

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

Studio dell'architettura e simulazione multibody di un carro miscelatore elettrico



Relatore

Prof. Aurelio Somà

Candidato

Marco Berteà

Dicembre 2018

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la Supertino S.r.l. per il supporto tecnico fornitomi e per l'accoglienza dimostratami nel periodo di tirocinio curriculare svolto durante il corso di studi.

Ringrazio, inoltre, il Professor Aurelio Somà, relatore di questa tesi, e i ragazzi del Laboratorio di Microsistemi per la disponibilità e l'aiuto mostratimi nel corso della stesura.

Infine un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, alla mia fidanzata ed ai miei amici che durante tutto il percorso universitario mi hanno sempre sostenuto con affetto continuando a credere in me.

Sintesi

Nel presente lavoro si effettua l'analisi di un carro miscelatore elettrico, ovvero una macchina semovente agricola in grado di svolgere la trinciatura, lo sminuzzamento, la miscelazione e la distribuzione in mangiatoia dei prodotti impiegati per l'alimentazione animale (quali ad esempio foraggi, paglia, insilati, mangimi, ecc.) dotata di un motore primario alimentato a batterie.

L'elaborato riporta inizialmente una descrizione della struttura del carro miscelatore tradizionale, munito di un motore diesel, in modo da chiarire qual è stato il punto di partenza per la realizzazione del prototipo elettrico. In particolare, si spiega come viene ripartita la potenza motrice tra i vari organi rotanti della macchina evidenziando quali sono le tipologie di trasmissione impiegate (meccanica, idraulica o mista).

Dopo questa introduzione, l'attenzione si focalizza sull'argomento principale del presente lavoro di tesi, ovvero lo studio di un carro miscelatore elettrico realizzato da un'azienda del cuneese presso la quale lo studente ha svolto un periodo di tirocinio curriculare. Il prototipo a risparmio energetico è molto simile alla macchina tradizionale in quanto l'unica differenza che le contraddistingue è che nella prima è installato un motore elettrico a magneti permanenti in sostituzione del motore endotermico presente nella seconda; il resto della catena di trasmissione è inalterato. Grazie all'elaborazione di dati sperimentali raccolti durante il funzionamento del semovente, si effettua un'analisi dei suoi consumi energetici mostrando che la triturazione-miscelazione dei prodotti costituenti la razione alimentare rappresenta la fase di lavoro della macchina che assorbe la maggior aliquota di potenza. Sulla base delle specifiche tecniche e delle prove svolte, si realizza un sistema multibody dell'apparato di miscelazione del carro costituito da una vasca all'interno della quale alloggiato due coclee tronco coniche controrotanti. Sfruttando le potenzialità del modello computerizzato, si valuta la dinamica agente sugli organi miscelanti al variare dei parametri costruttivi (passo, inclinazione, larghezza dell'elica della coclea) e della massa della quantità miscelata. In questo modo, si realizza un'ottimizzazione dei consumi energetici della macchina garantendo un maggior durata delle batterie che alimentano il motore elettrico. Quest'ultimo aspetto è di primaria importanza in quanto il semovente non può interrompere il suo funzionamento durante la preparazione della razione alimentare perché ciò impedirebbe di nutrire correttamente gli animali riducendo la produttività dell'allevamento.

Il miglioramento del profilo delle coclee di miscelazione non è l'unico aspetto che comporta un aumento dell'autonomia del prototipo elettrico; nell'ultima parte dell'elaborato vengono indicate altre possibili migliorie che potrebbero ottimizzare la macchina dal punto di vista energetico.

Indice dei contenuti

| | |
|---|-------------|
| RINGRAZIAMENTI..... | III |
| SINTESI..... | IV |
| INDICE DEI CONTENUTI..... | V |
| INDICE DELLE FIGURE | VIII |
| INDICE DELLE TABELLE..... | XI |
| CAPITOLO 1 INTRODUZIONE..... | 1 |
| 1.1 NORMATIVE SULLE EMISSIONI INQUINANTI..... | 1 |
| 1.1.1 <i>Macchine da lavoro</i> | 2 |
| 1.1.2 <i>Stage V</i> | 3 |
| 1.2 DISPOSITIVI DI POST-TRATTAMENTO DEI GAS DI SCARICO | 3 |
| 1.2.1 <i>DOC</i> | 5 |
| 1.2.2 <i>DPF</i> | 6 |
| 1.2.3 <i>EGR</i> | 8 |
| 1.2.4 <i>SCR</i> | 9 |
| 1.3 ELETTRIFICAZIONE IN AGRICOLTURA | 11 |
| 1.3.1 <i>Soluzioni full-electric</i> | 11 |
| 1.3.2 <i>Soluzioni ibride</i> | 14 |
| CAPITOLO 2 IL CARRO TRINCIA MISCELATORE TRADIZIONALE | 15 |
| 2.1 CLASSIFICAZIONE GENERALE | 15 |
| 2.1.1 <i>Carri miscelatori</i> | 16 |
| 2.1.2 <i>Carri trincia-miscelatori</i> | 17 |
| 2.2 CARRO TRINCIA-MISCELATORE VERTICALE SEMOVENTE..... | 19 |
| 2.2.1 <i>Motore endotermico</i> | 20 |
| 2.2.2 <i>Trasmissione del moto</i> | 21 |
| 2.2.3 <i>Apparato desilatore</i> | 26 |
| 2.2.4 <i>Sistema di trincia-miscelazione</i> | 26 |
| CAPITOLO 3 ELECTRA | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1 ARCHITETTURA DEI VEICOLI ELETTRICI | 28 |
| 3.1.1 Propulsione ibrida | 29 |
| 3.1.2 Propulsione full-electric | 32 |
| 3.2 COMPONENTI VEICOLI ELETTRICI | 33 |
| 3.2.1 Batterie | 33 |
| 3.2.2 Motori elettrici..... | 35 |
| 3.2.3 Inverter | 37 |
| 3.3 ESEMPI DI PROTOTIPI IBRIDO-ELETTRICI IN AGRICOLTURA | 38 |
| 3.3.1 John deere - 7530 E Premium | 38 |
| 3.3.2 Merlo - TF 40.7 Hybrid | 40 |
| 3.3.3 John Deere - SESAM | 41 |
| 3.3.4 Fendt - e100 Vario..... | 41 |
| 3.4 CHE COS'È ELECTRA? | 42 |
| 3.4.1 Quali sono le differenze rispetto alla macchina tradizionale..... | 43 |
| 3.4.2 Sistema di monitoraggio da remoto..... | 44 |
| CAPITOLO 4 STUDIO DELLE FUNZIONI E ANALISI DEI CONSUMI..... | 46 |
| 4.1 STUDIO DELLE FUNZIONI | 46 |
| 4.1.1 Posizionamento del motore..... | 47 |
| 4.1.2 Trasmissione coclee di miscelazione | 48 |
| 4.1.3 Trasmissione fresa desilatrice | 50 |
| 4.1.4 Trasmissione avanzamento..... | 51 |
| 4.1.5 Servizi ausiliari | 51 |
| 4.2 VALUTAZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI | 51 |
| 4.2.1 Elaborazione dei dati raccolti | 52 |
| 4.2.2 Rappresentazione dei risultati ottenuti | 55 |
| 4.2.3 Considerazioni energetiche | 56 |
| 4.2.4 Possibili miglioramenti..... | 57 |
| CAPITOLO 5 SIMULAZIONE MULTIBODY | 58 |
| 5.1 MODELLAZIONE CAD..... | 58 |
| 5.1.1 Vasca..... | 58 |
| 5.1.2 Coclee | 59 |
| 5.2 MODELLO MULTIBODY | 63 |
| 5.2.1 Struttura e proprietà | 63 |
| 5.2.2 Modellazione analitica del carico | 65 |

| | |
|--|-----------|
| 5.3 ANALISI DEL MODELLO DINAMICO | 79 |
| 5.3.1 <i>Variazione della velocità di rotazione</i> | 80 |
| 5.3.2 <i>Variazione della geometria delle coclee</i> | 84 |
| 5.3.3 <i>Confronto tra modello dinamico teorico e prove sperimentali</i> | 89 |
| CAPITOLO 6 CONCLUSIONI | 91 |
| RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI | 93 |

Indice delle figure

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1.1: Valori limite delle emissioni inquinanti.</i> | 3 |
| <i>Figura 1.2: Sistema integrato di post-trattamento dei gas di scarico.</i> | 4 |
| <i>Figura 1.3: Rappresentazione schematica delle reazioni chimiche di un DOC.</i> | 6 |
| <i>Figura 1.4: Rappresentazione del flusso attraverso le pareti del monolite.</i> | 7 |
| <i>Figura 1.5: Tipica configurazione di un sistema EGR esterno.</i> | 9 |
| <i>Figura 1.6: Rappresentazione delle reazioni coinvolte nel fenomeno di catalisi selettiva.</i> | 10 |
| <i>Figura 2.1: Desilatore-caricatore semovente.</i> | 16 |
| <i>Figura 2.2: Organi per la miscelazione nei carri miscelatori: (a) coclee ad asse orizzontale; (b) coclee ad asse verticale; (c) miscelazione a pale.</i> | 17 |
| <i>Figura 2.3: Rappresentazione del flusso di miscelazione con coclee orizzontali.</i> | 18 |
| <i>Figura 2.4: Rappresentazione del flusso di miscelazione con coclee verticali.</i> | 18 |
| <i>Figura 2.5: Rappresentazione del flusso di miscelazione con botte rotante.</i> | 19 |
| <i>Figura 2.6: Rappresentazione schematica di un carro trincia miscelatore verticale.</i> | 20 |
| <i>Figura 2.7: A sinistra: Motore endotermico a gasolio. A Destra: Radiatore ad acqua.</i> | 21 |
| <i>Figura 2.8: Schema dell'accoppiatore motore.</i> | 22 |
| <i>Figura 2.9: A sinistra: Schema dei rapporti di riduzione della trasmissione meccanica con cambio. A destra: Schema dei rapporti di riduzione della trasmissione meccanica con riduttore a singolo stadio.</i> | 23 |
| <i>Figura 2.10: Collegamento meccanico tra i riduttori ad assi ortogonali delle coclee.</i> | 23 |
| <i>Figura 2.11: Ripartizione della potenza motrice tramite accoppiatore ad assi paralleli a tre uscite.</i> | 24 |
| <i>Figura 2.12: Schema del sistema trasmissivo del carro miscelatore visto dall'alto.</i> | 25 |
| <i>Figura 2.13: A sinistra: Fase di carico della paglia tramite apparato desilatore. A destra: Fresa desilatrice.</i> | 26 |
| <i>Figura 2.14: Flusso di miscelazione generato dalle coclee controrotanti.</i> | 27 |
| <i>Figura 2.15: A sinistra: Schema di posizionamento delle celle di carico a flessione. A destra: Sportello di scarico con tappeto a nastro in pvc.</i> | 27 |
| <i>Figura 3.4: Architettura ibrida di tipo serie.</i> | 30 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 3.5: Architettura ibrida di tipo parallelo.</i> | 31 |
| <i>Figura 3.6: Architettura ibrida di tipo misto.</i> | 31 |
| <i>Figura 3.7: Schema semplificato di un powertrain elettrico.</i> | 32 |
| <i>Figura 3.8: Architettura modulare del pacco batterie.</i> | 33 |
| <i>Figura 3.9: Caratteristiche batterie al litio.</i> | 34 |
| <i>Figura 3.10: Caratteristica di funzionamento di un motore elettrico.</i> | 36 |
| <i>Figura 3.11: Rappresentazione del controllo di un motore a magneti permanenti utilizzando un inverter.</i> | 37 |
| <i>Figura 3.12: Schema del sistema John Deere E-Premium.</i> | 39 |
| <i>Figura 3.13: Prototipo LIB-OFF-road.</i> | 39 |
| <i>Figura 3.14: Configurazione ibrida di un telescopico Merlo.</i> | 40 |
| <i>Figura 3.15: A sinistra: Il SESAM di John Deere. A destra: L'e100 Vario di Fendt.</i> | 41 |
| <i>Figura 3.1: Electra.</i> | 42 |
| <i>Figura 3.2: Vano motore.</i> | 44 |
| <i>Figura 3.3: Dati registrati durante il monitoraggio di Electra: (a) Prima versione. (b) Seconda versione.</i> | 45 |
| <i>Figura 4.1: Carro trincia miscelatore semovente con motore posizionato anteriormente.</i> | 47 |
| <i>Figura 4.2: Carro trincia miscelatore semovente con motore posizionato posteriormente.</i> | 48 |
| <i>Figura 4.3: Trasmissione meccanica coclee di miscelazione.</i> | 49 |
| <i>Figura 4.4: Trasmissione idrostatica coclee di miscelazione.</i> | 49 |
| <i>Figura 4.5: Circuito elettrico equivalente del sistema di accumulo di Electra.</i> | 52 |
| <i>Figura 4.6: Curva OVC-SOC sperimentale per celle elettrolitiche LiFePO₄.</i> | 53 |
| <i>Figura 4.7: Distribuzione dei consumi energetici.</i> | 56 |
| <i>Figura 5.1: Modello tridimensionale della vasca di miscelazione</i> | 59 |
| <i>Figura 5.2: Rappresentazione grafica delle leggi lineari 5.1 e 5.2.</i> | 60 |
| <i>Figura 5.3: Rappresentazione grafica della struttura parametrica della coclea.</i> | 62 |
| <i>Figura 5.4: Modello tridimensionale della coclea destra di miscelazione.</i> | 63 |
| <i>Figura 5.5: Modello multibody del sistema di trincia miscelazione del carro semovente.</i> | 65 |
| <i>Figura 5.6: Ripartizione del peso della massa miscelata fra le due coclee.</i> | 67 |
| <i>Figura 5.7: Distribuzione triangolare delle componenti gravitazionali lungo il raggio medio dell'elica.</i> | 68 |
| <i>Figura 5.8: Diagramma di corpo libero dell'elemento di massa i-esimo.</i> | 70 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 5.9: Diagramma di corpo libero del piano inclinato in contatto con l'elemento di massa i-esimo.</i> | 70 |
| <i>Figura 5.10: Rappresentazione dei punti i individuati lungo il raggio medio dell'elica.</i> | 72 |
| <i>Figura 5.11: Scomposizione della forza Q_i applicata nel generico punto i.</i> | 73 |
| <i>Figura 5.12: Rappresentazione del flusso di mescolamento.</i> | 74 |
| <i>Figura 5.13: Scomposizione in settori della superficie elicoidale della coclea-</i> | 77 |
| <i>Figura 5.14: Rappresentazione delle forze applicate nel generico punto i.</i> | 78 |
| <i>Figura 5.15: Rappresentazione delle forze applicate alla coclea durante la simulazione dinamica del modello.</i> | 79 |
| <i>Figura 5.16: Andamento della potenza assorbita dalle coclee al variare della velocità di rotazione con indicazione della velocità utilizzata per lo svolgimento dell'analisi riportata nel paragrafo 5.3.2.</i> | 82 |
| <i>Figura 5.17: Andamento della potenza assorbita dalle coclee al variare del numero di rivoluzioni con indicazione della configurazione reale della coclea.</i> | 87 |

Indice delle tabelle

| | |
|---|----|
| <i>Tabella 2.1: Taglia del motore endotermico in funzione della capacità della vasca di miscelazione.</i> | 20 |
| <i>Tabella 4.1: Rendimento della trasmissione idrostatica della fresa desilatrice.</i> | 50 |
| <i>Tabella 4.2: Quote di ripartizione della potenza assorbita nelle varie fasi di lavoro del carro.</i> | 54 |
| <i>Tabella 4.3: Descrizione delle prove svolte.</i> | 55 |
| <i>Tabella 5.1: Proprietà inerziali dei corpi inseriti nel modello dinamico multibody.</i> | 64 |
| <i>Tabella 5.2: Risultati ottenuti per una coclea destra con 2,5 rivoluzioni.</i> | 72 |
| <i>Tabella 5.3: Valori dei parametri costruttivi delle coclee.</i> | 80 |
| <i>Tabella 5.4: Valori dei parametri costruttivi delle coclee mantenuti costanti.</i> | 85 |

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni la necessità di abbattere le emissioni inquinanti è diventato uno degli argomenti più discussi sia nella comunità scientifica che nelle realtà industriali. I legislatori stabiliscono annualmente regolamentazioni sempre più stringenti sui livelli di emissioni per spingere l'industria verso la realizzazione di macchine più efficienti e/o meno inquinanti.

Nel settore della meccanica agricola, le richieste che vengono fatte ai progettisti di trattori e macchine operatrici riguardano in maniera sempre crescente l'incremento sia dell'efficienza in termini di consumi che la capacità di interfacciarsi efficacemente con le diverse macchine. Sulla base di questi obiettivi, molti produttori di trattori ed attrezzature agricole hanno dapprima elevato il livello tecnologico delle macchine prodotte migliorando il rendimento energetico delle singole funzioni e installando nuovi sistemi di trattamento dei gas di scarico. Solo recentemente, si è iniziato a vagliare soluzioni architettoniche alternative investendo nell'elettrico e basandosi sui progressi svolti nel settore automotive dove sono state lanciate sul mercato le prime automobili elettriche.

Questo fermento elettrico nel mondo dell'agricoltura non coinvolge solo i maggiori produttori di macchine agricole, ma anche piccole realtà imprenditoriali che stanno sposando la conversione alle emissioni zero visto l'entrata in vigore delle nuove norme contro l'inquinamento. Inoltre, la tutela dei prodotti tipici e di qualità si realizza anche con dei veicoli più puliti.

1.1 Normative sulle emissioni inquinanti

Il problema dell'inquinamento atmosferico è tra i più preoccupanti nell'agenda politica comunitaria, a causa delle comprovate ricadute nocive sulla salute e sull'ambiente.

Trattato internazionale in materia ambientale riguardante il surriscaldamento globale, è rappresentato dal Protocollo di Kyoto, un accordo internazionale per contrastare il riscaldamento globale. Il trattato, di natura volontaria, è stato sottoscritto nel dicembre 1997 durante la Conferenza delle parti di Kyoto

(la COP3) ma è entrato in vigore solo a febbraio 2005; il Protocollo di Kyoto impegnava i Paesi sottoscrittori ad una riduzione quantitativa delle proprie emissioni di gas ad effetto serra rispetto ai propri livelli di emissione del 1990 (baseline), in percentuale diversa da Stato a Stato.

L'Unione europea è il principale sostenitore del Protocollo di Kyoto e ha dato concretezza a tale impegno con il Programma Europeo sul Cambiamento Climatico (ECCP), varando poi l'Azione per il clima, gestita da una Direzione Generale creata ad hoc e scorporata dalla Direzione Generale Ambiente. L'impegno della Comunità Europea è concretizzato tramite la Strategia "Europa 2020", che rappresenta il mezzo verso una crescita intelligente e sostenibile e si fonda su ambiziosi obiettivi riguardanti anche i cambiamenti climatici e l'energia. Relativamente a questo ultimo punto la UE ha definito come obiettivo prioritario la riduzione rispetto ai valori registrati nel 1990, del 20% delle emissioni di gas clima alteranti. Per raggiungerlo, si è proposto di utilizzare la combinazione sinergica di produzione di energia da fonti rinnovabili (+20% dei Consumi Finali Lordi nel 2020), efficienza e risparmio energetico (riduzione dei consumi rispetto ai valori attesi nel 2020 del 20%) [1].

Le regolamentazioni sempre più stringenti sulle emissioni di gas inquinanti, oltre ad interessare principalmente il settore automobilistico primo responsabile dell'inquinamento atmosferico, coinvolgono anche il campo delle macchine da lavoro. Questa categoria di veicoli incide per circa il 33% sul consumo mondiale di petrolio.

1.1.1 Macchine da lavoro

Questa categoria di veicoli (Non Road Mobile Machineries - NRMMS) raggruppa una grande varietà di macchine semoventi, usate soprattutto in applicazioni off-road. Sotto questa definizione ricadono quindi:

- macchinari per la manutenzione del verde e la movimentazione di carichi;
- macchinari per il settore edilizio;
- macchinari dedicati all'agricoltura e all'allevamento;
- motrici su rotaia e traghetti per la navigazione interna.

Attualmente, nei Paesi della Comunità Europea, la normativa in uso che regola le emissioni delle macchine mobili non stradali è lo Stage IV.

Tuttavia, a partire dal biennio 2019/2020, entrerà in vigore lo Stage V, ovvero il nuovo quadro di riferimento normativo (Regolamento (UE) 2016/1628 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 settembre 2016, relativo alle prescrizioni in materia di limiti di emissione di inquinanti gassosi e particolato inquinante e di omologazione per i motori a combustione interna destinati alle macchine mobili non stradali, e che modifica i regolamenti (UE) n. 1024/2012 e (UE) n. 167/2013 e modifica e abroga la direttiva 97/68/CE) che riscrive del tutto gli standard, andando ad abrogare le normative precedenti, inclusa la Direttiva 97/68/CE e successive modifiche e integrazioni, che hanno regolamentato i livelli emissivi antecedenti (da Stage I a Stage IV).

1.1.2 Stage V

Lo Stage V rappresenta dunque un nuovo step di emissioni stabilito dal Regolamento 1628/2016 per i motori off-road immessi sul mercato in Unione Europea e prevede l'ulteriore riduzione del Particulate Matter PM (- 40 per cento) e, per la prima volta, l'introduzione del Particulate Number PN (numero di particelle emesse). Le regolamentazioni risultano quindi porre limitazioni su: monossido di carbonio (CO), idrocarburi incombusti (HC), diverse tipologie di ossidi di azoto (NOx) e Particolato ovvero particelle/pulviscolo di varia dimensione a base di carbonio (misurato come PM – Particulate Matter ovvero in massa, e come PN – numero di particelle).

La data di applicazione della normativa Ue per l'immissione sul mercato di propulsori di ogni classe di potenza, compresi quelli con potenze inferiori ai 26 cavalli (19 chilowatt) e superiori ai 760 cavalli (560 chilowatt) finora non sottoposti a regolamentazioni, è fissata al primo gennaio 2019. L'unica eccezione riguarda i motori con potenze comprese tra 75 e 175 cavalli (56 e 130 chilowatt), per cui la data di applicazione del Regolamento è spostata al primo gennaio 2020 [2].

I valori limite specifici e le prescrizioni riguardanti le emissioni inquinanti stabiliti nel Regolamento 1628/2016 dovrebbero applicarsi anche ai propulsori per i trattori agricoli e forestali omologati in Mother Regulation MR. L'atto delegato sulle emissioni contenuto nella MR - il Regolamento 2015/96 - sarà sostituito da un nuovo atto, che probabilmente verrà pubblicato entro giugno 2018.

| | STAGE IIIB / TIER4A INTERIM | | | | STAGE IV / TIER 4B FINAL | | | | STAGE V EU COMMISSION PROPOSAL | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|------|--|---|--------------------------|------|-----------------|---|--------------------------------|------|-----------------|-------|----------------------|
| | CO | HC | NO _x | PM | CO | HC | NO _x | PM | CO | HC | NO _x | PM | PN |
| | g/kWh | | | | g/kWh | | | | g/kWh | | | | 1/kWh |
| P ≥ 560 kW ¹ | 3.5 | 0.40 | 3.5 | 0.10 | 3.5 | 0.19 | 3.5 | 0.04 | 3.5 | 0.19 | 3.5 | 0.045 | // |
| 130 ≤ P < 560 kW | 3.5 | 0.19 | 2.0 | 0.025 ^(EU) 0.02 ^(US) | 3.5 | 0.19 | 0.40 | 0.025 ^(EU) 0.02 ^(US) | 3.5 | 0.19 | 0.40 | 0.015 | 1 x 10 ¹² |
| 56 ≤ P < 130 kW | 5.0 | 0.19 | 3.3 ^(EU) 3.4 ^(US) | 0.025 ^(EU) 0.02 ^(US) | 5.0 | 0.19 | 0.40 | 0.025 ^(EU) 0.02 ^(US) | 5.0 | 0.19 | 0.40 | 0.015 | 1 x 10 ¹² |
| 37 ≤ P < 56 kW | 5.0 | 4.7 | | 0.025 ^(EU) 0.3 ^(US) | 5.0 | 4.7 | | 0.025 ^(EU) 0.3 ^(US) | 5.0 | 4.7 | | 0.015 | 1 x 10 ¹² |
| 19 ≤ P < 37 kW ² | 5.5 | 7.5 | | 0.6 | 5.5 | 4.7 | | 0.03 | 5.0 | 4.7 | | 0.015 | 1 x 10 ¹² |

Figura 1.1: Valori limite delle emissioni inquinanti.

1.2 Dispositivi di post-trattamento dei gas di scarico

La crescente attenzione ai temi ambientali, porta i costruttori di motori endotermici per applicazioni off-road a porsi come obiettivi principali la riduzione dei consumi di carburante e delle emissioni di sostanze inquinanti ed il rispetto delle normative anti-inquinamento.

L'applicazione di una stessa regolamentazione su macchine mobili con campi di applicazione molto differenti porta inevitabilmente a delle difficoltà nell'ottimizzazione dei loro sistemi di propulsione in un'ottica di emissioni inquinanti. Il differente profilo di missione, a cui uno stesso motore endotermico può essere sottoposto durante la propria vita utile, non permette di ottenere un'unica soluzione che minimizzi le emissioni e massimizzi le performance. Le regolamentazioni pongono limitazioni su più sostanze ritenute inquinanti: monossido di carbonio (CO), idrocarburi incombusti (HC), diverse tipologie di ossidi di azoto (NOx) e Particolato ovvero particelle/pulviscolo di varia dimensione a base di carbonio (misurato come PM – Particulate Matter ovvero in massa, e come PN – numero di particelle). La gestione delle emissioni di tali sostanze passa quindi da un'opportuna strategia di combustione, che talvolta va a discapito della performance, unita all'uso di particolari sistemi atti al condizionamento dei gas di scarico.

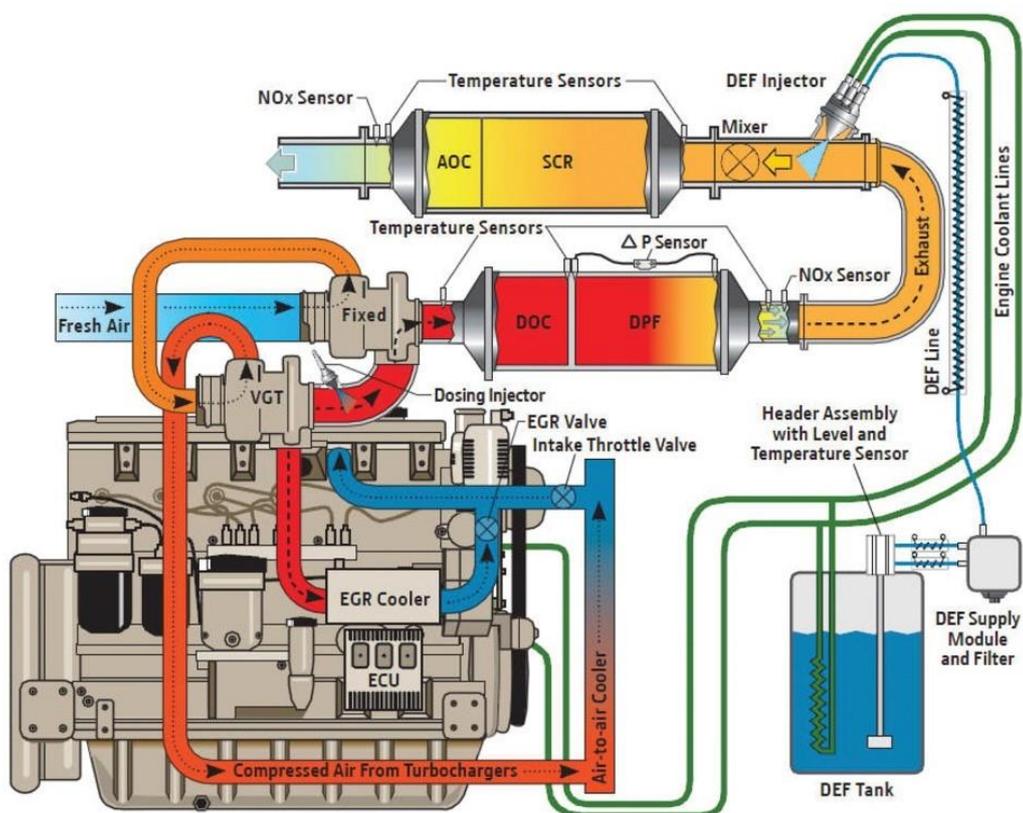


Figura 1.2: Sistema integrato di post-trattamento dei gas di scarico.

Nel caso di propulsori Diesel, il principale strumento per la gestione delle emissioni di CO e HC è il DOC (Diesel Oxidation Catalysts) che converte idrocarburi e monossido di carbonio principalmente in anidride carbonica, vapore acqueo e, in maniera indiretta, acido solforico in forma gassosa.

Invece, le principali tecnologie adottate per limitare le emissioni di NOx sono: sistemi di intrappolamento (LNT – Lean NOx Trap), sistemi di ricircolo dei gas di scarico (EGR – Exhaust Gas Recirculation) e sistemi di riduzione catalitica selettiva (SCR – Selective Catalytic Reduction). Gli LNT sono sistemi che stoccano ossidi di azoto in certe condizioni operative del motore, nelle quali vi è un'alta

produzione di tali sostanze, per rilasciarle in condizioni operative a basso tasso di produzione. I sistemi EGR reimmettono in camera di combustione i gas di scarico per aumentare la temperatura di combustione e al tempo stesso diminuire la percentuale di ossigeno presente in camera in fase di combustione. I sistemi SCR consentono di realizzare delle reazioni chimiche aggiungendo una sostanza riducente (ammoniaca o urea) per catturare l'ossigeno presente (sottraendolo a reazioni chimiche indesiderate) e convertire NO_x in azoto e vapore acqueo.

Infine, per il trattamento del particolato, ovvero l'insieme di particelle prodotte dalla combustione che rimangono in sospensione nell'aria, la principale tecnica di abbattimento consiste nell'uso di filtri antiparticolato (DPF Diesel Particulate Filter o FAP) che intrappolano le particelle a base di carbonio presenti nei gas di scarico [3].

1.2.1 DOC

Il catalizzatore di ossidazione diesel (DOC) promuove una serie di reazioni di ossidazione che impiegano l'ossigeno, ampiamente disponibile negli scarichi diesel in tutte le condizioni operative del motore. Queste reazioni convertono tutti i componenti di emissione di carattere chimicamente riducente, come CO, HC e i derivati di HC, in prodotti innocui quali anidride carbonica (CO₂) e vapore acqueo (H₂O).

A temperature di scarico sufficientemente elevate, i catalizzatori di ossidazione diesel consentono un controllo molto efficace delle emissioni di HC e CO, con un'efficienza di riduzione superiore al 90%. L'attività idrocarburica DOC comprende anche composti come gli idrocarburi aromatici polinucleati e la frazione solubile dei particolati diesel (SOF). L'ossidazione catalitica di SOF, derivante da combustibile incombusto e olio degradato, consente una riduzione delle emissioni di PM diesel. L'efficienza di conversione del PM è solitamente tra il 15 e il 30%. I DOC possono anche essere efficaci nel controllare l'odore di diesel.

Il corpo del convertitore è costituito da una struttura a nido d'ape in ceramica o metallo in cui il gas di scarico viene convogliato attraverso molti piccoli canali paralleli. Tale struttura a nido d'ape (carrier) consente un'elevata superficie di contatto catalitico per lo scarico dei gas. Le pareti interne dei canali sono ricoperte da un rivestimento catalitico costituito da un metallo nobile attivo, generalmente platino, in grado adsorbire l'ossigeno. Quando i componenti dei gas di scarico, CO e idrocarburi, attraversano il corpo del convertitore, si diffondono su questo strato e reagiscono con l'ossigeno legato. I prodotti di reazioni, CO₂ e vapore acqueo, desorbono dal sito catalitico e si diffondono nella maggior parte dei gas di scarico.

Nonostante queste vantaggiose funzioni, il DOC promuove l'ossidazione di tutti i composti di carattere riducente e perciò alcune delle reazioni di ossidazione possono produrre prodotti indesiderati risultando controproducenti allo scopo del catalizzatore. In particolare, il processo chimico più sgradito è l'ossidazione del biossido di zolfo nel triossido di zolfo con la successiva formazione di acido solforico (H₂SO₄). Quando i gas di scarico vengono scaricati dal tubo di scappamento e miscelati con l'aria,

nell'ambiente o nel tunnel di diluizione utilizzato per il campionamento del particolato, la loro temperatura diminuisce. In tali condizioni, l' H_2SO_4 gassoso si combina con le molecole d'acqua formando particelle (liquide) composte di acido solforico idratato. Questo materiale, chiamato particolato di solfato, contribuisce al totale delle emissioni di particolato dal motore. La formazione catalitica di solfati, specialmente in combinazione con gasolio ad alto contenuto di zolfo, può aumentare significativamente le emissioni totali di PM e diventare quindi proibitivo per l'applicazione del catalizzatore. Allo scopo di sopprimere l'ossidazione indesiderata dei composti dello zolfo, i catalizzatori attuali giungono normalmente ad un compromesso utilizzando formulazioni di ridotta attività catalitica [4].

In aggiunta, nei moderni sistemi di post-trattamento diesel, un'ulteriore importante funzione del DOC è quella di ossidare l'ossido nitrico (NO) in biossido di azoto (NO_2), un gas necessario per supportare le prestazioni dei filtri antiparticolato diesel e dei catalizzatori SCR utilizzati per la riduzione degli NOx.

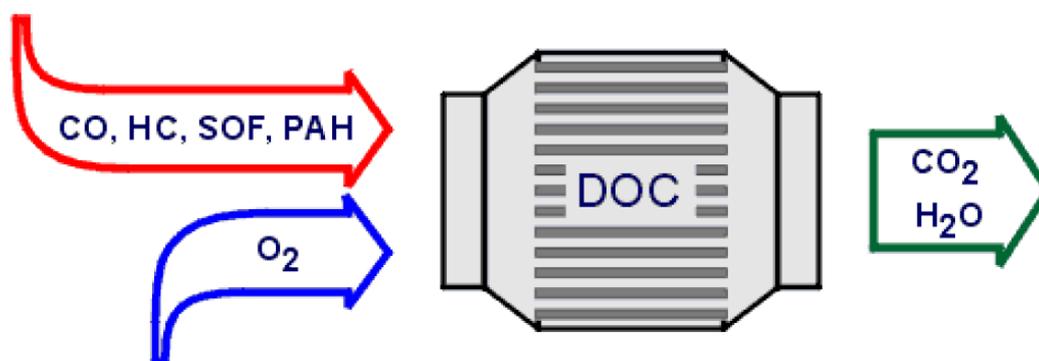


Figura 1.3: Rappresentazione schematica delle reazioni chimiche di un DOC.

1.2.2 DPF

I filtri antiparticolato diesel (DPF) sono dispositivi che catturano fisicamente le particelle di particolato diesel impedendo il loro rilascio nell'atmosfera. Si sono sviluppati materiali che mostrano una notevole efficienza di filtrazione, superiore al 90%, oltre a una buona durata meccanica e termica. I DPF sono diventati la tecnologia più efficace per il controllo delle emissioni di particolato diesel, in termini di massa (PM) e numero di particelle (PN).

Il substrato dei sistemi di filtraggio può essere costituito da molti differenti materiali e avere diverse composizioni. La struttura più comune per un DPF diesel è il monolite a parete, anche se si sono sviluppati numerosi altri design che prevedono l'impiego di materiali di filtro alternativi. In questa categoria rientrano, ad esempio, cartucce in fibra di ceramica, vari tipi di schiume ceramiche e materiali metallici, come feltri di fibre metalliche e strutture metalliche sinterizzate.

Il filtro a parete è composto da numerosi piccoli canali paralleli che attraversano assialmente il componente. I canali adiacenti sono alternativamente collegati a ciascuna estremità per forzare il flusso

dei gas di scarico diesel attraverso le pareti porose del substrato tra i canali. Queste pareti svolgono quindi la funzione di filtro meccanico [5].

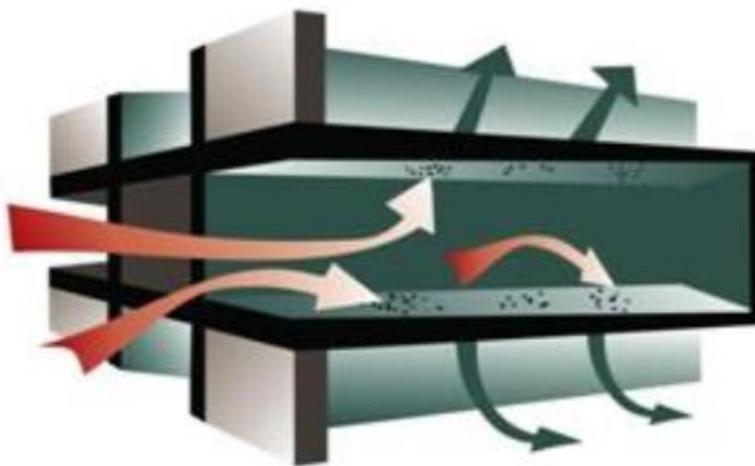


Figura 1.4: Rappresentazione del flusso attraverso le pareti del monolite.

I monoliti a flusso di parete sono caratterizzati da elevate efficienze di filtrazione, dal 70 al 95% del PM totale; tuttavia, la struttura a monolite presenta lo svantaggio di causare una caduta di pressione relativamente elevata. Mentre la frazione solida di PM (fuliggine) si accumula sulle pareti del canale, la caduta di pressione attraverso il filtro aumenta, portando ad una maggiore contropressione allo scarico del motore che ne compromette il consumo di carburante. La rimozione di questa fuliggine diventa essenziale per garantire un corretto funzionamento del sistema filtrante ed è per questo motivo che si effettua una rigenerazione del filtro. Essa può essere eseguita in modo continuo, durante il normale funzionamento o periodicamente, dopo che è stata accumulata una certa quantità di pulviscolo. Generalmente, nei DFP diesel si esegue una rigenerazione termica, dove i particolati raccolti vengono ossidati e trasformati quindi in prodotti gassosi innocui, come l'anidride carbonica.

L'ossidazione del carbonio nella fuliggine può avvenire tramite reazioni chimiche con O_2 e/o NO_2 . L'ossigeno O_2 è presente nei gas di scarico in concentrazioni sufficienti praticamente in tutte le condizioni operative del motore. Tuttavia, sono necessarie temperature relativamente elevate ($600\text{ }^\circ\text{C}$) per ottenere tassi di rigenerazione apprezzabili utilizzando come agente ossidante O_2 . Pertanto, questa tipologia di rigenerazione si impiega principalmente nei sistemi DPF attivi, dove il raggiungimento della temperatura di combustione è garantito da riscaldatori elettrici o combustioni del combustibile nei sistemi di scarico. La rigenerazione di tali dispositivi viene di solito effettuata periodicamente, come determinato dal sistema di controllo del veicolo.

Invece, il biossido di azoto NO_2 contiene molecole di ossigeno con un potere ossidante maggiore rispetto a quello della molecola di O_2 stessa, consentendo di effettuare la rigenerazione del filtro a temperature notevolmente inferiori. Utilizzando come agente ossidante NO_2 , si garantisce quindi che la temperatura dei gas di scarico sia idonea per la rigenerazione. Sulla base di questo principio, si realizzano DPF

passivi in grado di auto-mantenersi durante il funzionamento della macchina in quanto non risulta necessario applicare energia esterna per la combustione della fuliggine. La concentrazione di NO₂ nei gas di scarico nativi del gasolio è molto bassa, ma si può facilmente incrementare utilizzando un DOC specializzato nella produzione di NO₂ o altri metodi.

Per via dei meccanismi di deposizione delle particelle adottati, i DPF risultano efficaci solamente nel controllare la frazione solida dei particolati diesel, tra cui fuliggine e la relativa emissione di fumo nero, mentre presentano un'efficacia limitata o totalmente assente nel controllare le frazioni non solide delle emissioni di PM, ovvero la frazione organica (OF) e il particolato di solfato. Per controllare le emissioni totali di PM, i sistemi DPF incorporano quindi componenti funzionali aggiuntivi destinati ad ossidare la frazione organica OF; invece, per regolare il particolato di solfato si richiede l'utilizzo di combustibili a basso tenore di zolfo [6].

1.2.3 EGR

Il ricircolo dei gas di scarico (EGR) è una tecnologia di controllo delle emissioni che consente di ridurre significativamente la quantità di NO_x prodotta dalla maggior parte dei motori diesel.

Una parte dei gas di scarico viene fatta ricircolare nella camera di combustione; ciò viene realizzato internamente al motore tramite una corretta fasatura della valvola, oppure nella maggiore parte dei casi esternamente mediante un condotto. Il gas di scarico diluisce l'O₂ presente nella corrente d'aria in entrata al motore comportandosi come un gas inerte che non partecipa alla reazione di combustione. Le molecole di combustibile necessitano quindi di più tempo per trovare molecole di ossigeno con cui reagire. Questo comporta un rallentamento della velocità di combustione e una conseguente riduzione della temperatura massima in camera. Inoltre, CO₂ e H₂O (costituenti i gas di scarico) hanno una maggiore capacità termica e quindi, a parità di energia sprigionata dalla combustione, una massa gassosa contenente gas di scarico inerti presenta una temperatura inferiore a quella dell'aria pura. Il ricircolo dei gas di scarico, abbassando la temperatura di combustione, riduce dunque la formazione di NO_x, in quanto la velocità di formazione di queste molecole nocive dipende fortemente dalla temperatura.

Il gas in ricircolo può anche essere fatto passare attraverso un refrigeratore (intercooler), solitamente del tipo aria/acqua. Ciò riduce la temperatura del gas e di conseguenza ne aumenta la densità consentendo di utilizzare una percentuale più elevata di EGR. Su un motore diesel la frazione ricircolata può raggiungere anche il 50% in alcune condizioni operative [7].

Tuttavia, la riduzione delle emissioni di NO_x provocata da un dispositivo EGR ha un costo; infatti, è anche necessario l'impiego di altre misure per evitare aumenti inaccettabili del consumo di carburante, emissioni di PM, HC e CO, usura del motore e riduzione della durata del motore. Per affrontare questi compromessi nelle applicazioni dei motori diesel commerciali, i produttori di motori hanno dovuto adottare simultaneamente una serie di altri cambiamenti tecnologici come:

- riduzione del consumo di olio lubrificante;
- aumento della pressione di iniezione del carburante;

- maggiore uso di catalizzatori ossidanti diesel;
- aumento della pressione di sovralimentazione del collettore di aspirazione.

Per rispettare limiti più rigidi di emissione di NO_x, potrebbe essere necessario utilizzare un sistema EGR in combinazione con catalizzatori di riduzione di NO_x.

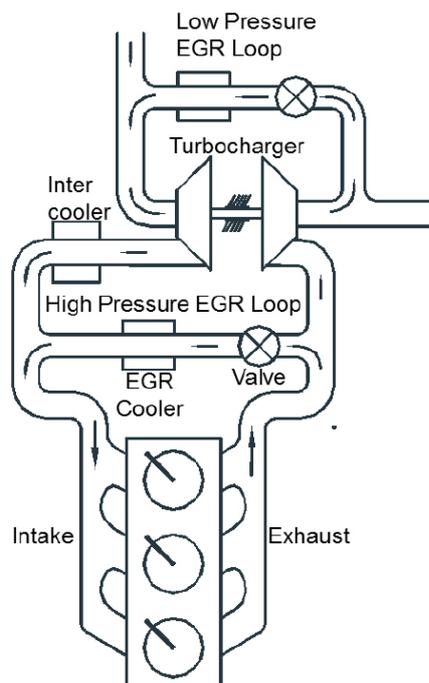


Figura 1.5: Tipica configurazione di un sistema EGR esterno.

1.2.4 SCR

La riduzione catalitica selettiva (SCR) rappresenta la tecnologia più appropriata per ridurre le emissioni di NO_x dei motori endotermici.

Il processo SCR riduce chimicamente le molecole di NO_x in azoto molecolare e vapore acqueo. Un reagente a base di azoto, come ammoniaca o urea, viene iniettato nel condotto di scarico a valle dell'unità di combustione. Il gas di scarico si mescola con l'agente riducente ed entra in un modulo contenente il catalizzatore. La miscela composta dai due elementi si diffonde attraverso la superficie porosa del catalizzatore. Qui, entro un intervallo di temperatura ben determinato e in presenza di ossigeno, l'agente a base di azoto viene attivato reagendo selettivamente con i composti NO_x e riducendoli a sostanze gassose innocue, quali N₂ e vapore acqueo.

Nei motori diesel per applicazioni veicolistiche, il riducente utilizzato per la reazione chimica è un prodotto specifico, l'AdBlue, una soluzione contenente circa il 27% di urea e il 73% di acqua demineralizzata. Questo liquido viene stoccato all'interno di un apposito serbatoio installato sui veicoli

e iniettato gradualmente nel condotto di scarico tramite un gruppo di pompaggio comandato elettronicamente da una centralina.

La temperatura, la quantità di agente riducente, la struttura della griglia di iniezione e l'attività svolta dal catalizzatore sono i principali fattori che determinano l'efficienza di rimozione delle sostanze inquinanti. L'impiego di un catalizzatore comporta due vantaggi principali: una maggiore efficienza nel controllo degli NOx e la possibilità di far avvenire le reazioni di riduzione in un intervallo di temperatura più basso e più ampio. Il catalizzatore è composto da metalli attivi o ceramiche e presenta una struttura altamente porosa. Le configurazioni adottate nella realizzazione dei catalizzatori sono generalmente due: a nido d'ape in ceramica o a placca metallica piegata (monolite).

Il processo SCR può essere compromesso se il catalizzatore viene disattivato da:

- avvelenamento di siti attivi da parte di gas costituenti;
- sinterizzazione termica di siti attivi a causa di alte temperature all'interno del reattore;
- accecamento, intasamento, incrostazione di siti attivi da sali di solfato di ammonio e particolato;
- erosione dovuta a velocità del gas elevate.

Man mano che l'attività del catalizzatore viene compromessa, la rimozione di NOx diminuisce e lo scorrimento/slittamento dell'ammoniaca, ovvero il rilascio indesiderato in atmosfera, aumenta. Quando lo slittamento dell'ammoniaca raggiunge il livello massimo consentito, è necessario sostituire il catalizzatore [8].

Ci sono diverse posizioni a valle dell'unità di combustione dove possono essere installati i sistemi SCR. La maggior parte delle applicazioni colloca il reattore a valle dei dispositivi di controllo del particolato. Il gas di combustione in questa posizione è solitamente all'interno della finestra di temperatura ottimale per le reazioni di riduzione degli NOx impiegando catalizzatori di ossidi metallici.

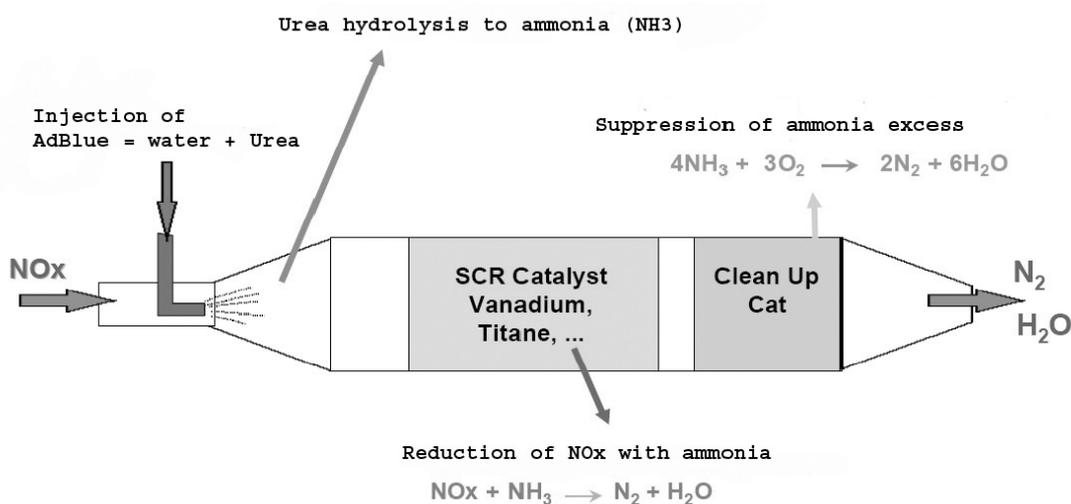


Figura 1.6: Rappresentazione delle reazioni coinvolte nel fenomeno di catalisi selettiva.

1.3 Elettificazione in agricoltura

Negli ultimi anni, sono stati dedicati notevoli sforzi per ridurre il consumo energetico delle macchine agricole senza comprometterne funzionalità e prestazioni, tenendo conto delle restrizioni imposte dalle recenti normative sulle emissioni. Le calibrazioni del motore sono state ottimizzate per ridurre gli inquinanti allo scarico in conformità con i livelli di emissione imposti dall’Agenzia per la protezione dell’ambiente degli Stati Uniti. Ciò è stato ottenuto attraverso l’aggiunta di sistemi di post-trattamento dei gas di scarico, tra i quali l’adozione di un fluido di scarico diesel per catalizzare sostanze inquinanti nel sistema (ad es. Urea).

Lo scenario delineato fa capire come il rispetto delle regolamentazioni sui gas di scarico comporti, per i produttori di macchinari da lavoro, grossi sforzi dal punto di vista progettuale per l’integrazione sul veicolo di tutti quei sistemi necessari per il trattamento di tali gas. La mancata ottemperanza di tali vincoli impedirebbe l’immissione sul mercato del macchinario. L’uso di questi sistemi anti-inquinamento, però, è diventato a livello macchina sempre più invasivo man mano che le regolamentazioni sono diventate più stringenti: la dimensione cresce più che proporzionalmente rispetto alla diminuzione dei valori ammessi. Per questo motivo, recentemente, i produttori di tali macchine hanno cominciato a considerare soluzioni alternative all’uso massiccio di sistemi di post trattamento dei gas di scarico prevedendo l’impiego di architetture ibride ed elettriche.

Gli sviluppi svolti nel campo dell’elettronica di potenza e in particolare nella tecnologia delle batterie a base di litio hanno superato la maggior parte delle sfide tecniche. Oggigiorno, i propulsori elettrici offrono prestazioni almeno altrettanto buone dei propulsori convenzionali, e sono intrinsecamente più efficienti dal punto di vista energetico e privi di emissioni nelle loro operazioni. In alcune applicazioni della macchina, di solito in mezzi con carichi gravosi, un propulsore elettrico è l’unica opzione adatta a causa dell’elevata richiesta di coppia del sistema trasmissivo e dei requisiti di controllabilità. Nelle macchine agricole, i sistemi elettrici potrebbero anche migliorare la manovrabilità e aumentare la precisione del controllo. Per il momento, i propulsori elettrici non sono ancora stati adottati su larga scala nei macchinari mobili, ma i recenti sviluppi tecnologici indicano che molte macchine tipiche possono trarre vantaggio dall’uso dell’elettricità come forza di trazione e elettificazione di sistemi ausiliari [9].

1.3.1 Soluzioni full-electric

Al giorno d’oggi, la sfida che il settore agricolo deve affrontare per rendere le aziende sempre più virtuose è sviluppare sistemi sostenibili non inquinanti attraverso l’adozione di strumenti green in grado di garantire la produzione senza danneggiare l’ecosistema. Per questo motivo, ultimamente, l’attenzione si sta focalizzando, sia in ambito industriale che in ambito scientifico, sul ruolo fondamentale dei trattori (e dei macchinari) elettrificati. Questo tipo di macchinari sta segnando un’alternativa ai tradizionali

mezzi da lavoro e rivoluzionerà nel prossimo futuro il comparto agricolo, facendolo arrivare ad una totale autonomia energetica nel rispetto dell'ambiente.

I principi tecnologici, sui quali si basano le architetture di tali macchinari innovativi, sono abbastanza semplici. I veicoli semoventi messi a punto sono forniti di un motore elettrico che sfrutta l'energia immagazzinata in un sistema di accumulo costituito da batterie ricaricabili. Inoltre, durante la fase di frenata, il motore del trattore elettrico produce energia trasformandosi in una dinamo e la invia alle batterie che traiano il mezzo: in questo modo non si spreca energia, anzi si crea un circolo attraverso il quale il calore dei freni va ad alimentare il motore.

I vantaggi introdotti dall'elettricità

I vantaggi derivanti dall'utilizzo di una macchina totalmente elettrica sono evidenti. Tra tutti emerge la possibilità di ridurre i consumi energetici in una prospettiva di risparmio e salvaguardia dell'ambiente che, a causa delle emissioni prodotte dai vecchi sistemi di produzione, è notevolmente compromesso. Seguendo questa direzione, l'impiego di architetture full-electric nei mezzi agricoli permette di:

- abbassare l'inquinamento acustico;
- mantenere una buona qualità dell'aria, grazie al fatto che questi macchinari non emettono gas di scarico;
- diminuire la massa dei veicoli;
- associare questa tecnologia allo sviluppo di impianti fotovoltaici, eolici e a biogas.

L'elettificazione delle macchine operatrici offre dunque prospettive molto interessanti soprattutto per produzioni biologiche, per colture in serra o per piante officinali per le quali sarebbe ottimale utilizzare mezzi a emissioni zero. Nel giardinaggio e nella cura del verde i mezzi alimentati a batteria, quali ad esempio i tagliaerba o le motoseghe, stanno avendo un forte successo di mercato ed incrementano di anno in anno la propria percentuale sul totale delle macchine vendute, pur coprendo una quota ancora limitata. Più lento, invece, è il processo per quanto riguarda le macchine agricole tradizionali, e soprattutto quelle più potenti che debbono operare in pieno campo necessitando di autonomie di funzionamento elevate.

Criticità e problematiche dei mezzi elettrici

La potenza richiesta da una macchina agricola tradizionale, come ad esempio una trattore, è molto elevata e le batterie elettriche debbono garantire performance paragonabili a quelle dei motori a combustione interna, cosa tecnicamente raggiungibile solamente per un breve lasso di tempo. Infatti, il limite dal punto di vista tecnologico risiede nella quantità di energia che è possibile immagazzinare a

bordo dipendente dalla densità di energia specifica dei sistemi di accumulo impiegati. Attualmente, nessuna tipologia di batteria riesce ad avvicinarsi alle potenzialità dei combustibili di origine fossile.

Al fine di fornire un paragone, si può affermare che da 1 kg di gasolio è possibile ricavare in condizioni ideali circa 45 MJ; tenendo conto del rendimento reale di un moderno motore Diesel (prudenzialmente stimato nel 33%), significa poter disporre di 15 MJ di energia meccanica per ogni kg di gasolio. Diversamente, 1 kg delle batterie al litio più moderne (di tipo commerciale) possono offrire solo 0,2 MJ. I prototipi più evoluti (al litio solfuro) promettono di raggiungere quasi 1,5 MJ/kg, mentre quelli al litio e cloruro di tionile i 2,5 MJ/kg. Pur ipotizzando motori elettrici e centraline di controllo efficientissimi, che assicurano rendimenti di conversione in energia meccanica superiori al 90%, rimane evidente l'enorme disparità, ovvero che ci si trova di fronte a due ordini di grandezza differenti. Inoltre, un altro aspetto tecnico da considerare è la durata delle batterie; infatti, dopo un certo numero di cicli di ricarica (si stima il tempo di circa 4-5 anni di lavoro di un trattore) esse si deteriorano e devono essere sostituite.

Ulteriore problematica da risolvere è il costo piuttosto elevato delle attuali batterie al litio, nonostante la previsione di una loro drastica riduzione di prezzo; entro i prossimi 10 anni si prevede una diminuzione dagli attuali 600 dollari/kWh fino a 150 dollari/kWh. In ogni caso, considerando le agevolazioni fiscali riservate ai combustibili destinati all'uso agricolo, la competitività economica delle batterie in ambito agricolo si verificherà ben più tardi rispetto al settore automobilistico.

Allo stato attuale, alcune importanti case costruttrici hanno già messo in campo modelli elettrici che sono frutto di sperimentazioni avanzate e che promettono sviluppi significativi, ma complessivamente la strada appare ancora lunga e impegnativa.

Applicazioni attuali

Attualmente, le soluzioni commercialmente già disponibili relative a veicoli totalmente elettrici in agricoltura sono limitate a macchine (per lo più operatrici) che devono funzionare anche per lunghi periodi, ma con assorbimenti di potenza limitati, o all'opposto a mezzi che, pur avendo la necessità di utilizzare potenze piuttosto ingenti, sono chiamati ad operare per tempi piuttosto brevi.

Appartengono alla prima categoria, ad esempio, i carri agevolatori per la raccolta della frutta e per le potature in vigneto e frutteto, gli ATV (All Terrain Vehicle, anche conosciuti come "Quad") a batteria di ridotta potenza, e alcuni piccoli robot semoventi per lo sfalcio dell'erba, sia nella manutenzione del verde che nell'interfila dei vigneti e dei frutteti, in qualche caso addirittura integrati con pannelli fotovoltaici per aumentare l'autonomia della macchina.

Nella seconda categoria si possono citare alcuni sollevatori telescopici o i più comuni carrelli elevatori, ma anche il nuovo ed efficiente carro trincia-miscelatore semovente *Electra 21* prodotto dalla Supertino S.r.l. Si tratta di una macchina con cassone da 21 m³ e con due coclee verticali per la trinciatura e la miscelazione, che garantisce un paio d'ore di operatività e necessita di tempi di ricarica di circa 4-5 ore. Le caratteristiche di questa macchina rappresentano una soluzione più che congrua per gli allevamenti

di dimensioni medio-grandi; nella gestione risulta essere più economica rispetto ad un analogo modello convenzionale munito di motore endotermico.

Per quanto riguarda le trattrici full-electric, ad oggi si osservano prototipi realizzati dalle case produttrici più grandi a livello mondiale: il *SESAM* di John Deere e l'*e100 Vario* di Fendt.

1.3.2 Soluzioni ibride

Le soluzioni basate su sistemi propulsivi completamente elettrici, a zero emissioni, non garantiscono ancora l'autonomia delle macchine tradizionali. Il passaggio intermedio tra queste e le soluzioni tradizionali è rappresentato dai sistemi ibridi di tipo elettrico. Esistono già una serie di prototipi sui quali al classico propulsore diesel è affiancato un motore/generatore elettrico, in grado di fornire un surplus di potenza nei momenti di necessità. Al contrario, nei periodi in cui il carico resistente è basso, una parte della potenza erogata dal motore endotermico viene trasformata in energia elettrica dal motore/generatore e immagazzinata nelle batterie a bordo macchina. In questi casi, come sulle comuni autovetture ibride, quando si ha necessità di una bassa potenza per brevi periodi è sufficiente l'energia stoccata nelle batterie, senza dover avviare il motore endotermico.

I vantaggi degli ibridi sono molteplici: in primis consumano meno combustibile tradizionale, poiché sfruttano il motore endotermico solo in condizioni di rendimento ottimale (ovvero a coppia elevata); inoltre, consentono una riduzione della cilindrata del motore a combustione interna, perché eventuali picchi di richiesta di potenza per brevi periodi possono essere soddisfatti dalla componente elettrica.

In questo ambito, già dalla fine del 2013 l'azienda italiana Merlo propone il *TurboFarmer 40.7 Hybrid*, un sollevatore telescopico ibrido con propulsore diesel da 56 kW affiancato da un motore elettrico alimentato tramite batterie al litio della capacità di 30 kWh, che consente tra l'altro alla macchina di lavorare anche solo in modalità full electric.

Anche la trazione (che è in definitiva il ruolo fondamentale del trattore agricolo) si avvale di soluzioni tecniche miste diesel-elettriche: si tratta di utilizzare il motore endotermico per azionare un generatore elettrico, che provvede poi a fornire ai vari motori elettrici (collocati spesso direttamente sulle ruote e in corrispondenza della presa di potenza) la corrente necessaria per azionarli.

Oltre ad avere una fluidità di funzionamento, si ottiene anche un rendimento paragonabile a quello delle più semplici trasmissioni idrauliche. Ulteriori vantaggi potrebbero risiedere nel controllo individuale di ogni ruota (con minori slittamenti localizzati) con un conseguente maggior rispetto del soprassuolo (specie nelle manovre in capezzagna), mentre le componenti meccaniche sarebbero alquanto semplificate (i differenziali ad esempio non sarebbero più necessari). Una soluzione intermedia tra quelle illustrate la sta perseguendo da anni uno dei più importanti costruttori a livello mondiale (Fendt), che sta sperimentando una trasmissione a variazione continua dove la componente idraulica viene sostituita con una elettrica, a beneficio di un notevole incremento del rendimento di trasmissione.

CAPITOLO 2

IL CARRO TRINCIA MISCELATORE TRADIZIONALE

In questo capitolo verrà illustrata l'architettura di un carro trincia miscelatore comune, esplicando le funzioni a cui deve assolvere ed elencando le varie tipologie presenti ad oggi sul mercato. In particolare, si evidenzierà che la fonte di energia principale della macchina è il motore diesel, il quale mette in moto gli organi della macchina o tramite collegamenti meccanici diretti o tramite trasmissioni idrauliche.

2.1 Classificazione generale

I carri trincia-miscelatori sono macchine agricole in grado di effettuare la trinciatura, lo sminuzzamento, la miscelazione e la distribuzione in mangiatoia dei prodotti impiegati per l'alimentazione animale (quali ad esempio foraggi, paglia, insilati, mangimi, ecc.).

Queste macchine sono normalmente utilizzate negli allevamenti di bovini da ingrasso o di mucche da latte per la preparazione delle razioni alimentari unifeed (a piatto unico), ma possono essere anche utilizzate in allevamenti avicoli e suinicoli.

Si dividono in due grandi categorie a seconda della loro capacità di desilare e caricare i componenti della razione, di miscelare i prodotti o di fare entrambe le funzioni:

- carri miscelatori;
- carri trincia-miscelatori.

Queste macchine possono essere di tipo trainato o semoventi: nel primo caso sono collegate al gancio di traino della trattrice ed azionate dalla presa di potenza (PTO) che tramite l'albero cardanico ed il sistema cinematico di trasmissione permette la movimentazione degli organi lavoratori; nel secondo caso sono azionate autonomamente tramite un motore endotermico e relativi sistemi di trasmissione del

moto di tipo idraulico e/o meccanico e sono munite di una cabina di guida chiusa. In quelle semoventi l'operatore lavora con ottima visibilità all'interno della cabina che è perfettamente di fronte alla linea di taglio in quanto la macchina lavora in avanti, mentre in quelle trainate l'operatore lavora all'interno della cabina del trattore, dove si portano generalmente i comandi ed esegue le lavorazioni in retromarcia con l'ausilio di specchi o telecamere.

Talvolta l'operatore esegue alcune operazioni da terra (comandi, attivazione di organi, operazioni di collegamento) tramite l'utilizzo di apposite pulsantiere.

Tutti i sistemi hanno comunque la funzione di miscelare il prodotto e, contemporaneamente, quella di ridurre la lunghezza ed il volume, in modo da aumentare la digeribilità [10].

2.1.1 Carri miscelatori

I carri miscelatori sono macchine atte solamente alla miscelazione degli elementi costituenti la razione alimentare degli animali e possono essere di tipo trainato o semoventi.

Sono formati da un cassone contenente coclee orizzontali o verticali (generalmente variabili per le prime da 1 a 4 e per le seconde da 1 a 3) in grado di miscelare i prodotti che vi sono immessi e di scaricarli direttamente nella mangiatoia della stalla.

I carri miscelatori, non essendo equipaggiati di un proprio sistema di caricamento dei prodotti, richiedono l'impiego di attrezzature di carico disponibili in azienda quali: caricatori idraulici, caricatori frontali, estrattori da silos a torre o desilatori-caricatori semoventi o trainati. L'utilizzo di trinciatori separati comporta perdite di sostanza secca e peggiora le condizioni di lavoro (aumento delle polveri). Nella parte posteriore del cassone è prevista solitamente una piccola apertura per il caricamento manuale di prodotti sfusi. La distribuzione della razione avviene, in genere, mediante nastro di scarico, costituito da un tappeto mobile unilaterale o bilaterale in gomma o a catene.



Figura 2.1: Desilatore-caricatore semovente.

2.1.2 Carri trincia-miscelatori

I carri trincia-miscelatori derivano dall'evoluzione dei carri miscelatori dai quali sostanzialmente si differenziano per essere equipaggiati con:

- organi capaci di tritare prodotti a fibra lunga (foraggi ed insilati) miscelandoli contemporaneamente in modo omogeneo agli altri componenti della razione;
- sistema di pesatura costituito da celle di carico per il dosaggio degli ingredienti. Esternamente al cassone, di solito nella parte anteriore di una macchina trainata o in cabina nel caso di una macchina semovente, è presente l'indicatore di pesatura del prodotto.

I carri trincia-miscelatori possono essere anch'essi di tipo orizzontale e verticale, trainati o semoventi e, oltre alle operazioni effettuabili con i semplici miscelatori, sono in grado anche di caricare il prodotto direttamente dalla trincea tramite la fresa di carico. Il prodotto (es.: silomais, insilato di foraggio, ecc.) viene fresato da un apparato trinciante costituito da uno o più cilindri porta-coltelli posizionato/i all'estremità di un braccio elevabile e convogliato tramite un nastro trasportatore all'interno del cassone. Nei carri trincia-miscelatori le coclee sono solitamente munite di coltelli che eseguono la trinciatura del materiale, soprattutto paglia e fieno, grazie anche alla presenza sul fondo e sui lati del cassone di apposite controlame.

Come già accennato in precedenza, si possono distinguere tre tipologie principali in base alla forma e disposizione degli organi di miscelazione:

- *carri con una o più coclee orizzontali*: gli organi di lavoro sono in numero variabile da 1 a 4, di diversa lunghezza, disposte in varie posizioni del cassone, controrotanti o meno, alcune delle quali dotate di dispositivi per la trinciatura (coltelli);
- *carri con una o più coclee verticali*: gli organi di lavoro sono in numero variabile da 1 a 3, di uguale lunghezza, disposte lungo la direzione dell'asse maggiore della pianta del cassone, controrotanti o meno, alcune delle quali dotate di dispositivi per la trinciatura (coltelli);
- *carri cilindrici a botte rotante*: all'interno di un cilindro rotante, disposto obliquamente, è presente un sistema di miscelazione a pale.

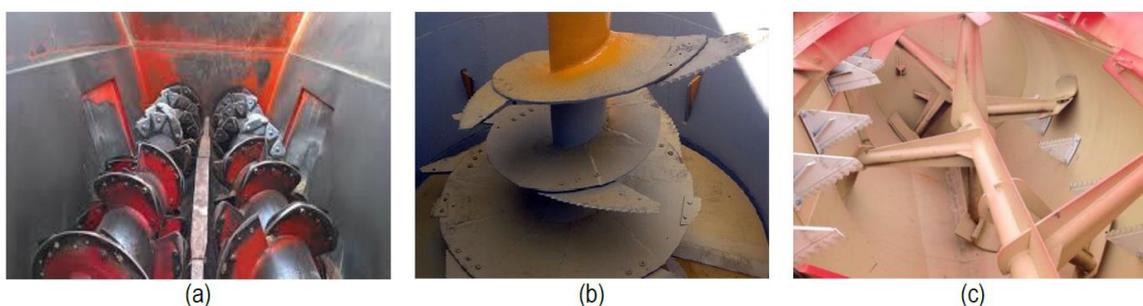


Figura 2.2: Organi per la miscelazione nei carri miscelatori: (a) coclee ad asse orizzontale; (b) coclee ad asse verticale; (c) miscelazione a pale.

Carri con coclee orizzontali

- Le coclee inferiori ruotano in senso opposto rispetto alle coclee superiori. In particolare, le coclee inferiori trasportano il materiale verso la parte anteriore del miscelatore, mentre le coclee superiori trasportano il materiale verso la parte posteriore.
- La convergenza di materiale verso la parte anteriore del miscelatore spinge il materiale stesso verso l'alto; qui viene trasportato nella parte posteriore dalle coclee superiori.
- L'azione degli organi di miscelazione crea un moto ciclico "avanti e indietro" e "sopra e sotto" che miscela il materiale.

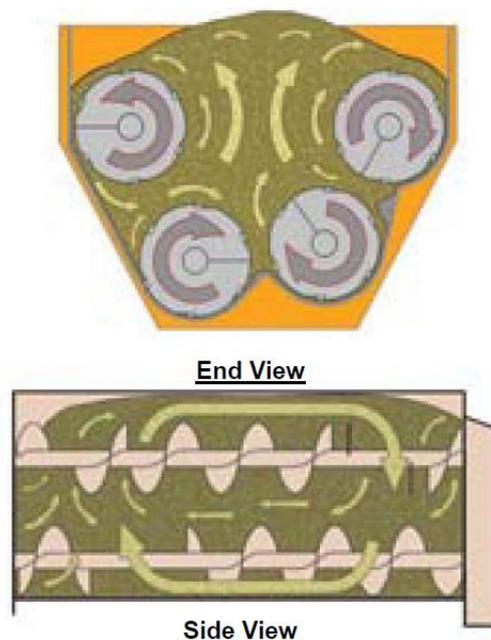


Figura 2.3: Rappresentazione del flusso di miscelazione con coclee orizzontali.

Carri con coclee verticali

- La miscelazione del materiale è effettuata da una, due o tre coclee verticali.
- Le coclee raccolgono e sollevano il materiale verticalmente, creando così un ciclo di miscelazione "sopra e sotto".
- La rotazione delle coclee sposta il materiale tra la parte anteriore e quella posteriore del miscelatore.
- La camera di miscelazione è aperta e consente l'elaborazione di "rotoballe" di fieno intero.

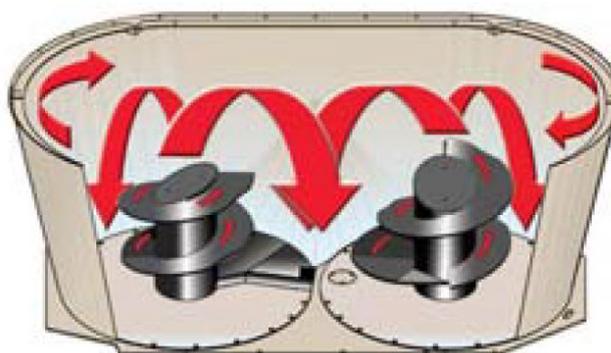


Figura 2.4: Rappresentazione del flusso di miscelazione con coclee verticali.

Carri cilindrici a botte rotante

- Il materiale viene miscelato tramite pale posizionate sulla superficie esterna di una struttura cilindrica cava. Questa, ruotando lentamente, solleva il materiale verso due coclee orizzontali controrotanti.
- La coclea inferiore trasporta il materiale verso la parte anteriore del miscelatore.
- La coclea superiore trasporta il materiale verso la parte posteriore del miscelatore.
- La coclea inferiore funge anche da coclea di scarico.

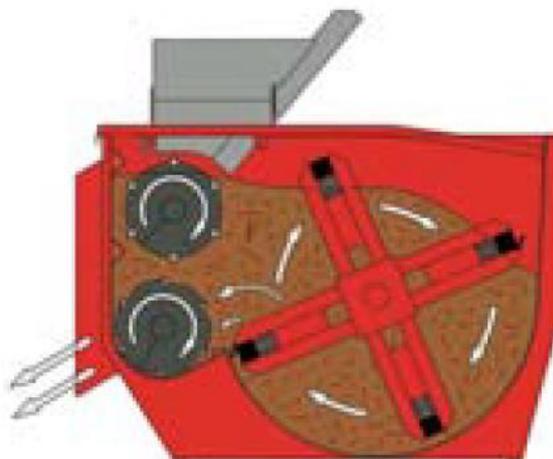


Figura 2.5: Rappresentazione del flusso di miscelazione con botte rotante.

Negli allevamenti di bovini da ingrasso o di mucche da latte si impiegano generalmente *carri trincia miscelatori a coclee verticali* in quanto consentono di mescolare un'ampia varietà di materiali, permettono di elaborare grandi quantità di fieno (anche intere "balle" rotonde e quadrate) e di foraggio a fibra lunga non trasformati.

2.2 Carro trincia-miscelatore verticale semovente

Nel presente paragrafo si effettua una descrizione dettagliata di un carro trincia-miscelatore verticale semovente mettendo in luce qual è la fonte di energia primaria e come viene trasmesso il moto ai vari organi mobili della macchina. In particolare, per svolgere la presente trattazione, si fa riferimento alle macchine realizzate dall'azienda presso la quale lo studente ha svolto un periodo di tirocinio curriculare nel periodo antecedente la scrittura della tesi.

Come già accennato in precedenza, si tratta di una macchina adibita alla preparazione e distribuzione in mangiatoia dei prodotti impiegati per l'alimentazione animale. Essa è dotata principalmente dei seguenti componenti:

- un motore endotermico;
- un sistema di trasmissione del moto;
- un apparato desilatore;
- un sistema di trincia-miscelazione;
- una cabina di guida.

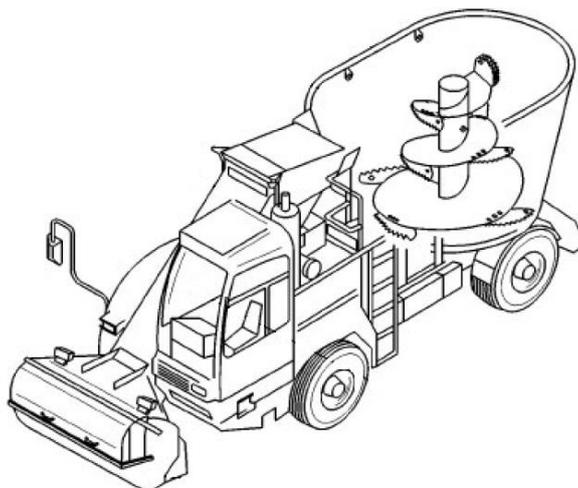


Figura 2.6: Rappresentazione schematica di un carro trincia miscelatore verticale.

2.2.1 Motore endotermico

L'energia necessaria ad azionare la macchina proviene da un motore a combustione interna alimentato a gasolio posizionato normalmente nella parte anteriore. La potenza che esso deve erogare dipende principalmente dalla massima quantità di massa miscelabile in ogni ciclo di lavoro, funzione a sua volta del volume della vasca di miscelazione.

| Volume vasca di miscelazione [m³] | Potenza nominale motore [CV] |
|---|-------------------------------------|
| 12 | 145 |
| 14 | 145 |
| 16 | 145 |
| 19 | 170 |
| 21 | 170 |
| 23 | 170 |
| 26 | 200 |
| 28 | 200 |
| 30 | 200 |

Tabella 2.1: Taglia del motore endotermico in funzione della capacità della vasca di miscelazione.

Accanto al motore è disposto un serbatoio di accumulo del carburante, dimensionato in modo da garantire un'autonomia di funzionamento della macchina di 8-9 ore.

Il sistema di scarico del motore è dotato dei vari dispositivi di post-trattamento dei gas esausti previsti dalla normativa che regola le emissioni inquinanti (stage V). In particolare, i moderni semoventi risultano dotati anche di un serbatoio per lo stoccaggio del liquido AdBlue, fondamentale per la catalisi selettiva degli NO_x. Inoltre, l'impianto di scarico possiede griglie di protezione antiscottatura nei punti in cui l'operatore potrebbe entrare in contatto.

Sempre nei pressi della parte anteriore del macchinario, è posizionato un radiatore ad acqua munito di ventola utilizzato per asportare calore al liquido del sistema di refrigeramento del motore.



Figura 2.7: A sinistra: Motore endotermico a gasolio. A Destra: Radiatore ad acqua.

2.2.2 Trasmissione del moto

L'albero motore è collegato direttamente ad un accoppiatore ad assi paralleli dotato di tre uscite per ripartire la potenza in ingresso tra:

1. La trasmissione meccanica delle coclee di miscelazione;
2. La trasmissione idrostatica che aziona la fresa desilatrice;
3. La trasmissione idrostatica che permette l'avanzamento della macchina.

Sui carri miscelatori di nuova concezione vengono sempre più impiegate soluzioni che prevedono trasmissioni miste (idrostatica e meccanica): questa tecnica prevede la trasformazione della potenza meccanica disponibile all'uscita dell'accoppiatore motore in potenza idraulica tramite pompe e la riconversione dell'energia idraulica in energia meccanica per mezzo di motori idraulici che comandano

direttamente gli organi mobili della macchina. In questo modo si ha il vantaggio di smorzare le sollecitazioni trasmesse al motore e consentire l'inversione istantanea del moto di rotazione in caso di bloccaggio. Tale sistema viene normalmente impiegato per l'azionamento della fresa desilatrice, per l'avanzamento della macchina e per l'alimentazione di servizi ausiliari.

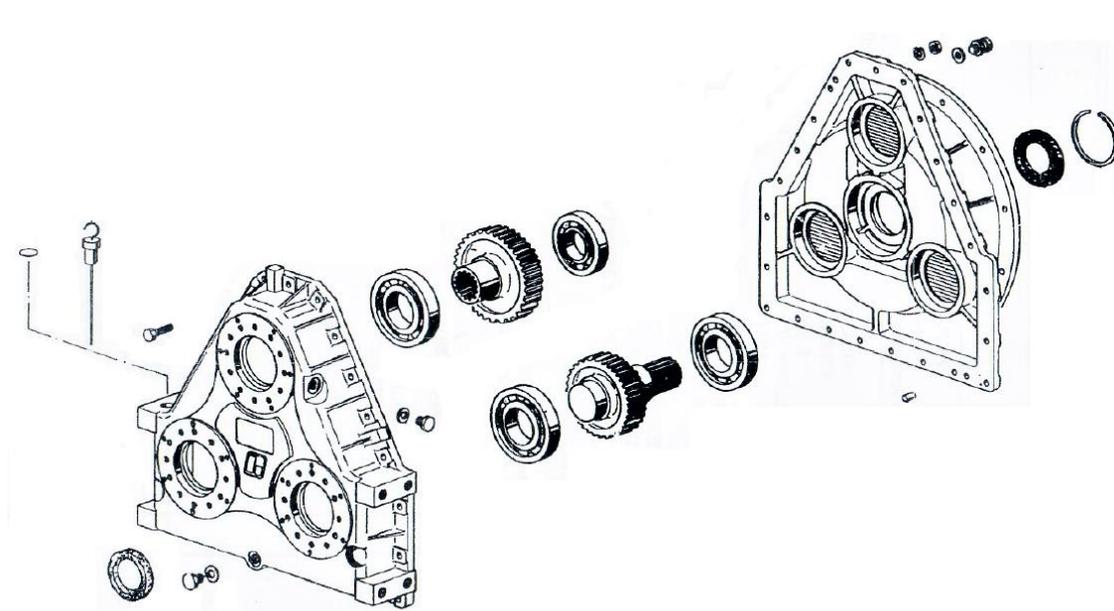


Figura 2.8: Schema dell'accoppiatore motore.

Trasmissione meccanica delle coclee di miscelazione

All'inizio di questa trasmissione meccanica è presente un riduttore flangiato direttamente ad un'uscita (in genere quella inferiore) dell'accoppiatore motore. Generalmente, questo presenta un rapporto di riduzione 4:1.

Su alcune tipologie di carri miscelatori è possibile installare, in alternativa al riduttore singolo rapporto, un cambio ad azionamento idraulico a due stadi di velocità e generare quindi due marce di azionamento delle coclee.

La trasmissione prosegue poi con un albero cardanico telescopico che trasmette il moto dal riduttore o cambio, ancorato all'accoppiatore motore, ad un riduttore ad assi ortogonali che impartisce il moto di rotazione alla coclea. Quest'ultimo, opportunamente fissato al fondo della vasca di miscelazione, garantisce una seconda riduzione di velocità pari circa a 20:1. Nel caso in cui siano presenti due coclee di miscelazione, il moto viene trasmesso dal riduttore della prima coclea a quello della seconda tramite l'inserimento di un ulteriore albero cardanico telescopico [11].

In conclusione, il rapporto totale di trasmissione risulta essere 50:1-100:1 passando da una velocità del motore di circa 1000 rpm ad una velocità delle coclee di 10-20 rpm.

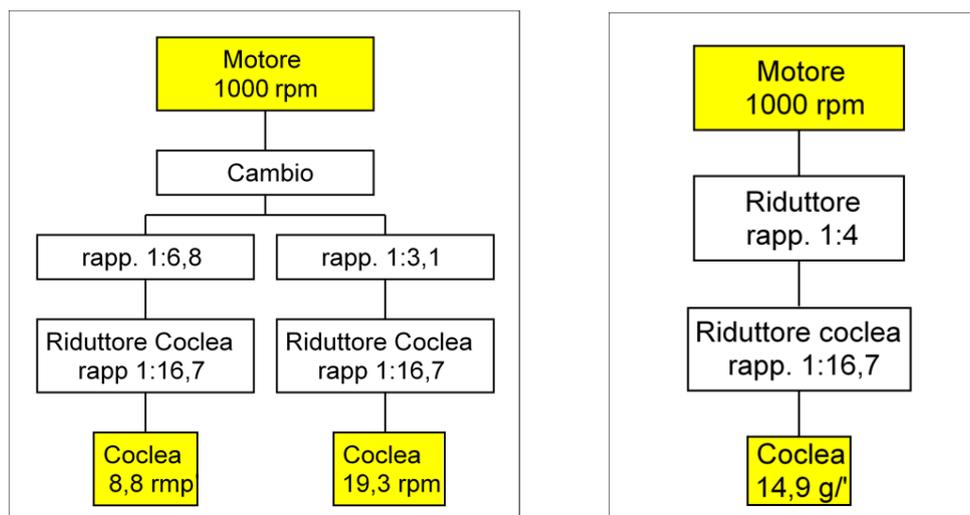


Figura 2.9: A sinistra: Schema dei rapporti di riduzione della trasmissione meccanica con cambio. A destra: Schema dei rapporti di riduzione della trasmissione meccanica con riduttore a singolo stadio.



Figura 2.10: Collegamento meccanico tra i riduttori ad assi ortogonali delle coclee.

Trasmissione idrostatica fresa desilatrice

Come già accennato in precedenza, la fresa desilatrice viene azionata tramite una trasmissione idrostatica. All'inizio di questa catena di trasmissione è presente una pompa a portata variabile calettata direttamente su una porta di uscita dell'accoppiatore motore. Tramite un circuito realizzato con tubi oleodinamici in gomma e/o in ferro, la pompa invia olio ad alta pressione ($p_{\max} = 375$ bar) ad un motore idraulico a cilindrata fissa. L'albero di uscita di quest'ultimo è collegato ad un riduttore che possiede un rapporto di trasmissione 6:1, il quale a sua volta mette direttamente in moto la fresa desilatrice.

La pompa ad alta pressione è comandata da uno stadio di pilotaggio a bassa pressione (4-10 bar) azionato a sua volta da una serie di comandi disposti su un joystick all'interno della cabina di guida.

Trasmissione idrostatica avanzamento

L'avanzamento è prodotto da due motori idraulici collegati direttamente a due riduttori fissati alle ruote posteriori della macchina semovente. Questi motori vengono azionati, tramite un circuito ad alta pressione, da una pompa a portata variabile calettata direttamente su un'uscita dell'accoppiatore motore. Anche questa pompa, come quella che impartisce il moto alla fresa desilatrice, è comandata da uno stadio di pilotaggio a bassa pressione azionato da due pedali di comando presenti all'interno della cabina di guida. Normalmente, la trasmissione idrostatica impiegata per l'avanzamento presenta almeno due modalità di lavoro: una a velocità ridotta per permettere le operazioni di carico dei materiali e una a velocità maggiore per consentire dei rapidi spostamenti all'interno dell'area aziendale.

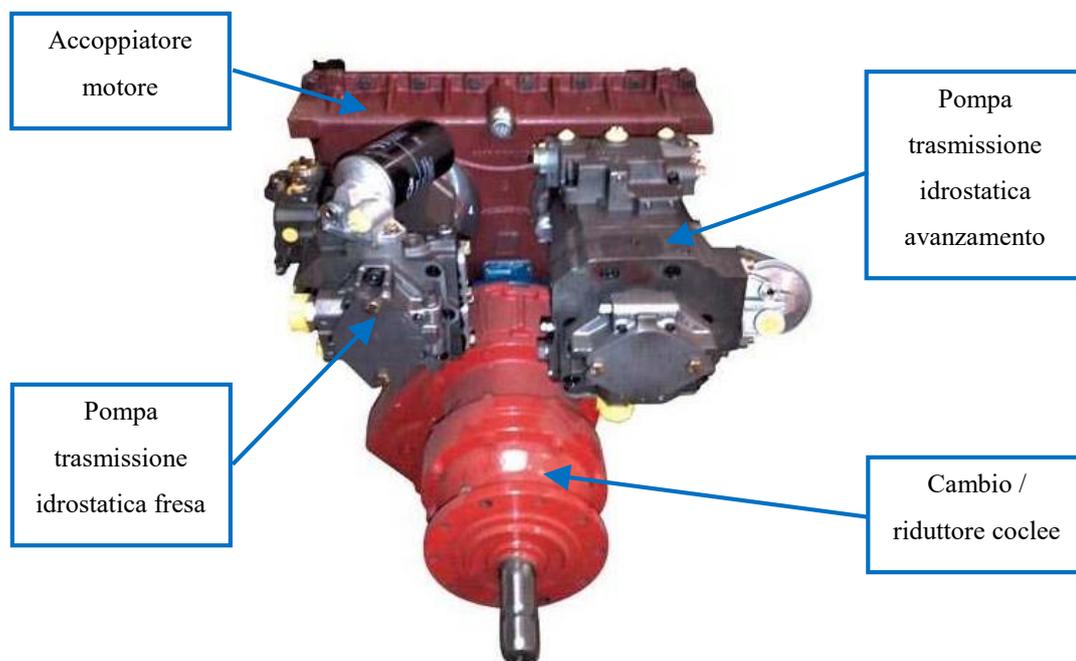


Figura 2.11: Ripartizione della potenza motrice tramite accoppiatore ad assi paralleli a tre uscite.

Servizi ausiliari

Generalmente, si adottano soluzioni idrauliche anche per l'alimentazione dei servizi ausiliari quali l'apertura e la chiusura della saracinesca dello sportello di scarico, l'azionamento dei nastri trasportatori di carico e scarico, la movimentazione dell'apparato desilatore, ecc. In questi casi si utilizzano una o più pompe idrauliche di piccola cilindrata, azionate dalle pompe ad alta pressione, e attuatori lineari e rotativi.

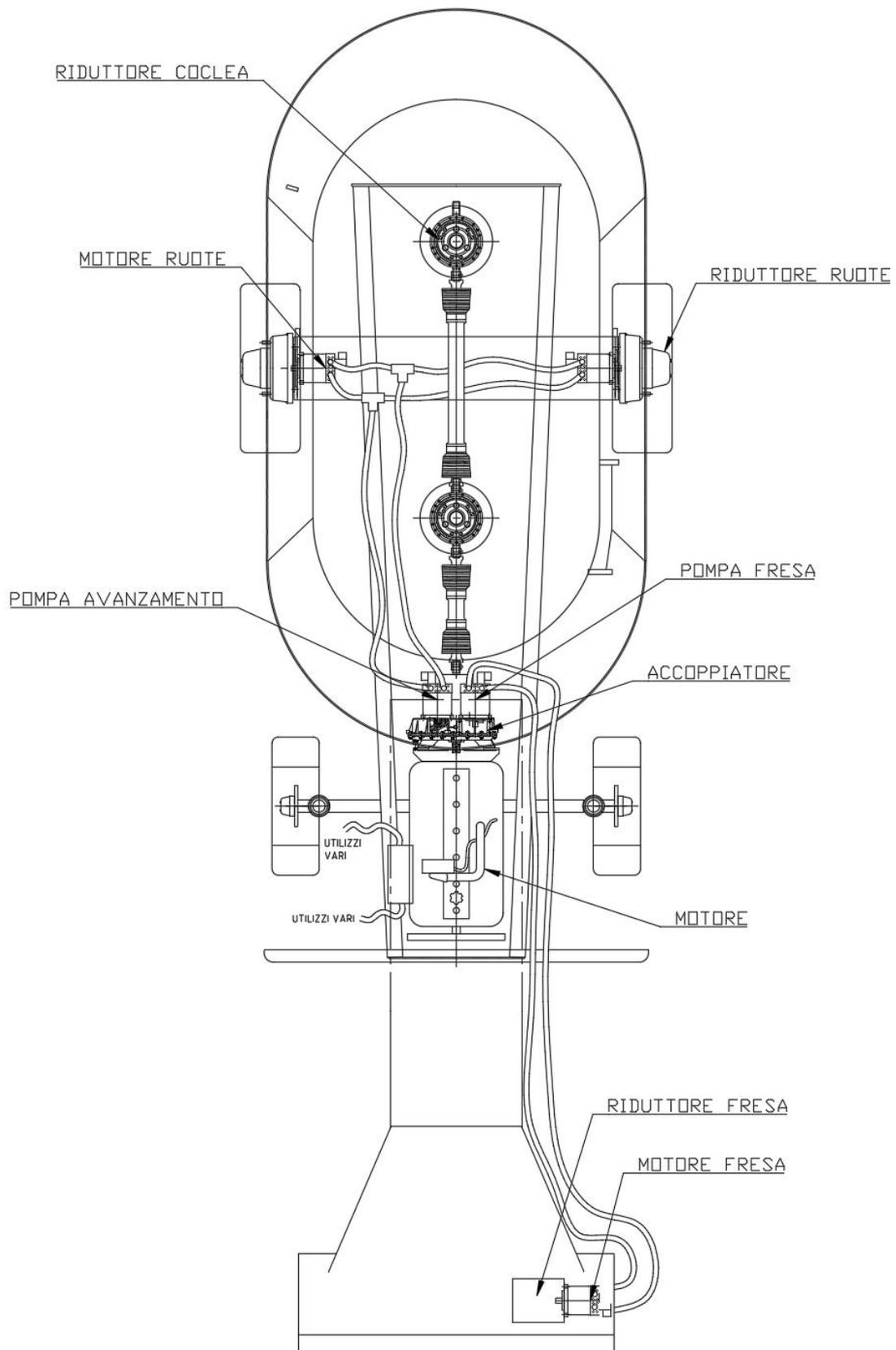


Figura 2.12: Schema del sistema trasmissivo del carro miscelatore visto dall'alto.

2.2.3 Apparato desilatore

Ogni carro trincia-miscelatore possiede un apparato desilatore costituito da una fresa, ovvero un cilindro rotante munito di coltelli disposti radialmente, sorretta da un braccio incernierato al telaio in grado di compiere movimenti di traslazione verticali verso il basso e verso l'alto.

Durante la fase di carico del prodotto (es.: silomais, insilato di foraggio, fieno, ecc.), la fresa ruotando aggredisce il materiale e lo convoglia all'interno del braccio dove un nastro trasportatore lo trascina all'interno della vasca di miscelazione.



Figura 2.13: A sinistra: Fase di carico della paglia tramite apparato desilatore. A destra: Fresa desilatrice.

2.2.4 Sistema di trincia-miscelazione

Il sistema di trincia-miscelazione assolve alla funzione fondamentale del carro, in quanto permette la triturazione e l'omogeneizzazione dei prodotti costituenti la razione alimentare animale.

Esso è costituito da una vasca di miscelazione realizzata in lamiera di acciaio, all'interno della quale sono alloggiati due coclee verticali costituite da un'elica a passo costante che si avvolge attorno ad un'anima tronco conica centrale. Sul raggio esterno dell'elica sono disposti dei coltelli, i quali durante la rotazione delle coclee interagiscono con dei controcoltelli posizionati sulla parte interna della vasca e garantiscono un rapido sminuzzamento dei materiali. Le coclee sono controrotanti e generano un flusso di miscelazione a forma di 8 permettendo un'ottima qualità di miscelazione sia con prodotti secchi che con prodotti umidi.

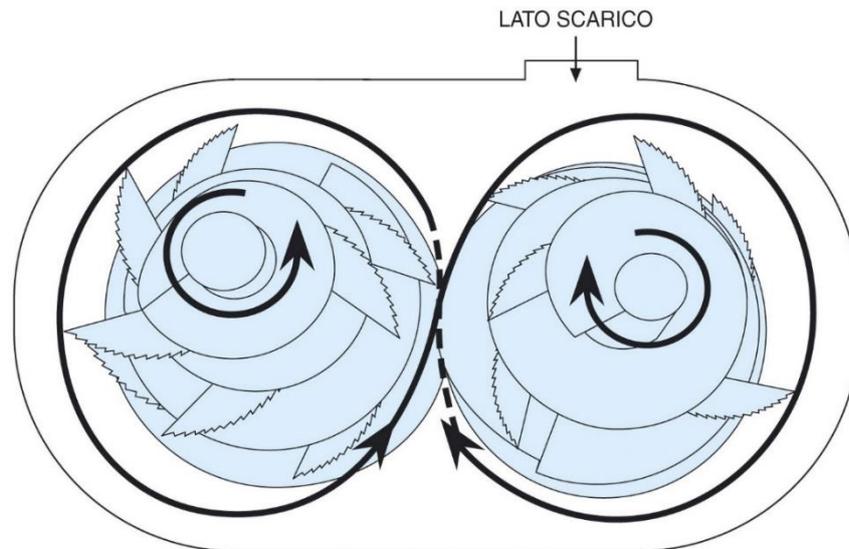


Figura 2.14: Flusso di miscelazione generato dalle coclee controrotanti.

Il carro è dotato di un impianto di pesatura elettronico digitale, con quattro celle di carico del tipo a flessione. La centralina elettronica programmabile, collocata in cabina, permette di visualizzare istantaneamente il quantitativo caricato. Un avvisatore acustico, con preallarme intermittente, avverte l'operatore quando l'85% del peso programmato è stato raggiunto.

Lo scarico del prodotto miscelato avviene mediante un portellone ad azionamento idraulico posto sul lato sinistro del cassone. Le azioni di spinta generate dalle coclee dirigono la miscela verso la parte anteriore del cassone, dalla quale si riversa sul nastro trasportatore trasversale di scarico in PVC.

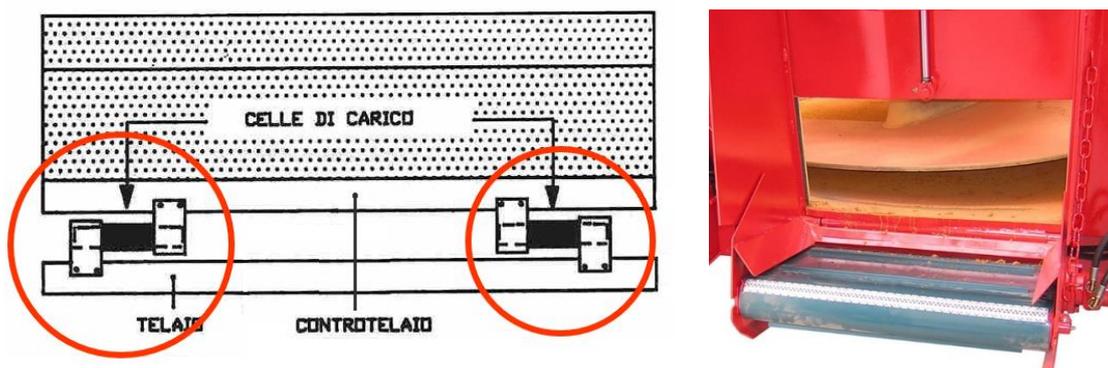


Figura 2.15: A sinistra: Schema di posizionamento delle celle di carico a flessione. A destra: Sportello di scarico con tappeto a nastro in pvc.

CAPITOLO 3

ELECTRA

In questo capitolo si effettuerà inizialmente una panoramica sulle architetture impiegate nei veicoli ibrido-elettrici, evidenziando quali sono i componenti costituenti questi sistemi propulsivi alternativi e le tecnologie attuali adottate. Facendo riferimento al campo della meccanizzazione agricola, verranno riportati alcuni esempi di prototipi realizzati dalle aziende operanti in questo settore.

Inoltre, verrà spiegato che cos'è Electra, ovvero un prototipo di carro trincia miscelatore full-electric, e, non entrando nel merito delle specifiche progettuali, quali sono le differenze che lo contraddistinguono dalla macchina tradizionale. Per la descrizione di questa macchina, si farà riferimento all'azienda costruttrice presso la quale lo studente ha completato un tirocinio curricolare nel periodo antecedente la scrittura della tesi.

3.1 Architettura dei veicoli elettrici

Il carro trincia miscelatore semovente oggetto di studio rientra all'interno della categoria delle macchine da lavoro mobili non stradali (NRMMs: Non Road Mobile Machineries) [12][1]. Negli ultimi anni, anche questa tipologia di veicoli è stata soggetta a regolamentazioni sempre più stringenti sulle emissioni di gas di scarico inquinanti. Per questo motivo tanti grandi produttori hanno iniziato a presentare prototipi di macchine tradizionali ripensate in architetture ibrido – elettriche [13].

Facendo riferimento alla letteratura, nel presente sotto capitolo si riportano gli schemi generali delle varie tipologie di propulsione impiegate nell'elettrificazione-ibridizzazione di queste macchine, basati a loro volta sulle architetture adottate nel campo automotive [14].

3.1.1 Propulsione ibrida

Nei veicoli mobili a propulsione ibrida la produzione della potenza motrice deriva dall'azione sinergica del motore termico e di quello elettrico, entrambi installati sulla macchina. L'ibridizzazione delle NRMMS riprende le architetture sviluppate in ambiente automobilistico che si differenziano per la loro struttura e per l'incidenza che il motore elettrico, installato in ausilio al motore endotermico, ha sul funzionamento della macchina. Esistono principalmente due schemi costruttivi che caratterizzano la struttura di una propulsione ibrida: *ibrido serie* e *ibrido parallelo*; la combinazione di queste due dà luogo alla configurazione *ibrido misto* [15].

Ibrido serie

In questa configurazione, la potenza meccanica di propulsione è fornita esclusivamente da un motore elettrico. Questo viene alimentato dalla corrente prodotta da un generatore azionato da un motore a combustione interna; l'energia elettrica superflua viene immagazzinata in un pacco di accumulatori. Il flusso energetico attraversa dunque gli elementi del sistema in serie, passando dal motore endotermico, tramite il generatore elettrico, alle batterie; da qui viene prelevato dal motore elettrico per essere trasferito alla trasmissione meccanica.

Quando la potenza richiesta è bassa, il sistema di generazione alimenta il motore elettrico e ricarica contemporaneamente le batterie. Nel momento in cui la macchina esige una potenza maggiore le batterie rilasciano l'energia accumulata, affiancando il generatore nell'alimentazione del motore elettrico.

Il motore endotermico lavora in un regime fisso di rotazione e raggiunge il punto di massimo rendimento consentendo una drastica riduzione delle emissioni nocive e della rumorosità del mezzo. Il suo dimensionamento dipende dalla potenza media richiesta dalla macchina.

L'ibrido serie è una scelta fattibile per la propulsione di molte macchine mobili. È flessibile in termini di posizionamento dei componenti e non vi è alcun accoppiamento meccanico tra il motore elettrico di trazione e quello a combustione interna. La maggior parte dei prototipi ibridi esistenti sono basati su questa configurazione [16].

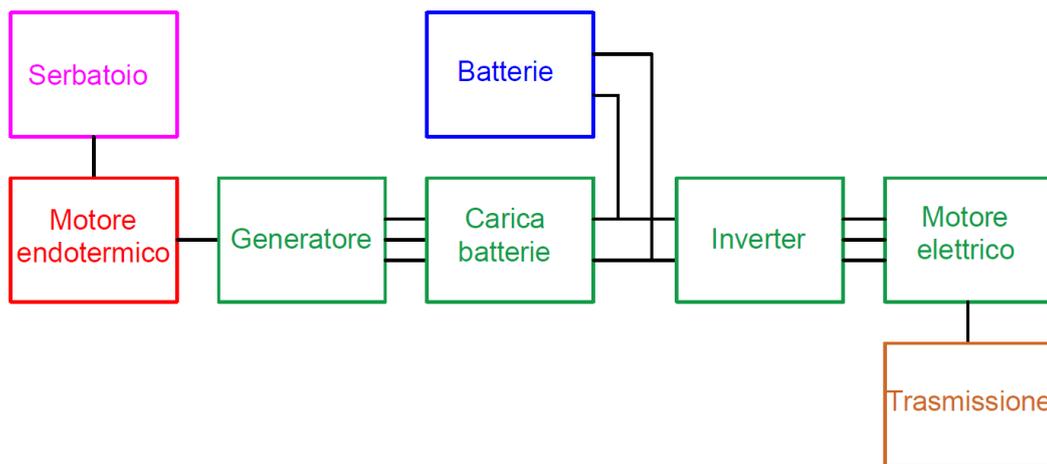


Figura 3.1: Architettura ibrida di tipo serie.

Ibrido parallelo

Questa configurazione prevede che i due motori, l'elettrico e il termico, lavorino in parallelo garantendo entrambi la produzione della coppia.

A differenza dell'ibrido serie, il motore endotermico è collegato direttamente alla trasmissione mediante una frizione elettromagnetica e consente quindi la propulsione del veicolo. Allo stesso modo, il motore elettrico, collegato anch'esso alla trasmissione, svolge le funzioni di propulsione e/o di generazione. Il parallelo, caratterizzato da un nodo meccanico di accoppiamento della potenza, permette quindi una continua compensazione dei due motori: se la potenza richiesta è superiore a quella di funzionamento del motore, la batteria si scarica alimentando la macchina elettrica; se invece la potenza richiesta è inferiore, la batteria si carica.

Le emissioni di inquinanti sono superiori rispetto all'ibrido serie, ma risultano comunque ridotte grazie al funzionamento del motore termico a regime quasi ottimale. Invece, da un punto di vista energetico, risulta più vantaggiosa la configurazione parallelo in quanto permette un minor numero di trasformazioni del flusso energetico e quindi di perdite. Inoltre, sempre questa configurazione prevede una maggiore potenza specifica e un'elevata compattezza [17].

L'ibrido parallelo è rilevante nelle macchine mobili più piccole; in particolare, si adatta bene in quelle macchine che impiegano una trasmissione idrostatica e operano con carichi transienti pesanti.

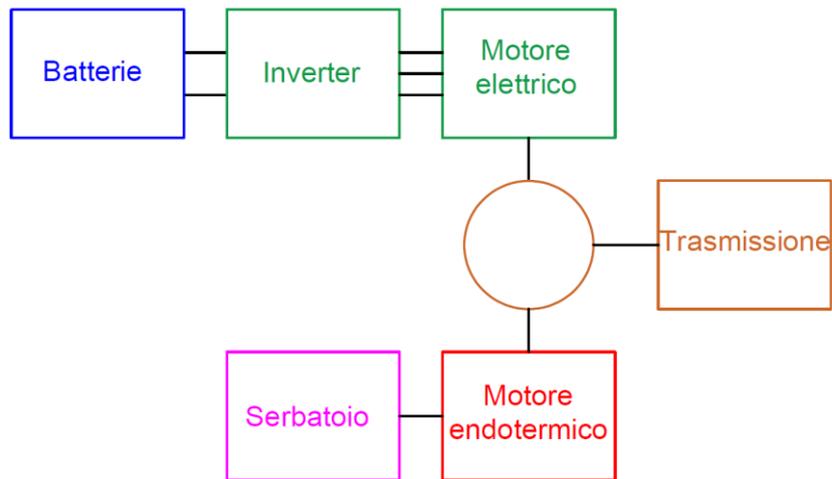


Figura 3.2: Architettura ibrida di tipo parallelo.

Ibrido misto (power split)

L'ibrido misto incorpora in un'unica configurazione i pregi e i difetti delle due precedenti avendo come particolarità la presenza di due nodi di accoppiamento: uno meccanico, come negli ibridi paralleli, e uno elettrico, come negli ibridi serie. Proprio come questi ultimi, è caratterizzato dalla presenza di due macchine elettriche: un generatore e un motore elettrico dedicato alla propulsione su di un'asse. Esistono diverse modalità costruttive per realizzare il doppio accoppiamento [18].

Nel settore delle NRMMS, questa configurazione è la meno attraente in quanto risulta piuttosto complicato progettare la trasmissione meccanica che necessita. Tuttavia, potrebbe essere fattibile nei trattori agricoli che spesso vengono utilizzati in modalità di trazione continua ad alta potenza.

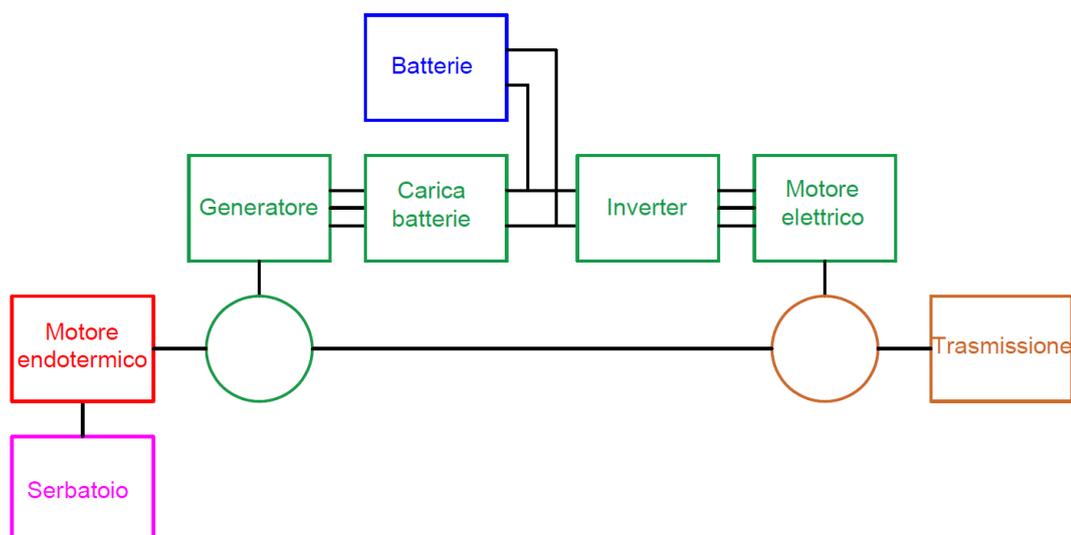


Figura 3.3: Architettura ibrida di tipo misto.

3.1.2 Propulsione full-electric

Nei veicoli mobili full-electric, la produzione della potenza motrice deriva unicamente dall'azione di uno o più motori elettrici che prelevano l'energia immagazzinata in appositi pacchi batteria [19]. L'elettrificazione della NRMMS, così come l'ibridizzazione, riprende le architetture sviluppate in ambiente automotive che prevedono la presenza di:

- un motore elettrico collegato alla trasmissione del veicolo e funzionante, nella maggior parte delle applicazioni, in corrente alternata;
- un inverter che, a partire dalla sorgente continua delle batterie, crea e modula una corrente sinusoidale da inviare al motore;
- un sistema di accumulo costituito da batterie ricaricabili direttamente dalla rete elettrica;
- un sistema di controllo che, interfacciandosi con l'utilizzatore, va ad agire sull'azionamento del motore.

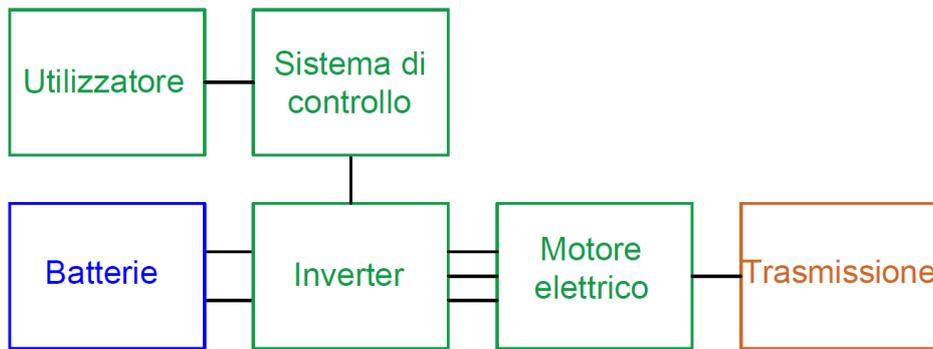


Figura 3.4: Schema semplificato di un powertrain elettrico.

I vantaggi di utilizzare una propulsione completamente elettrica sono:

- la completa assenza di emissioni di sostanze inquinanti;
- la silenziosità;
- la possibilità di avere coppie istantanee ed elevate, anche a basse velocità;
- un'elevata efficienza energetica;
- la possibilità di ricaricare le batterie tramite fonti rinnovabili (impatto zero);
- la manutenzione ridotta rispetto alla controparte endotermica.

Tuttavia, l'autonomia dei veicoli elettrici è fortemente influenzata dalla capacità dei sistemi di accumulo e dai tempi di rigenerazione della carica. Per questo motivo, l'impiego di tale configurazione propulsiva su macchine operatrici non è di facile attuazione. Ad oggi, un'architettura full electric può essere adottata per NRMMS caratterizzate da un'operatività concentrata in alcune ore di funzionamento, come ad esempio il carro trincia semovente studiato in questo lavoro di tesi.

3.2 Componenti veicoli elettrici

In questo capitolo, si realizza una panoramica sulla componentistica elettrica facente parte di una macchina elettrica o ibrida evidenziando quali sono le varie tipologie e le tecnologie adottate attualmente. Riferendosi allo schema classico di un azionamento elettrico, il motore viene alimentato dalla tensione prodotta da un classico inverter collegato a sua volta alla tensione di un bus in continua proveniente dalla batteria di alimentazione [20].

Il quadro tecnico elettrico si completa con l'inserimento delle schede di controllo, dei convertitori di potenza, della centralina di controllo del motore e di tutti i sensori necessari alla realizzazione delle funzioni di controllo e sicurezza. Il motore è sempre connesso al sistema trasmissivo della macchina mediante un accoppiamento meccanico, variabile a seconda della tipologia di motore impiegato e dal grado di ibridizzazione, o potenza elettrica desiderata.

3.2.1 Batterie

Il pacco batteria rappresenta attualmente il componente più essenziale di una macchina elettrica in quanto rappresenta la sua fonte di energia diretta determinandone l'autonomia e la conseguente capacità operatività. Si struttura come un sistema integrato suddiviso in moduli; ogni modulo è costituito da una sequenza di celle elettrolitiche, ossia batterie.

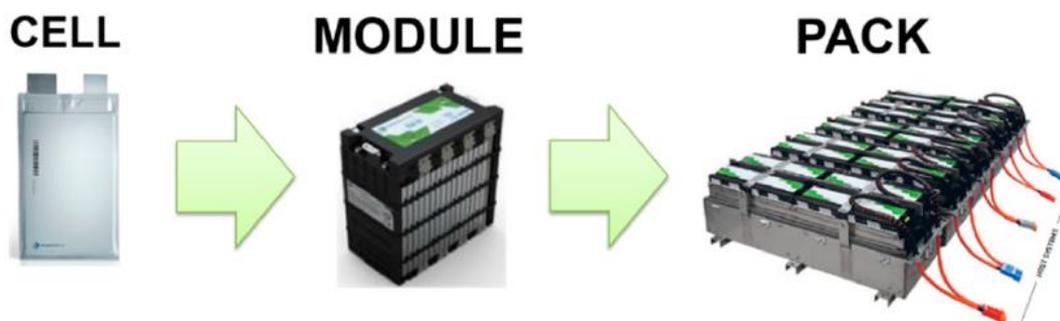


Figura 3.5: Architettura modulare del pacco batterie.

I sistemi di accumulo attuali sono costituiti essenzialmente da *batterie al nichel-idruro metallo* e *batterie agli ioni di litio*.

Le batterie al nichel-idruro metallo vengono utilizzate nei veicoli ibridi; sono caratterizzate da un'elevata densità di energia e un alto numero di cicli. L'applicazione di questi accumulatori, tuttavia, rimane limitata perché presentano una bassa tensione, un costo elevato e non sono adatti per la connessione in parallelo. Le batterie al litio (LIBs) rappresentano invece la soluzione più promettente nel panorama tecnologico attuale.

Batterie al litio

L'utilizzo del litio, metallo caratterizzato da un basso peso atomico e un'alta capacità specifica, come elemento di stoccaggio dell'energia ha permesso la realizzazione di batterie con prestazioni ampiamente migliori rispetto alle precedenti tecnologie. Questi accumulatori presentano infatti un'alta tensione, un'elevata densità di energia (100 Wh/kg), un'elevata potenza specifica (300 W/kg), un ampio intervallo di temperature di funzionamento, un basso tasso di auto-scarica, un limitato effetto memoria, un'alta efficienza, una lunga durata di vita (circa 1000 cicli), proprietà ecosostenibili. Il loro costo si aggira intorno a 200-400 €/kWh [21].

| Caratteristiche (cella) | Valore |
|---|-------------|
| Capacità di accumulo [Ah] | 0,1 - 10000 |
| Energia specifica [Wh/kg] | 40 - 180 |
| Potenza specifica [W/kg] | 200 - 3000 |
| Efficienza energetica di carica/scarica [%] | 80 - 95 |
| Rendimento amperometrica [%] | 100 |
| Durata [n° di cicli] | 1500 - 5000 |
| Temperatura di funzionamento [°C range] | -30 - 60 |
| Rapporto di scarica [c-rate] | C/3 - 2C |

Figura 3.6: Caratteristiche batterie al litio.

Esistono diverse tipologie in cui è possibile distinguere una struttura comune ma il materiale con cui sono realizzati elettrodi ed elettrolita cambia. Tipicamente l'anodo è composto da grafite mentre il catodo da un ossido di litio metallico. L'elettrolita invece è solitamente costituito da sali di litio disciolti in solventi organici liquidi o polimerici; questa differenza introduce quindi una distinzione tra le batterie al litio tradizionali e quelle polimeriche.

Le batterie al litio si possono quindi suddividere in tre principali tipologie:

- batterie agli *ioni di litio* con elettrolita liquido: sono quelle più mature e diffuse;
- batterie *litio ioni-polimeri*: hanno un elettrolita solido di tipo polimerico e presentano minori rischi in termini di sicurezza;
- batterie *litio metallo-polimeri*: il litio è in forma metallica allo stato liquido e presentano maggiori problemi di sicurezza, il loro sviluppo è ancora arretrato.

Nonostante le elevate prestazioni energetiche, le batterie al litio sono sensibili ai loro parametri operativi e presentano un campo di funzionamento molto rigido; il superamento dei limiti di tensione, in caso di sovraccarico o sotto carica, può influire negativamente sull'affidabilità causando danni irreversibili alle celle. Questo danneggiamento porta ad un aumento della temperatura interna della batteria che, nel peggiore dei casi, ne può causare l'esplosione. Pertanto, nei pacchi batteria sono installati dispositivi

elettronici sofisticati definiti BMS (Battery Management System) che hanno il compito di controllare e gestire continuamente ogni singola cella [22].

Un sistema BMS svolge quindi le seguenti funzioni:

- Monitorare lo stato di carica (SOC) della batteria misurando i livelli di tensione, la corrente assorbita e la temperatura di ciascuna cella.
- Equalizzare lo SOC complessivo della batteria in quanto le celle elettrolitiche collegate in serie si caricano e scaricano in modo non uniforme. Esistono bilanciamenti attivi o passivi.
- Gestire la sicurezza della batteria. Il BMS, oltre ad impedire alle singole celle di sovraccaricare o scaricarsi eccessivamente, permette anche di rilevare un innalzamento della tensione e, in caso di malfunzionamento, di isolare il pacco batterie.

3.2.2 Motori elettrici

I motori elettrici, la cui funzione è convertire l'energia elettrica proveniente dalle batterie in energia meccanica da fornire al sistema trasmissivo, possono essere classificati in diversi modi:

- asincroni, sincroni;
- a corrente continua, a corrente alternata;
- con spazzole, senza spazzole;
- rotanti (ideali per la maggior parte delle applicazioni), lineari;

I motori a corrente continua (DC), utilizzati inizialmente per la propulsione elettrica per via delle ridotte esigenze di regolazione, hanno ormai un impiego limitato sui veicoli a causa della loro bassa efficienza, della struttura ingombrante, della mancanza di affidabilità dovuta alla presenza del commutatore costituito da spazzole striscianti. Con l'avanzare dell'elettronica di potenza e dei sistemi di controllo, sono emerse diverse tipologie, tra cui i motori sincroni a magneti permanenti.

Motori sincroni a magneti permanenti

I motori sincroni a magneti permanenti, nello specifico brushless, sono utilizzati sempre più largamente in ambito veicolistico, specialmente negli azionamenti di piccola e media potenza. Sono motori elettrici a corrente continua aventi il rotore formato da una serie di magneti permanenti ad alta densità energetica (NdFeB) posizionati con polarità alternata lungo la circonferenza esterna; lo statore è costituito da un numero di poli pari al numero di magneti del rotore. La conversione elettromeccanica che questi ultimi attuano segue il principio di funzionamento dei sistemi elettrodinamici in cui però i conduttori su cui agiscono le forze sono collocati nella parte fissa (statore) e la parte mobile (rotore) viene posta in movimento per il principio fisico di reazione [23].

Questa tipologia di motore, essendo brushless, non ha quindi bisogno di contatti elettrici striscianti (spazzole) sull'albero del rotore per funzionare. La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti dello statore, e quindi la variazione dell'orientamento del campo magnetico da essi generato, avviene tramite un circuito elettronico (inverter). Questo permette una minore resistenza meccanica, eliminando la possibilità che si generino scintille al crescere della velocità di rotazione e riducendo notevolmente la necessità di manutenzione periodica.

Affinché il motore possa essere controllato correttamente, è necessario un circuito di retroazione che dialoghi continuamente con l'inverter. Tale circuito è costituito da un encoder che rileva l'esatta posizione angolare del rotore e permette all'elettronica di controllo di inviare la giusta tensione e corrente alle varie fasi dell'avvolgimento statorico, in modo da agire sull'angolo di sfasamento per far fronte alle richieste di coppia.

Nella Figura 3.10 si riporta un esempio di curva caratteristica del motore in funzione del numero di giri Ω . La curva T indica il valore di coppia nominale erogata dal motore; si può notare che fino al valore di Ω_n essa rimane costante, poi decresce seguendo la legge $1/\Omega$.

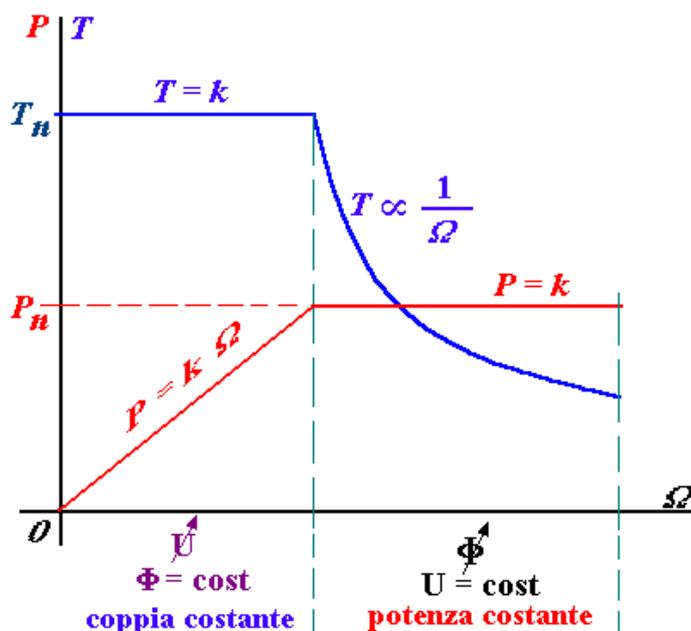


Figura 3.7: Caratteristica di funzionamento di un motore elettrico.

Questa condizione di funzionamento comporta notevoli vantaggi in quanto il motore può erogare sempre la coppia nominale nel campo di velocità $0 - \Omega_n$ (funzionamento a coppia costante). Questo vuol dire che, finché la coppia richiesta da un sistema esterno rimane sotto od eguaglia la curva T , il motore seguirà l'andamento del carico mantenendosi sempre in condizione di equilibrio.

La curva P , invece, rappresenta la potenza meccanica all'albero motore. Si può notare che durante il funzionamento a coppia costante, la potenza aumenta in modo lineare; raggiunta la velocità Ω_n , questo andamento non viene più rispettato e viene mantenuto il valore di potenza nominale fino alla massima velocità di rotazione sostenibile dal motore (funzionamento a potenza costante) [24].

La coppia aumenta in modo proporzionale alla lunghezza del pacco lamellare e con una legge quadratica rispetto al diametro; questo significa che più il motore ha coppia elevata e più lo sviluppo assiale e radiale sarà maggiore. Nei motori sincroni si preferisce far variare principalmente la lunghezza rispetto al diametro del rotore, in modo da mantenere basso il valore del momento d'inerzia e raggiungere così velocità angolari elevate. Inoltre, l'impiego di diametri contenuti limita la componente di velocità tangenziale del rotore ed evita il problema di distacco dei magneti dovuto alla forza centrifuga. La possibilità di raggiungere un alto numero di giri consente al motore di fornire potenza meccanica elevata anche mantenendo bassi valori di coppia motrice e quindi ingombri contenuti.

3.2.3 Inverter

Come già accennato in precedenza, l'inverter rappresenta un elemento essenziale nell'architettura di un veicolo elettrico in quanto effettua la commutazione delle grandezze da continue ad alternate. In particolare, si occupa di convertire la tensione di un bus in continua, proveniente dal pacco batterie della macchina, in alternata a sua volta impiegata per alimentare il motore elettrico, le apparecchiature di bordo, il sistema di illuminazione. Un invertitore classico, il cui schema è riportato in Figura 3.11, è costituito da sei transistor bipolari a gate isolato (IGBTs) che funzionano come interruttori elettronici controllati da segnali PWM [25]. Utilizzando una modulazione di tipo vettoriale, si generano delle sequenze di commutazione per tutti e sei gli IGBTs garantendo che sui conduttori di uscita si produca la corrente alternata trifase desiderata con gli opportuni sfasamenti di fase.

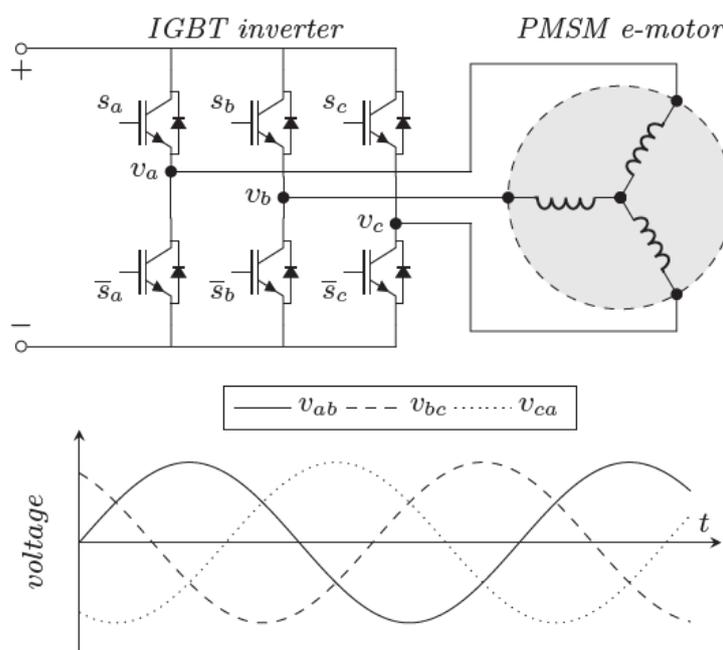


Figura 3.8: Rappresentazione del controllo di un motore a magneti permanenti utilizzando un inverter.

Questa tipologia di azionamento si presta bene alla produzione di tensione alternata per l'alimentazione dei motori descritti nel paragrafo precedente.

È consigliabile installare l'inverter in posizione orizzontale, lontano dal suolo e dal motore, in modo tale da evitare possibili danneggiamenti e inconvenienti sulle interconnessioni, in particolare sui segnali dell'encoder connesso al motore. Inoltre, questa posizione permette una maggiore accessibilità nel caso di interventi di miglioramento o manutenzione.

Il corretto posizionamento dell'inverter, in caso di guasto del sistema di raffreddamento, evita che il liquido refrigerante entri in contatto con i dispositivi elettrici, salvaguardandone quindi l'integrità e la continuità elettrica.

I moderni inverter devono essere dotati di alcune funzionalità che mirano alla miglior efficienza del motore in termini di risparmio energetico. Sono necessarie inoltre opportune protezioni contro le sovratensioni, che potrebbero danneggiare i sistemi di controllo e di management dell'energia, e delle particolari protezioni contro sovraccarichi e sovratemperature, che determinerebbero il malfunzionamento dell'intera macchina.

3.3 Esempi di prototipi ibrido-elettrici in agricoltura

Negli ultimi anni, le aziende operanti nel settore della meccanizzazione agricola hanno mostrato un interesse sempre più crescente verso l'elettrificazione di trattori e macchinari.

Nel 2002 l'Agricultural Industry Electronics Foundation (AEF) ha sviluppato il sistema ISO11783 (ISObus) per promuovere comunicazioni standard tra trattore e attrezzi di qualsiasi produttore. Oggi giorno, l'AEF sta lavorando su un nuovo protocollo per permettere l'interfacciamento di potenza elettrica tra la trattore e le varie tipologie di macchinari.

Al fine di fornire soluzioni alternative ai normali sistemi di propulsione endotermici, numerose case costruttrici hanno iniziato a realizzare prototipi diesel-elettrici, ibridi-elettrici o addirittura full-electric. Per citare alcuni esempi, si ricordano i trattori elettrificati John Deere *7530 E-Premium*, *6210RE* e *SESAM*, il trattore diesel-elettrico *Belarus 3023*, il trattore *e100 Vario* di Fendt, il sollevatore telescopico *TF 40.7 Hybrid* di Merlo [26].

3.3.1 John deere - 7530 E Premium

Il primo trattore elettrificato ad essere lanciato sul commercio è stato il John Deere *7530 E Premium*. Si differenzia dalla versione standard per la presenza di un generatore elettrico da 20 kW a cui sono collegati la ventola del radiatore, il compressore dell'aria condizionata e un trasformatore DC/DC. La potenza elettrica fornita dal generatore può essere impiegata per fornire un power boost alle ruote quando il carico motore è elevato. L'E-Premium, rispetto alla macchina tradizionale, genera un risparmio energetico del 5% nel lavoro in campo e del 16 % nel trasporto su strada del rimorchio. La

macchina presenta anche due prese elettriche posteriori rispettivamente da 230V e 400V per azionare utensili necessari ad effettuare eventuali riparazioni in campo e attrezzature elettrificate quali rimorchi, spandi concime, barre irroratrici, ecc [27].

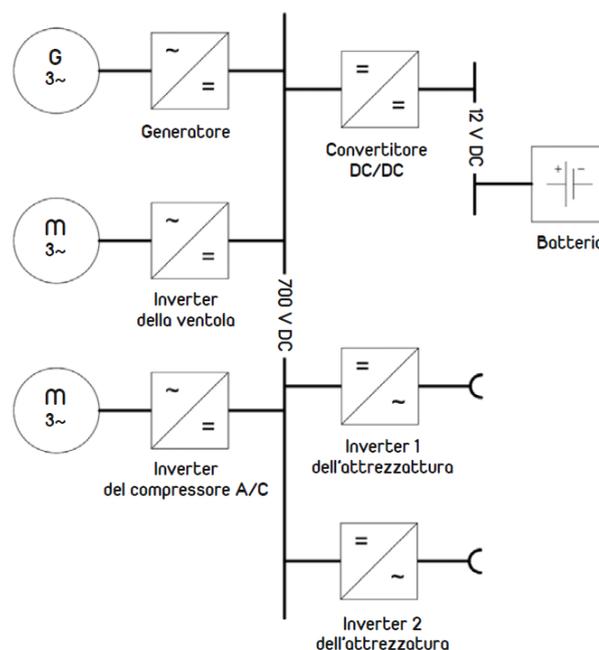


Figura 3.9: Schema del sistema John Deere E-Premium.

Successivamente, John Deere ha sviluppato il prototipo *LIB-OFF-road*: alla trattoria commercialmente prodotta sono state aggiunte una batteria ausiliaria agli ioni di litio, prese elettriche per le attrezzature e sistemi di controllo avanzati. La macchina possiede un power boost elettrico, la funzione di ricaricare le batterie in frenata e un sistema che permette di ottimizzare il regime di rotazione del motore termico per mantenerlo nella fascia di massima efficienza semplicemente variando la velocità di avanzamento grazie all'intervento del motore elettrico [28].

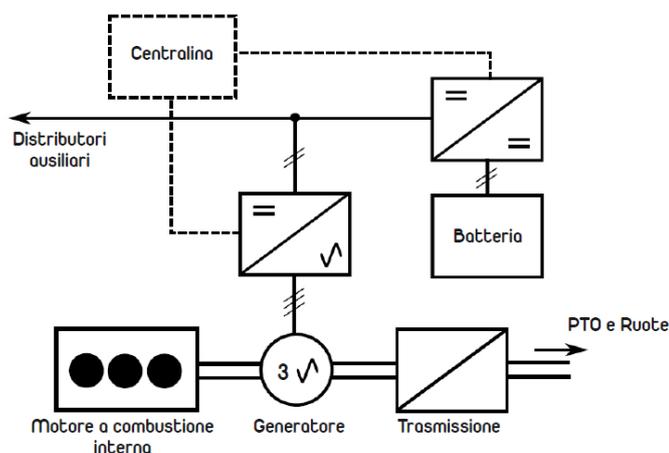


Figura 3.10: Prototipo LIB-OFF-road.

Un'ulteriore versione del John Deere 7530 E Premium è il trattore *eE-Tour*; la macchina, in aggiunta alla versione commerciale, presenta una batteria da 50kWh portata sull'attacco a 3 punti anteriore in sostituzione della zavorra anteriore. L'alta capacità della batteria consente una maggiore flessibilità in tutte le strategie di ibridizzazione della trattrice e risulta essere una soluzione molto comoda per l'esecuzione di lavori gravosi caratterizzati da richiesta di picchi di potenza, come tipicamente sono le arature e, più in generale, tutte le lavorazioni profonde del terreno.

3.3.2 Merlo - TF 40.7 Hybrid

Nel 2013 Merlo ha realizzato un sollevatore telescopico elettro-idraulico ibrido. Si tratta di un prototipo sviluppato sulla base del Turbofarmer P 40.7.

La macchina tradizionale è munita di un motore diesel che mette in rotazione due pompe idrauliche a cilindrata fissa, le quali alimentano due sistemi idraulici separati: uno per l'avanzamento del veicolo e l'altro per il movimento del braccio telescopico.

La struttura innovativa, proposta nel prototipo a risparmio energetico, prevede un'architettura di tipo serie per la trazione del veicolo e un'architettura di tipo parallelo per il funzionamento dei sistemi idraulici del braccio. Questo sistema permette un miglioramento generale delle prestazioni e una diminuzione del consumo energetico giornaliero di carburante in quanto il motore a combustione interna opera continuamente nella zona di massimo rendimento. Inoltre, impiegando sistemi elettro-idraulici, si riducono le perdite della catena trasmissiva e le emissioni acustiche della macchina [9].

La configurazione presentata è in grado di funzionare in modalità full-electric, senza emissioni di sostanze inquinanti, adatta per l'utilizzo della macchina in ambienti chiusi quali stalle, capannoni, magazzini industriali, ecc.

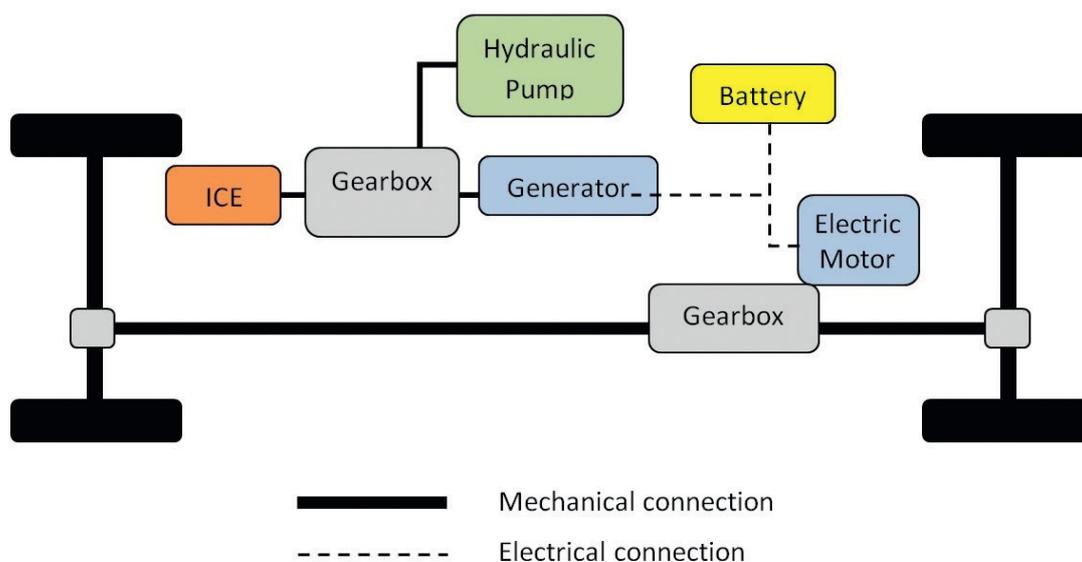


Figura 3.11: Configurazione ibrida di un telescopico Merlo.

3.3.3 John Deere - SESAM

Nel 2016 John Deere ha realizzato *SESAM*, un trattore completamente elettrico di potenza elevata, dotato di un pacco batterie agli ioni di litio della capacità di 150 kWh e di due motori elettrici che sviluppano una potenza continua di 130 kW. Per la ricarica totale delle batterie ci vogliono 3 ore, mentre la scarica completa (con i motori impegnati al 100%) avviene in 30 minuti. Purtroppo le condizioni di lavoro reali si discostano a volte anche di molto da questa situazione limite, come ad esempio le arature o le rippature.

3.3.4 Fendt - e100 Vario

Nel 2017 Fendt ha presentato il modello *e100 Vario*, un concept di trattore compatto completamente elettrico. Si tratta di un prototipo sviluppato sulla base del Fendt 200 Vario, dove sotto al cofano, al posto del tradizionale propulsore diesel, è stata installata una batteria da 650 V con una capacità di circa 100 kWh, per alimentare un motore elettrico in grado di sviluppare 50 kW di potenza continua. Con il motore al massimo l'autonomia raggiunge le 2,5 ore e in un'operazione come un'aratura probabilmente si arriva a 2 ore. Però, solo per un impiego davvero poco impegnativo (come l'andatura o il rivoltamento del fieno), il prototipo assicura un'autonomia per poter completare un'intera giornata di lavoro senza ricariche. L'adozione di batterie al litio che accettano elevate correnti in fase di ricarica permette però al Fendt e100 Vario di riportare all'80% della sua capacità la batteria in soli 40 minuti.



Figura 3.12: A sinistra: Il SESAM di John Deere. A destra: L'e100 Vario di Fendt.

3.4 Che cos'è Electra?

Electra è una macchina realizzata da un'azienda del cuneese, la Supertino S.r.l., presso la quale lo studente ha svolto un periodo di tirocinio curriculare.

La Supertino S.r.l. opera nel settore della meccanizzazione agricola, producendo macchinari per la raccolta e la distribuzione zootecnica. È una ditta a conduzione familiare, la cui caratteristica principale è la capacità di diversificare i suoi prodotti per poter rispondere ai molteplici bisogni dei suoi clienti.

Per quanto riguarda la fienagione, la Supertino fabbrica rotopresse a camera fissa e a camera variabile, presse Big Baler ad alta densità e avvolgitori balle.

Nel settore zootecnico, vengono prodotti carri trincia miscelatori orizzontali e verticali a coclee convergenti nelle versioni trainate e semoventi, impagliatrici distributrici, carri falcia autocaricanti e carri spandiletame. Proprio in quest'ultimo campo, l'azienda ha lanciato sul mercato un'importante novità: *Electra*, un carro trincia miscelatore verticale semovente dotato di un motore elettrico a magneti permanenti alimentato a batterie.

In particolare, il debutto dell'azienda nell'elettrificazione del carro trincia miscelatore semovente è iniziato con la versione *Electra 1*, il cui pacco batterie permetteva l'esecuzione di un solo ciclo di miscelazione. Con questo prototipo non si potevano soddisfare le esigenze di una media azienda che solitamente richiede di effettuare due cicli di miscelazione consecutivi.

L'evoluzione del progetto in *Electra 2* ha permesso di adempiere a questa richiesta del mercato. Il prototipo attuale presenta un nuovo pacco batterie che, mantenendo gli ingombri dimensionali della prima versione, garantisce un'autonomia di funzionamento sufficiente ad effettuare due cicli di miscelazione successivi.



Figura 3.13: Electra.

Sebbene la macchina debba erogare costantemente quantità elevate di energia, mettendosi quindi in una condizione di lavoro non prettamente indicata dall'attuale stato dell'arte dei sistemi di accumulo, due caratteristiche specifiche del ciclo di lavoro di questa macchina ne ammettono una completa elettrificazione: l'elevata ripetibilità delle operazioni e la limitata area di lavoro. Il primo fattore permette un dimensionamento ottimizzato del sottosistema, limitando al massimo il delta costo legato all'acquisto delle batterie. Il secondo aspetto dà comunque la possibilità di eseguire le lavorazioni stazionarie prelevando direttamente l'energia necessaria dalla rete.

3.4.1 Quali sono le differenze rispetto alla macchina tradizionale

Come anticipato in precedenza, Electra è un prototipo di carro trincia miscelatore verticale semovente a risparmio energetico. La potenza necessaria all'azionamento della macchina proviene da un motore *sincrono a magneti permanenti brushless* posizionato nella parte anteriore della macchina in sostituzione del motore endotermico diesel. Esso è stato dimensionato in modo da supplire ai consumi energetici registrati nel semovente tradizionale.

Il motore elettrico viene alimentato da un sistema di accumulo modulare costituito da *batterie al litio* che garantiscono un'autonomia di funzionamento di circa tre ore, sufficiente quindi a svolgere due cicli di miscelazione consecutivi. Esse sono sistemate all'interno di un cofano a tenuta stagna, collocato accanto al motore sempre nella parte anteriore della macchina. L'azionamento elettrico del motore è costituito da un *inverter* che converte la tensione in continua di un bus, proveniente dal pacco batterie, in alternata per alimentare il motore stesso. Inoltre, è presente un circuito di raffreddamento ad acqua e un sistema di sicurezza che, nel caso di un guasto all'impianto, stacca immediatamente l'alimentazione delle batterie.

Nel prototipo elettrico il moto viene trasmesso dal motore primario agli organi mobili della macchina esattamente come nella macchina tradizionale; la potenza motrice viene quindi ripartita tra:

- una trasmissione meccanica che mette in rotazione le coclee di miscelazione;
- una trasmissione idrostatica che aziona la fresa desilatrice;
- una trasmissione idrostatica che permette l'avanzamento del semovente.

L'unica eccezione è rappresentata dall'accoppiatore motore, il quale possiede un rapporto di trasmissione differente tra semovente elettrico e semovente diesel. Questo è dovuto al fatto che il motore a magneti permanenti ha una velocità nominale di *4.000 rpm*, quasi il doppio di quella del motore endotermico che presenta una velocità di *2.500 rpm*.

L'architettura *full electric* del prototipo a risparmio energetico risulta notevolmente semplificata rispetto alla macchina tradizionale in quanto prevede la totale eliminazione del serbatoio del gasolio e di tutti quei sistemi di trattamento post combustione dei gas di scarico. Inoltre, la maggiore prontezza della macchina elettrica nel rispondere alle richieste di potenza di picco, migliora notevolmente l'aspetto produttivo e il feeling che l'utilizzatore ha verso questa nuova architettura.



Figura 3.14: Vano motore.

3.4.2 Sistema di monitoraggio da remoto

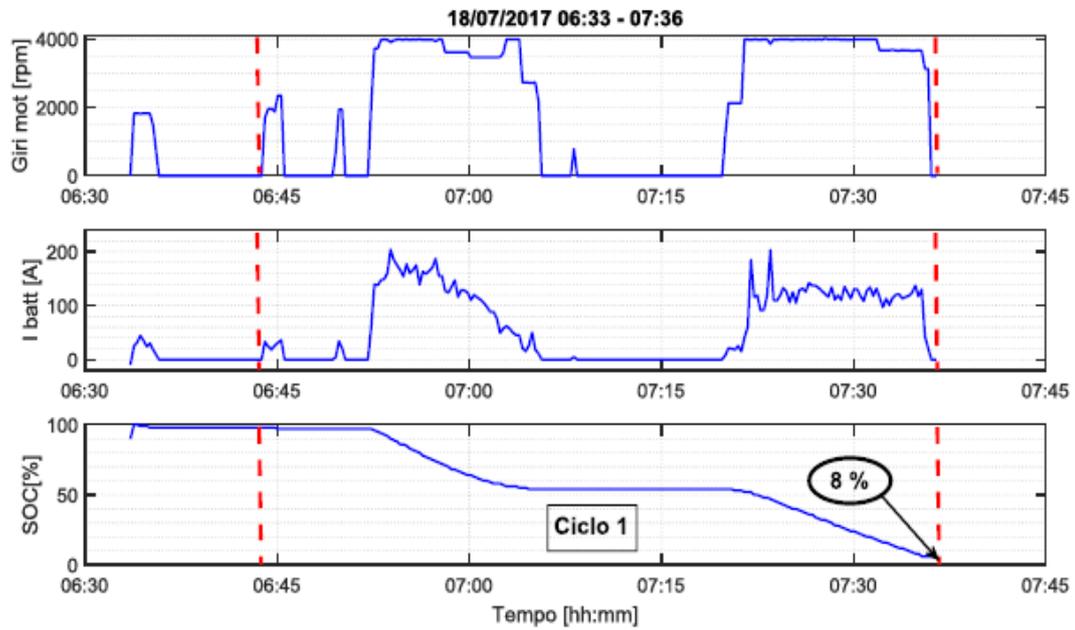
La macchina semovente elettrica è dotata di un sistema di monitoraggio che in grado di rilevare le principali grandezze di interesse sulla rete *CAN BUS* del veicolo ed inviarle su un cloud remoto; in particolare, permette di registrare e controllare a distanza quasi in tempo reale i seguenti parametri:

- corrente assorbita dalle batterie
- temperatura interna dell'azionamento elettrico;
- temperatura del liquido di refrigerazione del motore;
- stato di carica delle batterie;
- velocità di rotazione del motore;

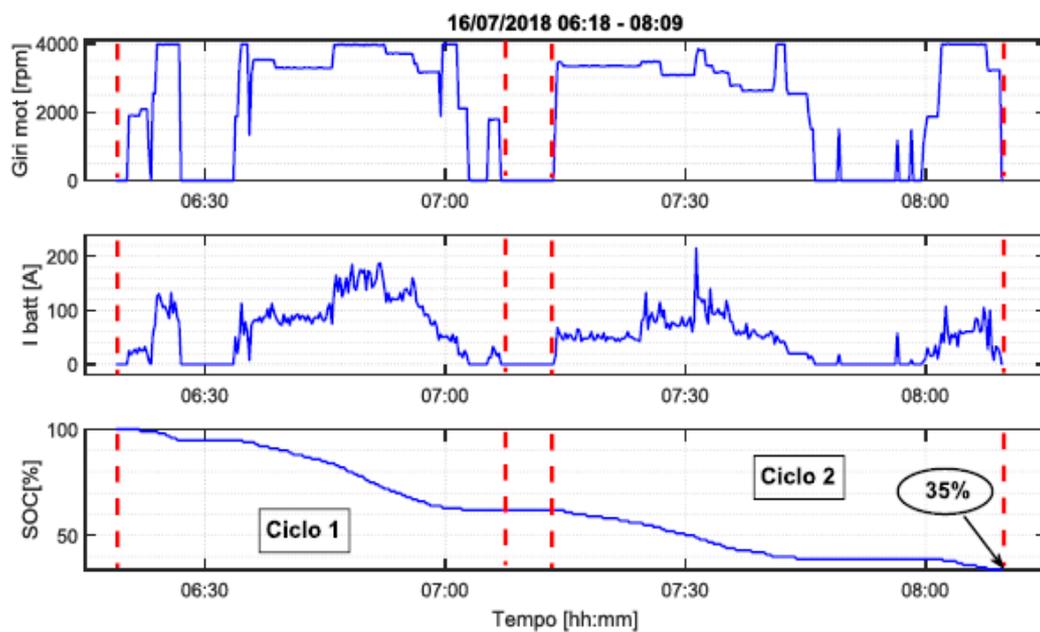
Lo studente, nel periodo di tirocinio curriculare presso la Supertino S.r.l., ha utilizzato questo sistema per continuare l'attività di monitoraggio del semovente durante il suo funzionamento in cascina e registrare i dati trasmessi dal *CAN BUS*, plottando la loro variazione nel corso di un ciclo di miscelazione.

Nella Figura 3.3 si riporta un esempio dei dati ottenuti dalla macchina nelle due differenti versioni del pacco batterie. Nella prima parte si rappresentano i dati registrati su *Electra 1*. Come si può notare, il pacco batterie progettato per questa versione riesce agevolmente a concludere la singola miscelata, rimanendo con una percentuale di carica residua (*SOC*: stato di carica) sufficiente alla salvaguardia nel tempo delle singole celle al litio. Nella seconda parte della figura si rappresentano i dati registrati su *Electra 2*. La macchina, con questa configurazione, riesce ad effettuare facilmente due cicli di lavorazione consecutivi rimanendo con una carica residua ancora maggiore rispetto a quella della precedente versione.

Tale sistema di monitoraggio da remoto permette dunque l'osservazione continua della macchina lasciando comunque l'utilizzatore libero di usarla in piena autonomia. L'attività di testing risulta fondamentale in quanto permette di analizzare costantemente i parametri vitali e i consumi energetici della macchina con lo scopo di incrementare sempre di più l'efficienza e l'affidabilità del prototipo.



(a)



(b)

Figura 3.15: Dati registrati durante il monitoraggio di Electra: (a) Prima versione. (b) Seconda versione.

CAPITOLO 4

STUDIO DELLE FUNZIONI E ANALISI DEI CONSUMI

In questo capitolo verranno analizzate le funzioni di un carro trincia miscelatore semovente evidenziando quali sono le soluzioni migliori da adottare in termini di architettura e di trasmissione del moto per garantire una massima efficienza energetica.

Inoltre, riferendosi al prototipo elettrico illustrato nel capitolo precedente, si esamineranno i dati registrati nell'attività di monitoraggio della macchina svolta dallo studente nel periodo di tirocinio curriculare presso la Supertino S.r.l. Sulla base di questi, si stimeranno i consumi energetici delle varie funzioni del semovente e successivamente si forniranno possibili migliorie da attuare per ottimizzare l'efficienza e di conseguenza prolungare la durata delle batterie.

4.1 Studio delle funzioni

In commercio, sebbene un carro miscelatore è una macchina agricola adibita allo svolgimento di determinati compiti quali la trinciatura, la miscelazione e la distribuzione in mangiatoia dei prodotti impiegati per l'alimentazione animale, le case costruttrici impiegano differenti soluzioni strutturali e trasmissive. Nel capitolo 2, come già accennato, è stata effettuata una descrizione del carro semovente tradizionale (cioè dotato di motore endotermico) facendo riferimento alle macchine prodotte dall'azienda presso la quale lo studente ha svolto un periodo di tirocinio curriculare.

In questo sotto capitolo, si confrontano quindi le varie tecniche utilizzate dalle ditte evidenziando quali di queste risultano migliori dal punto di vista energetico e strutturale.

4.1.1 Posizionamento del motore

Il posizionamento del motore primario non risulta importante dal punto di vista energetico in quanto, a parità di modello adottato e di funzioni svolte, il consumo energetico della macchina dipende dall'efficienza degli organi trasmissivi. Invece, dal punto di vista strutturale, questo aspetto è fondamentale.

Un carro miscelatore semovente è una macchina autonoma utilizzata perlopiù in cascina e quindi costretta a confrontarsi con spazi delimitati quali i corridoi delle stalle, i silos orizzontali per lo stoccaggio degli insilati, ecc. Ogni azienda agricola ovviamente possiede dei macchinari proporzionati in base alla sua realtà dimensionale, ma molto spesso il livello produttivo non concilia adeguatamente con gli spazi a disposizione. Possono esistere grandi aziende altamente produttive che possiedono strutture di piccole dimensioni e piccole aziende mediamente produttive che hanno a disposizione grossi spazi nei quali i macchinari riescono ad operare senza problemi.

Per questo motivo, gli ingombri dimensionali dei carri miscelatori sono funzione delle realtà aziendali con cui devono confrontarsi. Osservando i modelli realizzati dalle varie case costruttrici, si individuano sostanzialmente due tipologie di semoventi in base alla collocazione del motore:

- Carri miscelatori con motore posizionato nella parte *anteriore* della macchina, di fianco alla cabina di guida (in questa categoria rientrano i semoventi prodotti dalla Supertino S.r.l.). Queste macchine sono caratterizzate da una elevata compattezza dimensionale che permette loro di operare agevolmente in spazi ridotti. Presentano normalmente un asse sterzante anteriore e un passo di 2.800 – 3.000 mm (le dimensioni riportate si riferiscono a modelli con una vasca di capacità 20-22 m³). Il collocamento del motore e di tutti gli accessori ad esso connessi (radiatore, ventola di raffreddamento, serbatoio gasolio, ecc.) nella parte anteriore limita, però, le operazioni di manutenzione e il campo di visibilità dell'operatore; per ovviare a quest'ultimo problema, si installano opportuni specchi retrovisori e telecamere.



Figura 4.1: Carro trincia miscelatore semovente con motore posizionato anteriormente.

- Carri miscelatori con motore posizionato nella parte *posteriore* della macchina. Queste macchine sono caratterizzate da un ampio campo di visibilità; grazie proprio a questo aspetto è possibile effettuare in modo agevole lo scarico degli alimenti in mangiatoia sia dal lato destro che dal lato sinistro della macchina. Inoltre, si facilitano anche le operazioni di manutenzione ordinaria quali cambio olio e filtri, pulizia radiatore. Presentano normalmente due assi sterzanti e un passo di $5.200 - 5.400 \text{ mm}$ (le dimensioni riportate si riferiscono a modelli con una vasca di capacità $20-22 \text{ m}^3$). Il collocamento del motore e di tutti gli accessori ad esso connessi (radiatore, ventola di raffreddamento, serbatoio gasolio, ecc.) nella parte posteriore comporta, però, una maggiore lunghezza della macchina rendendo difficoltose le operazioni in spazi ridotti. A questo si cerca di ovviare trasformando l'asse posteriore in un asse sterzante e diminuendo così il raggio di manovra.



Figura 4.2: Carro trincia miscelatore semovente con motore posizionato posteriormente.

4.1.2 Trasmissione coclee di miscelazione

Il rendimento della catena trasmissiva impiegata per trasmettere il moto dal motore alle coclee è molto importante dal punto di vista energetico in quanto la miscelazione dei prodotti inseriti all'interno della vasca rappresenta la fase più gravosa per la macchina. Questo significa che un incremento dell'efficienza di questa funzione del semovente comporterebbe un notevole risparmio energetico.

Per effettuare l'azionamento degli organi miscelanti, le case costruttrici di carri miscelatori si distinguono quindi nell'adottare:

- Una *trasmissione meccanica* costituita normalmente da un cambio a due velocità, alberi cardanici e riduttori ad assi ortogonali (questa tipologia trasmissiva è adottata sui semoventi della ditta Supertino S.r.l.). Tale soluzione presenta un rendimento meccanico molto elevato pari all'incirca a $0,9$ in quanto le perdite che si sviluppano sono dovute solamente all'attrito degli ingranaggi. Nonostante l'efficienza energetica sia eccellente, questa trasmissione comporta alcuni svantaggi quali la necessità di doversi fermare per l'inserimento delle marce del cambio (solitamente sono due) e la possibilità di effettuare una variazione limitata della

velocità di rotazione delle coclee. Inoltre, è necessario operare una manutenzione ordinaria per l'ingrassaggio e la sostituzione dell'olio dei vari componenti.

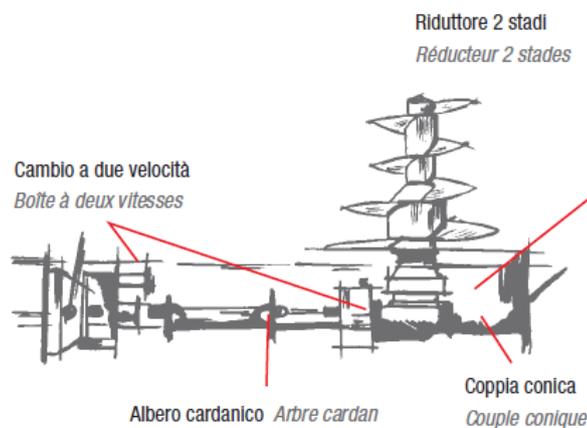


Figura 4.3: Trasmissione meccanica coclee di miscelazione.

- Una *trasmissione idrostatica* costituita da una pompa a cilindrata variabile, tubazioni oleodinamiche e un motore idraulico. Questa soluzione permette di miscelare piccole o grandi quantità di prodotto grazie ad una variazione continua della velocità di rotazione delle coclee e, inoltre, consente una rapida inversione del moto in caso di bloccaggio degli organi miscelanti. Necessita di una manutenzione ordinaria minima e presenta una realizzazione costruttiva più semplice rispetto a quella meccanica. Tuttavia, questa catena trasmissiva è caratterizzata da perdite di portata e di pressione dovute alla viscosità del fluido; il rendimento globale risulta solitamente essere pari a 0,7 anche se tale valore può scendere drasticamente nel caso in cui l'olio si surriscaldi oltre la temperatura massima ammessa. Tra gli svantaggi vi è inoltre la necessità di avere un impianto dedicato per la generazione dell'energia e un impatto ambientale negativo a causa dell'infiammabilità del fluido.

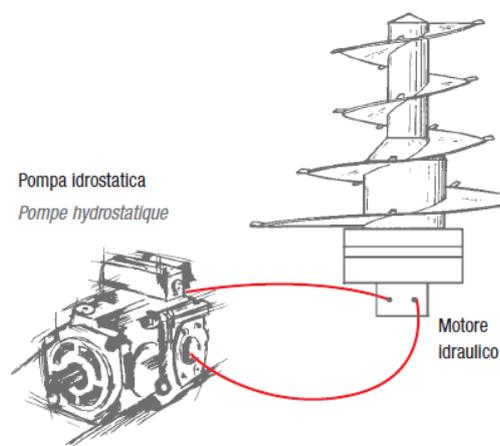


Figura 4.4: Trasmissione idrostatica coclee di miscelazione.

Sulla base dei semoventi presenti in commercio, nel maggior parte dei casi si sceglie di premiare l'aspetto energetico e di adottare una trasmissione meccanica per mettere in rotazione le coclee di miscelazione. In questo modo, le perdite dovute al solo azionamento della catena cinematica risultano essere le minime possibili. In aggiunta, la potenza dissipata a vuoto è minore in quanto nella trasmissione idrostatica l'albero della pompa è sempre in rotazione.

4.1.3 Trasmissione fresa desilatrice

Tutte le case costruttrici di carri miscelatori semoventi impiegano una trasmissione idrostatica per l'azionamento della fresa desilatrice. Essendo posizionata all'estremità di un braccio mobile, risulta quasi obbligatorio l'impiego di questa soluzione per poter trasmettere il moto. Normalmente, tale catena trasmissiva è costituita da una pompa a cilindrata variabile, da tubazioni oleodinamiche in gomma e/o ferro ad alta pressione e da un moto-riduttore idraulico. In questo modo, si riesce a trasmettere la potenza necessaria ad una certa distanza senza avere vincoli di allineamento. Inoltre, tale sistema ha il vantaggio di assorbire i picchi di carico derivanti da improvvisi sovraccarichi e urti senza causare danni agli organi meccanici.

Come già accennato nel sotto capitolo precedente, questa tipologia trasmissiva si caratterizza per un rendimento non molto elevato a causa delle perdite di pressione e portata dovute alla viscosità dell'olio. Facendo riferimento ai componenti installati sui semoventi della ditta Supertino S.r.l, si effettua una stima del rendimento globale di tale trasmissione.

| | |
|--|------------|
| $\eta_{\text{ACCOPIATORE}}$ | 95% |
| η_{POMPA} | 89% |
| $\eta_{\text{TUBAZIONI}}$ | 98% |
| η_{MOTORE} | 89% |
| $\eta_{\text{RIDUTTORE}}$ | 95% |
| $\eta_{\text{TRASMISSIONE}}$ | 71% |

Tabella 4.1: Rendimento della trasmissione idrostatica della fresa desilatrice.

Dalla tabella 4.1, si nota che le perdite di potenza ammontano ad un 30% circa; questo risultato teorico è probabilmente una sottostima del valore reale in quanto la temperatura del fluido ha una forte incidenza negativa sul rendimento della trasmissione in questione.

In conclusione, risultando impossibile adottare una catena trasmissiva meccanica per azionare la fresa desilatrice, si realizza una trasmissione idrostatica a scapito di una minore efficienza energetica.

4.1.4 Trasmissione avanzamento

Un carro miscelatore semovente è una macchina operatrice che compie piccoli spostamenti all'interno dell'area aziendale senza affrontare grandi pendenze (max 8-10%). La potenza destinata alla trazione serve unicamente allo spostamento della macchina stessa; essa non è adibita al traino di alcun tipo di attrezzatura.

Tutte le case costruttrici impiegano una trasmissione idrostatica a due posizioni di lavoro per l'avanzamento delle macchine. Normalmente, la potenza di trazione è fornita da due moto-riduttori idraulici calettati sull'assale anteriore o posteriore del semovente e collegati direttamente alle ruote. Tramite pedali di comando o joystick disposti in cabina, l'allevatore governa facilmente lo spostamento del carro semovente impostando la velocità di avanzamento più adeguata all'operazione che deve svolgere. In generale, la velocità massima che può raggiungere un carro miscelatore è 25 km/h (come optional si può scegliere di inserire una terza posizione di lavoro che garantisce una velocità massima di 40 km/h).

Riepilogando, risulta complicato impiegare una trasmissione meccanica per l'avanzamento di questa tipologia di macchine per motivi di disassamento e distanza; si adotta quindi una soluzione idrostatica a scapito di una minore efficienza energetica.

4.1.5 Servizi ausiliari

Come già descritto nel capitolo 2, soluzioni idrauliche vengono impiegate anche per l'alimentazione dei servizi ausiliari quali l'apertura e la chiusura dello sportello di scarico, l'azionamento dei nastri trasportatori di carico e scarico, la movimentazione del braccio desilatore, l'inserimento dei controcoltelli, ecc. In questi casi, si realizzano impianti costituiti da pompe a cilindrata fissa, tubazioni oleodinamiche in gomma e/o ferro a bassa pressione e attuatori lineari o rotativi.

4.2 Valutazione dei consumi energetici

Nella prima parte del presente sotto capitolo si effettua una stima dei consumi energetici di un carro semovente evidenziando quali sono le funzioni della macchina più dispendiose. Ciò viene realizzato elaborando i dati raccolti dal monitoraggio remoto del prototipo a zero emissioni realizzato dalla Supertino S.r.l che, come spiegato in precedenza, si tratta di un carro semovente tradizionale in cui il motore diesel è stato sostituito con uno elettrico.

Sulla base dei risultati ottenuti, nella parte conclusiva si indicheranno quali potrebbero essere dei possibili miglioramenti da apportare alla macchina per ridurre la spesa energetica e di conseguenza aumentare l'autonomia garantita dalle batterie.

4.2.1 Elaborazione dei dati raccolti

Il sistema di monitoraggio remoto installato sul carro miscelatore elettrico permette di registrare alcuni parametri della macchina elencati nel capitolo precedente; ai fini della presente analisi, vengono utilizzati i seguenti dati registrati:

- Corrente elettrica fornita dal pacco batterie;
- Intervallo di tempo con cui vengono campionati i dati;
- Stato di carico delle batterie.

Questi dati non sono sufficienti per determinare la potenza istantanea assorbita dalla macchina; risulta necessario conoscere anche il valore di tensione presente ad ogni istante ai capi del pacco batterie. Poiché esso non viene rilevato dalla centralina elettronica, si ipotizza di determinarlo considerando lo schema semplificato del circuito elettrico in questione.

Il pacco batterie, realizzato collegando in serie un certo numero di batterie, è di fatto un generatore di tensione reale composto da:

- Un generatore di tensione ideale che produce una forza elettromotrice pari alla somma delle tensioni di ogni singola batteria;
- Una resistenza interna pari alla somma delle resistenze di ogni singola batteria.

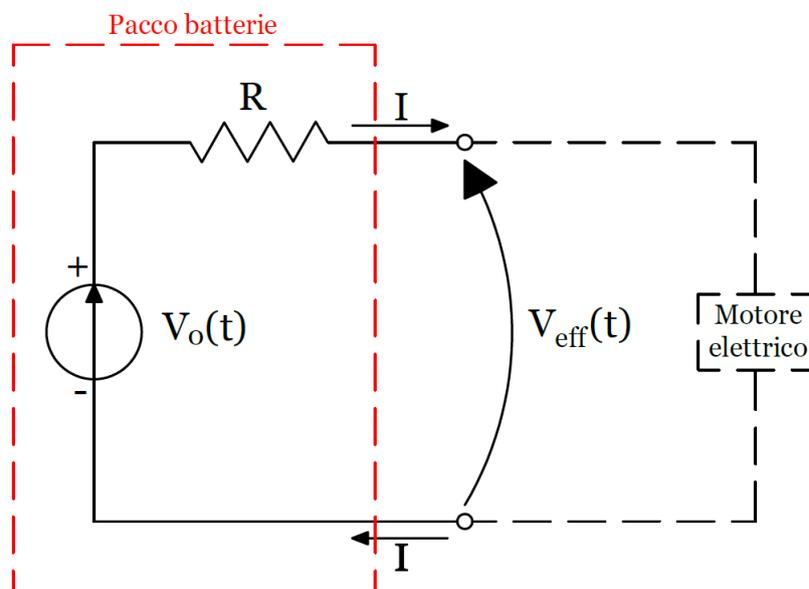


Figura 4.5: Circuito elettrico equivalente del sistema di accumulo di Electra.

La tensione effettiva $V_{eff}(t)$ presente in ogni istante ai capi del pacco batteria risulta essere:

$$V_{eff}(t) = V_0(t) - R \cdot I(t) \quad (4.1)$$

Dove:

- $I(t)$ è la corrente elettrica fornita in ogni istante dal pacco batterie e registrata dal sistema di controllo remoto. Le batterie, essendo collegate in serie, erogano ciascuna l'intensità di corrente $I(t)$;
- R è la resistenza interna del pacco batterie, pari alla somma delle resistenze interne di ciascuna batteria. Considerando N batterie aventi una resistenza interna r_i , la resistenza totale risulta quindi essere:

$$R = N \cdot r_i \quad (4.2)$$

- $V_0(t)$ è la tensione ideale generata dal pacco batterie, pari alla somma delle tensioni di circuito aperto (Open Circuit Voltage - OCV) di ogni singola batteria. Questo valore dipende dallo stato di carica (SOC) e risulta avere un andamento come quello riportato nella Figura 4.6 sottostante [29].

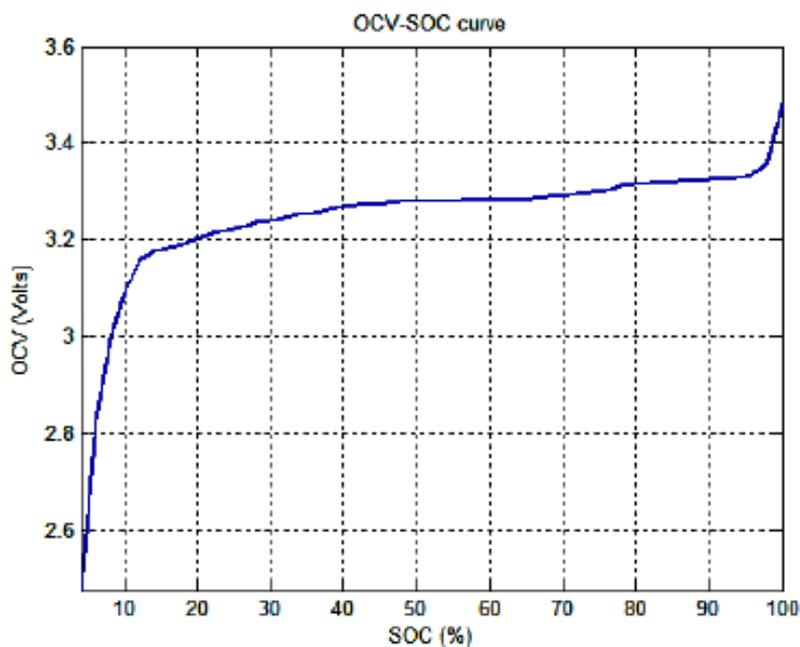


Figura 4.6: Curva OCV-SOC sperimentale per celle elettrolitiche LiFePO₄.

Considerando N batterie aventi una tensione di circuito aperto $V_{OC,i}$ funzione dello stato di carica $SOC(t)$ registrato in ogni istante dal sistema di controllo remoto, la tensione ideale $V_0(t)$ generata dal pacco batterie in ogni istante risulta essere:

$$V_0(t) = N \cdot V_{OC,i}(SOC(t)) \quad (4.3)$$

Una volta ricavata la tensione effettiva $V_{eff}(t)$ presente in ogni istante ai capi del pacco batteria, si determina la potenza istantanea assorbita dalla macchina con la seguente espressione:

$$P(t) = V_{eff}(t) \cdot I(t) \quad (4.4)$$

L'intervallo di tempo con cui vengono registrati i parametri della macchina è pari a $T = 15$ s; l'energia consumata in ogni intervallo di tempo j risulta quindi essere:

$$E(j) = P_{m,j} \cdot T \quad (4.5)$$

Dove:

- $P_{m,j}$ è la potenza media assorbita nell'intervallo di tempo j -esimo;
- T è la durata di ciascun intervallo j -esimo pari a 15 s.

In ogni intervallo di tempo j , la potenza media istantanea assorbita dalla macchina viene distribuita tra le funzioni del semovente (*coclee, fresa, avanzamento e servizi ausiliari*) in azione in quel momento. Le quote di ripartizione vengono stabilite studiando analisi svolte sul carro tradizionale, nella quali si mette a confronto la potenza assorbita dagli organi della macchina tra le varie fasi del ciclo di lavoro. Di seguito vengono riportati i tassi di distribuzione impiegati nell'elaborazione dei dati raccolti, suddivisi per fasi di lavoro.

| Fase del ciclo di lavoro | Funzioni | | | |
|---------------------------------|----------|-------|-------------|-------------------|
| | Coclee | Fresa | Avanzamento | Servizi ausiliari |
| Spostamento | - | - | 0,95 | 0,05 |
| Spostamento con miscelazione | 0,65 | - | 0,30 | 0,05 |
| Carico paglia o foraggi secchi | 0,25 | 0,65 | 0,05 | 0,05 |
| Carico foraggi semi-secchi | 0,35 | 0,55 | 0,05 | 0,05 |
| Carico insilato di mais | 0,60 | 0,25 | 0,05 | 0,10 |
| Miscelazione | 0,95 | - | - | 0,05 |
| Scarico miscelata in mangiatoia | 0,60 | - | 0,30 | 0,10 |

Tabella 4.2: Quote di ripartizione della potenza assorbita nelle varie fasi di lavoro del carro.

Individuando la fase del ciclo di lavoro a cui appartiene l'intervallo di tempo j -esimo e suddividendo la potenza media assorbita come indicato nella Tabella 4.2, si ottiene l'energia consumata da ciascuna funzione del semovente in ogni intervallo di tempo j .

4.2.2 Rappresentazione dei risultati ottenuti

Il procedimento di calcolo descritto nel sotto capitolo precedente viene implementato in uno script *Matlab*. Grazie a tale programma, si effettua la lettura e la successiva elaborazione dei dati registrati in diversi cicli di lavoro della macchina permettendo così di determinare i consumi energetici medi di ciascuna funzione del semovente. In particolare, si analizzano dei cicli di lavoro dalla durata media di 35 -40 minuti in cui il semovente viene utilizzato per preparare la razione alimentare di 130 capi bovini in cui si distinguono:

| Fase del ciclo di lavoro | Quantità |
|---------------------------------|----------|
| Spostamento | 1 |
| Spostamento con miscelazione | 2 |
| Carico paglia o foraggi secchi | 1 |
| Carico foraggi semi-secchi | 1 |
| Carico insilato di mais | 1 |
| Miscelazione | 2 |
| Scarico miscelata in mangiatoia | 1 |

Tabella 4.3: Descrizione delle prove svolte.

I risultati ottenuti vengono rappresentati nel grafico in Figura 4.7 riportato nella pagina seguente.

Come si può notare, l'analisi effettuata ha prodotto dei risultati plausibili poiché ha confermato quanto emerge dall'esperienza delle case costruttrici di carri miscelatori, ovvero che il sistema di miscelazione assorbe la quota maggiore di energia, seguito in ordine decrescente dall'apparto desilatore, dall'avanzamento e dai servizi ausiliari.

L'esecuzione di prove sperimentali più specifiche in cui ogni funzione del semovente venga azionata singolarmente sia a vuoto che sotto carico sicuramente perfezionerebbe le quote di ripartizione della potenza assorbita valutate teoricamente e riportate nella Tabella 4.2 alla pagina precedente.

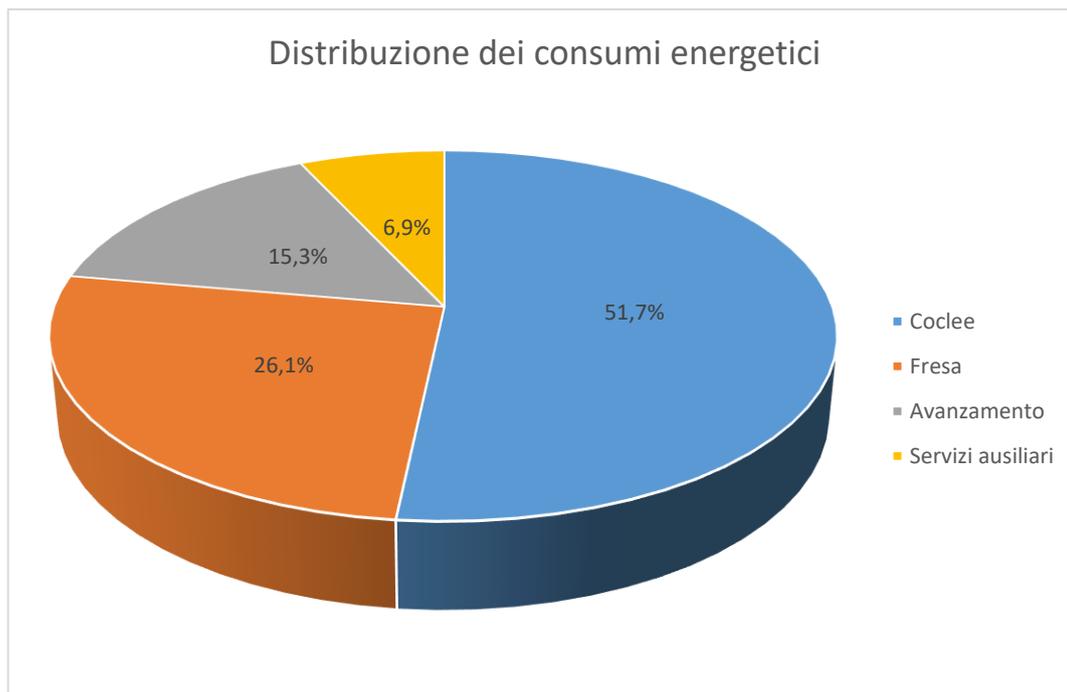


Figura 4.7: Distribuzione dei consumi energetici.

4.2.3 Considerazioni energetiche

L'elaborazione dei dati raccolti dal sistema di controllo del carro miscelatore elettrico hanno evidenziato che:

- La miscelazione dei prodotti generata dalla rotazione delle coclee all'interno della vasca di contenimento è la funzione che impiega più energia in un ciclo di lavoro della macchina; in particolare dai risultati ottenuti si evidenzia un consumo del 51,7%. Le coclee vengono azionate nel momento in cui si introduce all'interno del cassone il primo componente della razione e si arrestano quando termina lo scarico in mangiatoria della miscelata. Infatti, oltre ad avere il compito di sminuzzare e miscelare i materiali inseriti nella vasca, gli organi miscelanti permettono anche il convogliamento della massa miscelata verso lo sportello di scarico ed è per questo motivo che restano in azione fino alla fine del ciclo di lavoro.
- La fresa desilatrice, che permette il carico all'interno della vasca di miscelazione dei foraggi e degli insalati, utilizza una buona parte dell'energia totale impiegata dal carro semovente in un ciclo di lavoro; in particolare, dai risultati ottenuti, si evidenzia un consumo del 26,1%. Questo valore, frutto di una stima teorica svolta su un determinato set di prove, può sicuramente variare in quanto l'azionamento dell'apparato desilatore dipende fortemente dal tipo di razione alimentare che si desidera preparare derivante, a sua volta, dalle esigenze nutrizionali dell'allevamento. In ogni caso, si suppone che la variazione del consumo energetico legato alla desilazione dei materiali dal valore indicato sia al massimo di qualche punto percentuale.

- Il consumo energetico dovuto all'avanzamento della macchina risulta essere circa il 15,3% del totale. Anche questo valore, come quello precedente, può certamente variare in quanto gli spostamenti della macchina sono notevolmente influenzati dall'organizzazione delle strutture aziendali, ovvero dalla locazione dei silos di stoccaggio, delle tettoie di riparo, delle stalle e dalla distanza che li separa.
- I servizi ausiliari hanno fondamentalmente una bassa incidenza sul consumo energetico totale di un ciclo di lavoro (circa il 6,9%).

4.2.4 Possibili miglioramenti

Sulla base dell'analisi energetica compiuta, si deduce che per ridurre i consumi della macchina bisogna intervenire innanzitutto migliorando l'efficienza del sistema di miscelazione poiché esso impiega più della metà dell'energia totale utilizzata in un ciclo di lavoro. Ipotizzando di adottare una trasmissione meccanica per azionare le coclee che presenta un rendimento già molto elevato (pari all'incirca a 0,9), per diminuire l'energia consumata dalla miscelazione si può presumere di ottimizzare la struttura degli organi miscelanti. Questa valutazione viene svolta nel presente lavoro di tesi costruendo un modello multibody del sistema di miscelazione del semovente, in grado di simulare il carico dinamico prodotto dai componenti della razione alimentare sulle coclee. Nel prossimo capitolo si riporta la spiegazione del procedimento seguito per realizzare tale modello, le ipotesi effettuate e i risultati ottenuti analizzandolo.

Oltre a migliorare l'efficienza del sistema di miscelazione, per ridurre i consumi si potrebbe anche intervenire sull'apparato desilatore e ottimizzare il rendimento della trasmissione che impone il moto alla fresa. In questo modo, si diminuirebbe l'energia spesa per desilare in ogni ciclo di lavoro.

Tutte queste considerazioni sono di primaria importanza per il prototipo elettrico, dove generare la giusta autonomia di cui la macchina necessita per operare non risulta così scontato con le tecnologie attuali in termini di batterie. Per questo motivo, è meglio innanzitutto massimizzare l'efficienza energetica di ciascuna funzione del carro semovente per prolungare il più possibile la durata delle batterie.

CAPITOLO 5

SIMULAZIONE MULTIBODY

Analizzando i dati raccolti durante il monitoraggio di Electra, si sono individuati i consumi energetici di ogni singola funzione della macchina; dalla loro analisi risulta che la fase più gravosa è la miscelazione dei prodotti costituenti la razione animale. Una volta caricati tutti gli ingredienti della miscelata nella vasca, le coclee presenti all'interno di essa mettono in moto il materiale secondo un flusso convettivo dal basso verso l'alto. Questo processo ha termine nel momento in cui si ottiene una totale uniformità e omogeneità in tutta la massa mescolata.

Si deduce, quindi, che il miglioramento dell'efficienza del sistema di miscelazione comporterebbe una significativa riduzione dei consumi della macchina e un conseguente aumento della durata delle batterie. Sulla base di questa riflessione è stato realizzato un modello multibody dell'apparato di miscelazione della macchina al fine di eseguire un'ottimizzazione del profilo geometrico delle coclee.

5.1 Modellazione CAD

Come già spiegato nel capitolo 2, il sistema di trincia miscelazione è costituito da una vasca di acciaio, all'interno della quale sono alloggiati due coclee verticali tronco coniche controrotanti. Poiché i corpi in questione presentano una geometria complessa da realizzare in un ambiente multibody, essi sono stati prima modellati in un ambiente CAD tridimensionale sulla base dei disegni tecnici costruttivi e poi successivamente importati nel software di analisi dinamica.

5.1.1 Vasca

La vasca di miscelazione è costituita da un fondo in acciaio spesso 20 mm a forma di ellisse, a cui si saldano le pareti laterali realizzate in lamiera di acciaio di spessore pari a 8 mm. La superficie laterale

possiede un angolo di apertura verso l'alto. All'interno della vasca sono presenti due nervature che evitano l'accumulo di materiale tra le due coclee e generano un flusso di miscelazione a forma di 8. Sempre sulla superficie laterale della vasca, sono presenti degli scassi per permettere l'inserimento dei controcoltelli laterali.

Per modellare questo corpo in ambiente *Solidworks*, è stato realizzato un solido tramite un'*Estrusione/base con loft* tra le due ellissi di base della vasca e successivamente svuotato utilizzando la funzione *Svuota*. Le due nervature interne sono state costruite tramite la definizione di superfici di delimitazione poi inspessite. Infine, sono stati creati quattro controcoltelli sulla superficie interna tramite delle semplici operazioni di *Estrusione/base* e *Taglio estruso*.

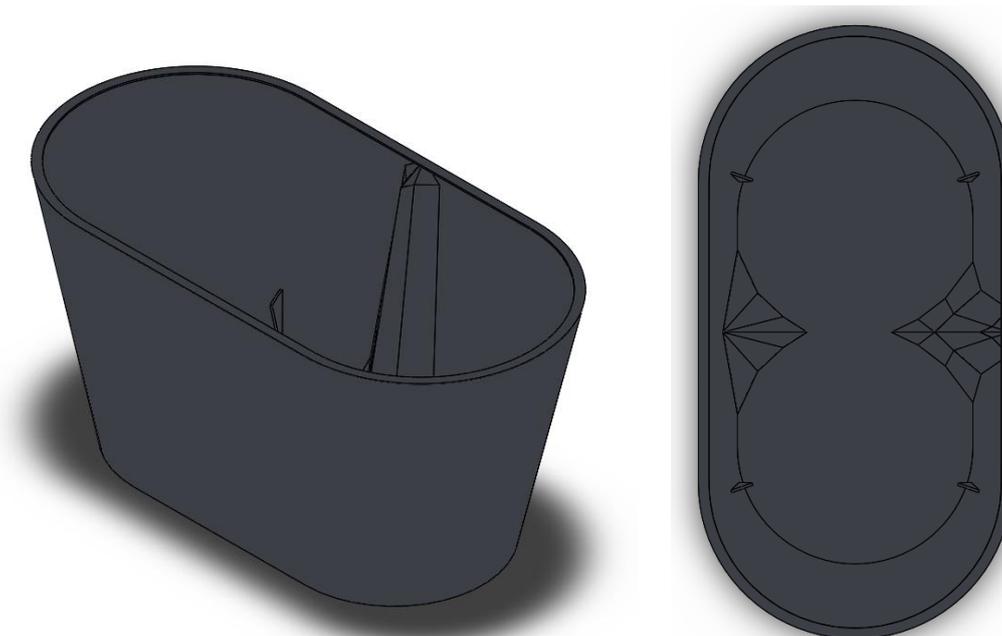


Figura 5.1: Modello tridimensionale della vasca di miscelazione

5.1.2 Coclee

La coclea verticale del carro trincia miscelatore è costituita da un'elica a passo costante che si avvolge con una certa conicità intorno ad un'anima centrale avente un profilo tronco conico. L'elica risulta essere rastremata, ovvero la sua larghezza diminuisce progressivamente procedendo dalla base inferiore alla base superiore del tronco di cono. All'estremità superiore dell'elica la coclea presenta un terminale, ovvero una superficie a forma di arco di corona circolare di ampiezza pari a 60° circa avente un'inclinazione maggiore rispetto all'elica; questa parte serve per evitare che durante la miscelazione il materiale strisci sul cupolino del tronco cono centrale usurandolo. Sulla base di questa geometria, è stata realizzata una parametrizzazione della coclea per poter successivamente effettuare un'analisi dinamica dell'apparato di miscelazione della macchina al variare dei parametri di progetto considerati.

Parametrizzazione

Il raggio interno e il raggio esterno dell'elica presentano due angoli di conicità differenti poiché, come già detto, la larghezza della spirale diminuisce progressivamente dalla base inferiore alla base superiore della coclea. Per parametrizzare analiticamente la variazione di questi due raggi lungo l'asse di rotazione della coclea, sono state definite le seguenti leggi lineari:

$$r_i = kx + q \quad (5.1)$$

$$r_e = mx + t \quad (5.2)$$

dove:

- x rappresenta la posizione dell'elica lungo l'asse di rotazione della coclea;
- k è la tangente dell'angolo di conicità valutata al raggio interno dell'elica;
- m è la tangente dell'angolo di conicità valutata al raggio esterno dell'elica;
- q è il raggio superiore interno dell'elica;
- t è il raggio superiore esterno dell'elica.

Nella Figura 5.2 si può osservare una rappresentazione grafica delle leggi appena descritte.

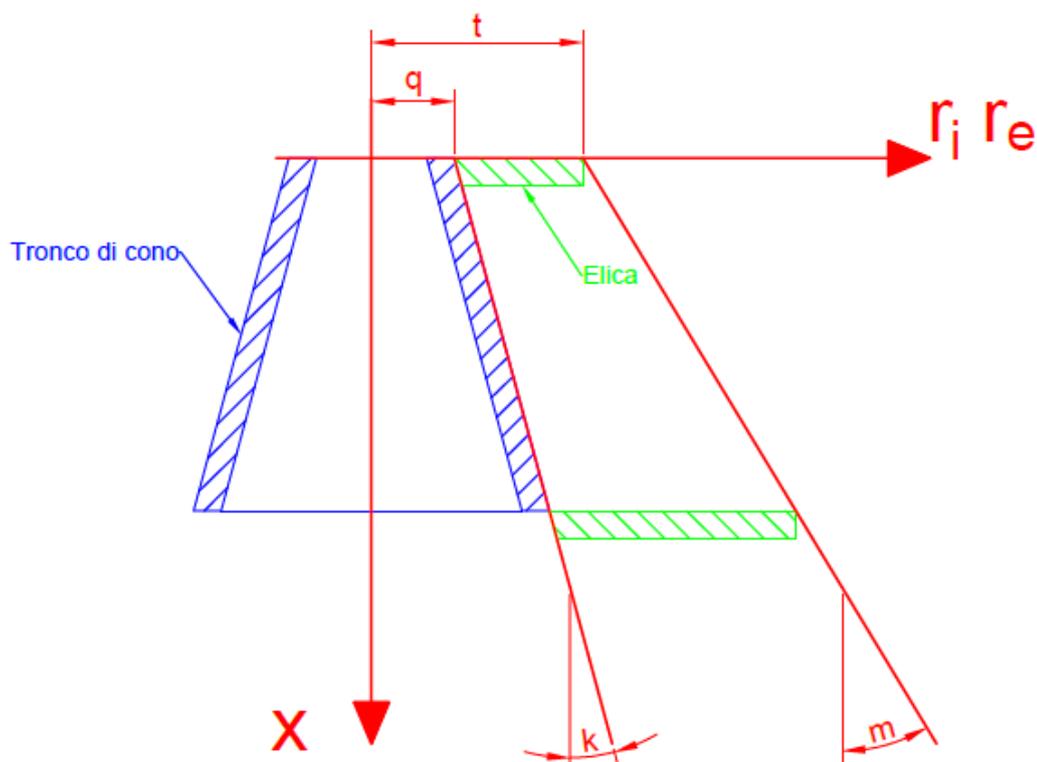


Figura 5.2: Rappresentazione grafica delle leggi lineari 5.1 e 5.2.

In questo modo, la geometria dell'anima centrale è subordinata alla scelta dei parametri q e k . L'elica della coclea ha un passo p costante; la sua altezza risulta quindi dipendere dal numero di rivoluzioni n e dal passo stesso. La formula impiegata per determinare l'altezza h è dunque:

$$h = p \cdot n \quad (5.3)$$

Sulla base della parametrizzazione appena definita, risulta che:

- il raggio interno dell'elica per $x = 0$ vale:

$$r_i(x = 0) = q \quad (5.4)$$

- il raggio esterno dell'elica per $x = 0$ vale:

$$r_e(x = 0) = t \quad (5.5)$$

- il raggio interno dell'elica per $x = h$ vale:

$$r_i(x = h) = k \cdot h + q \quad (5.6)$$

- il raggio esterno dell'elica per $x = h$ vale:

$$r_e(x = h) = m \cdot h + t \quad (5.7)$$

Oltre ai parametri fino a qui introdotti, è necessario ancora aggiungere due grandezze che rappresentano rispettivamente lo spessore dell'elica s_e e lo spessore della struttura centrale tronco conica s_t .

La scelta dei parametri di progetto è vincolata dal fatto che nella realtà il raggio esterno dell'elica alla base inferiore della coclea presenta un limite massimo $r_{e,max}$ che non deve essere oltrepassato. Infatti, deve sempre sussistere un determinato spazio vuoto tra l'estremità dell'elica e la superficie interna della vasca di miscelazione in modo da evitare la compenetrazione dei corpi che renderebbe impossibile la rotazione della coclea stessa.

Inoltre, il raggio superiore interno dell'elica non può essere inferiore allo spessore longitudinale del tronco centrale per evitare problemi di compenetrazione della lamiera.

Nella determinazione dei parametri di progetto, si devono quindi rispettare le seguenti due disequazioni.

$$m \cdot h + t \leq r_{e,max} \quad (5.8)$$

$$q \geq \frac{s_t}{\cos(\tan^{-1}(k))} \quad (5.9)$$

In conclusione, la struttura della coclea verticale del carro miscelatore è stata modellata tramite una parametrizzazione analitica che definisce nove grandezze indipendenti: $k, q, m, t, p, n, s_e, s_t, r_{e,max}$.

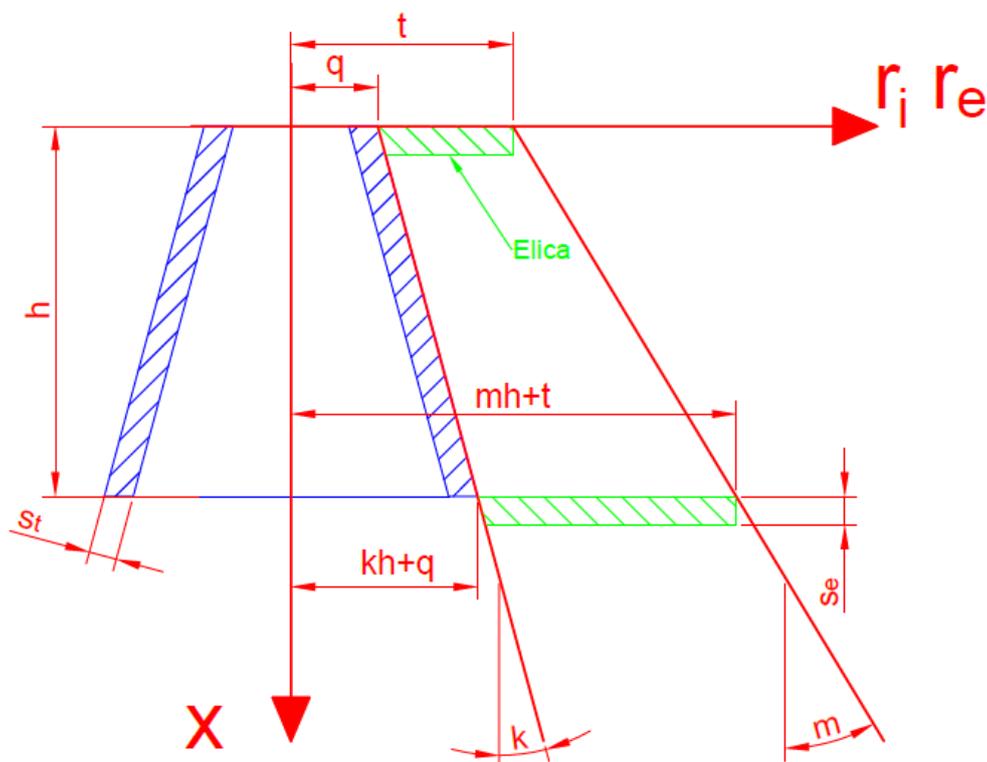


Figura 5.3: Rappresentazione grafica della struttura parametrica della coclea.

Modellazione 3D

La parametrizzazione della coclea del carro miscelatore appena descritta è stata implementata nel modello tridimensionale realizzato in *Solidworks*.

Per modellare l'anima centrale della coclea, è stata effettuata un'*Estrusione/base in rivoluzione* dello schizzo di sezione. L'elica, invece, è stata costruita tramite la definizione di due curve guida (spirale interna e spirale esterna) e mediante operazioni di *Estrusione/base* e *Taglio estruso*. Le quote geometriche del modello sono state inserite sulla base dell'equazioni spiegate nel precedente paragrafo. In questo modo, variando i valori dei parametri di progetto si ottengono differenti configurazioni delle coclee.

Nella modellazione della coclea, non sono stati considerati i coltelli disposti all'estremità della superficie elicoidale; questo perché la loro massa si può ritenere trascurabile rispetto alla massa complessiva dell'organo di miscelazione e quindi ininfluenza ai fini dell'analisi dinamica che si vuole compiere nel presente lavoro.

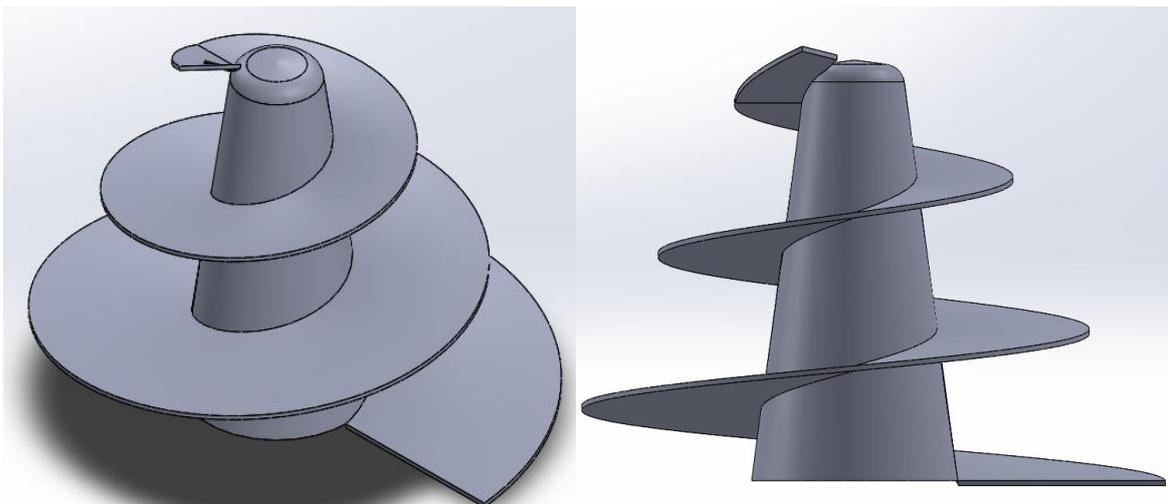


Figura 5.4: Modello tridimensionale della coclea destra di miscelazione.

5.2 Modello multibody

In questo paragrafo, si illustra come è stato realizzato il modello multibody del sistema di trincia miscelazione del carro semovente nell'ambiente di lavoro *Adams view*. In particolare, si evidenzia il modo con il quale è stato modellato analiticamente il carico dinamico agente sulle coclee durante la miscelazione dei componenti costituenti la razione animale.

5.2.1 Struttura e proprietà

Per la realizzazione del modello dinamico del sistema trincia-miscelante della macchina, sono stati innanzitutto importati all'interno di *Adams view* i CAD tridimensionali della vasca e delle coclee realizzati in *Solidworks*. Durante questa fase preliminare, sono state attentamente valutate le proprietà inerziali dei corpi in oggetto; in particolare, si è verificato che i dati riportati dai due software fossero compatibili tra loro poiché un diverso avviso avrebbe comportato un errore nella procedura di *Import*. Di seguito si riportano le proprietà di massa degli elementi costituenti il modello.

| Vasca | | |
|--|-----------------|---------|
| Materiale | Acciaio | |
| Densità [kg/m³] | 7801 | |
| Massa [kg] | 5084,56 | |
| Volume [m³] | 6,518E-01 | |
| Tensore di inerzia [kg·m²] | I _{XX} | 8221,34 |
| | I _{YY} | 7232,11 |
| | I _{ZZ} | 6184,06 |
| | I _{XY} | 0,00 |
| | I _{ZX} | 0,00 |
| | I _{YX} | 0,00 |

| Coclea destra | | |
|--|-----------------|--------|
| Materiale | Acciaio | |
| Densità [kg/m³] | 7801 | |
| Massa [kg] | 499,76 | |
| Volume [m³] | 6,406E-02 | |
| Tensore di inerzia [kg·m²] | I _{XX} | 119,58 |
| | I _{YY} | 109,12 |
| | I _{ZZ} | 92,71 |
| | I _{XY} | 0,00 |
| | I _{ZX} | 0,00 |
| | I _{YX} | 0,00 |

| Coclea sinistra | | |
|--|-----------------|--------|
| Materiale | Acciaio | |
| Densità [kg/m³] | 7801 | |
| Massa [kg] | 497,32 | |
| Volume [m³] | 6,375E-02 | |
| Tensore di inerzia [kg·m²] | I _{XX} | 119,03 |
| | I _{YY} | 108,69 |
| | I _{ZZ} | 92,24 |
| | I _{XY} | 0,00 |
| | I _{ZX} | 0,00 |
| | I _{YX} | 0,00 |

Tabella 5.1: Proprietà inerziali dei corpi inseriti nel modello dinamico multibody.

Nella fase successiva, sono stati posizionati i corpi all'interno dello spazio accoppiandoli opportunamente tra loro. La vasca di miscelazione è stata fissata al *ground* tramite un incastro (*fixed joint*) impedendo ogni suo movimento traslazionale e rotazionale. Le due coclee sono state inserite all'interno della vasca; ciascuna di esse è stata vincolata al cassone tramite una cerniera (*revolute joint*) bloccando tutti i gradi di libertà tranne quello rotazionale attorno all'asse verticale.

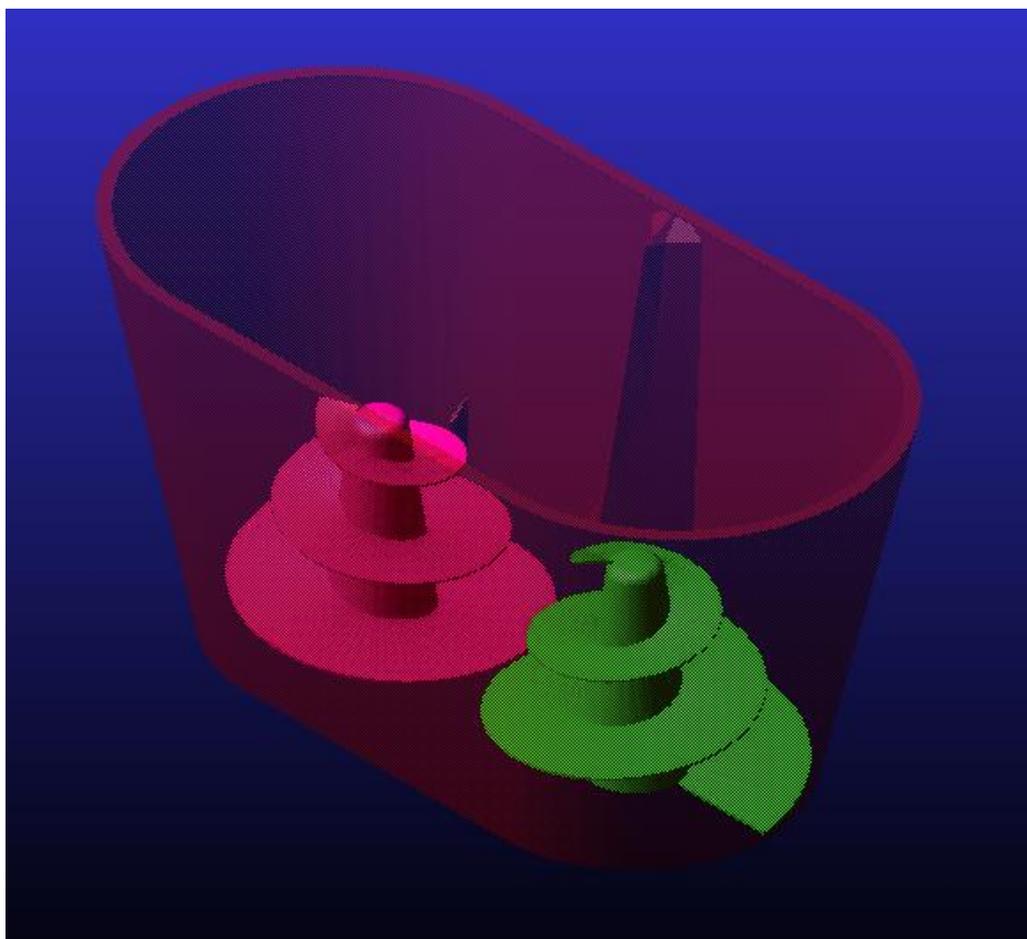


Figura 5.5: Modello multibody del sistema di trincia miscelazione del carro semovente.

5.2.2 Modellazione analitica del carico

Durante la fase di miscelazione della razione alimentare, all'interno della vasca si instaura un flusso convettivo di materiale dal basso verso l'alto generato dalla rotazione delle coclee. L'elica raccoglie il materiale al fondo della vasca e ruotando lo trasporta verso l'alto; arrivato in cima, esso frana verso il bordo esterno del cassone e scorrendo lungo le pareti laterali torna di nuovo alla base. Questo continuo scambio di materia tra la parte inferiore e quella superiore della vasca genera una progressiva omogeneizzazione della miscela. La fase ha termine nel momento in cui tutta la massa miscelata presenta una densità uniforme.

Nel modello multibody, questo periodo del ciclo di lavoro della macchina viene simulato imponendo un carico dinamico alle coclee in rotazione. Per modellare analiticamente tale carico, sono stati considerati tre aspetti principali della fase oggetto di studio:

- Il rendimento non unitario della catena trasmissiva delle coclee provoca una dissipazione energetica.
- Sulla superficie elicoidale della coclea agisce una forza opposta al suo moto di rotazione dovuta all'attrito di strisciamento generato dal contatto tra il materiale miscelato e la superficie stessa; questa forza è proporzionale al peso della quantità di massa miscelata sovrastante.
- Il moto convettivo di mescolamento del materiale produce un effetto resistente fluidodinamico sul profilo elicoidale della coclea proporzionale all'area dell'elica e alla velocità di rotazione della coclea stessa.

Modellazione della potenza dissipata a vuoto

La catena di trasmissione che preleva il moto dal motore e lo trasferisce alle coclee non presenta un rendimento unitario. Quest'ultimo è comunque molto elevato in quanto la trasmissione in questione è di tipo meccanico.

Per determinare la potenza a vuoto dissipata dalla rotazione delle coclee, è stata svolta una prova sperimentale sulla macchina nella quale sono state azionate unicamente le coclee. Il test è stato condotto per diversi valori di velocità di rotazione degli organi miscelanti; l'elaborazione dei dati ha permesso di stimare la coppia resistente media agente su una singola coclea pari a:

$$C_r = 629,55 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.10)$$

Questo ragionamento è stato implementato nel modello multibody applicando su ciascuna coclea una coppia discorde al verso di rotazione e pari al valore indicato nell'espressione 1.

Modellazione del carico dovuto al peso della massa miscelata

Come già spiegato in precedenza, durante la fase di miscelazione le coclee hanno il compito di prelevare il materiale dal fondo della vasca e di trasportarlo verso l'alto. Nel sollevamento del materiale miscelato, le forze agenti sulla superficie elicoidale della coclea sono quindi assimilabili a quelle che agiscono su un piano inclinato sul quale striscia un elemento di massa. Nel presente caso, la massa di questo elemento dipende dalla quantità di materiale miscelato sovrastante per cui essa risulta essere maggiore alla base della coclea.

Sulla base di queste riflessioni, si è prodotto il seguente modello analitico di forze distribuite sulla superficie elicoidale della coclea.

1. Ripartizione equa del peso della massa miscelata fra le coclee

Le due coclee presentano una simmetria geometrica specchiata, ovvero l'unica cosa che le differenzia è che nella destra l'elica si avvolge in senso orario attorno al tronco cono centrale, mentre nella sinistra l'elica si avvolge in senso antiorario. L'area della superficie elicoidale è dunque uguale per entrambe.

Al fondo della vasca l'elica delle coclee occupa quasi tutta l'area a disposizione e quindi il peso del materiale che grava unicamente sulla base del cassone è molto minore rispetto a quello che si scarica sulle coclee. Inoltre, la vasca è costituita da pareti laterali che possiedono un angolo di apertura verso l'alto di 7-12° e quindi, anche in questo caso, il peso della massa miscelata che grava su di esse è notevolmente inferiore rispetto a quello che incide sugli organi miscelanti.

Data una certa quantità di massa (M) introdotta all'interno della vasca di miscelazione, si ipotizza dunque che la forza peso da essa esercitata ($W = M \cdot g$) si scarichi totalmente sulla superficie elicoidale delle coclee distribuendosi equamente fra le due.

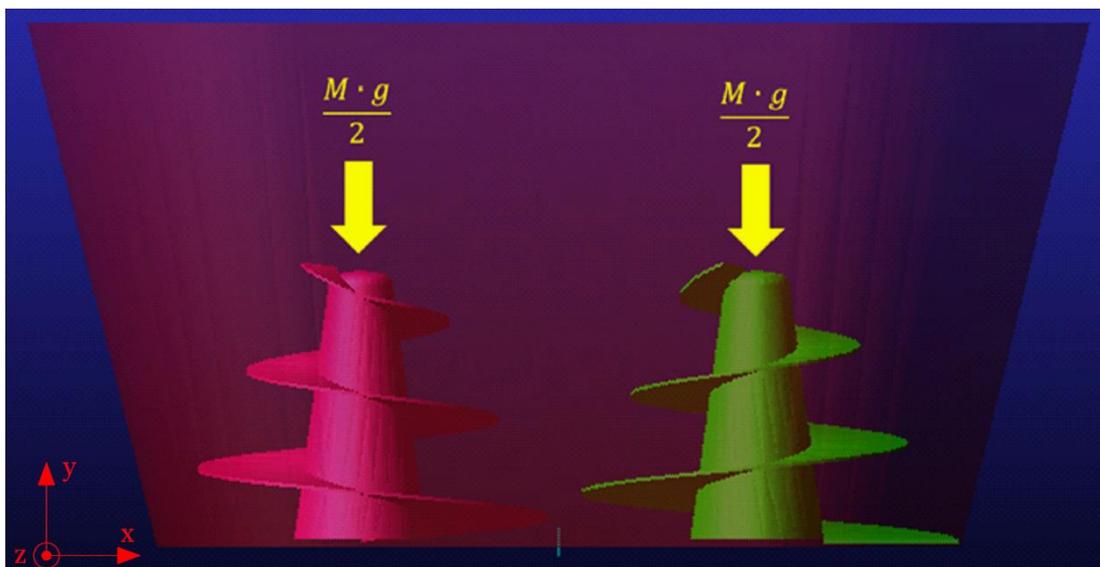


Figura 5.6: Ripartizione del peso della massa miscelata fra le due coclee.

2. Distribuzione triangolare delle componenti gravitazionali agenti sulle coclee

Una volta stabilita la quantità di materiale miscelato che grava su ciascuna coclea, è necessario capire come ripartire la forza peso da esso esercitata sulla loro superficie elicoidale. Considerando il fenomeno reale, si può notare che la massa miscelata in contatto con la superficie elicoidale alla base della coclea è maggiore rispetto alla massa in contatto con la superficie elicoidale all'estremità superiore della coclea. Questo è dovuto al fatto che la quantità di materiale sovrastante un punto dell'elica alla base dell'organo miscelante è maggiore della quantità di materiale sovrastante un punto dell'elica all'estremità superiore. Si può ipotizzare quindi che l'intensità della forza peso di un elemento di massa

in contatto con la superficie elicoidale della coclea in un punto dipenda proporzionalmente dalla distanza di quel punto dal pelo libero del materiale miscelato.

Sulla base di queste considerazioni, si individuano N punti distanti angularmente 90° lungo il raggio medio della superficie elicoidale di ciascuna coclea; in ognuno di questi N punti si applica un elemento di massa puntiforme la cui componente gravitazionale ha un'intensità proporzionale alla distanza di quel punto dal pelo libero del materiale miscelato. In questo modo, si crea una distribuzione triangolare di componenti gravitazionali gravanti sul profilo alare degli organi miscelanti.

Nella Figura 5.7 sottostante, si riporta la distribuzione delle forze peso degli elementi di massa posizionati lungo il raggio medio della superficie elicoidale di una coclea con 2,5 rivoluzioni, come quella attualmente installata sul carro miscelatore elettrico. In questo caso sono stati individuati 11 punti di applicazione.

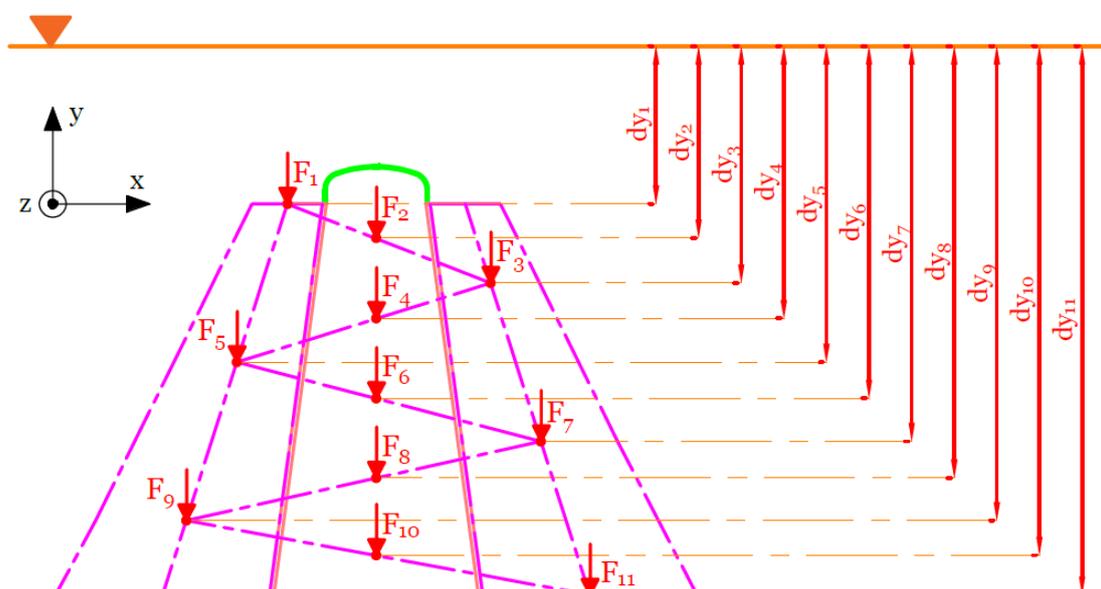


Figura 5.7: Distribuzione triangolare delle componenti gravitazionali lungo il raggio medio dell'elica.

Per determinare il modulo della componente gravitazionale F_i dell'elemento di massa in contatto nel generico punto i , si utilizza la seguente espressione:

$$F_i = C \cdot dy_i \quad (5.11)$$

Dove:

- C è una costante numerica;
- dy_i è la distanza del punto i dal pelo libero del materiale miscelato.

Il valore di C si può ricavare considerando che la sommatoria delle forze F_i gravanti su una coclea è pari a metà della forza peso della massa inserita all'interno della vasca di miscelazione.

$$\sum_i^N F_i = \frac{M \cdot g}{2} \quad (5.12)$$

Sostituendo a F_i , l'espressione 5.11 si ottiene:

$$\sum_i^N (C \cdot dy_i) = \frac{M \cdot g}{2} \quad (5.13)$$

Isolando C a primo membro si ricava che il suo valore è pari a:

$$C = \frac{M \cdot g}{2 \cdot \sum_i^N dy_i} \quad (5.14)$$

In conclusione, seguendo il procedimento descritto nel presente paragrafo, si ottiene quindi per ciascuna coclea una distribuzione triangolare di N componenti gravitazionali associate ad N elementi di massa in contatto con la superficie elicoidale in N punti individuati sul raggio medio. La sommatoria di queste è pari al peso di materiale miscelato totale che grava sulla coclea stessa. In questo modo, nel capitolo successivo si potranno studiare diverse configurazioni di coclea a parità di massa miscelata.

3. Determinazione delle forze applicate all'elica delle coclee nei punti i

Proseguendo con la descrizione del modello analitico adottato, si ipotizza che nel generico punto i l'elemento di massa i -esimo segua un moto verticale di sollevamento a velocità costante imposto dal piano inclinato (o cuneo) con il quale è in contatto. Il piano verticale (o cuneo) rappresenta la superficie elicoidale della coclea che ruotando intorno al suo asse di rivoluzione trasporta il materiale miscelato, rappresentato dall'elemento di massa, verso l'alto.

Come si può notare dal digramma di corpo libero riportato nella Figura 5.8, l'elemento di massa puntiforme i -esimo (in questo caso ingigantito per facilitare la comprensione) è soggetto a tre forze:

- F_i rappresenta la componente gravitazionale dovuta alla massa associata all'elemento i -esimo stesso;
- $V_{l,i}$ rappresenta la reazione vincolare orizzontale che consente all'elemento i -esimo di traslare solo verticalmente;
- Q_i rappresenta la forza generata dal contatto tra l'elemento i -esimo e il piano inclinato (o cuneo).

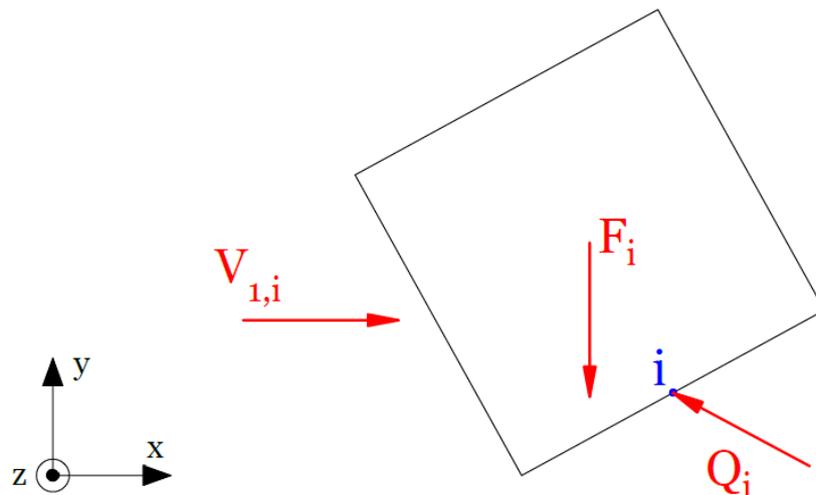


Figura 5.8: Diagramma di corpo libero dell'elemento di massa i -esimo.

Nel fenomeno reale, la componente di reazione $V_{1,i}$ è fornita dalle pareti laterali della vasca che trattengono il materiale permettendogli di effettuare perlopiù un moto ascensionale verticale.

Considerando invece il diagramma di corpo libero del piano inclinato in contatto con l'elemento di massa i -esimo riportato nella Figura 5.9, si può notare che anch'esso è soggetto a tre forze:

- Q_i rappresenta la forza generata dal contatto tra il piano inclinato (o cuneo) e l'elemento i -esimo;
- $V_{2,i}$ rappresenta la reazione vincolare verticale che sorregge il piano inclinato;
- S_i rappresenta la forza necessaria per traslare il piano inclinato (o cuneo) e quindi a sua volta spostare verso l'alto l'elemento i -esimo.

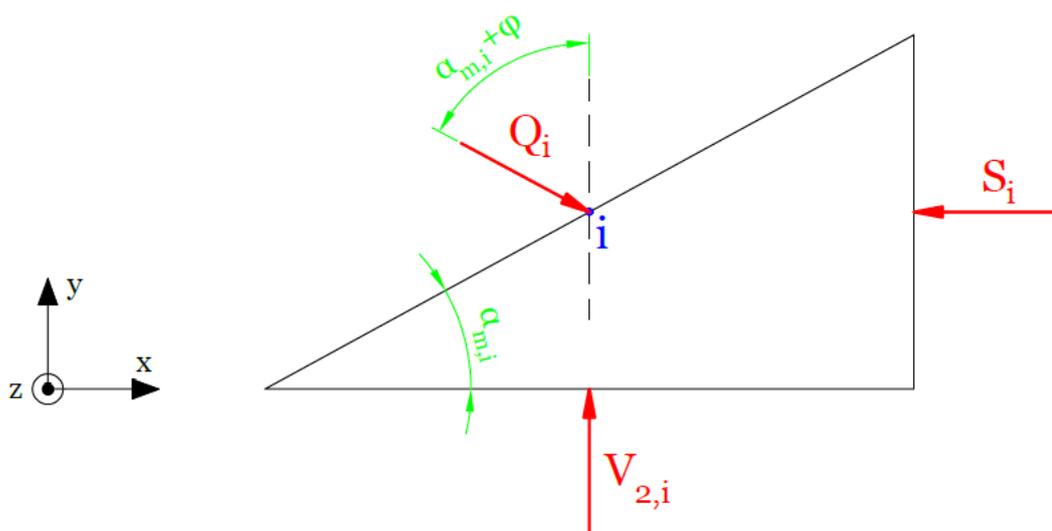


Figura 5.9: Diagramma di corpo libero del piano inclinato in contatto con l'elemento di massa i -esimo.

Nel fenomeno reale, la componente di reazione $V_{2,i}$ è fornita, tramite il riduttore flangiato alla coclea, dal telaio della macchina che sorregge l'intero apparato di miscelazione. La componente S_i , invece, rappresenta la forza e quindi la coppia fornita alle coclee dal motore per ruotare e permettere la miscelazione del materiale all'interno della vasca. Infine, la componente Q_i rappresenta la forza di contatto generata dalla massa miscelata sulla superficie elicoidale della coclea.

Sulla base di queste considerazioni, si ipotizza che in ogni punto i , individuato lungo il raggio medio dell'elica di una coclea, agisca una forza di contatto Q_i inclinata rispetto alla direzione verticale di un angolo $\alpha_{m,i} + \varphi$. Tale angolo risulta quindi composto da:

- φ che rappresenta l'angolo di attrito dovuto allo strisciamento del materiale miscelato sulla superficie elicoidale della coclea. Questo valore si ricava tramite la seguente espressione:

$$\mu_s = \tan(\varphi) \quad (5.15)$$

Dove μ_s è il coefficiente di attrito radente (o di strisciamento).

- $\alpha_{m,i}$ che rappresenta l'inclinazione della superficie elicoidale nel punto i considerato. L'elica al raggio medio della superficie alare della coclea è conica e presenta un passo costante; ciò vuol dire che la sua inclinazione, ovvero l'angolo tra la tangente alla curva nel punto considerato e il piano perpendicolare al suo asse di rivoluzione, varia da punto a punto. Per tale motivo, è necessario determinare l'inclinazione media dell'elica in ogni punto i in modo da orientare correttamente la componente Q_i . Questa operazione viene compiuta tramite l'utilizzo di uno script *Matlab*; in tale programma, inserendo in input i parametri costruttivi della coclea, si ottengono in output per ogni punto i la posizione in coordinate cartesiane del punto stesso rispetto al sistema di riferimento assoluto dell'ambiente multibody e il valore dell'inclinazione media dell'elica.

Nella pagina seguente, si riportano i risultati ottenuti immettendo in input i parametri di una coclea destra (avvolgimento dell'elica in senso orario) con 2,5 rivoluzioni. Come si può notare dalla Tabella 5.2, l'inclinazione media dell'elica al raggio medio diminuisce procedendo dall'alto verso il basso della coclea; questo è dovuto all'angolo di conicità.

| Punto | x [mm] | y [mm] | z [mm] | α_m [°] |
|-------|---------|---------|---------|----------------|
| 1 | 649,00 | 1160,00 | 0,00 | 15,93 |
| 2 | 900,00 | 1047,50 | -286,50 | 14,04 |
| 3 | 1222,00 | 935,00 | 0,00 | 12,54 |
| 4 | 900,00 | 822,50 | 357,50 | 11,33 |
| 5 | 507,00 | 710,00 | 0,00 | 10,33 |
| 6 | 900,00 | 597,50 | -428,50 | 9,49 |
| 7 | 1364,00 | 485,00 | 0,00 | 8,77 |
| 8 | 900,00 | 372,50 | 499,50 | 8,16 |
| 9 | 365,00 | 260,00 | 0,00 | 7,62 |
| 10 | 900,00 | 147,50 | -570,50 | 7,16 |
| 11 | 1506,00 | 35,00 | 0,00 | 6,74 |

Tabella 5.2: Risultati ottenuti per una coclea destra con 2,5 rivoluzioni.

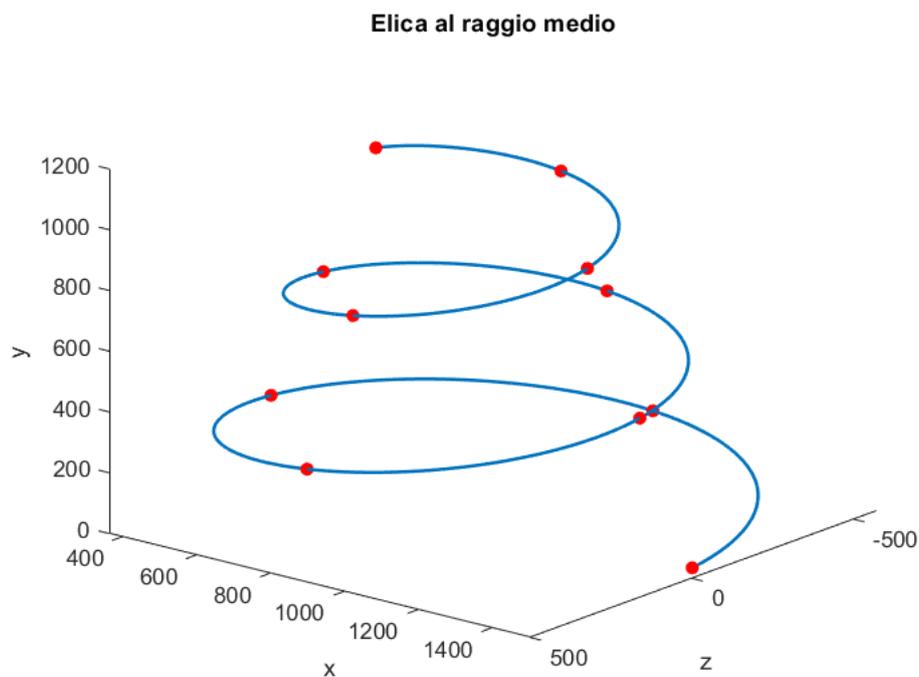


Figura 5.10: Rappresentazione dei punti i individuati lungo il raggio medio dell'elica.

Una volta determinata l'inclinazione media dell'elica per ogni punto i , si determinano le componenti di contatto Q_i tramite la seguente espressione ricavata svolgendo l'equilibrio alla traslazione verticale dell'elemento di massa i -esimo:

$$Q_i = \frac{F_i}{\cos(\alpha_{m,i} + \varphi)} \quad (5.16)$$

Nel modello multibody, per permettere un'applicazione agevole, la forza di contatto Q_i si scompone in ogni punto i in due componenti:

- una componente N_i normale alla superficie elicoidale della coclea;
- una componente T_i parallela alla superficie elicoidale, avente una direzione tangente alla circonferenza centrata sull'asse di rivoluzione dell'elica al raggio medio e passante per quel punto e un verso discorde al moto di rotazione della coclea.

Le componenti di forza N_i e T_i si determinano quindi tramite le seguenti formule:

$$N_i = Q_i \cdot \cos(\alpha_{m,i}) \quad (5.17)$$

$$T_i = Q_i \cdot \sin(\alpha_{m,i}) \quad (5.18)$$

Nella Figura 5.11 sottostante, si riporta la schematizzazione della scomposizione della forza Q_i applicata nel generico punto i individuato sull'elica al raggio medio. Come si può notare, viene anche indicata la velocità con cui trasla il piano inclinato e quindi con cui ruota l'elica della coclea in quel punto.

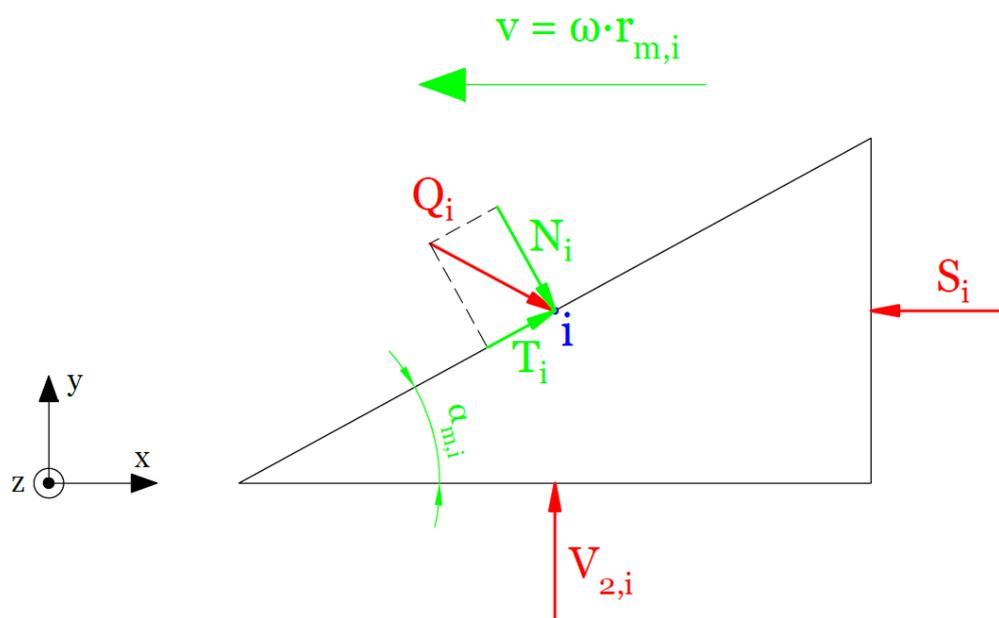


Figura 5.11: Scomposizione della forza Q_i applicata nel generico punto i .

In conclusione, sulla base della procedura sviluppata nel presente paragrafo, per simulare il contatto con il materiale miscelato si applicano quindi su ciascuna coclea N forze normali N_i ed N forze parallele T_i in N punti individuati sul raggio medio della superficie elicoidale della coclea stessa. Tramite la simulazione del modello multibody realizzato, si potrà determinare la coppia resistente (generata dalle forze S_i) e quindi la potenza assorbita dalle coclee durante la fase di miscelazione.

Modellazione semplificata della resistenza fluidodinamica dovuta al flusso convettivo

Come già spiegato in precedenza, durante la fase di miscelazione il materiale inserito all'interno della vasca segue un moto convettivo di mescolamento; esso viene trasportato dal basso verso l'alto dalla rotazione delle coclee per poi franare verso le pareti laterali e scivolare nuovamente al fondo del cassone. Questo continuo flusso di materia che si instaura è l'artefice della progressiva omogeneizzazione della miscela che si compie durante il ciclo di lavoro della macchina.

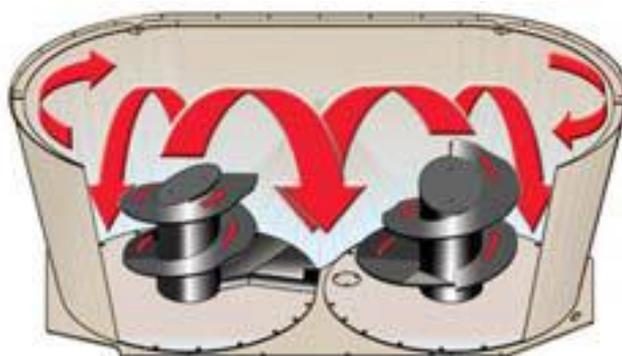


Figura 5.12: Rappresentazione del flusso di mescolamento.

Per tenere conto in maniera semplificata degli effetti prodotti sugli organi miscelanti dal flusso di mescolamento generatosi all'interno della vasca, si ipotizza che la superficie elicoidale della coclea abbia un comportamento simile a quello di un profilo alare investito da un fluido.

In fluidodinamica, l'interazione di un flusso con un profilo alare genera la comparsa su quest'ultimo di due forze:

- una forza di *portanza*, agente in direzione perpendicolare alla direzione del fluido che investe il profilo. Essa è generata dalla differenza di pressione fra la parte inferiore e quella superiore della pala. Conoscendo il coefficiente di portanza di un profilo (o di un corpo) è possibile risalire alla portanza tramite la seguente formula:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_L \quad (5.19)$$

Dove:

- ρ è la densità del fluido;
- V è la velocità del flusso;
- S è la superficie investita dal flusso;
- C_L è il coefficiente di portanza.; è adimensionale ed è funzione della forma geometrica del profilo alare, dell'angolo di attacco, del numero di Reynolds e del numero di Mach.

- una forza di *resistenza*, agente in direzione parallela (e con verso opposto) alla direzione del moto. Essa è dovuta fondamentalmente alla viscosità del fluido, alla forma del profilo alare, al distacco dello strato limite, alla presenza della portanza. Conoscendo il coefficiente di resistenza di un profilo (o di un corpo) è possibile risalire alla resistenza tramite la seguente formula:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_D \quad (5.20)$$

Dove:

- ρ è la densità del fluido;
- V è la velocità del flusso;
- S è la superficie investita dal flusso;
- C_D è il coefficiente di resistenza.; è adimensionale ed è funzione della forma geometrica del profilo alare, dell'angolo di attacco, del numero di Reynolds e del numero di Mach.

Nella presente trattazione, l'effetto fluidodinamico prodotto dal moto di mescolamento convettivo sugli organi miscelanti è modellato tramite l'introduzione di una sola componente aggiuntiva di forza. In particolare, in ogni punto i individuato sul raggio medio della superficie elicoidale della coclea viene applicata un'ulteriore forza parallela alla superficie stessa direzionata come la componente T_i introdotta nel paragrafo precedente. L'espressione per calcolare tale forza risulta essere:

$$R_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_i^2 \cdot S_i \cdot C_X \quad (5.21)$$

Dove:

- ρ è la densità del materiale inserito all'interno della vasca di miscelazione considerato, per ipotesi, come un fluido di densità uniforme;
- V_i è la velocità relativa del materiale miscelato rispetto alla coclea. Ad ogni punto i , si suppone che V_i sia pari alla velocità periferica di quel punto della superficie elicoidale e quindi risulta che:

$$V_i = \omega \cdot r_{m,i} \quad (5.22)$$

- S_i è l'area della porzione di superficie elicoidale della coclea adiacente al punto i . Per semplicità, si scompone il profilo alare in archi di corona circolare di ampiezza pari a 90° . La forza R_i associata ad un settore viene applicata nel punto i adiacente che presenta la coordinata y minore.

Questo ragionamento fa eccezione per il punto I , dove si applica la forza R_I associata alla superficie del terminale della coclea.

- C_X è un coefficiente adimensionale funzione della tipologia di materiale inserito all'interno della vasca, della forma geometrica che tale materiale presenta e dell'interazione che ha con la superficie elicoidale della coclea. Nel sotto capitolo successivo verrà valutata l'incidenza di tale parametro.

Per determinare le forze R_i agenti sulla superficie elicoidale degli organi miscelanti, si utilizza uno script *Matlab*; in tale programma, inserendo in input i parametri costruttivi della coclea e la velocità di rotazione, si ottengono in output i valori delle componenti R_i da applicare in ogni punto i .

Nella pagina seguente si riporta nella Figura 5.13 la scomposizione in settori del profilo alare di una coclea destra con 2,5 rivoluzioni vista dall'alto (l'asse y di rotazione della coclea è uscente dal piano del foglio). Come si può notare, la rappresentazione del profilo è suddivisa in tre piani raffiguranti ciascuno una rivoluzione dell'elica. In questo caso, nell'ultimo piano la superficie elicoidale compie solo mezzo giro e inoltre alla sua estremità si aggancia il terminale della coclea; la forza R_I associata a quest'ultimo viene applicata nel punto I .

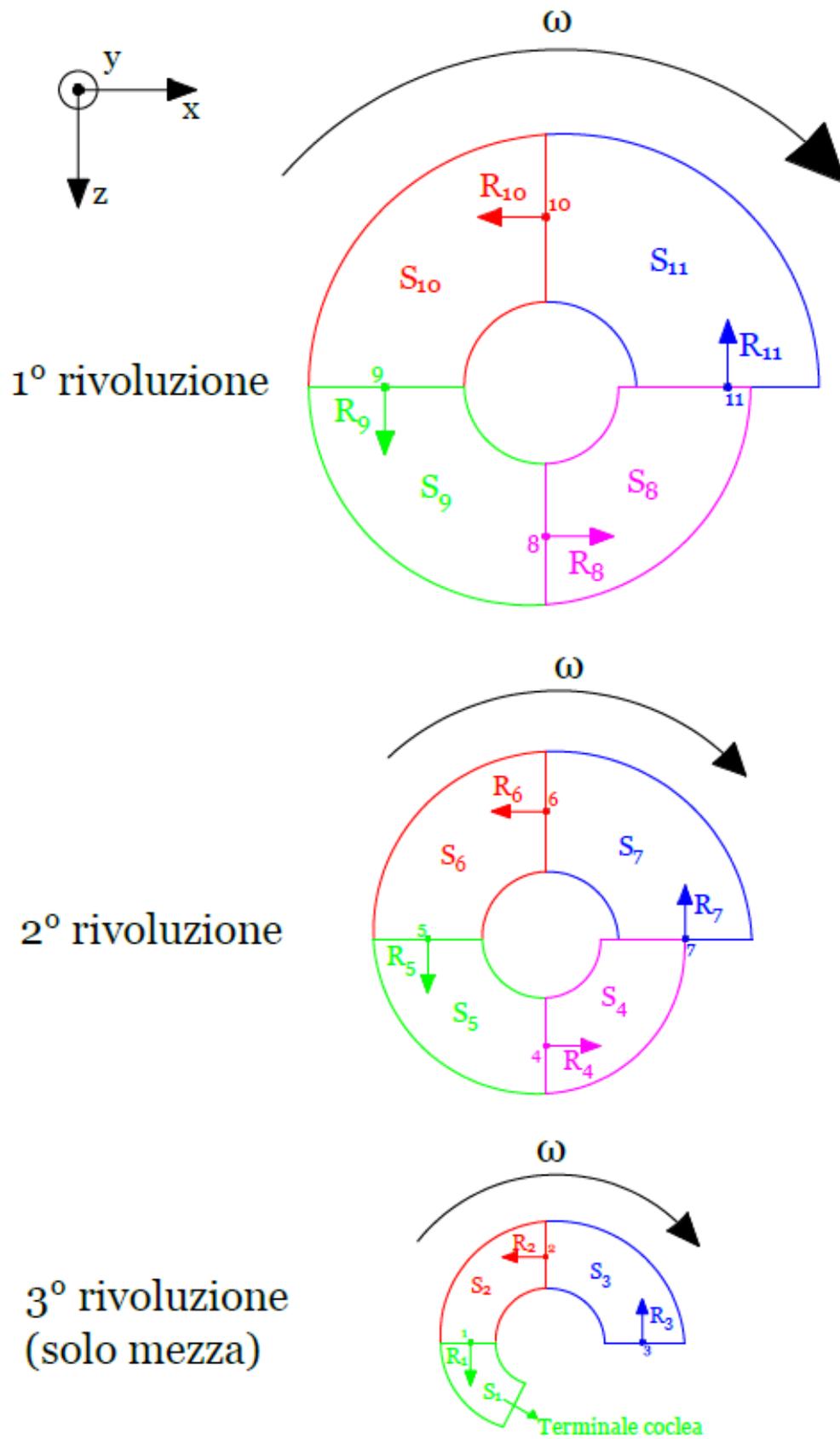


Figura 5.13: Scomposizione in settori della superficie elicoidale della coclea-

La forza risultante parallela alla superficie elicoidale da applicare nel generico punto i in direzione tangente alla circonferenza centrata sull'asse di rivoluzione dell'elica al raggio medio e passante per quel punto risulta quindi essere pari a:

$$P_i = T_i + R_i \quad (5.23)$$

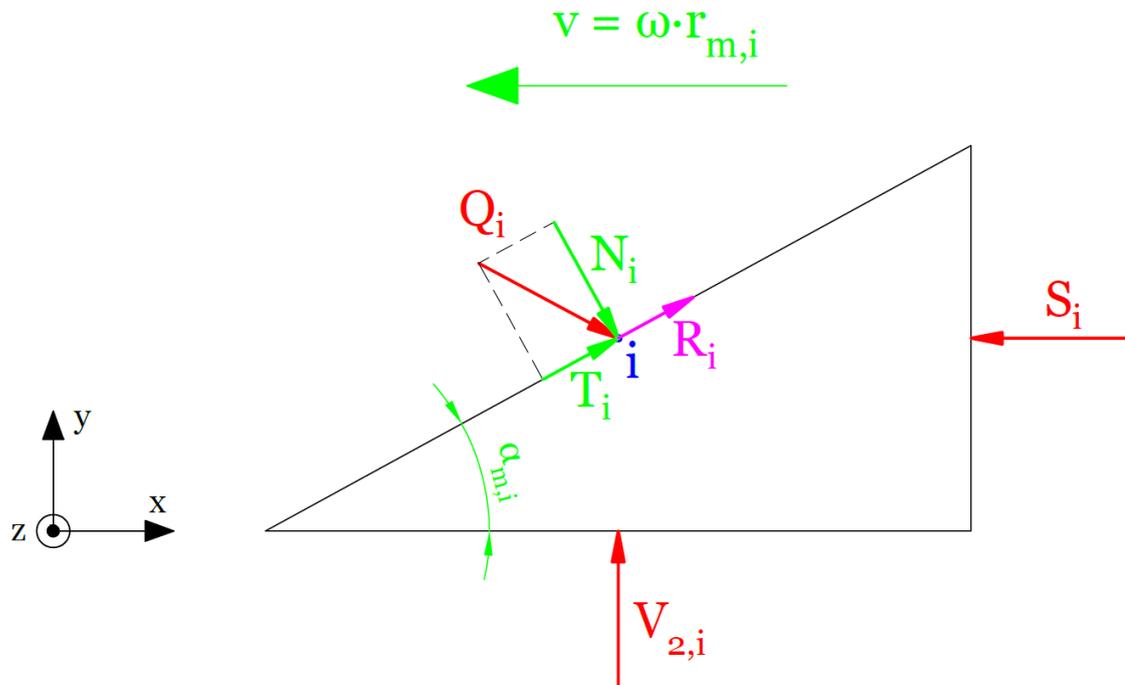


Figura 5.14: Rappresentazione delle forze applicate nel generico punto i .

Riepilogo

Ricapitolando quanto descritto finora, nel modello multibody realizzato su ciascuna coclea agiscono le seguenti forze:

- Una coppia resistente C_r applicata alla base dell'organo miscelante che simula la potenza dissipata a vuoto dalla trasmissione meccanica che impartisce il moto alla coclea stessa.
- N forze N_i applicate perpendicolarmente alla superficie elicoidale della coclea in N punti individuati sul raggio medio di tale superficie.
- N forze P_i applicate parallelamente alla superficie elicoidale della coclea in N punti individuati sul raggio medio di tale superficie.

In questo modo, il carico dinamico agente sugli organi miscelanti è funzione della quantità di massa miscelata, della velocità di rotazione e del profilo geometrico delle coclee.

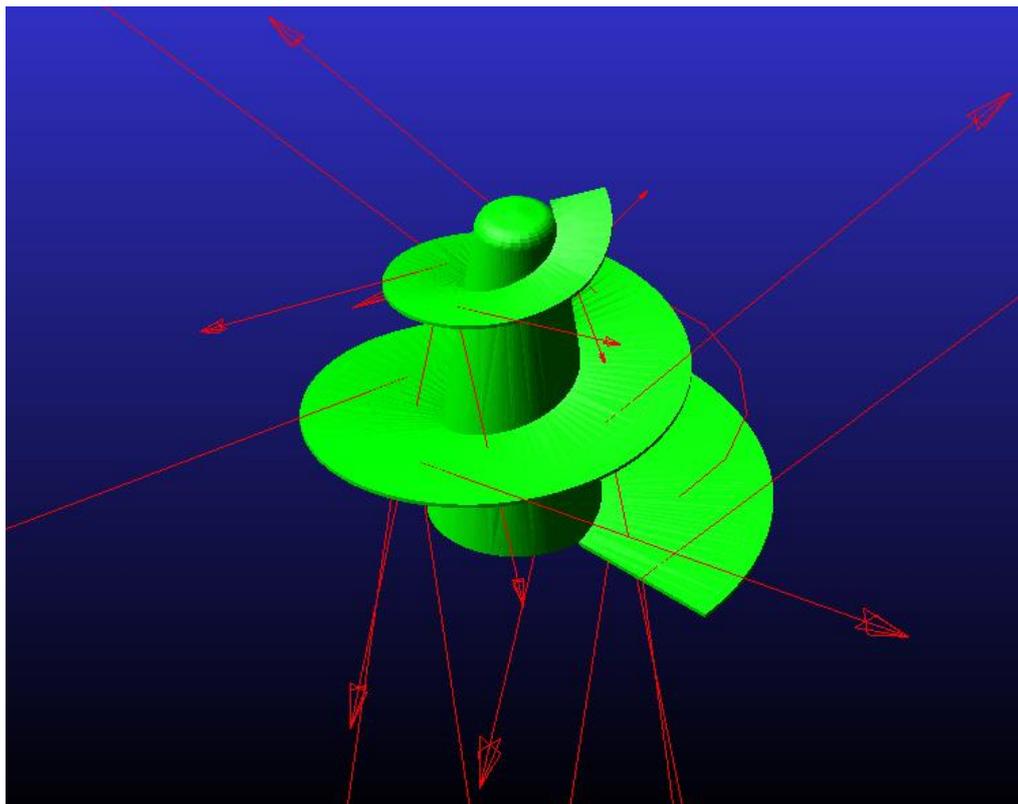


Figura 5.15: Rappresentazione delle forze applicate alla coclea durante la simulazione dinamica del modello.

5.3 Analisi del modello dinamico

Il modello multibody realizzato consente di simulare la fase di miscelazione di un ciclo di lavoro della macchina dal punto di vista energetico; esso riesce a ricreare analiticamente il carico agente sugli organi miscelanti e a determinare la potenza assorbita dal loro azionamento.

Tale modello non tiene conto, però, dell'aspetto qualitativo della miscelazione; il grado di omogeneità e la composizione granulometrica della miscela sono di fondamentale importanza in quanto generano un effetto ben definito sull'azione ruminale e sull'intensità delle fermentazioni negli stomaci degli animali. Questo aspetto può essere simulato solo tramite l'utilizzo di un software particellare.

Ritornando allo studio del modello realizzato, si riportano di seguito una serie di analisi sui consumi energetici del sistema di trincia miscelazione del semovente condotte al variare di alcuni parametri quali la velocità di rotazione e la struttura geometrica delle coclee. Per tutte le analisi svolte, si valuta l'incidenza del coefficiente adimensionale C_X di resistenza fluidodinamica introdotto nel sotto capitolo precedente dipendente dalla forma e tipologia del materiale inserito nella vasca di miscelazione. I risultati teorici ottenuti lavorando sul modello dinamico vengono poi confrontati con quelli sperimentali registrati durante il funzionamento della macchina.

5.3.1 Variazione della velocità di rotazione

Nel carro miscelatore verticale oggetto di studio la velocità di rotazione delle coclee di miscelazione è regolabile da 8 a 30 giri al minuto. Questo campo di funzionamento è realizzato variando il numero di giri del motore primario e modificando il rapporto di trasmissione della catena cinematica che trasmette il moto alle coclee tramite il cambio ad azionamento idraulico posizionato dopo l'accoppiatore motore. Il cambio del carro semovente oggetto di studio presenta due rapporti di trasmissione. Simulando il modello dinamico multibody creato, si valuta quindi la potenza assorbita dalle coclee al variare della loro velocità di rotazione a parità di:

- M : massa miscelata. La massima quantità di materiale che si può introdurre all'interno della vasca di miscelazione è 7.500 kg ;
- H : altezza del pelo libero del materiale miscelato rispetto al fondo della vasca. La massima altezza che il materiale può raggiungere è 2.400 mm ;
- μ_s : coefficiente di attrito di strisciamento. Questo parametro varia in funzione delle caratteristiche del materiale di miscelazione da un minimo di $0,3$ (materiale secco) ad un massimo di $0,6$ (materiale umido).

Per svolgere l'analisi in questione, si effettuano tre prove di simulazione in cui, oltre a variare la velocità di rotazione delle coclee, si modifica anche il valore del coefficiente adimensionale C_X . Tale parametro non trova un riscontro in letteratura in quanto la modellazione analitica effettuata dell'effetto fluidodinamico generato dal flusso convettivo di mescolamento sugli organi miscelanti è un'ipotesi del presente lavoro di tesi. Viene svolta dunque un'analisi qualitativa preliminare per valutare l'incidenza di questo coefficiente sulla potenza assorbita dalle coclee nel modello realizzato in quanto, solo attraverso lo svolgimento di prove sperimentali, si potrebbe determinare l'andamento di tale parametro al variare del materiale introdotto nella vasca di miscelazione.

Nella Tabella 5.3 si riportano i valori dei parametri costruttivi adottati per la modellazione CAD delle coclee impiegate per l'esecuzione di questa analisi.

| Coclea destra | | Coclea sinistra | |
|--------------------|--------|--------------------|------------|
| Avvolgimento elica | Orario | Avvolgimento elica | Antiorario |
| k | 0,133 | k | 0,133 |
| m | 0,498 | m | 0,498 |
| q [mm] | 152 | q [mm] | 152 |
| t [mm] | 350 | t [mm] | 350 |
| p [mm] | 450 | p [mm] | 450 |
| n | 2,5 | n | 2,5 |
| s_e [mm] | 15 | s_e [mm] | 15 |
| s_t [mm] | 12 | s_t [mm] | 12 |

Tabella 5.3: Valori dei parametri costruttivi delle coclee.

Prova 1

| Input | |
|---------|------|
| M [kg] | 4000 |
| H [m] | 1,26 |
| μ_s | 0,45 |
| C_x | 2 |

| Output | |
|----------------|--------|
| ω [rpm] | P [kW] |
| 8,0 | 12,04 |
| 10,0 | 15,15 |
| 12,0 | 18,32 |
| 14,0 | 21,57 |
| 16,0 | 24,91 |
| 18,0 | 28,35 |
| 20,0 | 31,91 |
| 22,0 | 35,59 |
| 24,0 | 39,42 |
| 26,0 | 43,40 |
| 28,0 | 47,54 |
| 30,0 | 51,87 |

Prova 2

| Input | |
|---------|------|
| M [kg] | 4000 |
| H [m] | 1,26 |
| μ_s | 0,45 |
| C_x | 4 |

| Output | |
|----------------|--------|
| ω [rpm] | P [kW] |
| 8,0 | 12,18 |
| 10,0 | 15,42 |
| 12,0 | 18,79 |
| 14,0 | 22,31 |
| 16,0 | 26,00 |
| 18,0 | 29,91 |
| 20,0 | 34,04 |
| 22,0 | 38,44 |
| 24,0 | 43,11 |
| 26,0 | 48,09 |
| 28,0 | 53,41 |
| 30,0 | 59,08 |

Prova 3

| Input | |
|---------|------|
| M [kg] | 4000 |
| H [m] | 1,26 |
| μ_s | 0,45 |
| C_x | 6 |

| Output | |
|----------------|--------|
| ω [rpm] | P [kW] |
| 8,0 | 12,32 |
| 10,0 | 15,69 |
| 12,0 | 19,25 |
| 14,0 | 23,04 |
| 16,0 | 27,10 |
| 18,0 | 31,47 |
| 20,0 | 36,18 |
| 22,0 | 41,28 |
| 24,0 | 46,80 |
| 26,0 | 52,79 |
| 28,0 | 59,27 |
| 30,0 | 66,30 |

Risultati analisi

I risultati ottenuti dalle simulazioni svolte vengono riportati all'interno del grafico sottostante.

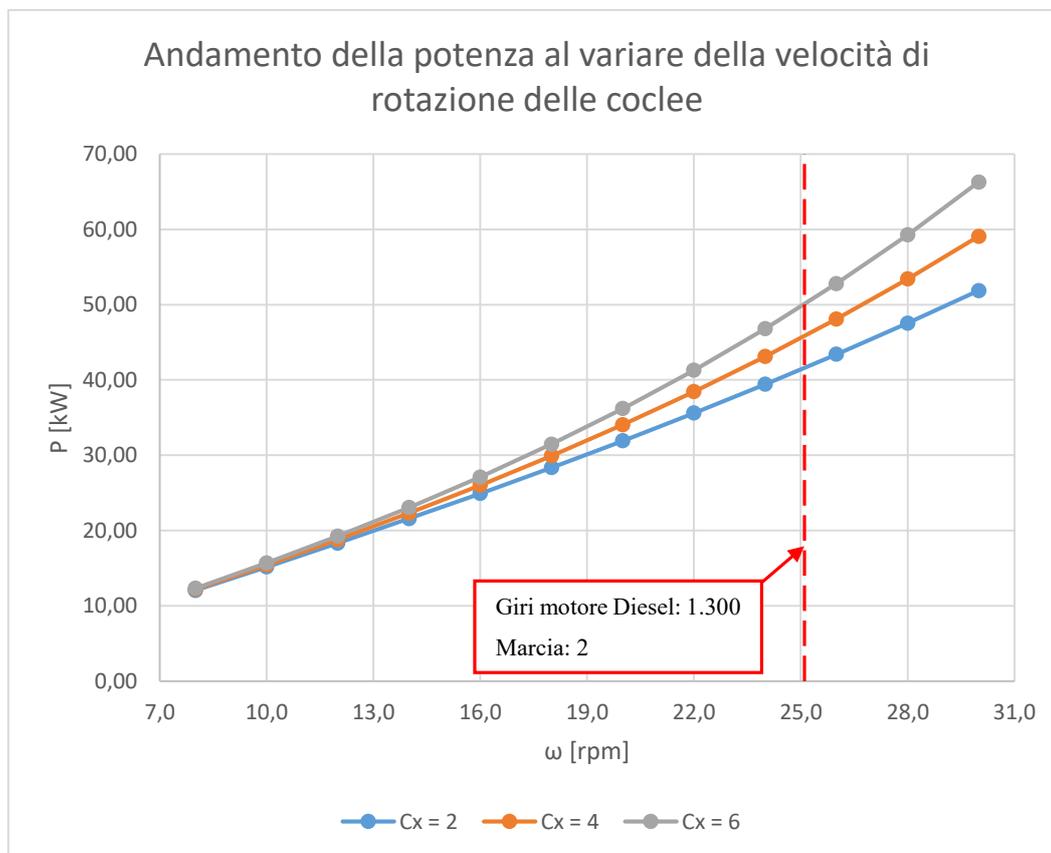


Figura 5.16: Andamento della potenza assorbita dalle coclee al variare della velocità di rotazione con indicazione della velocità utilizzata per lo svolgimento dell'analisi riportata nel paragrafo 5.3.2.

Osservazioni

Come si può notare dal grafico in Figura 5.16, la potenza assorbita dalle coclee durante la fase di miscelazione cresce all'aumentare della loro velocità di rotazione. In particolare, l'andamento che si ottiene non è lineare, ma parabolico; questo è dovuto alla coppia resistente generata dalle componenti di forza R_i proporzionali al quadrato della velocità relativa del materiale miscelato.

L'andamento parabolico della curva si accentua sempre di più all'aumentare del valore del coefficiente adimensionale C_X in quanto diventa sempre maggiore l'incidenza che hanno la forma e la tipologia del materiale miscelato sulla superficie elicoidale della coclea.

Per svolgere la miscelazione finale dei prodotti costituenti la razione animale, nella realtà l'allevatore imposta normalmente la velocità di rotazione delle coclee a 20 – 25 rpm per una durata di 4 - 6 minuti. Sulla base dei dati ottenuti simulando il modello realizzato, si ottiene che l'energia consumata dalle coclee ad una velocità di rotazione $\omega = 24 \text{ rpm}$ per un tempo di miscelazione $t_m = 5 \text{ minuti}$ è:

| C_X | E_1 [kJ] |
|-------|------------|
| 2 | 11825 |
| 4 | 12933 |
| 6 | 14041 |

Invece, miscelando ad una velocità di rotazione delle coclee dimezzata $\omega = 12 \text{ rpm}$ per un tempo di miscelazione doppio $t_m = 10 \text{ minuti}$ si ottiene un consumo pari a:

| C_X | E_2 [kJ] |
|-------|------------|
| 2 | 10994 |
| 4 | 11271 |
| 6 | 11548 |

È risultato che, miscelando ad una velocità minore per un tempo ragionevolmente maggiore che consenta di ottenere un prodotto miscelato di pari qualità, si ottiene un consumo energetico minore. Il risparmio energetico $E_1 - E_2$ cresce all'aumentare del coefficiente adimensionale C_X .

| C_X | $E_2 - E_1$ [kJ] |
|-------|------------------|
| 2 | 831 |
| 4 | 1662 |
| 6 | 2493 |

Il risparmio energetico ottenuto non è elevato; tuttavia bisogna ricordare che questa analisi è stata effettuata considerando solo la fase di miscelazione finale dei prodotti che avviene prima dello scarico in mangiatoia. Nella realtà, come già accennato, le coclee vengono azionate nel momento in cui si introduce all'interno del cassone il primo componente della razione e si arrestano quando termina lo

scarico in mangiatoria della miscelata. Impostando dunque una velocità di rotazione delle coclee minore per tutto il ciclo di lavoro, il risparmio energetico ottenuto risulterebbe maggiore.

5.3.2 Variazione della geometria delle coclee

Nel carro miscelatore oggetto di studio, le coclee del sistema di trincia miscelazione presentano un'elica avente un passo $p = 450 \text{ mm}$ e un numero di rivoluzioni $n = 2,5$. Studiando il profilo geometrico delle coclee, si sono sviluppate le seguenti considerazioni:

- Diminuire la larghezza della superficie elicoidale delle coclee potrebbe portare ad un consumo energetico minore, ma sicuramente non garantirebbe un buon risultato dal punto di vista qualitativo della miscelazione;
- Attuare un restringimento dell'anima tronco conica centrale risulterebbe impossibile dal punto di vista strutturale in quanto non si garantirebbe più uno spazio interno sufficiente per l'inserimento del riduttore responsabile della trasmissione del moto alle coclee;
- Abbassare o aumentare l'altezza delle coclee potrebbe portare ad un consumo energetico minore o maggiore; probabilmente, però, non garantirebbe un buon risultato dal punto di vista qualitativo della miscelazione nel caso in cui si avesse una massa di materiale miscelato molto alta o molto bassa.
- Diminuire o aumentare il numero di rivoluzioni dell'elica della coclea potrebbe comportare un aumento o una riduzione del consumo energetico ottenendo in ogni caso un buon risultato dal punto di vista qualitativo della miscelazione.

Sulla base di queste riflessioni, si valuta quindi la potenza assorbita dalle coclee al variare del numero di rivoluzioni dell'elica a parità di:

- M : massa miscelata;
- H : altezza del pelo libero del materiale miscelato rispetto al fondo della vasca;
- μ_s : coefficiente di attrito di strisciamento;
- ω : velocità di rotazione delle coclee;
- h : altezza totale dell'elica della coclea. Questo vuol dire che, variando il numero di rivoluzioni e mantenendo costante l'altezza totale, cambia anche il passo dell'elica.

Per svolgere l'analisi in questione, si effettuano cinque prove di simulazione in cui, oltre a variare il numero di rivoluzioni dell'elica delle coclee, si modifica anche il valore del coefficiente adimensionale C_x . Come già accennato nel sotto capitolo precedente, tale parametro non trova un riscontro in letteratura e per questo motivo si svolge un'analisi qualitativa preliminare per valutare l'incidenza di questo coefficiente, funzione della forma e della tipologia di materiale introdotto all'interno della vasca di miscelazione, sulla potenza assorbita dalle coclee nel modello realizzato.

Nella tabella 5.4 si riportano i valori dei parametri costruttivi adottati per la modellazione CAD delle coclee impiegate per l'esecuzione di questa analisi che si mantengono costanti tra una simulazione e l'altra.

| Coclea destra | | Coclea sinistra | |
|--------------------|--------|--------------------|------------|
| Avvolgimento elica | Orario | Avvolgimento elica | Antiorario |
| k | 0,133 | k | 0,133 |
| m | 0,498 | m | 0,498 |
| q [mm] | 152 | q [mm] | 152 |
| t [mm] | 350 | t [mm] | 350 |
| se [mm] | 15 | se [mm] | 15 |
| st [mm] | 12 | st [mm] | 12 |

Tabella 5.4: Valori dei parametri costruttivi delle coclee mantenuti costanti.

Prova 1

| Input | |
|----------------|------|
| M [kg] | 4000 |
| H [m] | 1,26 |
| μ_s | 0,45 |
| C_x | 1 |
| ω [rpm] | 25,1 |

| Output | |
|--------|--------|
| n | P [kW] |
| 1,5 | 46,88 |
| 2 | 42,31 |
| 2,5 | 39,47 |
| 3 | 37,61 |
| 3,5 | 36,35 |
| 4 | 35,94 |
| 4,5 | 35,44 |
| 5 | 34,87 |

Prova 2

| Input | |
|----------------|------|
| M [kg] | 4000 |
| H [m] | 1,26 |
| μ_s | 0,45 |
| C_x | 2 |
| ω [rpm] | 25,1 |

| Output | |
|--------|--------|
| n | P [kW] |
| 1,5 | 48,21 |
| 2 | 44,03 |
| 2,5 | 41,59 |
| 3 | 40,12 |
| 3,5 | 39,24 |
| 4 | 39,41 |
| 4,5 | 39,31 |
| 5 | 39,12 |

Prova 3

| Input | |
|----------------|------|
| M [kg] | 4000 |
| H [m] | 1,26 |
| μ_s | 0,45 |
| C_x | 4 |
| ω [rpm] | 25,1 |

| Output | |
|--------|--------|
| n | P [kW] |
| 1,5 | 50,86 |
| 2 | 47,47 |
| 2,5 | 45,81 |
| 3 | 45,12 |
| 3,5 | 45,02 |
| 4 | 46,36 |
| 4,5 | 47,04 |
| 5 | 47,62 |

Prova 4

| Input | |
|----------------|------|
| M [kg] | 4000 |
| H [m] | 1,26 |
| μ_s | 0,45 |
| C_x | 6 |
| ω [rpm] | 25,1 |

| Output | |
|--------|--------|
| n | P [kW] |
| 1,5 | 53,51 |
| 2 | 50,92 |
| 2,5 | 50,04 |
| 3 | 50,12 |
| 3,5 | 50,81 |
| 4 | 53,31 |
| 4,5 | 54,78 |
| 5 | 56,12 |

Prova 5

| Input | |
|----------------|------|
| M [kg] | 4000 |
| H [m] | 1,26 |
| μ_s | 0,45 |
| C_x | 8 |
| ω [rpm] | 25,1 |

| Output | |
|--------|--------|
| n | P [kW] |
| 1,5 | 56,17 |
| 2 | 54,36 |
| 2,5 | 54,26 |
| 3 | 55,13 |
| 3,5 | 56,59 |
| 4 | 60,26 |
| 4,5 | 62,52 |
| 5 | 64,62 |

Risultati analisi

I risultati ottenuti dalle simulazioni svolte vengono riportati all'interno del grafico sottostante.

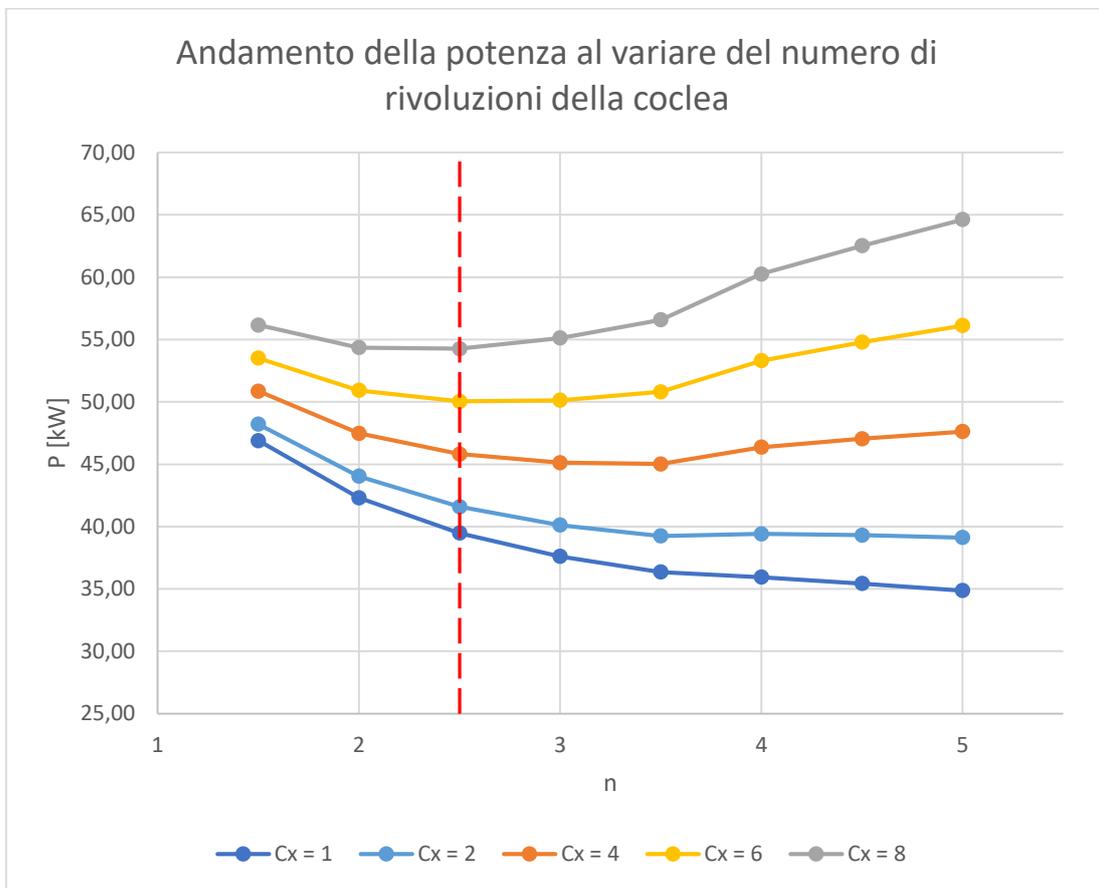


Figura 5.17: Andamento della potenza assorbita dalle coclee al variare del numero di rivoluzioni con indicazione della configurazione reale della coclea.

Osservazioni

Come si può notare dal grafico in Figura 5.17, l'andamento della potenza assorbita dalle coclee al variare del numero di rivoluzioni dipende molto dal valore che assume il coefficiente adimensionale C_x di resistenza fluidodinamica.

Aumentando il numero di rivoluzioni, l'inclinazione dell'elica della coclea diminuisce e quindi la coppia resistente alla rotazione fornita dalle componenti normali N_i diminuisce, mentre la coppia resistente fornita dalle componenti parallele-tangenziali P_i aumenta. Viceversa, diminuendo il numero di rivoluzioni, l'inclinazione dell'elica della coclea aumenta e quindi la coppia resistente dovuta alle componenti normali N_i aumenta, mentre la coppia resistente fornita dalle componenti parallele-tangenziali P_i diminuisce.

Contemporaneamente al fenomeno appena descritto, si verifica anche che all'aumentare del numero di rivoluzioni cresce la superficie elicoidale a contatto con il materiale miscelato; questo comporta un

aumento della componente fluidodinamica R_i della forza parallela-tangenziale P_i in quanto essa è direttamente proporzionale all'area della superficie della coclea investita dal flusso convettivo di mescolamento. Viceversa, abbassando il numero di rivoluzioni, decresce la resistenza fluidodinamica agente sulla coclea in quanto l'estensione del suo profilo alare diminuisce. Inoltre, l'influenza delle componenti di forza R_i aumenta proporzionalmente al crescere del valore del coefficiente adimensionale C_X in quanto diventa sempre maggiore l'incidenza che hanno la forma e la tipologia del materiale miscelato sulla superficie elicoidale della coclea.

Osservando i risultati ottenuti nelle prove di simulazione riportati nella figura 5.17, si nota che:

- L'andamento della potenza assorbita dalle coclee per un coefficiente adimensionale $C_X = 1$ è strettamente decrescente, anche se la pendenza della retta tangente alla curva aumenta al crescere del numero di rivoluzioni. Questo vuol dire che la crescita delle componenti di forza R_i , causata dall'ampliamento della superficie elicoidale della coclea, ha un'incidenza minore rispetto alla diminuzione della coppia resistente attribuita alle componenti normali N_i .
- L'andamento della potenza assorbita dalle coclee per un coefficiente adimensionale $C_X = 2$ presenta un minimo locale nell'intorno di $n = 3,5$. La pendenza della retta tangente alla curva in questo punto risulta quasi nulla; ciò vuol dire che la crescita delle componenti di forza R_i , causata dall'ampliamento della superficie elicoidale della coclea, ha un'incidenza equivalente alla diminuzione della coppia resistente attribuita alle componenti normali N_i . Si può quindi notare un appiattimento della curva di potenza all'aumentare del numero di rivoluzioni causato dalla diminuzione di inclinazione dell'elica.
- L'andamento della potenza assorbita dalle coclee per un coefficiente adimensionale $C_X = 4$ presenta un minimo locale nell'intorno di $n = 3,5$. Rispetto al caso precedente, dopo tale punto la pendenza della curva di potenza torna a crescere; questo significa che la crescita delle componenti di forza R_i , causata dall'ampliamento della superficie elicoidale della coclea, ha un'incidenza maggiore rispetto alla diminuzione della coppia resistente attribuita alle componenti normali N_i . Tuttavia, si può notare che la pendenza della curva dopo il minimo locale diminuisce all'aumentare del numero di rivoluzioni tendendo ad un progressivo appiattimento causato dalla riduzione sempre maggiore dell'inclinazione dell'elica.
- Le curve rappresentanti l'andamento della potenza assorbita dalle coclee per valori del coefficiente adimensionale $C_X = 6$ e $C_X = 8$ presentano un minimo locale nell'intorno di $n = 2,5$. Come nel caso precedente, dopo il punto di minimo la pendenza delle curve considerate torna a crescere perché come prima l'incremento delle componenti di forza R_i , causata dall'ampliamento della superficie elicoidale della coclea, ha un'incidenza maggiore rispetto alla diminuzione della coppia resistente attribuita alle componenti normali N_i .
- All'aumentare del coefficiente adimensionale C_X , la curva rappresentante l'andamento della potenza assorbita dalle coclee trasla verso l'alto. Inoltre, si assiste alla comparsa di un minimo locale la cui posizione si sposta sempre più a sinistra, cioè verso un numero più basso di rivoluzioni dell'elica.

Sulla base di queste considerazioni e del modello dinamico realizzato, si può affermare che per un valore del coefficiente adimensionale $C_X \leq 4$ un aumento del numero di rivoluzioni della coclea comporta una riduzione del consumo energetico del sistema di miscelazione, mentre per un valore $C_X > 4$ la configurazione attuale della coclea ($n = 2,5$) garantisce già il minimo dispendio energetico. In ogni caso, solo attraverso lo svolgimento di prove sperimentali, si potrebbe determinare l'andamento del coefficiente C_X al variare del materiale introdotto nella vasca di miscelazione e quindi stabilire la configurazione di coclea che garantisce per ogni valore di tale parametro il minimo consumo energetico.

5.3.3 Confronto tra modello dinamico teorico e prove sperimentali

Le prove di simulazione svolte nella seconda analisi, nella quale si studia l'andamento della potenza assorbita dalle coclee al variare del numero di rivoluzioni dell'elica, sono effettuate impostando una velocità di rotazione $\omega = 25,1 \text{ rpm}$ e una massa miscelata $M = 4.000 \text{ kg}$. Si selezionano questi valori per poter confrontare i risultati ottenuti simulando il modello dinamico multibody con delle prove sperimentali condotte sulla macchina tradizionale Diesel in queste condizioni e verificarne così l'attendibilità.

Sempre considerando il modello teorico, si pone il coefficiente di attrito μ_s pari a $0,45$ per meglio rappresentare la condizione standard reale dove la massa miscelata è costituita circa dal 50% di materiale secco (mangimi e foraggi) e dal 50% di materiale umido (insilati).

Dai test condotti sul carro semovente tradizionale, risulta che le coclee durante la fase di miscelazione assorbono il 45-50% della potenza nominale erogata dal motore. Ciò significa che la potenza mediamente dissipata dagli organi miscelanti è:

$$P_{reale} = 58,8 \text{ kW} \quad (5.23)$$

Confrontando tale valore con i dati ottenuti simulando il modello teorico costituito da coclee con $n=2,5$ come nella configurazione reale, si ottiene che:

| C_X | $P_{modello} \text{ [kW]}$ | $P_{reale} \text{ [kW]}$ | $\Delta P \text{ [%]}$ |
|-------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 39,5 | 58,8 | 32,8 |
| 2 | 41,6 | 58,8 | 29,2 |
| 4 | 45,8 | 58,8 | 22,0 |
| 6 | 50,0 | 58,8 | 14,9 |
| 8 | 54,3 | 58,8 | 7,7 |

Si può notare che il modello dinamico realizzato è attendibile in quanto fornisce risultati confrontabili con quelli reali registrati sul campo. All'aumentare del coefficiente adimensionale C_X la differenza

percentuale tra la potenza reale e quella teorica diminuisce e, come si osserva, per equiparare il risultato sperimentale è necessario imporre un valore di C_X leggermente maggiore di 8.

Sulla base di questo confronto, si deduce che il modello dinamico realizzato riesce a:

- considerare la quantità di materiale introdotta all'interno della vasca di miscelazione e l'attrito che si produce dallo strisciamento di questo materiale sulla superficie elicoidale della coclea;
- riprodurre la resistenza fluidodinamica generata dal flusso convettivo di mescolamento all'interno della vasca sulle coclee contemplando la forma e la tipologia del materiale miscelato tramite un parametro adimensionale (C_X).

Sicuramente, come già accennato, l'esecuzione di altre prove sperimentali più specifiche garantirebbe un miglioramento del lavoro svolto in quanto permetterebbe una definizione dell'andamento del coefficiente C_X al variare del materiale miscelato introdotto nella vasca. Dallo svolgimento di questi test, sarebbe plausibile ottenere bassi valori di C_X (ad esempio da 1 a 3) per materiali quali farine e mangimi e valori più alti (ad esempio da 7 a 10) per materiali quali foraggi lunghi e insilati.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi si è effettuata l'analisi di un prototipo elettrico di carro miscelatore, macchina semovente agricola impiegata per l'alimentazione animale, realizzato da un'azienda del cuneese, la Supertino S.r.l., presso la quale lo studente ha svolto un periodo di tirocinio curriculare. L'elettrificazione di questa tipologia di macchinario è fattibile in quanto si tratta di una macchina utilizzata esclusivamente all'interno dell'area aziendale, ogni giorno per un periodo di tempo limitato (il tempo giornaliero di funzionamento può variare da 1 ora a 5 ore al massimo).

Il pacco batterie installato attualmente sulla macchina garantisce un'autonomia di funzionamento di circa tre ore, riuscendo a soddisfare la richiesta di una media azienda di compiere due cicli di miscelazione consecutivi. Nonostante le esigenze tecniche vengano soddisfatte, la competitività economica del prototipo sul mercato rispetto alle versioni tradizionali potrebbe sicuramente essere migliorata. Infatti, aumentare il numero di batterie, com'è stato fatto passando dalla versione *Electra 1* alla versione *Electra 2*, comporta necessariamente anche un aumento del prezzo di mercato della macchina. A tal proposito, una riduzione dei consumi energetici risulterebbe fondamentale per poter consentire un dimensionamento ottimizzato del sistema di accumulo e ridurre al minimo i costi di produzione. Inoltre, sempre diminuendo i consumi energetici, si riuscirebbe ad aumentare l'autonomia della macchina a fronte della stessa capacità installata e si potrebbero soddisfare anche le richieste delle grandi aziende di compiere più di due cicli di miscelazione consecutivi.

Sulla base di queste motivazioni, nel presente lavoro si sono analizzati inizialmente i consumi specifici del carro semovente compiendo dei test durante il suo funzionamento. Come era facile aspettarsi, la funzione che assorbe più energia in un ciclo di lavoro è risultata essere la miscelazione - triturazione dei materiali inseriti all'interno della vasca. Per questo motivo, l'attenzione si è focalizzata nella realizzazione di un modello multibody del sistema di trincia miscelazione al fine di produrre un'ottimizzazione energetica di tale apparato. Si è quindi simulato un carico dinamico analitico agente sugli organi miscelanti che tenga conto della quantità di massa immessa nel cassone e della sua densità, dell'attrito prodotto dal materiale strisciante sull'elica delle coclee, della resistenza fluidodinamica

causata dal moto convettivo di mescolamento, delle perdite trasmissive della catena meccanica responsabile di impartire il moto alle coclee.

Dalle analisi condotte, si è osservato come il modello computerizzato produca dei risultati confrontabili con quelli registrati nelle prove reali. Anche se non si raggiunge con esattezza il dato sperimentale registrato nelle prove di funzionamento, si può affermare che l'andamento teorico risultante rispecchia il fenomeno reale e che le differenze fra i due si potrebbero limare migliorando i valori assegnati ai parametri coinvolti. Infatti, non essendo presenti altri casi simili in letteratura, non è possibile confrontare il lavoro svolto se non con dei test di funzionamento più specifici in cui si valuti analiticamente anche il tipo di materiale coinvolto nella miscelazione. Ciò vuol dire che per migliorare il modello dinamico prodotto, si potrebbe considerare, anziché una miscela omogenea, un composto di vari materiali, com'è nella realtà, con ognuno una propria densità e interazione con l'elica delle coclee. In ogni caso, dallo studio del modello si è evidenziato che le coclee presentano un profilo geometrico (valutato in termini di numero di rivoluzioni) che produce già il minor consumo energetico. Quindi, il percorso basato sull'esperienza che con gli anni ha portato l'azienda a delineare questa configurazione di coclea risulta corretto. Sempre analizzando il modello, si è potuto notare che miscelando ad una velocità di rotazione delle coclee minore per un tempo ragionevolmente maggiore l'energia consumata diminuisce.

Tutte le analisi svolte con questo modello dinamico, purtroppo, non riescono a considerare anche l'aspetto qualitativo della miscelazione. Infatti, per poter delineare un profilo energetico completo, bisognerebbe valutare anche l'incidenza che ha il profilo geometrico della coclea sulla miscelazione – triturazione effettiva dei materiali. La corretta preparazione della derrata alimentare è di fondamentale importanza per valutare l'efficienza globale della macchina. Per approfondire l'analisi e migliorare il modello realizzato si potrebbe dunque impiegare un software particellare per simulare il materiale miscelato. In questo modo, si potrebbe garantire una più sicura interpretazione delle forze agenti sugli organi miscelanti e, inoltre, si riuscirebbe a valutare l'effettivo tempo impiegato per miscelare i prodotti inseriti nella vasca. Per lo scarso tempo a disposizione, questo tipo di soluzione è stata accantonata ed è stata seguito l'approccio descritto nel presente elaborato, ovvero il carico agente sulle coclee è stato modellato analiticamente.

In conclusione, si è mostrato come, negli ultimi tempi, nel settore della meccanizzazione agricola le aziende abbiano iniziato ad analizzare sistemi propulsivi alternativi alle tradizionali unità motrici in un'ottica di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni inquinanti. Nonostante le architetture prototipali realizzate possiedano già un buon sviluppo tecnologico, il lavoro da svolgere per massimizzare l'efficienza delle macchine è ancora molto e l'attività di tesi presentata in questo testo ne è un esempio.

Riferimenti bibliografici

- [1] Ancitel Energia e Ambiente S.p.a., “Linee guida per la mobilità elettrica”, Tipografia Grasso sas, Novembre 2016.
- [2] <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>
- [3] Vaasa University, “Literature review regarding SCR engine integration and particulate abatement”, HERCULES-2 Project, 2016.
- [4] https://www.dieselnet.com/tech/cat_doc.php
- [5] Majewski, Addy W. & Magdi K. Khair, “Diesel Emissions and Their Control”, Warrendale: SAE International 561, 2006, p. ISBN 978-0-7680-0674-2.
- [6] <https://www.dieselnet.com/tech/dpf.php>
- [7] Prasad Divekar, Qingyuan Tan, Xiang Chen, Ming Zheng, “Characterization of Exhaust Gas Recirculation for Diesel Low Temperature Combustion”, IFAC-PapersOnLine 48-15, 2015, pp. 045–051.
- [8] https://www.dieselnet.com/tech/cat_scr.php
- [9] Aurelio Somà, “Hybrid Electric Vehicles: Trends and Hybridization Factor for Heavy-Duty Working Vehicles”, <https://www.intechopen.com/books/hybrid-electric-vehicles>, IntechOpen, 2017.
- [10] Carlo Carnevali, Fabio Ricci, “Carri desilatori, trincia-miscelatori e distributori di mangime”, Ente Nazionale Meccanizzazione Agricola (ENAMA), Roma, Settembre 2003.
- [11] FARE SIN, “Mixer wagon for animal feed mixtures”, European Patent Application, 16177282.7, 2017.
- [12] A. Lajunen *et al.*, “Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery”, Energies, Maggio 2018.

- [13] A. Lajunen *et al.*, “*Electric and hybrid electric non-road mobile machinery – present situation and future trends*”, World Electric Vehicle Journal, Vol. 8, pp. 0172 – 0183, 2016.
- [14] K.Ç. Bayindir, M.A. Gözüküçük and A. Teke, “*A comprehensive overview of hybrid electrical vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units*”, Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 2, February 2011, pp. 1953–68.
- [15] Ali Emadi, Young Joo Lee, Kaushik Rajashekara, “*Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, Issue: 6, pp. 2237 – 2245, Jun 2008.
- [16] Ehsani M, Gao Yimin, Miller JM, “*Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives*”, Proceedings of the IEEE. 2007;95(4):719-728.
- [17] Kutrašnik T, Tranc F, Rodman Oprešnik S, “*Analysis of the energy conversion efficiency in parallel and series hybrid powertrains*”, IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2007;56(6/2):3649-3659.
- [18] He Y, Chowdhury M, Pisu P, Ma Y, “*An energy optimization strategy for power-split drivetrain plug-in hybrid electric vehicles*”, Transportation Research Part C. 2012;22:29-41.
- [19] Noëlle Janiaud, François-Xavier Vallet, Marc Petit, Guillaume Sandou, “*Electric Vehicle Powertrain Architecture and Control Global Optimization*”, World Electric Vehicle Journal, Vol. 3, 2009, pp.0682-0693.
- [20] Fuad Un-Noor *et al.*, “*A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development*”, Energies, Agosto 2017.
- [21] Alireza Khaligh, Zhihao Li, “*Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art*”, IEEE Transactions on Vehicular Technology (Volume:59, Issue: 6) Page(s):2806 – 2814, Jul 2011.
- [22] Jiuchun Jiang, Caiping Zhang, “*Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles*”, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, Singapore, 2015.
- [23] Dr. Duane Hanselman, “*Brushless Permanent Magnet Motor Design*”, Magna Physics Publishing, Lebanon, Ohio, 2006.
- [24] A. Tenconi, *Materiale didattico del corso di Trazione Elettrica*, Politecnico di Torino, 2012.

- [25] Martin Lukaszewycz *et al.*, “*System Architecture and Software Design for Electric Vehicles*”, Design Automation Conference (DAC), ResearchGate, Maggio 2013.
- [26] G.P. Moreda, M.A. Muñoz-García, P. Barreiro, “*High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – A review*”, Energy Conversion and Management 115, 2016, pp. 117–131.
- [27] Riccardo Biondini, Michele Mattetti, Giovanni Molari, “*Elettrificazione in agricoltura*”, Distal - Università di Bologna.
- [28] J. Barthel, D. Gorges, M. Bell, P. Munch, “*Energy Management for Hybrid Electric Tractors Combining Load Point Shifting, Regeneration and Boost*”, Vehicle Power and Propulsion Conference, Coimbra, 2014.
- [29] A. Singh, A. Izadian, S. Anwar, “*Adaptive Nonlinear Model-Based Fault Diagnosis of Li-ion Batteries*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013.