

# Trasmissioni CVT ibride

## una possibilità per ottimizzare l'efficienza dei motori a combustione interna

LA MASSIMIZZAZIONE DELL'EFFICIENZA GLOBALE DELLE MACCHINE È UN TEMA DI SEMPRE MAGGIORE CENTRALITÀ CHE INTERESSA IN PARTICOLARE LA PROGETTAZIONE DEI PROPULSORI E LA DOMANDA DI SISTEMI AD ELEVATA EFFICIENZA È IN COSTANTE AUMENTO IN OGNI SETTORE. INOLTRE, GLI STANDARD EURO/TIER PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI INQUINANTI DEI VEICOLI STRADALI/AGRICOLI RISPETTIVAMENTE, IMPONGONO UN MIGLIORAMENTO DELL'EFFICIENZA SIA DEI MOTORI, SIA DELLE TRASMISSIONI. PER QUESTO MOTIVO, LE RISORSE DEDICATE ALLA RICERCA IN TALE AMBITO SONO IN CONTINUO AUMENTO.



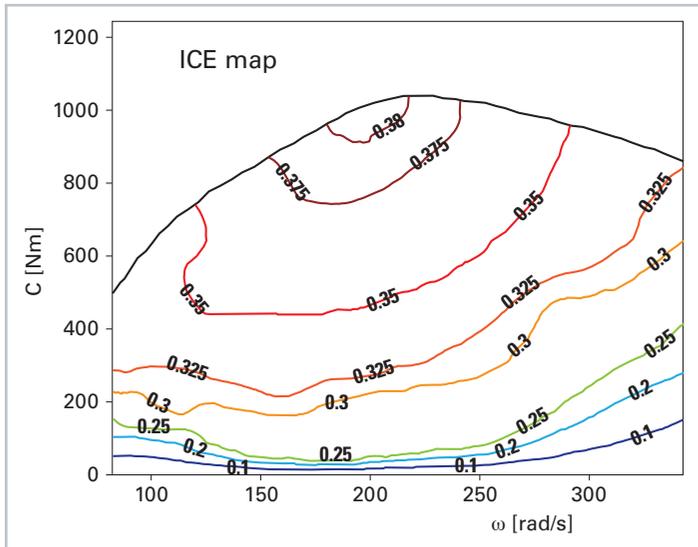
L'efficienza istantanea globale (termica e meccanica) di un motore a combustione interna (*Internal Combustion Engine, ICE*), espressione delle scelte costruttive in esso adottate, è fortemente legata al suo punto di funzionamento, espresso come combinazione di velocità di rotazione e coppia erogata (Figura 1).

Le classiche trasmissioni meccaniche ad ingranaggi, aventi un numero limitato di rapporti, fissano una velocità di rotazione del motore in funzione della velocità di avanzamento del veicolo, lasciando al conducente la scelta del rapporto di volta in volta più adatto per soddisfare le esigenze di coppia che il veicolo deve soppravanzare (ad es.: superamento di pendenze, traino di carichi). Nell'utilizzo quotidiano, la velocità di un veicolo varia notevolmente e, come conseguenza, il motore potrebbe trovarsi a funzionare molto lontano dal suo punto di massima efficienza per un periodo di tempo anche considerevole. Ciò è particolarmente penalizzante, ad

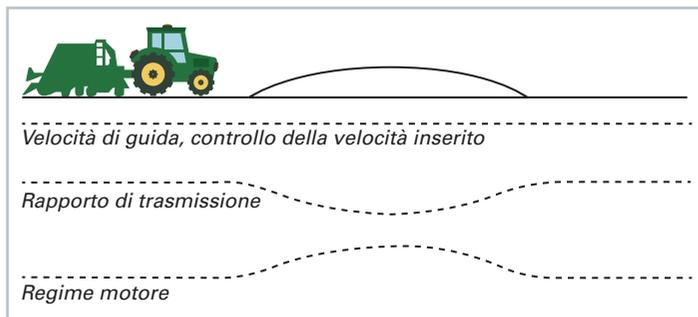
esempio, per i veicoli che viaggiano in un contesto urbano, dato che i loro rapporti di trasmissione sono ottimizzati solo per alcune condizioni operative specifiche, di solito corrispondenti alle velocità di 90 e 130 km/h (ossia, rispettivamente, le velocità di crociera che si avrebbero in un percorso extra-urbano ed autostradale).

Anche per le macchine agricole il punto di funzionamento del motore a combustione interna può essere tutt'altro che prossimo a quello ottimale per la maggior parte del tempo. In particolare, i trattori possono essere pensati come unità mobili di generazione di potenza e vengono utilizzati per compiti anche molto diversi tra loro, pertanto un'ottimizzazione globale dei rapporti di trasmissione è molto più difficoltosa dei veicoli stradali.

Inoltre, anche considerando un unico tipo di attività, ad esempio le lavorazioni del terreno, e, in questo ambito, l'utilizzo di un unico tipo di attrezzo agricolo, ad esempio l'aratro, l'ottimizzazione funzionale della macchina è resa particolarmente complessa dalla variabilità intrinseca delle condizioni del terreno stesso (in termini, ad esempio, di attrito opposto dal terreno agli organi di lavoro e di coesione interna).



**Fig. 1** - Mappa di efficienza di un motore a combustione interna in funzione del regime e della coppia erogata. (Fonte: Francesco Bottiglione, Tommaso Contursi, Angelo Gentile and Giacomo Mantriota, The Fuel Economy of Hybrid Buses: The Role of Ancillaries in Real Urban Driving, Energies 2014, 7(7), 4202-4220; doi:10.3390/en7074202).



**Fig. 2** - Esempificazione del principio di funzionamento di una trasmissione CVT in una macchina agricola; fissata la velocità di avanzamento, il sistema adatta il rapporto di trasmissione e il regime del motore a seconda delle richieste di coppia. (Fonte: <http://www.valtra.it/valtra-transmissions.aspx>).

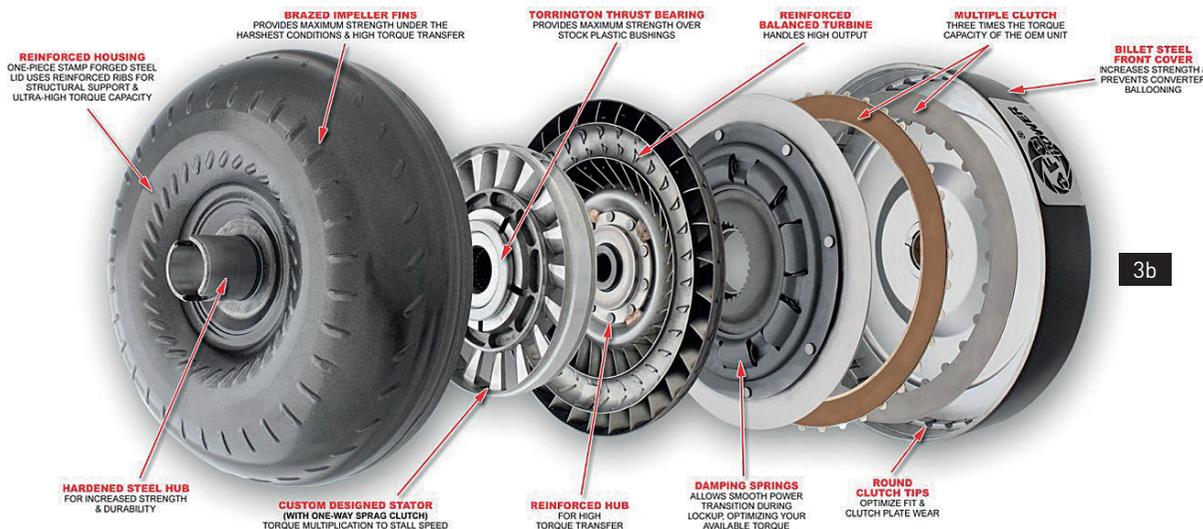
Una possibile soluzione a questo problema è rappresentata dalle trasmissioni a variazione continua del rapporto di trasmissione (*Continuously Variable Transmission*, CVT). Questi sistemi consentono di disaccoppiare la velocità di rotazione del motore da quella di avanzamento del veicolo (Figura 2). In particolare, le trasmissioni CVT, se ben progettate nel loro modo di funzionare, permettono al motore a combustione interna di operare sempre attorno al suo punto di lavoro ottimale, noto al costruttore del veicolo e caratterizzato dalla massima efficienza. Tra i più diffusi tipi di CVT vi sono:

- i CVT diretti a cinghia metallica/catena;
- i CVT indiretti idromeccanici;
- i CVT indiretti elettromeccanici.

I CVT a catena (Figura 3a) funzionano variando le circonferenze di avvolgimento delle catene sulle due pulegge e sono caratterizzati da un'efficienza molto contenuta, a causa delle elevate perdite per attrito relative allo strisciamento tra i loro componenti interni.



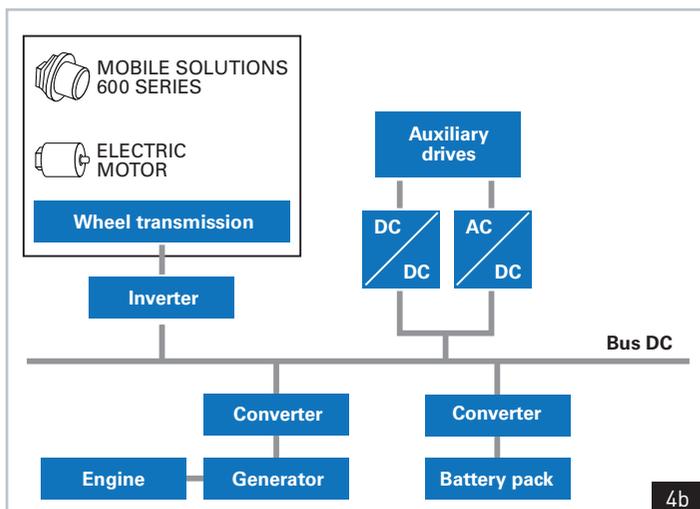
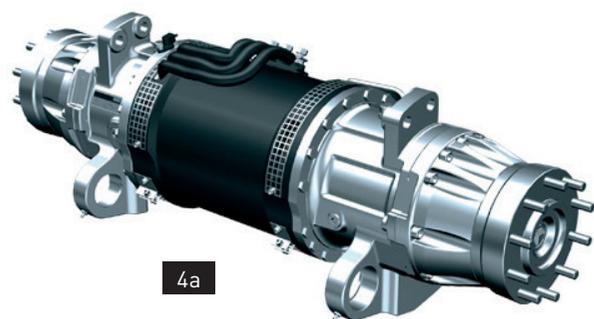
3a



3b

**Fig. 3** In alto, CVT diretto a cinghia metallica/catena; a sinistra, CVT indiretto idromeccanico (di tipo idrodinamico).

I CVT idromeccanici (Figura 3b) possiedono al loro interno elementi meccanici e idraulici accoppiati coinvolti nella trasmissione del moto; essi sono però penalizzati dalla presenza di un circuito idraulico, che ha perdite interne piuttosto rilevanti. I tipici CVT elettromeccanici (Figura 4) garantiscono invece, tra tutte le trasmissioni ibride, il valore di efficienza maggiore, ma implicano l'utilizzo di sistemi di accumulo dell'energia (solitamente trattasi di batterie), che incidono significativamente sui costi e sul peso complessivo di queste soluzioni.



**Fig.4** - CVT indiretto elettromeccanico Bonfiglioli 600F per veicoli adibiti alla movimentazione dei materiali con coppie fino a 18000 Nm (Fonte: <https://www.bonfiglioli.it/>).

**Trasmissioni CVT: vantaggi applicativi e tipologie**

I veicoli puramente elettrici hanno molti vantaggi rispetto alle soluzioni tradizionali che montano un motore a combustione interna, che vanno dalla ridotta emissione acustica alla capacità intrinseca di adattare la velocità di marcia agendo solamente sulle grandezze elettriche di alimentazione del motore.

Questo fatto, considerando anche l'elevato range operativo dei motori elettrici in termini di velocità di rotazione, permette di progettare soluzioni che non necessitino di un elemento, il cambio, che riscali la velocità del motore per adattarla a quella del veicolo. Di conseguenza, la complessità di suddetti veicoli è sicuramente inferiore a quella dei veicoli tradizionali equipaggiati invece con un ICE.

I veicoli puramente elettrici, però, non hanno trovato ancora larga diffusione a causa degli elevati costi e della limitata autonomia che riescono a garantire.

Negli anni sono stati fatti numerosi tentativi per sopperire a questi aspetti, anche se, allo stato attuale, non sembra ancora possibile escludere completamente il motore a combustione interna dalla linea di generazione della potenza necessaria all'autodislocamento del veicolo. Al contrario, il range utile di velocità di rotazione di un motore ICE (e in particolare il range di velocità nel quale la coppia ha valori sufficienti a movimentare l'intero veicolo) è relativamente ristretto rispetto ai sopracitati motori elettrici, per cui una trasmissione meccanica a più rapporti è strettamente necessaria.

Il numero finito di rapporti, per quanto negli anni sia cresciuto (si pensi alle automobili, da 4 a 5 e infine 6 marce avanti), fissa il regime operativo del motore a combustione interna data una velocità di avanzamento del veicolo.

Dal punto di vista puramente teorico, solo un numero infinito di rapporti permetterebbe di superare questa limitazione, garantendo l'esistenza di un rapporto di trasmissione adatto a qualsiasi richiesta di coppia e velocità di avanzamento del veicolo. E questa è la motivazione che ha spinto i costruttori di veicoli a sviluppare le trasmissioni a rapporto variabile (CVT).

In base alla loro architettura, le trasmissioni a variazione continua possono essere suddivise in dirette ed indirette.

Le CVT dirette permettono di variare in modo continuo il rapporto di trasmissione grazie a più elementi posti in serie. Tutta la potenza fluisce quindi nell'unico ramo presente, attraversando in maniera sequenziale i diversi componenti. La conversione della coppia e della velocità di rotazione dei vari organi può avvenire sfruttando principi meccanici, idraulici o elettrici (Tabella 1).

Al di là degli aspetti produttivi ed economici, la tipologia della trasmissione spesso viene scelta in base alle sue prestazioni ed al livello di efficienza.

Ad esempio, nelle trasmissioni CVT meccaniche (a cinghia metallica/catena), gli elevati strisciamenti fanno sì che anche l'efficienza di tale soluzione non sia particolarmente elevata. Inoltre, il loro utilizzo è fortemente limitato dalla massima coppia trasmissibile. Per potenze elevate vengono solitamente preferite soluzioni basate su una conversione idrodinamica (accoppiamento pompa-turbina idraulica) oppure idrostatica (accoppiamento di pompa-motore idraulico, entrambi volumetrici) nonostante questa abbia un'efficienza ancora minore rispetto alla conversione di natura meccanica.

Questa tipologia viene spesso chiamata anche convertitore di coppia e ha trovato largo utilizzo nella trazione stradale (come innesto progressivo nei cambi automatici) e nelle macchine agricole. In generale, a causa delle elevate perdite interne e nonostante gli elevati costi, questo

Tipologia di CVT	Principio di trasmissione dell'energia	Controllo del rapporto di trasmissione	Applicazione tradizionale
1 Meccanica	Forze di trazione, attrito	Diametro delle pulegge	Autoveicoli passeggeri
2 Idrodinamica	Pompa e turbina idraulica	Automatico in funzione del carico	Autoveicoli passeggeri e veicoli da lavoro
3 Idrostatica	Pompa e motore idraulico	Variazione geometrica cilindrata	Macchinari mobili
4 Elettrica	Generatore e motore elettrico	Frequenze della corrente o flusso magnetico	In via di sviluppo

**Tabella 1:** Principi fisici alla base delle differenti architetture di CVT (Fonte: Reinus, K., Resch, R., Continuously variable tractor transmissions [2005], ASAE Distinguished lecture 29, pp. 1-37).

tipo di trasmissioni CVT dirette, vengono molto raramente applicate per potenze superiori ai 50 kW in quanto non riescono a garantire una apprezzabile riduzione dei consumi di carburante nonostante la possibilità di selezionare il migliore rapporto di trasmissione, essendo preponderante l'effetto delle perdite per scarsa efficienza.

L'alternativa è rappresentata dalle soluzioni indirette, dette anche "power-split" in cui, con l'utilizzo di rotismi planetari, la potenza viene divisa in più percorsi (in inglese il verbo "split" significa infatti "suddividere"), per poi essere ricongiunta all'uscita del sistema di trasmissione, quindi in prossimità del punto di utilizzazione (ad esempio, il differenziale di un assale motore, Figura 5).

L'idea alla base del principio di suddivisione della potenza è relativamente semplice: la potenza in ingresso viene suddivisa tra un ramo in cui il rapporto di trasmissione è fisso ed uno secondario, in cui viene utilizzata una soluzione CVT diretta. I due flussi sono poi riuniti prima dell'albero di uscita.

Se la maggior parte della potenza viene trasmessa dal ramo meccanico a rapporto costante (caratterizzato da un'efficienza molto elevata, prossima a 1), le perdite del ramo CVT diretto, particolarmente significative quando questo è realizzato tramite soluzioni idrauliche (Figura 6 e 7), saranno molto contenute in termini assoluti, in quanto anche la potenza transitante attraverso di esso risulterà limitata.

In questo modo, pur mantenendo un buon livello globale di efficienza, è possibile variare in modo anche significativo il rapporto globale di trasmissione agendo solamente sul ramo CVT e quindi sulla ripartizione dei flussi di potenza (Figura 6b e 8).

Con riferimento ai differenti principi tecnologici impiegati nei due rami paralleli, questo tipo di trasmissione viene molto spesso anche chiamata "ibrida".

Le due tipologie più diffuse di trasmissione CVT indiretta (ibrida) sono le soluzioni idromeccaniche, largamente utilizzate in particolare nel settore agricolo fin dal 1995.

In quell'anno, infatti, Fendt presentò il primo trattore commerciale equipaggiato con trasmissione a variazione continua (il Favorit 926 Vario). Tre anni dopo fu la volta di Steyr (gruppo CNH) e, successivamente, di tutti gli altri costruttori di trattori, ciascuno con la propria architettura costruttiva caratteristica (Figura 9 e 10).

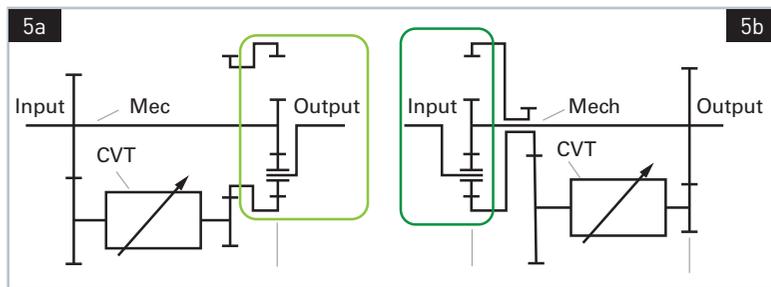
## Sviluppi futuri

Negli anni molti sono stati i tentativi, in differenti ambiti, di ridurre i consumi di combustibile e, di conseguenza, le emissioni inquinanti, e molto lavoro è ancora da fare in tal senso. Nel settore del trasporto pubblico su gomma (bus), ad esempio, spesso vengono impiegate soluzioni elettromeccaniche che mirano a fare lavorare il motore termico nel suo punto di lavoro ottimale.

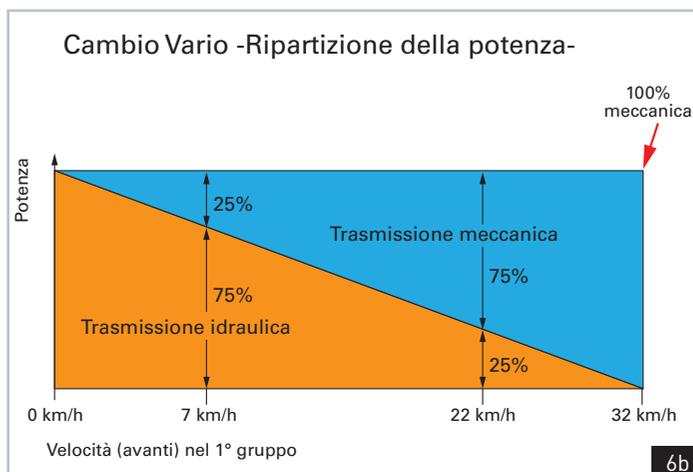
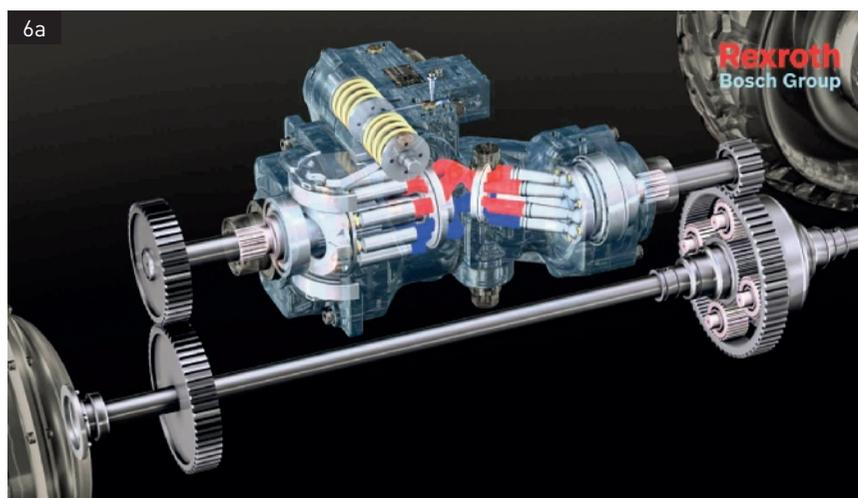
Questo deve coprire solamente il fabbisogno medio di energia. I picchi sono coperti da quella accumulata nelle batterie. Ad ogni ruota del mezzo è collegato un piccolo motore elettrico che preleva energia dalle batterie e assicura la trazione. Questo tipo di soluzione è molto efficiente ma al contempo anche molto costosa e, soprattutto, non adatta alla diffusione su larga scala né tanto meno ad essere utilizzata in altri ambiti, dove le esigenze (in termini di coppia, in particolare) possono essere anche molto differenti.

Ad esempio, i trattori agricoli e i gatti delle nevi hanno un altro tipo di necessità, ovvero assicurare la continuità nella fornitura di coppia e potenza anche a bassissime velocità ed elevati carichi.

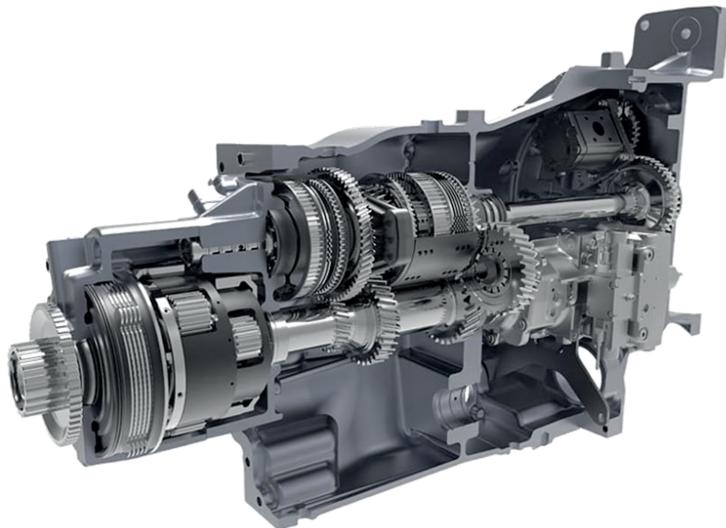
Un cambio di marcia sotto carico, effettuato ad esempio con una trasmissione tradizionale manuale o automatica, implicherebbe



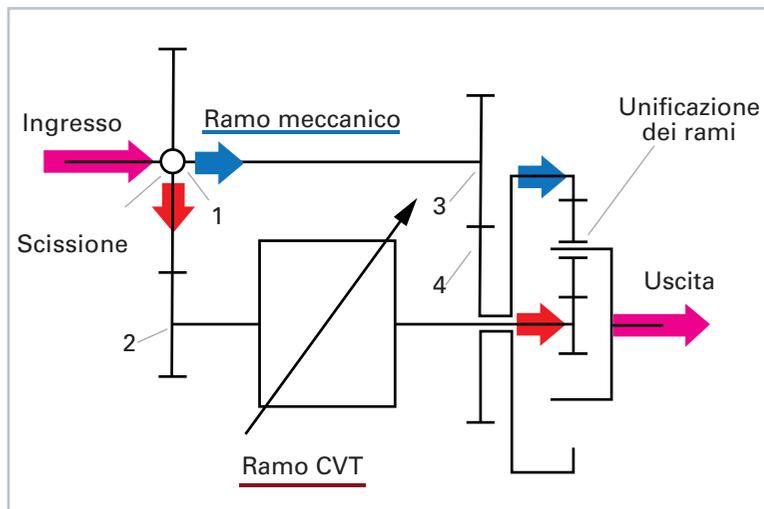
**Fig. 5** - Due differenti concetti di trasmissione CVT indiretta, caratterizzati dalla differente posizione del rotismo planetario o epicicloidale nella linea di trasmissione della potenza: a sinistra il rotismo epicicloidale è utilizzato come sommatore (per la ricongiunzione dei flussi di potenza), a destra è invece utilizzato come divisore (per la suddivisione iniziale dei flussi di potenza). Notare che la stessa figura indica con "CVT" un sottosistema a trasmissione variabile diretto. (Fonte: Kress, J.H., Hydrostatic power-splitting transmissions for wheeled vehicles - Classification and theory of operation (1968) SAE Technical Papers DOI: 10.4271/680549).



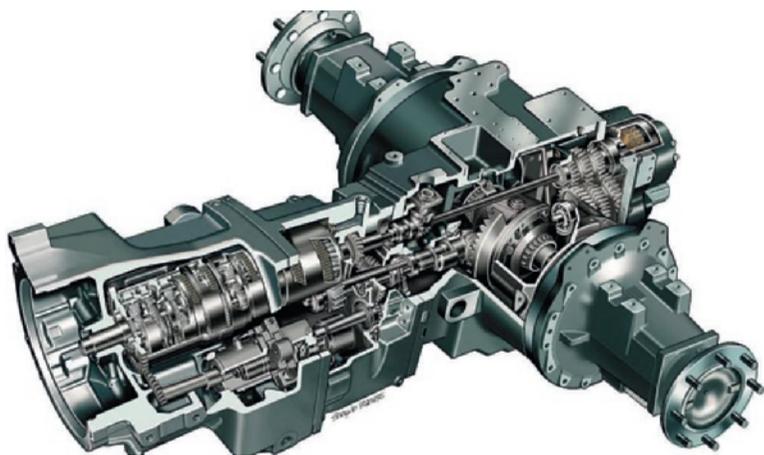
**Fig. 6** - In alto, trasmissione CVT indiretta idromeccanica con rotismo epicicloidale di tipo "sommatore" e componente CVT diretta (ramo superiore) realizzata tramite accoppiamento tra pompa e motore idraulico a pistoni assiali e cilindrata variabile (Fonte: Bosch Rexroth); in basso, ripartizione meccanica - idraulica al variare della velocità di avanzamento nella gamma 1 (Fonte: Fendt).



**Fig. 7** - Trasmissione a variazione continua VT-Drive di Argo Tractors, sviluppata da ZF e installata su un trattore McCormick X6.4 VT-drive (source [www.argotracors.com](http://www.argotracors.com)). Il gruppo è composto da una parte idrostatica e da una meccanica: a basse velocità, fino a 3-4 km/h in entrambi i sensi il gruppo lavora in idrostatico "puro", mentre per velocità superiori la componente idrostatica si combina progressivamente con quella meccanica, minimizzando gli assorbimenti di potenza (Fonte: [www.mccormick.it](http://www.mccormick.it)).



**Fig. 8** - Flussi di potenza in una trasmissione CVT indiretta con rotismo epicicloidale sommatore anche detto CVT ad input accoppiati. (Fonte: Kress, J.H., Hydrostatic power-splitting transmissions for wheeled vehicles - Classification and theory of operation (1968) SAE Technical Papers DOI: 10.4271/680549).



**Fig. 9** - Trasmissione CVT Deutz Fahr Agrottron TTV (Fonte: <https://www.weeklytimesnow.com.au/machine/a-dummies-guide-to-tractor-transmissions-and-how-they-get-the-power-down/news-story/73ed4d56122186f8d9f226c3360c57a5f>).



**Fig. 10** - Case CVXDrive installata su trattore articolato dotato di semicingoli della serie Steiger (Fonte: <https://www.caseih.com/northamerica/en-us/products/tractors/steiger-series>).

necessariamente una interruzione della coppia e della potenza alle ruote (causata dall'apertura della frizione), con elevati carichi dinamici alla chiusura della frizione e possibile arresto della marcia del veicolo. Nell'ambito agricolo i costruttori continuano a studiare nuove trasmissioni CVT con logiche di funzionamento sempre più evolute finalizzate a far fluire la potenza il più possibile nel ramo meccanico pur mantenendo tutti i vantaggi di avere un ramo idrostatico in parallelo. La conseguenza di ciò è stata l'introduzione di una serie di gamme di velocità anche nei cambi CVT, con punti di selezione automatica corrispondenti ai differenti compiti che un trattore può essere chiamato a svolgere (ad esempio: lavorazioni pesanti, medie, leggere, trasporti su strada).

## Conclusioni

I fabbisogni dei differenti settori hanno favorito anni di ricerca che, con l'utilizzo di architetture molto differenti, hanno permesso di dare una risposta efficace sia in termini di continuità della trasmissione della po-

tenza che in termini di efficienza. Resta però ancora irrisolta la questione legata alla autonomia per cui i motori a combustione interna rimangono ancora oggi un elemento essenziale del sistema propulsivo di qualsiasi veicolo. Le trasmissioni CVT di nuova generazione, però, permettono non solo di ridurre le perdite della trasmissione stessa, ma, soprattutto, di migliorare quella del motore a combustione interna, disaccoppiandone il regime di rotazione dalla velocità del veicolo.

© RIPRODUZIONE RISERVATA

**Per approfondire il tema dell'efficienza delle trasmissioni, è possibile contattare gli autori:**

Facoltà di Scienze e Tecnologie della Libera Università di Bolzano  
 Dr.- Ing. Franco Concli - Scuola di Dottorato SET, [franco.concli@unibz.it](mailto:franco.concli@unibz.it)  
 Dr.- Ing. Marco Bietresato - Scuola di Dottorato MEA, [marco.bietresato@unibz.it](mailto:marco.bietresato@unibz.it)  
 Dr.- Ing. Sandro Calligaro, [sandro.calligaro@unibz.it](mailto:sandro.calligaro@unibz.it)