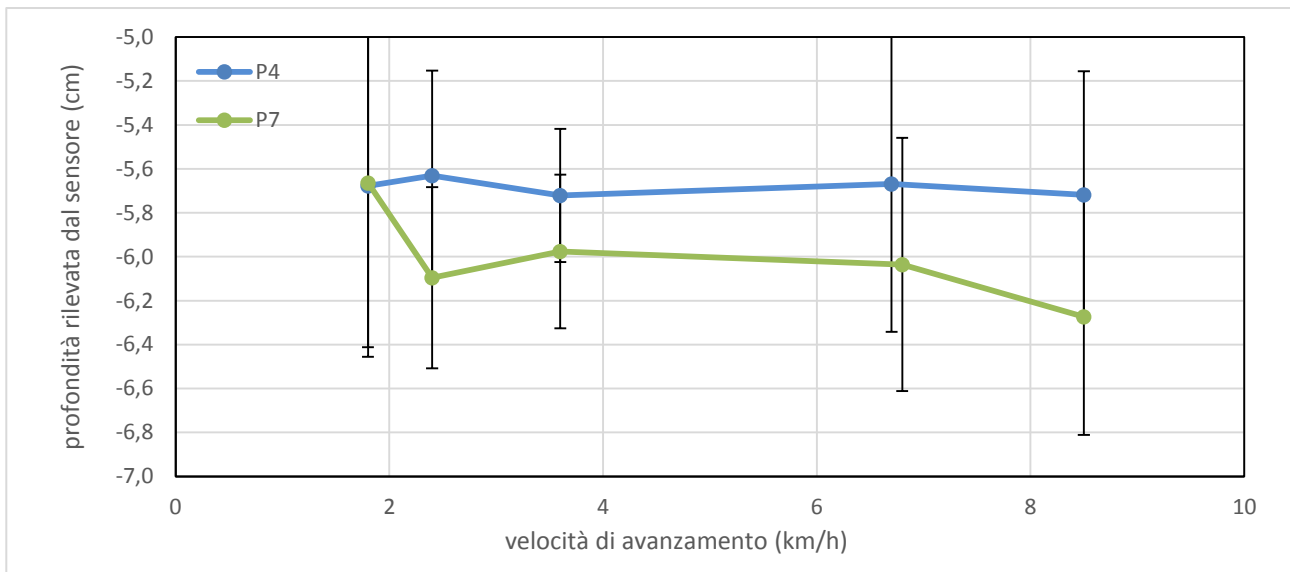


Grafico 7.13. Test di velocità effettuato a differenti velocità nei settaggi del sistema di appesantimento P4 e P7. La profondità di semina rilevata dal sensore di movimento angolare è espressa in centimetri rispetto al livello zero, inteso come la superficie del terreno.

8 – Conclusioni e discussioni

La centralità del lavoro proposto è focalizzata a sottolineare l'importanza della profondità di semina nella gestione agronomica di una coltura, aspetto che può influenzare anche pesantemente il benessere della stessa.

Essendo questa operazione colturale una fase cruciale dell'intero ciclo di coltivazione, è di fondamentale importanza evitare errori di qualsivoglia natura per non incorrere in perdite di produzione.

Avere, quindi, la possibilità di eseguire la semina avvalendosi di una macchina seminatrice in grado di garantire una deposizione delle sementi a profondità regolare ed uniforme, porta ad una maggiore emergenza delle giovani plantule, evitando situazioni di stress dovute ad una errata profondità di deposizione del seme e con positive ricadute sulla produzione finale.

La realizzazione di una seminatrice di precisione in grado di gestire autonomamente la profondità di semina è un obiettivo molto importante e richiede la collaborazione di più discipline quali l'agronomia, la meccanica, l'elettronica e l'informatica.

Quanto svolto in questo lavoro ha lo scopo di capire quali siano i parametri da considerare maggiormente per poter realizzare un sistema di automazione che permetta di beneficiare di quanto deriva dalla semina di precisione in termini di profondità.

I test eseguiti sul sensore di movimento angolare hanno permesso di capire che il sensore scelto si è dimostrato particolarmente affidabile ed indicato per assolvere alla funzione di monitoraggio della profondità di semina.

Nonostante siano presenti degli errori nei dati raccolti dalle misurazioni, essi si sono rivelati regolari e costanti nel tempo e questo permette di considerarli comunque incoraggianti per proseguire nel lavoro di sviluppo.

Avvalendosi di un software appositamente sviluppato ed installato all'interno della memoria della centralina elettronica, è possibile gestire tali dati per avvisare l'operatore dello stato della semina, attivando dei messaggi di allerta qualora si notino delle anomalie.

Oltre al sensore di movimento angolare, il sistema di automazione prevede l'installazione di due attuatori a movimento lineare: un primo attuatore per l'impostazione della profondità di semina tramite la regolazione del meccanismo di controllo delle ruote di profondità ed un secondo per la gestione dei carichi sull'unità di semina da parte del sistema di appesantimento.

La fase successiva alle prove realizzate in questo lavoro è l'implementazione della componentistica in un sistema comandato da un'ECU (Electronic Control Unit) che ne presieda il funzionamento.

Va considerato che, ai dati ricavati da queste prove, vanno affiancati altri test di campo per approfondire maggiormente tutte le dinamiche chiamate in causa al fine di aver maggiori informazioni da sfruttare in termini di fattibilità e di progettazione.

Affinché un sistema di controllo della profondità di semina, come quello ideato in questo lavoro, possa essere sfruttato al massimo del suo potenziale, ne è consigliata l'installazione in macchine di moderna concezione, dotate di tecnologia ISOBUS e affiancato da un sistema che permetta una semina a dose variabile.

Inoltre, grazie alle nuove tecnologie che assumono sempre più importanza in un'agricoltura moderna, è possibile registrare i dati rilevati in campo creando quindi delle mappe di semina, che sono un ulteriore utile strumento per attuare una corretta gestione aziendale.

Infine, un aspetto molto importante da considerare è l'aspetto economico, ovvero l'impatto che l'implementazione di questo sistema ha sul prezzo finale di vendita della macchina seminatrice.

Appare evidente che l'implementazione di questi automatismi deve avere un costo contenuto affinché l'aumento del prezzo sia facilmente assorbito dal mercato.

Va da sé che, un eccessivo costo, richiede un elevato numero di anni per poter ammortizzare la spesa e, considerando la dimensione media delle aziende nel nostro Paese, questo potrebbe rivelarsi un problema con cui doversi confrontare.

Bibliografia

- ADAMCHUK, V., SKOTNIKOV, A., SPEICHINGER, J., & KOCHER, M. (2004). *Development of an Instrumented Deep-Tillage Implement for Sensing of Soil Mechanical Resistance*. Transactions of the ASAE, vol. 47(6), pp. 1913–1919. Retrieved from <http://digitalcommons.unl.edu/biosysengfacpub/163/>
- AIKINS, S., & AFUAKWA, J. (2008). *Growth and dry matter yield responses of cowpea to different sowing depths*. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science, vol. 3(5&6), pp. 50–54.
- ALLOTTA, B., & PUGI, L. (2017). *Meccatronica: azionamenti elettrici ed oleodinamici*. Società Editrice Esculapio, pp. 238-243.
- ALTIKAT, S., CELIK, A., & GOZUBUYUK, Z. (2013). *Effects of various no-till seeders and stubble conditions on sowing performance and seed emergence of common vetch*. Soil & Tillage Research, vol. 126, pp. 72–77.
- AREA Laboratory (n.d.). *Capitolo 1 - I sensori per l'automazione*. Università degli Studi della Basilicata (Potenza) - Department of Environmental Engineering and Physics.
- BEDIN, M. C. (2013). *Caratterizzazione di un sistema ad ultrasuoni per la rilevazione di target umani*. Università degli Studi di Padova - Facoltà di Ingegneria.
- BELFORTE, G. (2005). *Manuale di pneumatica - II edizione*. Tecniche Nuove, pp. 97-171.
- BELFORTE, G., MANUELLO BERTETTO, A., & MAZZA, L. (1998). *Pneumatica: corso completo*. Tecniche Nuove, pp. 3.
- BIANCONI, F. (2009). *Sul controllo della fessurazione nelle strutture civili*. Politecnico Di Milano - Facoltà Di Architettura E Società, pp. 84.
- CAO, H., WANG, D., SHI, J., ZHU, K., DONG, S., LIU, P., ZHAO, B., ZHANG, J. (2015). *Effects of sowing depth on seedling traits and root characteristics of summer maize*. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao (The Journal of Applied Ecology), vol. 26(8), pp. 2397–2404.
- CHEN, Y., MONERO, F., LOBB, D., TESSIER, S., & CAVERS, C. (2004). *Effects of six tillage methods on residue incorporation and crop performance under a heavy clay soil condition*. Transactions of the ASAE, vol. 47(4), pp. 1003–1010.
- CHOUDHARY, M. A., YU, G. P., & BAKER, C. J. (1985). *Seed placement effects on seedling establishment in direct-drilled fields*. Soil and Tillage Research, vol. 6, pp. 79–93.
- DONINI, F., & NERI, D. (2003). *Studio di invasività dei sensori nelle applicazioni biomediche*. Università di Modena e Reggio Emilia, pp. 9-48.
- FENZI, A. (2005). *Sensori e sistemi as-interface. Tecnologie per l'automazione industriale*. Tecniche Nuove, pp. 55-56.
- FERRARI, I. (2014). *Un metodo per misurare la velocità del suono*. Note Di Laboratorio, pp. 28–35.
- FERRI, F. M. (2010). *Sensori di posizione angolare e di velocità*. Prontuario dell'ingegnere, pp. 325.

- FOUNDATION, A.-A. I. E. (n.d.). *ISOBUS e le sue funzionalità*. AEF ISOBUS Guidelines Etc., pp. 1–23.
- GAN, Y., & STOBBE, E. H. (1995). *Effect of variations in seed size and planting depth on emergence, infertile plants, and grain yield of spring wheat*. Canadian Journal of Plant Science, vol. 75, pp. 565–570.
- GASPARETTO, E. (n.d.). *Applicazioni avanzate dell' elettronica nella meccanizzazione agricola: procedure isobus, robotica, sistemi di automazione e tele-controllo delle funzioni*. Percorsi Di Riqualificazione per Addetti Del Comparto Della Meccanizzazione Agricola, pp. 28–29.
- GATTO, S. (2013). *Applicazione delle tecnologie di Agricoltura di Precisione nella coltivazione del Mais in una azienda cerealicola-zootecnica*. Università degli Studi di Padova – Facoltà di Agraria, pp. 1-98.
- GRIEPENTROG, H. (1998). *Seed distribution over the area*. EurAgEng. Oslo., pp. 98-A-059.
- HADJICHRISTODOULOU, A., DELLA, A., & PHOTIADES, J. (1977). *Effect of sowing depth on plant establishment, tillering capacity and other agronomic characters of cereals*. J. Agric. Sci., vol. 89, pp. 161–167.
- IACONIS, F.M. (2015). *Note sulle incertezze e sulla precisione delle misure*. Società Editrice Esculapio, pp. 19-22.
- JANELLE, L., TESSIER, S., & LAGUE, C. (1993). *Seeding tool design for no-tillage conditions in North-East*. ASAE Paper, ASABE, St. Joseph, MI, vol. 93, pp. 1561.
- KARAYEL, D., & OZMERZI, A. (2002). *Effect of tillage methods on sowing uniformity of maize*. Canadian Biosystems Engineering, vol. 44, 2.23-2.26.
- KASPERBAUER, M., & KARLEN, D. (1994). *Plant spacing and reflected far-red light effects on phytochrome-regulated photosynthate allocation in corn seedlings*. Crop Science, vol. 34(6), pp. 1564–1569.
- KESSLER, J. (1994). *Synchro/resolver conversion handbook*. Retrieved from <http://www.ddc-web.com/documents/synhdbk.pdf>
- KIRBY, E. J. M. (1993). *Effect of sowing depth on seedling emergence, growth and development in barley and wheat*. Field Crops Research, vol. 35(2), pp. 101-111.
- KRALL, J., ESECHIE, H., RANEY, R., CLARK, S., TENEYCK, G., LUNDQUIST, M., HAMBURG, N., AXTHELM, L., DAYTON, A., VANDERLIP, R. (1977). *Influence of within-row variability in plant spacing on corn grain yield*. Agron. J., vol. 69, pp. 797–799.
- LARACCA, M. (n.d.). *Sensori e Circuiti di Condizionamento*. Università Degli Studi Di Cassino - Facoltà Di Ingegneria, DAEIMI, pp. 1–99.
- LAZZARI, M. (n.d.). *Generalità sui sensori impiegati per il monitoraggio e controllo delle produzioni agricolo-zootecniche*. Università Degli Studi Di Milano, pp. 1–48.
- LEGNANI, G., ADAMINI, R., TIBONI, M., & TOSI, D. (2016). *Meccanica degli azionamenti. Azionamenti elettrici: Principi di funzionamento, accoppiamento con il carico, scelta del gruppo motore-riduttore, leggi di moto, controllo*. Società Editrice Esculapio, pp. 238-243.

- LOEPPKY H., LAFOND, G. P., & FOWLER, D. B. (1989). *Seeding depth in relation to plant development, winter survival and yield in no-till winter wheat*. Agron. J., vol. 81, pp. 125–129.
- MAGGI, S. (n.d.). *Dispensa sul “ Controller Area Network ” (CAN)*. Politecnico Di Milano, pp. 1–40.
- MASSIGNAN, S. (2011). *Sensori di prossimità nell’automazione industriale*. Università Degli Studi Di Padova - Facoltà Di Ingegneria, pp. 4–38.
- MATTERA, J., ROMERO, L., CUATRÍN, A., CORNAGLIA, P., & GRIMOLDI, A. (2013). *Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (Medicago sativa L.) in response to row spacing*. European Journal of Agronomy, vol. 45, pp. 87–95.
- MATTETTI, M., & MOLARI, G. (2012). *CAN-Bus e Isobus per un’agricoltura moderna*. Terra E Vita, n. 40, pp. 48–50.
- MAZZETTO, F., RIEDL, M., & SACCO, P. (2016). *Sistemi informativi aziendali ed agricoltura di precisione*. In R. Casa (Ed.), *Agricoltura di Precisione, Edagricole*, pp. 9–41.
- MCGAHAN E.J., & ROBOTHAM B.G. (1992). *Effect of planting depth on yield in cereals*. Conference on Engineering in Agriculture, Albury, NSW, 4-7 October, pp. 121–126.
- MIEDEMA, P. (1982). *The Effects of Low Temperature on Zea mays*. Advances in Agronomy, vol. 35, pp. 93–128.
- MONTES, J. M., UTZ, H. F., SCHIPPRACK, W., KUSTERER, B., MUMINOVIC, J., PAUL, C., & MELCHINGER, A. E. (2006). *Near-infrared spectroscopy on combine harvesters to measure maize grain dry matter content and quality parameters*. Plant Breeding, vol. 125(6), pp. 12–16.
- MORRISON J.E., & GERIK, T. J. (1985). *Planter depth control, I: prediction and projected effects on crop emergence*. Transactions of the ASAE, vol. 28(5), pp. 1415–1418.
- NAUVA, N. (2016). *Analisi delle prestazioni di un elemento di semina di precisione ad azionamento meccanico o elettronico*. Università degli Studi di Padova – Facoltà di Agraria, pp. 11-36.
- NEHMZOW, U. (2008). *Robotica mobile - Un’introduzione pratica*. Springer, pp. 31-33.
- NIELSEN, R. (1995). *Planting speed effects on stand establishment and grain yield of corn*. J. Prod. Agric., vol. 8(3), pp. 391–393.
- NIELSEN, R. (1996). *Don’t let the planter hold back your corn yields*. Retrieved June 21, 2004, from www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/articles.96/chat9601.htm
- NIELSEN, R. (1997). *Stand establishment variability in corn*. Retrieved April 9, 2004, from www.agry.purdue.edu/ext/corn/pubs/agry9101.htm
- ÖZMERZI, A., KARAYEL, D., & TOPAKCI, M. (2002). *Effect of sowing depth on precision seeder uniformity*. Biosystems Engineering, vol. 82(2), pp. 227–230.
- PANNING, J., KOCHER, M., SMITH, J., & KACHMAN, S. (2000). *Laboratory and field testing of seed spacing uniformity for sugarbeet planters*. American Society of Agricultural Engineers - ASAE, vol. 16(1), pp. 7–13.

- PERRY, C., POCKNEE, S., HANSEN, O., STAFFORD, J., & WERNER, A. (2003). *A variable rate pivot irrigation control system*. In Precision Agriculture, pp. 539–544.
- PETRELLA, R. (2007). *I trasduttori utilizzati negli azionamenti elettrici: principi di funzionamento, caratteristiche e metodologie di utilizzo*. Università di Udine - Dipartimento di ingegneria elettrica, gestionale e meccanica, pp. 6-12.
- PICCO, A. (2010). *Analisi sui sensori: i sensori di temperatura*. Università degli Studi di Padova – Facoltà di Ingegneria, pp. 15-28.
- RAPISARDA, D. (2004). *Automazione industriale*. Università Degli Studi Di Siena - Facoltà Di Ingegneria, pp. 3–135.
- ROMANECKAS, K., PILIPAVICIUS, V., SARAUSKIS, E., & SAKALAUŠKAS, A. (2009). *Effect of sowing depth on emergence and crop establishment of sugar beet (Beta vulgaris L.)*. Journal of Food Agriculture & Environment, vol. 7(2), pp. 571–575.
- SADLER, E. J., EVANS, R. G., STONE, K. C., & CAMP, C. R. (2005). *Opportunities for conservation with precision irrigation*. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 60, pp. 371–379.
- SARTORI, L. (2016b). *Seminatrici*. Università Degli Studi Di Padova - Facoltà Di Agraria, pp. 1–40.
- SARTORI, L. (2016c). *Analisi dei dati e VRA*. Università Degli Studi Di Padova - Facoltà Di Agraria, pp. 1–60.
- SARTORI, L., MARINELLO, F., PEZZUOLO, A., & TAROLLI, P. (2016a). *Lavorazioni variabili del terreno e semina a dose variabile*. In R. Casa (Ed.), Agricoltura di Precisione, Edagricole, pp. 229–247.
- SECCHI, C. (n.d.). *Sensori e trasduttori*. Università Degli Studi Di Modena E Reggio Emilia, pp. 1–81.
- SGARBOSSA, L. (n.d.). *Sensori e attuatori per l'automazione*. Università Di Udine, pp. 1–51.
- STAGGENBORG, S., TAYLOR, R., & MADDUX, L. (2004). *Effect of planter speed and seed firmers on corn stand establishment*. Applied Eng. in Agric., vol. 20(5), pp. 573–580.
- STOCKTON, R. D., KRENZER, E. G., SOLIE, J., & PAYTON, M. E. (1996). *Stand establishment of winter wheat in Oklahoma: a survey*. Journal of Production Agriculture, vol. 9, pp. 571–575.
- VANDERLIP, R., OKONKWO, J., & SCHAFFER, J. (1988). *Corn response to precision of within-row plant spacing*. Appl. Agric. Res., vol. 3, pp. 116–119.
- VÉLEZ, J., MÉNDEZ, A., SCARAMUZZA, F., & VILLARROEL, D. (n.d.). *Control total en sembradoras, un paso más hacia la robotización*. (Kairós - El tiempo de los nativos sustentables). Manfredi (Argentina).
- WADE, L., & DOUGLAS, A. (1990). *Effect of plant density on grain yield and yield stability of sorghum hybrids differing in maturity*. Australian Journal of Experimental Agriculture, vol. 30, pp. 257–264.

- WADE, L., NORRIS, C., & WALSH, P. (1988). *Effects of suboptimal plant density and non-uniformity in plant spacing on grain yield of rain-grown sunflower*. Australian Journal of Experimental Agriculture, vol. 28, pp. 617–622.
- WORKU, M., & ASTATKIE, T. (2011). *Row and plant spacing effects on yield and yield components of soya bean varieties under hot humid tropical environment of Ethiopia*. Journal of Agronomy and Crop Science, vol. 197(1), pp. 67–74.
- YAGMUR, M., & KAYDAN, D. (2009). *The effects of different sowing depth on grain yield and some grain yield components in wheat (Triticum aestivum L.) cultivars under dryland conditions*. African Journal of Biotechnology, vol. 8(2), pp. 196–201. Retrieved from <http://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/59766>
- ZANOBINI, A., & GIOVANNETTI, S. (2013). *Incertezza di misura e acquisizione di segnali*. Società Editrice Esculapio, pp. 119-120.
- ZETTLEX. (2017). *Confronto tra encoder capacitivi e encoder induttivi*. Retrieved from <http://www.zettlex.com/it/articles/encoder-capacitivi-e-encoder-induttivi/>
- ZHOU, J., LIU, G., LI, S., WANG, X., & ZHANG, M. (2008). *Decision support system of variable rate irrigation based on mathematical model and GIS*. IFIP International Federation for Information Processing, vol. 259, pp. 1011–1019. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77253-0_33

Sitografia

- www.agleader.com
- www.agrometal.com
- www.amazone.net
- www.dawnequipment.com
- www.deere.com
- www.forigo.it
- www.horsch.com
- www.kinze.com
- www.kuhn.it
- www.precisionplanting.com
- www.sulky-burel.com
- www.vaderstad.com