

QUANDO SI PARLA DI QUANTIFICAZIONE DELL'EFFICIENZA DI UN SISTEMA SI INTENDE IL CALCOLO DEL SUO RENDIMENTO GLOBALE, INTESO COME IL RAPPORTO MATEMATICO TRA L'ENERGIA IN USCITA DAL SISTEMA CONSIDERATO (IN QUALUNQUE FORMA UTILE: ELETTRICA, CHIMICA, TERMICA, ...) E L'ENERGIA IN INGRESSO (ANCORA UNA VOLTA, IN QUALUNQUE FORMA ESSA SIA), ESPRESSO CON UN NUMERO PURO (TRA 0 E 1) OPPURE COME PERCENTUALE. LA QUANTIFICAZIONE DEL RENDIMENTO NON È UN'OPERAZIONE SEMPLICE, PERCHÉ IMPLICA UN CONTROLLO MOLTO PRECISO DEI FLUSSI DI ENERGIA CHE ATTRAVERSANO LA FRONTIERA DEL SISTEMA CONSIDERATO, MA È SEMPRE UTILE, POICHÉ È ASSOCIATA ALLA BONTÀ DELLE TRASFORMAZIONI ENERGETICHE CHE AVVENGONO ALL'INTERNO DEL SISTEMA.

L'operazione di contabilizzazione del rendimento di un sistema ha un altro risvolto molto interessante, che riguarda la quantificazione della quota parte dell'energia in ingresso che viene dissipata all'interno del sistema sotto forma di calore, e che quindi è fonte di dilatazioni strutturali e possibili surriscaldamenti anche a carico dei sistemi adiacenti.

Come caratterizzare l'efficienza delle macchine agricole





I sistemi per la misurazione dell'efficienza globale del motore nelle macchine agricole

Le macchine agricole, come del resto qualsiasi veicolo, si configurano come un sistema tecnico avente una notevole complessità, ulteriormente aumentata rispetto alle automobili dalla presenza di una serie di interfacce (o "prese di potenza") meccaniche e idrauliche per l'azionamento degli attrezzi agricoli. Concentrandosi sui trattori e schematizzandone il sistema moto-propulsivo (spesso indicato come "powertrain") in componenti generatori dell'energia, trasmettitori dell'energia e utilizzatori dell'energia, possiamo quindi apprezzare che, a fronte di un unico generatore dell'energia (motore), vi sono quindi più utilizzatori, peraltro posizionati diversamente rispetto al percorso seguito dalla potenza per arrivare alle ruote (l'utilizzatore più "distante"; Figura 1).

Ad esempio, la presa di potenza meccanica (in inglese indicata come PTO o "power-take-off") si configura come un albero scanalato con rigatura standardizzata, cui può essere connesso un albero cardanico per azionare quindi qualsiasi attrezzo agricolo. Nella sua versione più semplice (sincronizzata col motore), la connessione col motore è pressoché diretta e non passa attraverso il cambio di velocità, e quindi è possibile utilizzare la presa di potenza meccanica per connettere un freno dinamometrico al motore trattore e tracciarne così le curve caratteristiche (coppia e potenza in condizioni di piena ammissione). Il freno dinamometrico è un dispositivo (generalmente idraulico o elettrico) che applica una coppia frenante all'albero scanalato della presa di potenza meccanica del trattore, rilevandone nel contempo la velocità di rotazione. Misurando la coppia applicata mano a mano che cala la velocità di rotazione del motore, per il terzo principio della dinamica, esso riesce a fornire il valore della coppia del motore in tutto il suo campo di funzionamento. L'ottenimento dell'efficienza del motore, però, non è ancora a portata di mano (Figura 2): è necessa-

rio utilizzare un misuratore istantaneo di consumi (inserito in serie nella linea di alimentazione) oppure un sistema cronogravimetrico (che misura il decremento di massa di combustibile nel tempo; Figura 3) per ottenere i valori del consumo di carburante (espressi in $g\ h^{-1}$). Il consumo (massico) specifico C_s ai diversi regimi di rotazione viene ottenuto dividendo i valori del consumo di carburante per i valori di potenza erogati dal motore (misurati al freno dinamometrico, in kW); esso permette il calcolo dell'efficienza globale del motore η (%), noto il potere calorifico inferiore del combustibile utilizzato (per il gasolio è $42400\ kJ\ kg^{-1}$):

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{E_{out}}{m_{fuel} \cdot LHV_{fuel}} = \frac{1}{c_s \cdot LHV_{fuel}} \Rightarrow \eta_{diesel\ oil} = \frac{84 \left(\frac{g}{kWh} \right)}{c_s \left(\frac{g}{kWh} \right)}$$

in cui

- η – efficienza globale del motore, %;
- E_{in} – energia che entra nella macchina, J;
- E_{out} – energia che esce dalla macchina, J;
- m_{fuel} – massa del carburante, kg;
- LHV_{fuel} – potere calorifico inferiore del carburante, $kJ\ kg^{-1}$;
- C_s – consumo specifico di carburante, $g\ (kWh)^{-1}$.

La misurazione dell'efficienza delle trasmissioni utilizzate nelle macchine agricole

Il compito della trasmissione è adattare le condizioni di funzionamento del motore alle richieste dell'utilizzatore, in termini di velocità di rotazione e coppia trasmesse. L'adattamento opera nel dominio del tempo del motore e dell'utilizzatore, quindi nelle fasi temporali di: avvio, transitorio/regime, arresto (dell'erogazione oppure della

Figura 1 – Schema della trasmissione di un trattore a 4 ruote motrici; oltre alle derivazioni del moto alle ruote sono visibili anche le due differenti possibilità riguardanti la presa di potenza meccanica posteriore (p.d.p.), normalmente utilizzata per l'azionamento dei cinematismi di vari attrezzi agricoli (figura adattata da: G. Pellizzi, L. Bodria, P. Piccarolo, Meccanica agraria vol.1 - Il trattore e le macchine operatrici, Il Sole 24 Ore Edagricole, 2006).

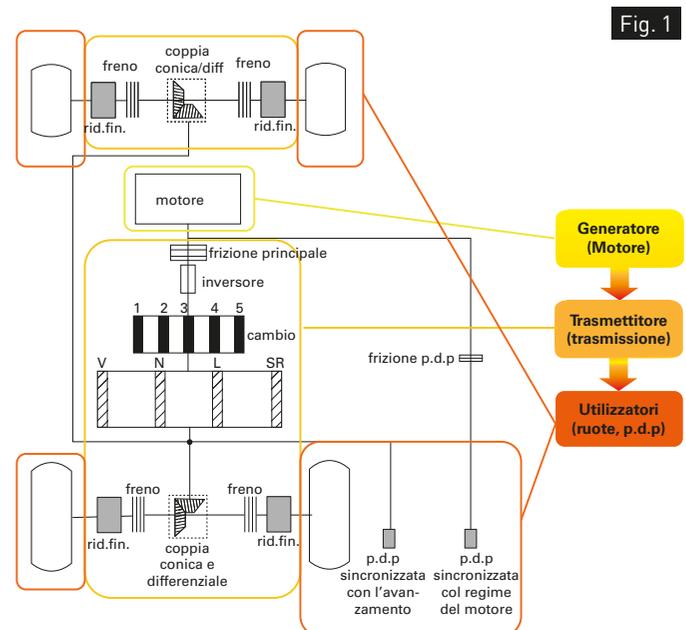


Fig. 1

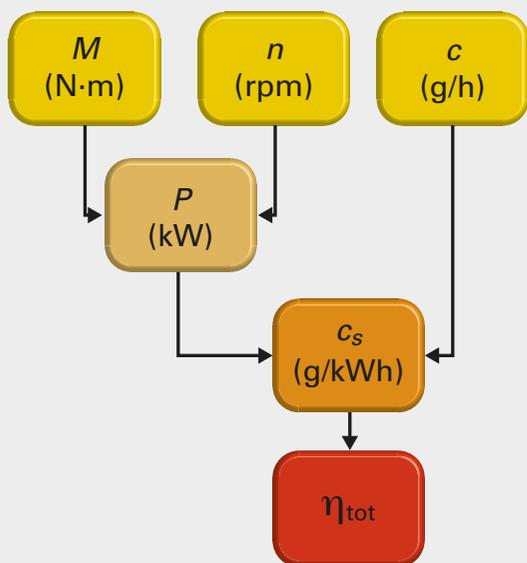


Fig. 2

richiesta di potenza). Nel caso dei motori elettrici, aventi un campo di velocità molto esteso e una coppia non nulla anche a rotore fermo, il motore può adattarsi direttamente alle richieste dell'utilizzatore, quindi il sistema di trasmissione è semplificato e include il solo albero di trasmissione. Viceversa, quando la sorgente della potenza è un motore termico, la complessità dei sistemi di trasmissione aumenta notevolmente, e i vari costruttori di veicoli hanno sviluppato soluzioni anche progettualmente molto raffinate: trasmissioni meccaniche automatiche con innesto idrocinetico (convertitore di coppia), trasmissioni meccaniche a rapporti fissi e doppia frizione, trasmissioni di tipo idrauliche-meccaniche a variazione continua del rapporto di trasmissione (CVT). Le trasmissioni meccaniche svolgono un ruolo fondamentale anche e soprattutto nelle macchine agricole, dove sussiste la necessità di non interrompere l'erogazione di coppia durante le cambiate, tanto è vero che una delle ultime innovazioni in campo automobilistico (vale a dire i cambi a doppia frizione, in agricoltura indicati come cambi con frizioni multiple elettro-attuate o full-powershift) è in realtà derivata dalla soluzione inizialmente studiata per l'agricoltura. Le operazioni colturali che possono essere svolte con un trattore sono molteplici, ciascuna caratterizzata da un intervallo ottimale della velocità di avanzamento e soprattutto da una diversa richiesta di coppia e potenza al motore, basti pensare alle operazioni di aratura (nelle quali vi è interazione col terreno), distribuzione di prodotti fitosanitari (rimorchio dell'attrezzo e contemporaneo azionamento di una pompa e un ventilatore) oppure di ranghinatura (con la quale si raccoglie il foraggio scalcato in cumuli longitudinali). In quest'ambito si sono quindi sviluppati cambi con molti più rapporti di trasmissione di quelli normalmen-

te presenti sulle automobili, normalmente organizzati in gamme di velocità e con lo stesso numero (o, comunque, con un numero molto alto) di rapporti nelle due direzioni (marcia avanti, retromarcia).

Ad ogni modo, che si tratti di cambi a rapporti fissi tradizionali, Powershift o CVT, questi sistemi sono sede di attriti interni di vario tipo (radente, volvente, misto, viscoso), causati dai vari organi meccanici a contatto diretto/ con lubrificante interposto e in moto relativo (es. alberi sui cuscinetti, fianchi dei denti), e, come tali, costituiscono un'importante fonte di dissipazione dell'energia erogata dal motore. In un'ottica di cosiddetto bilancio energetico del trattore, il sistema di trasmissione è sede di perdite quantificabili tra il 7 e il 16% (Figura 5) e merita quindi di essere indagato.

Per la rilevazione dell'efficienza delle trasmissioni è possibile utilizzare nuovamente dei sistemi di frenatura dissipativa controllata come quelli precedentemente proposti (freno dinamometrico), opportunamente collegati in un punto della powertrain a valle della trasmissione, ad esempio: alle ruote (banchi a rulli, Figura 6, oppure con alberi da connettere direttamente ai mozzoni delle ruote, Figura 7) oppure alla p.d.p. sincronizzata con l'avanzamento (freno dinamometrico con trattore sollevato).

Un sistema di questo tipo permetterebbe di rilevare la

Figura 2 – Ottenimento dell'efficienza del motore (in rosso) dalle grandezze sperimentali (in giallo).

Figura 3 – Allestimento di un misuratore dei consumi istantanei di combustibile basato sul principio cronogravimetrico (pesatura del decremento di massa nel tempo) al banco prova oppure al freno dinamometrico (in questo secondo caso il sistema è trasportabile e deve essere pallettizzato); nella fotografia si può vedere un tipico allestimento sperimentale per la prova in situ di un trattore facente uso del sistema di pesatura del carburante illustrato.

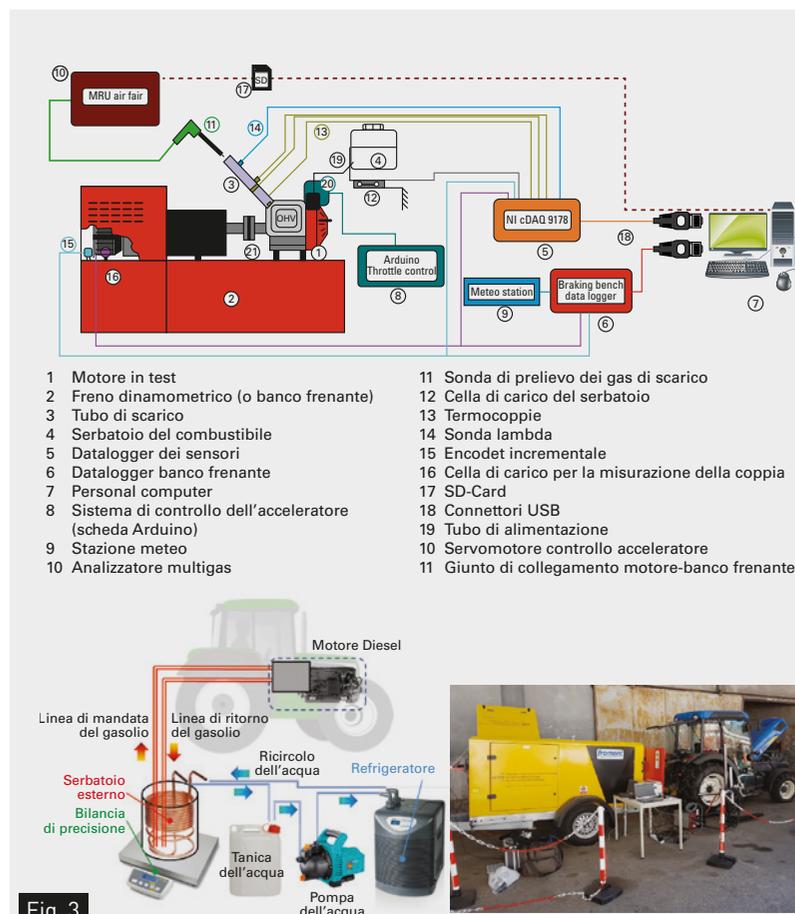


Fig. 3

coppia e la potenza assolute effettivamente disponibili alle ruote (dati già molto interessanti) nonché consentirebbe di calcolare il rendimento della trasmissione, noto l'output di potenza del motore ottenuto da prove precedenti alla p.d.p. sincronizzata col motore. Per i sistemi considerati (motore, trasmissione), in serie uno rispetto all'altro, vale la seguente equazione:

$$\eta_{tot} = \frac{E_{ruote}}{E_{combustibile}} = \frac{E_{motore}}{E_{combustibile}} \cdot \frac{E_{ruote}}{E_{motore}} = \eta_{motore} \cdot \eta_{trasmissione}$$

Fig. 4

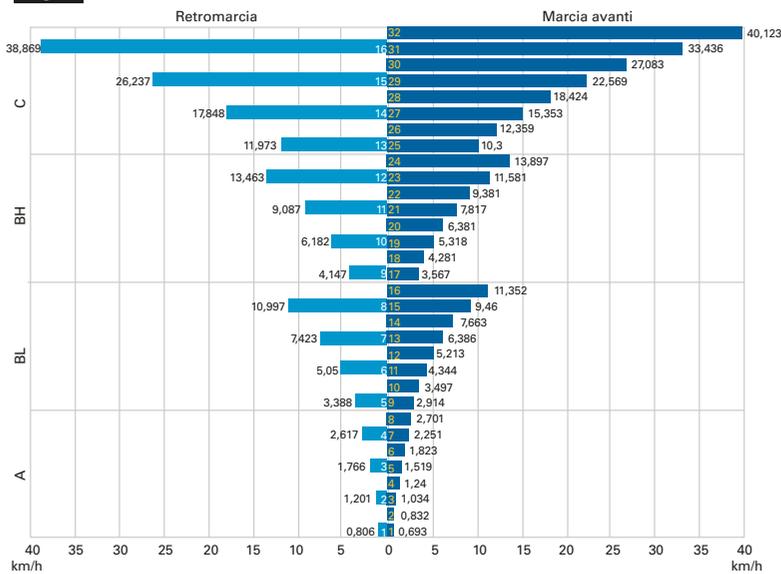


Figura 4 – Trasmissione New Holland Dual Command™ 32x16 (32 marce avanti, 16 marce indietro suddivise in quattro gamme denominate A, BL, BH, C) che equipaggia i trattori della serie T4 F/N/V (figura tratta da <http://assets.cnhindustrial.com/nhag/eu/it-it/assets/pdf/agricultural-tractors/t4fnv-brochure-italy-it.pdf>); il numero indicato a fianco di ciascuna barra indica la velocità massima raggiungibile con quel rapporto; come è possibile apprezzare dalla figura, i primi due rapporti consentono addirittura velocità massime inferiori ad 1 km/h. Per applicazioni specialistiche particolari è disponibile anche una trasmissione Dual Command 44x16, quindi con ulteriori possibilità per il guidatore.

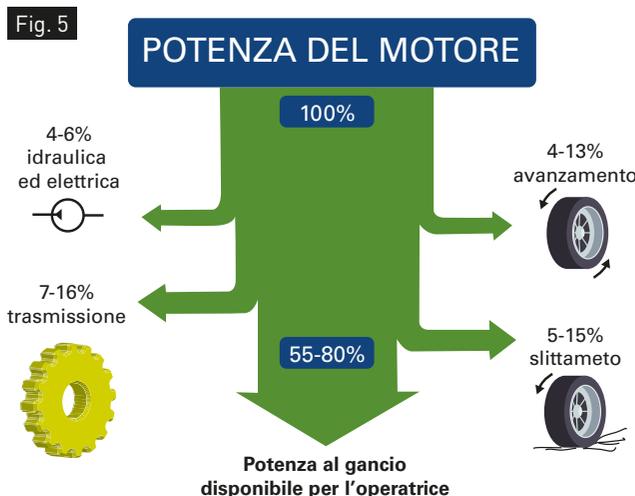
Letture di approfondimento

- Bietresato, M., Calcante A., Mazzetto, F., A neural network approach for indirectly estimating farm tractors engine performances [2015] Fuel, 143, pp. 144-154. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.11.019
- Bietresato, M., Friso, D., Sartori, L., Assessment of the efficiency of tractor transmissions using acceleration tests [2012] Biosystems Engineering, 112 (3), pp. 171-180, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.03.009
- Concli, F., Gorla, C., CFD simulation of power losses and lubricant flows in gearboxes, (2017) American Gear Manufacturers Association Fall Technical Meeting, (January 2017), pp. 2-14. ISBN: 978-151085281-5
- Concli, F., Gorla, C., Numerical modeling of the power losses in geared transmissions: Windage, churning and cavitation simulations with a new integrated approach that drastically reduces the computational effort, (2016) Tribology International, 103, pp. 58-68. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.06.046
- Concli, F., Gorla, C., Windage, churning and pocketing power losses of gears: different modeling approaches for different goals [Wirkungsgrad und Verluste von Zahnradgetrieben: Verschiedene Methoden für verschiedene Anwendungen], (2016) Forschung im Ingenieurwesen/Engineering Research, 80 (3-4), pp. 85-99. DOI: 10.1007/s10010-016-0206-9
- Mattetti M., Molari G. Trasmissioni, il prossimo futuro è nella doppia frizione? Macchine e motori agricoli (2013), n.6, 32-34
- Molari G., Pagliarani S., Perdite di potenza nei cambi full power-shift; Terra e vita (2007); n.23; 44-46
- Molari G., Trasmissioni a variazione continua per trattori di potenza medio- bassa; Mondo Macchina (2012); anno XXI n.1; 84-89
- Pagliarani S., Molari G., Alla scoperta delle CVT; Macchine e Motori Agricoli (2010); n.3; 42-45
- Renius, K. T., Resch R., Continuously variable tractor transmissions, (2005) ASAE Distinguished Lecture: tractor design, 29, pp. 1-37. St. Joseph, Mich.: ASAE
- Renzi, M., Bietresato, M., Mazzetto, F., An experimental evaluation of the performance of a SI internal combustion engine for agricultural purposes fuelled with different bioethanol blends, (2016) Energy, 115, pp. 1069-1080. DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.050

Dove è possibile studiare l'efficienza delle macchine agricole? Ad esempio presso la Facoltà di Scienze e Tecnologie della Libera Università di Bolzano, con i seguenti docenti:

- Ing. Franco Concli – Scuola di Dottorato SET – contatto: franco.concli@unibz.it
- Ing. Marco Bietresato, Prof. Fabrizio Mazzetto – Scuola di Dottorato MEA – contatti: marco.bietresato@unibz.it, fabrizio.mazzetto@unibz.it

Figura 5 – Bilancio di utilizzazione della potenza in un trattore impegnato in un lavoro di trazione secondo l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture - IRSTEA, precedentemente chiamato Cemagref (figura tratta da: Lazzari M., Mazzetto F., Meccanica e Meccanizzazione dei processi produttivi agricoli, (2016) Il Capitello).



Conclusioni

Le macchine motrici agricole (e, in particolare, i trattori) si configurano come dei sistemi semoventi aventi un'elevata complessità dal punto di vista meccanico, soprattutto per quanto riguarda il sottosistema di trasmissione, fondamentale per garantire la piena fruibilità di queste macchine nei vari compiti che esse sono chiamate a svolgere.

Esse presentano però anche una serie di interfacce meccaniche (le cosiddette "prese di potenza"), predisposte dai costruttori per azionare vari attrezzi agricoli, che forniscono un accesso in vari punti della powertrain.

Adottando un approccio specifico e sviluppando quindi dei sistemi dedicati, basati sostanzialmente sull'utilizzo di dispositivi di frenatura dissipativa controllata (freni dinamometrici) opportunamente collegati alle prese di potenza oppure alle ruote, è possibile quindi avere una piena qualificazione energetica della macchina, in termini di quantificazione dei rendimenti del sistema motore e del sistema trasmissione. ■

© RIPRODUZIONE RISERVATA



Figura 6 – Banco di prova trattori a rulli inaugurato nel 2015 da Fendt presso lo stabilimento di Marktobendorf in Germania (figura tratta da: https://www.mondomacchina.it/ew/ew_rivista/images/imageset/big_fendt%207-9%202015.jpg).



Figura 7 – Banco di prova per macchine agricole (trattori, mietitrebbiatrici) a "quattro postazioni indipendenti" installato nel 2015 da Claas nel suo stabilimento a Trangé, in Francia (figura tratta da: <http://www.agricolturanews.it/files/2015/03/240463-3.jpg>).

INTERROLL