

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In Disegno Tecnico Assistito Dal Calcolatore

**Studio e ottimizzazione di una trasmissione a infiniti
rapporti per un motore automobilistico**

CANDIDATO	RELATORE
Stefano Domeniconi	Prof. Ing. Luca Piancastelli

Anno Accademico 2013/2014
Sessione II

Indice

Introduzione Pag. 4

Capitolo 1 Il veicolo Pag. 6

- 1.1 Descrizione del veicolo
- 1.2 Dati tecnici e prestazioni della vettura
- 1.3 Problemi riscontrati in vettura

Capitolo 2 Il cambio Pag. 11

- 2.1 Evoluzione delle trasmissioni a infiniti rapporti
- 2.2 Il rotismo epicicloidale
- 2.3 Cambio CVT con rotismo epicicloidale
- 2.4 Vantaggi e svantaggi

Capitolo 3 Il motore Pag. 29

- 3.1 Descrizione del motore
- 3.2 Dati tecnici e dimensioni
- 3.3 Vantaggi e svantaggi

Capitolo 4 Scelta del riduttore epicicloidale Pag. 35

- 4.1 Analisi dei dati e ricerca modello ottimale
- 4.2 Vantaggi del modello scelto

Capitolo 5 Scelta del gruppo elettrico	Pag. 44
5.1 Analisi dei dati e confronto delle soluzioni	
5.2 Motore-inverter-alternatore	
5.3 Il pacco accumulatori	
Capitolo 6 Gestione della trasmissione	Pag. 60
6.1 Ottimizzazione dei regimi di funzionamento	
6.2 Studio delle prestazioni del modello	
6.3 Modalità di funzionamento	
6.4 Modalità “push to pass”	
Rendering e vista esplosa	Pag. 74
Conclusioni	Pag. 78
Bibliografia	Pag. 79
Software utilizzati	Pag. 80
Ringraziamenti	Pag. 81

INTRODUZIONE

Con il seguente esposto si intende studiare e ottimizzare una trasmissione a infiniti rapporti per motori automobilistici di media potenza.

Questa tipologia di trasmissioni si sta diffondendo molto negli ultimi anni grazie soprattutto alla possibilità di accoppiamento con i sistemi di propulsione ibrida.

In particolare si vuole proporre una trasmissione a infiniti rapporti basata su un sistema alternativo a quelli attualmente utilizzati e proposti dalle principali case automobilistiche.

La variante ideata punta a migliorare caratteristiche quali prestazioni, rendimenti, dimensioni e masse complessive della trasmissione.

L'idea nasce dalla necessità di semplificare la guidabilità e le prestazioni di un veicolo sportivo per portatori di handicap precedentemente sviluppato, l'Astura.

Questo veicolo, già dotato di numerosi accorgimenti per consentire l'accesso in abitacolo e la guida a portatori di handicap, non è ancora stato ottimizzato per quanto riguarda la gestione del cambio. L'Astura è infatti dotata di un cambio manuale tradizionale a sei rapporti, abbinato al motore 1900 MJT Fiat.

L'intenzione è dotare il veicolo di un cambio CVT ma la limitazione di questa soluzione è data dalla necessità di fare un compromesso tra complessità costruttiva e potenza trasmissibile.

Da un lato infatti, la semplicità costruttiva caratteristica di alcuni sistemi, ad esempio la trasmissione Variomatic, il sistema a cinghia trapezoidale e pulegge impiegato nella maggioranza degli scooter, rappresenta il principale pregio a cui si oppone l'impossibilità di trasmettere potenze elevate, a causa della scarsa aderenza della cinghia.

Dall'altro, i sistemi Super CVT-I proposti da Toyota o la trasmissione X-troid di Nissan, unica dotata di cambio toroidale.

Questi ultimi consentono la trasmissione di potenze elevate garantendo elevati gradi di affidabilità, ma sono caratterizzati da una complessità di costruzione che si traduce in costi e pesi elevati.

Lo studio di un alternativa è quindi obbligato dall'irreperibilità sul mercato di un sistema semplice e allo stesso tempo affidabile.

Si intraprende quindi lo studio e l'ottimizzazione di una trasmissione ad infiniti rapporti.



IL VEICOLO

1.1 Descrizione del veicolo

L'Astura è un'automobile sportiva di media cilindrata, destinata anche all'utilizzo da parte di persone portatrici di handicap.

Per questa necessità il veicolo è stato dotato nel tempo di numerosi accorgimenti.

Sin dai primi progetti l'imperativo è stato quello di ottimizzare l'abitacolo in termini di accessibilità ed ergonomia.

Oltre al posizionamento dei comandi della vettura in posizioni strategiche per consentire un utilizzo facilitato, sono stati introdotti sistemi di accesso inediti che sono risultati molto efficaci.



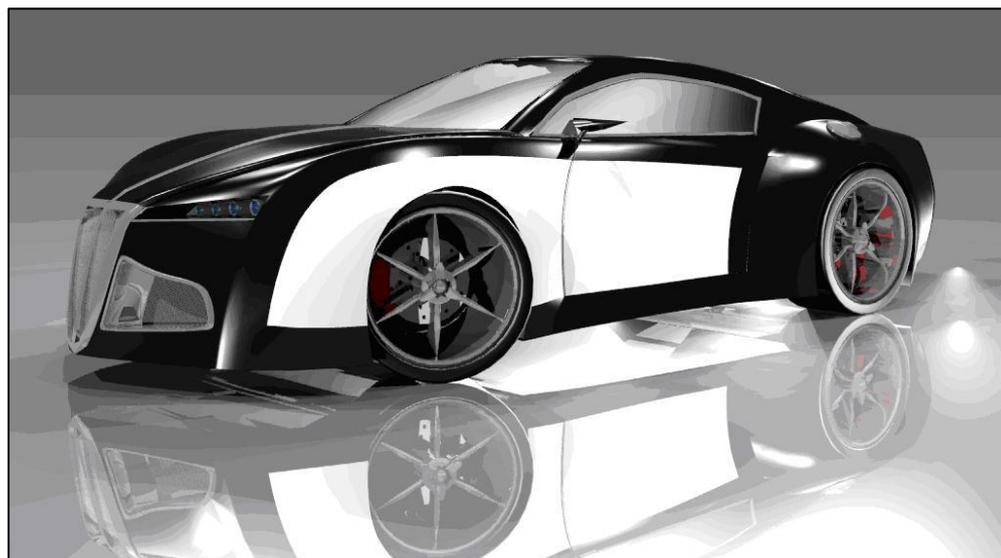
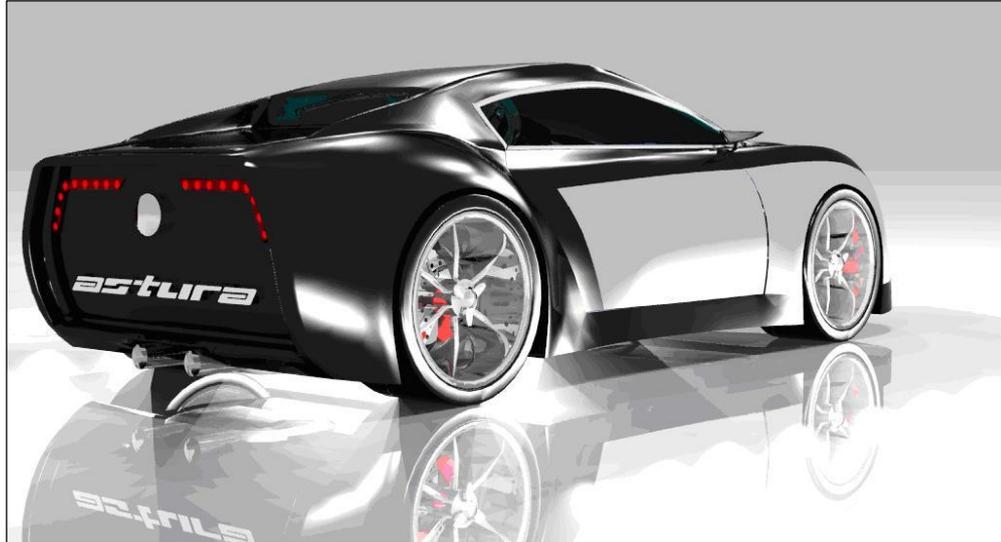
Un esempio è il sedile di guida a scorrimento laterale e rotazione.

Questo sedile, una volta aperta la portiera a scorrimento longitudinale, si sposta verso l'esterno dell'abitacolo e ruota sul proprio asse.

In questo modo ci si trova già all'esterno della vettura e si facilitano quindi i movimenti.

Il veicolo prende il nome dal modello prodotto da Lancia nel 1931.

Il design esterno è ispirato alle linee del modello del 1947 ma modificato nel corso di precedenti tesi per migliorare l'aerodinamica e la stabilità della vettura ai venti laterali.



Il telaio tubolare realizzato con acciai alto-resistenziali è stato ottimizzato anch'esso attraverso tesi precedenti, fino all'attuale versione, realizzata attorno ai punti fermi del progetto, che sono il sedile per l'accesso facilitato e il motore 1900 MJT.

1.2 Dati tecnici e prestazioni della vettura

Come già detto, l'inserimento dei sistemi di accesso in abitacolo e di semplificazione della guida hanno appesantito la vettura. Pertanto la vettura ha una massa a vuoto di 1525 Kg.

Già da questo dato si evince che le prestazioni sarebbero migliori se si potesse ridurre il peso dell'automobile.

L'Astura è equipaggiata con un motore che ha segnato un decennio per Fiat, il 1900 MJT.

Il motore Fiat 1900 MJT, alimentato a gasolio, può erogare fino a 170 Cv al regime di 4000 giri al minuto e una coppia massima di 320 Nm al regime di 2000 giri al minuto.

Un motore dalle ottime prestazioni quindi, con un'elevata coppia disponibile già a bassi regimi.

Il motore diesel in questione pesa 181 Kg, un valore importante se analizzato in ottica di riduzione del peso della vettura.

A tale motore è abbinato il cambio M32, sempre di derivazione Fiat, un cambio ideale per questo motore.

Infatti la sigla M32 sta ad indicare la coppia massima applicabile a questa trasmissione, cioè 320 Nm, esattamente quella erogata dal motore dell'Astura.

Si tratta di un cambio a 6 rapporti e retromarcia ampiamente utilizzato da Fiat in combinazione con una vasta gamma di motori.

Il cambio M32 dal peso di 47Kg è quindi un altro componente modificabile per l'alleggerimento della vettura.

Inoltre questo modello di cambio ha riscontrato un'elevata frequenza di guasti, all'avvicinarsi dei 100.000 Km.

Specialmente sulla Fiat Grande Punto con motorizzazione 1.9MJT, veicolo dotato di cambio M32, si sono verificati spesso cedimenti dei cuscinetti di testa dell'albero primario del cambio.

Gli alberi di questo cambio infatti sono supportati da cuscinetti a rulli conici.

Come possiamo vedere nell'immagine, è proprio la gabbia di uno dei cuscinetti in questione a cedere, causando quindi rumorosità e malfunzionamento della trasmissione. Questo difetto è un motivo aggiuntivo a favore della sostituzione del cambio M32.



Altre problematiche riguardanti cambio e motore sono gli elevati ingombri. Proprio per questioni di eccessivo ingombro infatti il motore e il cambio sono stati collocati nella parte anteriore della vettura.

Da studi precedenti è emerso che la collocazione del motore nella parte posteriore del veicolo avrebbe sottratto troppo spazio all'abitacolo e conseguentemente la vettura è stata sviluppata con trazione anteriore, che tuttavia non rappresenta una soluzione ideale per una vettura sportiva.

Si ritiene tuttavia esprimere una nota positiva a favore dei pneumatici, di dimensione 235/40 R18.

Questi pneumatici con battistrada allargata e spalla ribassata conferiscono alla vettura un'elevata aderenza, sia in rettilineo che in curva.

Il battistrada largo infatti consente di scaricare un'elevata coppia a terra e di ottimizzare l'accelerazione e la frenata mentre la spalla bassa del pneumatico rende più rigida la vettura in curva, riducendo il rollio del veicolo.

Dati tecnici

MOTORE 1.9 MJT	
Cilindrata: 1910 cc	N° Cilindri: 4 in linea
Alimentazione: Gasolio	Normativa: Euro 4
Potenza max: 170 Cv a 4000rpm	Coppia max: 320 Nm a 2000rpm
Peso: 181 Kg	Lunghezza: 450 mm

CAMBIO M32	
N° rapporti: 6+rm	Lunghezza Rapporti*
	Ia: 3,818
	IIa: 2,158
	IIIa: 1,302
Peso: 47 Kg	IVa: 0,959
	Va: 0,744
	VIa: 0,614
	RM: 3,545

**tutti i rapporti vanno moltiplicati per il rapporto di riduzione finale.*

1.3 Problemi riscontrati in vettura

Riassumendo quindi i problemi principali della vettura sono:

- Elevato peso: 1525 Kg;
- Cambio pesante (45 Kg), non automatico (non facilitante per portatori di handicap) e con problemi di affidabilità;
- Motore pesante (181 Kg), normativa obsoleta (Euro 4)
- Trazione anteriore dovuta agli eccessivi ingombri del blocco motore-cambio.

IL CAMBIO

2.1 Evoluzione delle trasmissioni a infiniti rapporti

La trasmissione a infiniti rapporti o trasmissione continua o cambio continuo è un cambio automatico in cui il rapporto di trasmissione può variare continuamente.

Tale variazione continua fa sì che il rapporto di trasmissione assuma istante dopo istante tutti i valori che sono compresi tra il rapporto minimo e il rapporto massimo, quindi un numero infinito di rapporti.

Recentemente al nome di trasmissione a infiniti rapporti si è affiancato l'acronimo inglese CVT, *continuously variable transmission*.

I primi studi e i primi concetti di trasmissioni a variazione continua vengono attribuiti a Leonardo da Vinci, nel 1490, ma il primo modello di trasmissione a infiniti rapporti risale al XIX secolo.

La prima versione effettivamente funzionante però arrivò solo nel 1950 e venne ideata da Hub van Doorne, co-fondatore della DAF, che per primo utilizzò una cinghia metallica al posto delle tradizionali.

Nel 1958 da una collaborazione tra DAF e Volvo venne prodotta la prima vettura con cambio a variazione continua.

Da quel momento la maggior parte delle case automobilistiche mondiali si fiondarono sullo studio di tali sistemi.



La Fiat in particolare si unì alla DAF nelle ricerche e qualche anno più avanti presentò un prototipo di Fiat 131 con cambio a variazione continua.

Seguirono la Ritmo e nel 1990 la Panda Selecta, prima vettura senza una vera e propria frizione, ma dotata di innesto elettromagnetico.

La repulsione della popolazione italiana all'utilizzo del cambio automatico fu la causa dell'abbandono delle ricerche da parte delle case italiane.

Lo sviluppo di queste trasmissioni continuò però, soprattutto da parte delle case automobilistiche giapponesi.

Numerosi modelli di Honda, Subaru, Nissan e più recentemente Toyota, sono dotati di cambio CVT, in particolare Nissan è l'unica marca a proporre un cambio CVT a rulli.



Negli anni 2000 lo studio di questi cambi è ripartito anche nelle marche europee e americane, grazie soprattutto al miglioramento delle tecnologie di gestione elettronica, cioè la possibilità di utilizzare apparati elettronici per la gestione del cambio estremamente compatti ed economici.

Proprio nel 2000 Audi presentò l'A4 3.0 V6 dotata di cambio a variazione continua, mentre nel 2005 Ford Freestyle e Fiat 500 presentarono il cambio a variazione continua disponibile opzionalmente.

Dunque l'evoluzione del cambio CVT si è velocizzata ulteriormente negli ultimi 10 anni, passando da cambi a gestione meccanica, come il Variomatic, o i sistemi a cono, a sistemi gestiti elettronicamente, come i sistemi E-CVT della gamma Toyota hybrid.

Il cambio a rulli è composto semplicemente da due rulli conici montati l'uno l'opposto dell'altro e la variazione del rapporto di trasmissione è affidata allo scorrimento della cinghia sull'asse dei rulli, passando quindi da un diametro grande a uno minore per un rullo, e da un diametro piccolo ad uno maggiore per l'altro rullo.

Conseguentemente il rapporto può variare da un rapporto massimo di riduzione, ad un rapporto di trasmissione unitario o a un rapporto massimo di moltiplicazione.

Lo scorrimento della cinghia è un effetto generato automaticamente dalle velocità di rotazione dei rulli, così come la forza centrifuga che agisce sui rulli del variatore nel sistema Variomatic.

Nei nuovi cambi CVT invece la variazione del rapporto di trasmissione è affidata all'azione di una centralina elettronica su un attuatore solitamente elettrico.

Fu ipotizzato l'utilizzo di sistemi a variazione continua anche in Formula 1 ma l'enorme potenza da trasmettere non era compatibile con le soluzioni a cinghia, uniche soluzioni esistenti fino a qualche decennio fa.

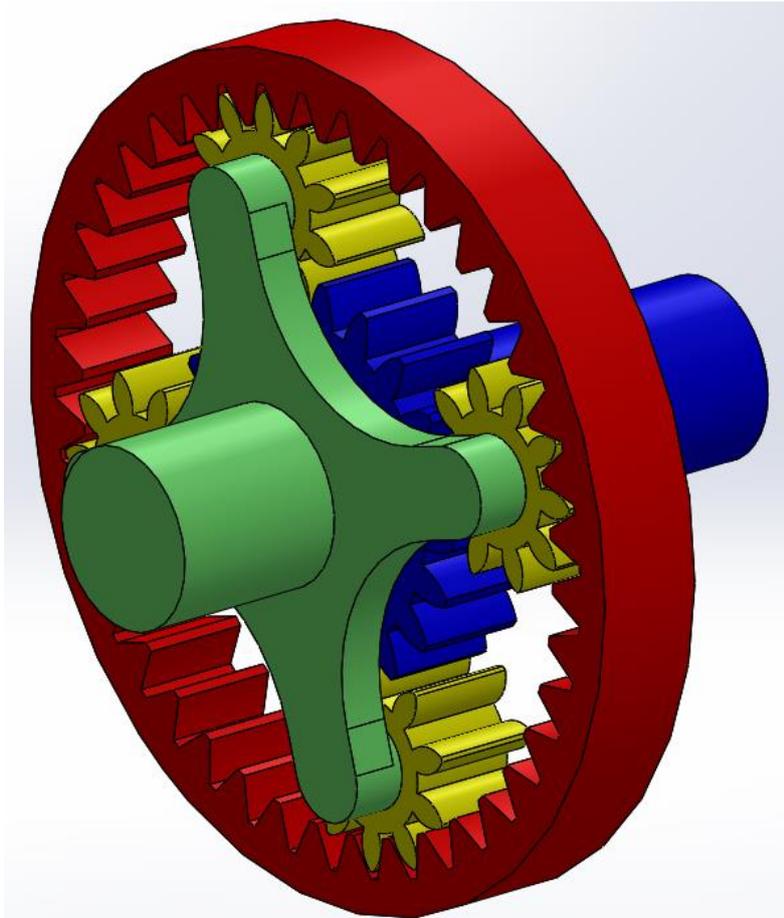
Tuttavia non è da escludere che, grazie al costante miglioramento della componentistica elettronica, verrà rivaluta l'applicabilità dei CVT anche in Formula 1, ricordando che possono rendere ancor più prestazionale la vettura.

Proprio il miglioramento dei componenti elettrici, specialmente dei motori elettrici, ha portato a valutare il loro utilizzo per gestire una trasmissione a infiniti rapporti basata sul rotismo epicicloidale.

2.2 Il rotismo epicicloidale

Per definizione un rotismo si dice epicicloidale quando l'asse di almeno una ruota dentata non è fisso.

Con questa definizione si identificano un numero illimitato di trasmissioni, ma nel gergo comune con rotismo epicicloidale si identifica un tipo particolare di rotismo, che definiremo standard.



Il rotismo epicicloidale standard è composto da 4 tipi di elementi che nell'immagine si identificano tramite i colori associati ai termini seguenti:

- **Solare**: una ruota dentata posizionata al centro del rotismo, definita solare poiché ruota attorno al proprio asse fisso al centro del sistema;
- **Corona**: una ruota dentata interna, cioè dotata di dentatura rivolta verso

l'interno della circonferenza. Anche l'asse di rotazione è fisso e coincide con quello del solare;

- **Portasatellite**: Si tratta di un supporto, il quale ruota attorno ad un asse fisso, anch'esso coincidente con quello del solare e della corona. Il portasatellite è dotato di perni su cui verranno collocati i satelliti.
- **Satelliti**: sono le ruote che rispondono alla definizione di epicicloidali. Infatti il loro asse non è fisso ma si muove lungo una circonferenza intermedia tra le circonferenze primitive del solare e della corona. I satelliti sono montati liberi di ruotare, sui perni del portasatellite. Nella figura sono 4; ne sono sempre presenti almeno 3.

Il rapporto di trasmissione di questo rotismo dipende dall'elemento scelto come movente ma soprattutto dall'elemento fissato a telaio.

Infatti in base a quale elemento si fissa a telaio, il sistema può diventare anche un rotismo ordinario.

Fissando il portasatellite, anche i satelliti ruoteranno attorno ad un asse fisso, quindi il sistema sarà ordinario.

La soluzione classica invece, prevede di fissare a telaio la corona esterna, quella in rosso nell'immagine della pagina precedente.

A questo punto, il solare (in blu) sarà il movente, mentre il portasatelliti (in verde) sarà il cedente.

Con movente e cedente si identificano rispettivamente gli alberi di ingresso e di uscita della potenza meccanica.

Questa modalità consente di ottenere rapporti di riduzione molto elevati, con rendimenti di molto superiori rispetto allo stesso rapporto ottenuto con treni di ingranaggi ordinari.

Per esempio, il riduttore utilizzato è parte di una gamma di riduttori il cui rapporto di trasmissione va da 3 a 100, con rendimenti sempre maggiori del 98%.

Ipotizzando di voler ottenere un rapporto di riduzione 100 con i rotismi ordinari, saranno necessario 3 stadi almeno.

Infatti utilizzando rotismi ordinari, è difficile ottenere rapporti di riduzione maggiori di 8 e contemporaneamente mantenere un rendimento soddisfacente.

Quindi considerando un rendimento del 99% ad ogni stadio, risulta che il rendimento totale del riduttore ordinario è del 97,03%.

Inoltre, un riduttore a tre stadi è sicuramente più pesante e più ingombrante rispetto ad un equivalente riduttore epicicloidale.

Le qualità di questi riduttori sono noti da tempo ma il loro utilizzo in quantità importanti è un fatto piuttosto recente.

Questo è dovuto al miglioramento delle macchine utensili, giunte solo ora ad una precisione di lavorazione sufficiente, anche per materiali lavorati dopo trattamenti termo-chimici.

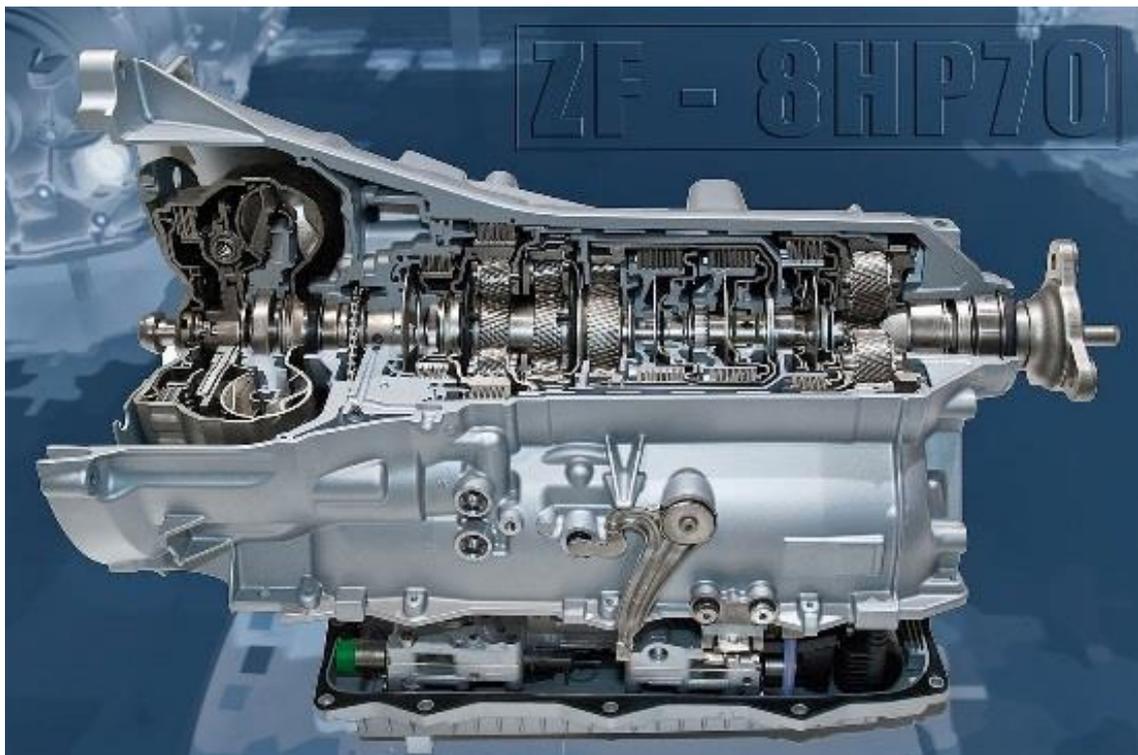
La precisione e i trattamenti sono elementi indispensabili per trasmettere coppie elevate con affidabilità, pur mantenendo dimensioni ridotte e conseguentemente masse limitate.

Recentemente sono stati commercializzati cambi per biciclette proprio di tipo epicicloidale, a dimostrazione della più piccola dimensione ad oggi ottenibile.

L'avvento di questi riduttori ha modificato le strutture di tutti i cambi.

I cambi automatici epicicloidali sono ormai diffusissimi su tutte le autovetture e sono composti semplicemente da una serie di riduttori epicicloidali standard, con solari e corone opportunamente collegati tramite freni o frizioni elettronicamente controllate.

In questa tipologia, uno dei cambi più utilizzati è il cambio ZF.



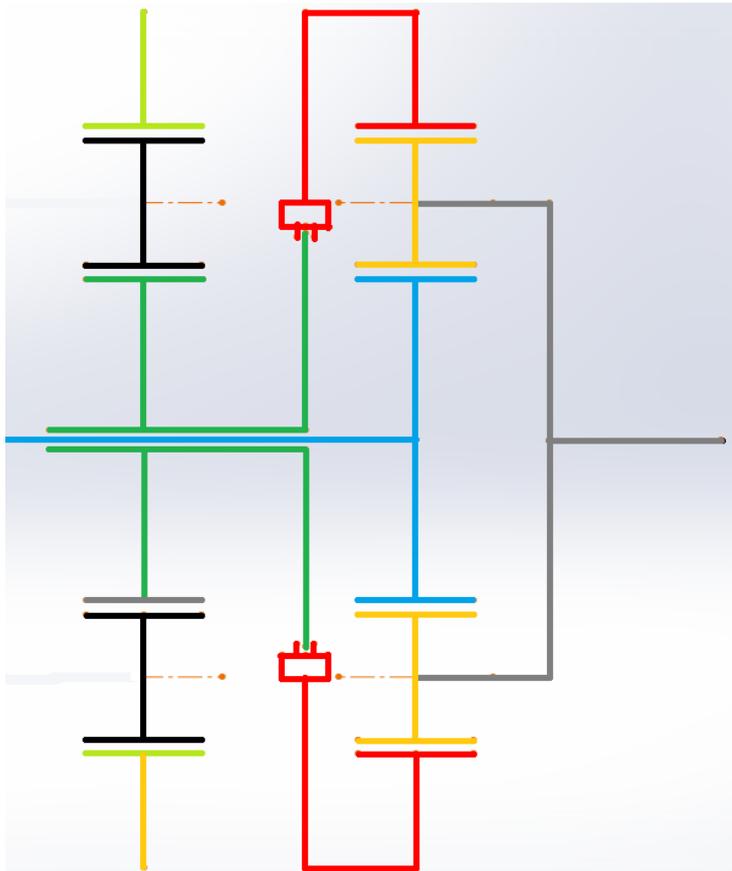
Si tratta di cambi epicicloidali molto efficienti, dotati di numerosi rapporti, 8 nelle ultime versioni.

Purtroppo però, come si può notare dalla figura, si tratta di soluzioni complesse, dalle masse non troppo contenute e di dimensioni notevoli, soprattutto in direzione assiale.

Importante però è il principio di funzionamento di questo cambio.

Si tratta come già detto di una serie di riduttori epicicloidali, i cui elementi sono collegati tramite una frizione al riduttore precedente, o ad un freno.

In questo modo è possibile controllare la velocità di uno elemento tramite un attuatore esterno.



Un tratto classico di questi cambi è caratterizzato dal solare di un riduttore, collegato tramite una frizione alla corona del successivo. In questa configurazione, se il solare del secondo stadio ruota in verso opposto al solare del primo stadio, quando si innesta la frizione, la corona del secondo stadio inizierà a ruotare.

In particolare tale rotazione, concorde con il solare del primo stadio, sarà opposta alla

rotazione del solare del secondo stadio.

Quindi rispetto alla classica configurazione del riduttore epicicloidale (corona ferma) la velocità di rotazione del portasadelliti risulterà ridotta.

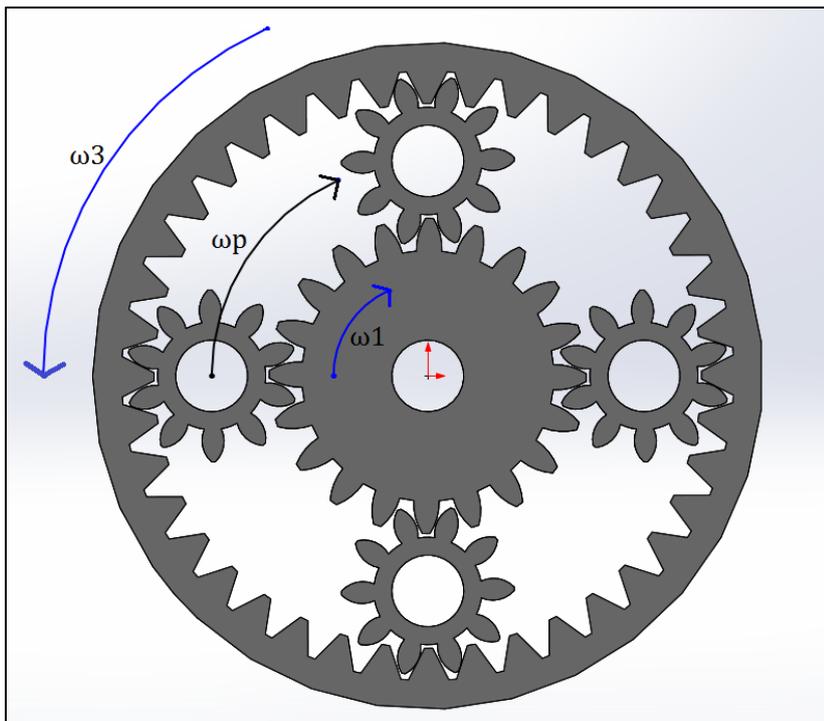
Maggiore sarà la velocità del primo solare e quindi della seconda corona e minore risulterà la velocità del secondo portasadelliti.

2.3 Cambio CVT a rotismo epicicloidale

Proprio dalla soluzione appena illustrata deriva l'idea del cambio CVT epicicloidale.

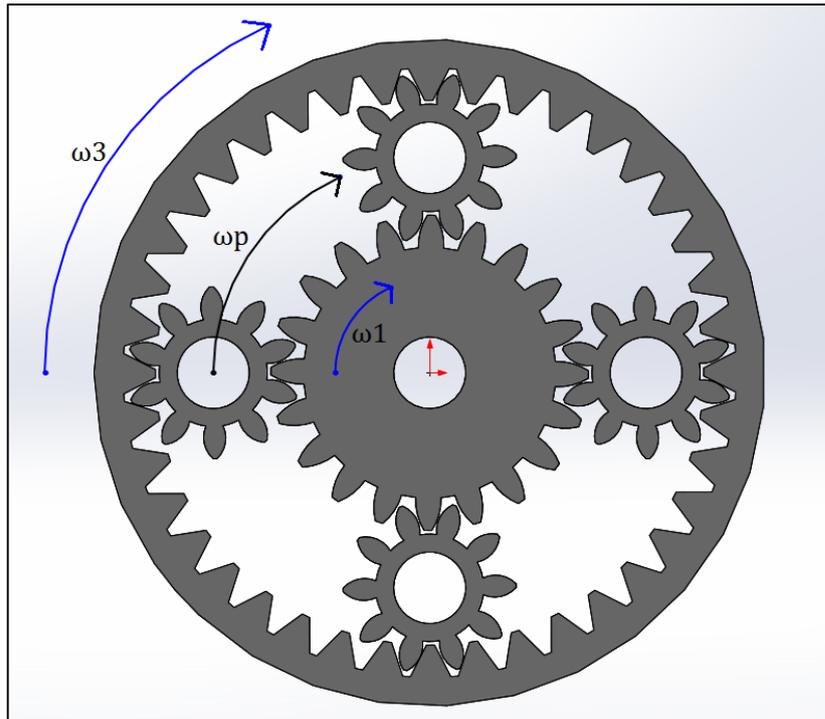
Infatti analizzando il funzionamento del tratto di cambio ZF sopra descritto si evince che utilizzando un solo stadio di riduttore epicicloidale è possibile, fissato un regime di rotazione del solare, ottenere teoricamente ogni regime di rotazione del portasatellite, semplicemente agendo sulla corona.

Si ipotizza, a corona ferma, che ad una data velocità del solare ne corrisponda una rispettiva del portasatelliti.



ω_1 = velocità angolare solare ω_3 = velocità angolare corona
 ω_p = velocità angolare portasatellite

Come in figura, azionando la corona in senso opposto al solare, il quale continua a ruotare costantemente alla stessa velocità, si otterrà una velocità del portasatelliti diversa da quella precedente; tale velocità risulterà ora minore.



$\omega_1 = \text{velocità angolare solare}$ $\omega_3 = \text{velocità angolare corona}$
 $\omega_p = \text{velocità angolare portasatellite}$

Azionando invece la corona in senso concorde al solare, la velocità del portasatelliti risulterà maggiore.

Le velocità di questo cambio sono descrivibili attraverso la formula di Willis, una formula caratteristica dei rotismi epicicloidali che consente di ricondursi ad un rotismo ordinario.

Questa formula consiste semplicemente nel sottrarre la velocità di rotazione del portasatelliti alla velocità di rotazione degli altri componenti del riduttore.

Così facendo, si ottiene una configurazione equivalente alla situazione di partenza ma, con il portasatelliti fermo. Questo significa che il rotismo è di tipo ordinario ovvero tutti gli ingranaggi ruotano su un asse fisso.

Detto questo è possibile procedere al calcolo del rapporto di trasmissione, che risulterà dunque un rapporto tra differenze. Al numeratore di questo rapporto va la differenza tra la velocità angolare dell'albero cedente e la velocità angolare del portasatelliti. Al denominatore invece va la differenza tra la velocità angolare dell'albero movente e la velocità angolare del portasatelliti. Ad ogni modo la formula verrà approfondita in seguito.

A colpo d'occhio risultano discrepanze con quanto detto fin ora riguardo i rapporti di trasmissione, infatti si tratta di un rapporto tra velocità del cedente e velocità del movente. Per un riduttore, tale rapporto si traduce in un numero minore di uno. Analizzando ad esempio i dati tecnici del cambio M32, i rapporti risultano maggiori di uno fino alla quarta marcia. Questo perché nel linguaggio comune il rapporto di trasmissione viene confuso col suo reciproco.

La motivazione di questa convenzione è ottenere una maggior intuitività del dato, che sarà caratterizzato da un numero tanto maggiore quanto più ridotta risulta la velocità di rotazione del cedente. Parimenti invece, nella formulazione teorica ad una maggior riduzione corrisponde un numero decimale, sempre più vicino allo zero.

Ad esempio un riduttore con l'albero cedente che ruota tre volte più lentamente dell'albero movente ha rapporto di trasmissione 0,333, periodico per giunta, mentre secondo il gergo comune questo rapporto sarà "tre", reciproco di 0,333.

La formulazione comune risulta quindi più intuitiva, perciò in questo esposto si continuerà ad utilizzare per le descrizioni la formulazione comune, chiamando il valore caratteristico "rapporto di riduzione", mentre per i calcoli si utilizzerà la formulazione teorica, chiamando il valore "rapporto di trasmissione".

Analizzando quindi il riduttore con la formula di Willis precedentemente introdotta si ottiene:

$$\tau_0 = \frac{\omega_3 - \omega_p}{\omega_1 - \omega_p}$$

In questa formula τ_0 rappresenta il rapporto di trasmissione (quindi secondo le formulazione teoriche) del riduttore ordinario associato al riduttore epicicloidale:

$$\tau_0 = \frac{\omega_{3_0}}{\omega_{1_0}} = -\frac{z_1 z_2}{z_2 z_3} = -\frac{z_1}{z_3}$$

Dove sono indicati con ω_{3_0} e ω_{1_0} le velocità angolari rispettivamente della corona e del solare nel riduttore ordinario associato e con z_1 , z_2 e z_3 il numero di denti rispettivamente del solare, dei satelliti e della corona.

Il segno meno è attribuito al verso opposto di rotazione del satellite rispetto al solare.

Per poter scegliere il riduttore dai cataloghi commerciali sarà importate in oltre effettuare la conversione dal rapporto di trasmissione del riduttore ordinario associato al rapporto di trasmissione e infine di riduzione (quello convenzionale) del riduttore epicicloidale standard.

Questo passaggio si effettua facilmente sapendo che $i = \frac{1}{\tau}$ e per il riduttore

epicicloidale standard $\tau = \frac{z_1}{z_1+z_3}$ allora:

$$i = 1 + \frac{1}{-\tau_0}$$

Infatti dalla formula di τ_0 si ricava che $z_1 = -\tau_0 z_3$ e inserendo questa relazione in $\tau = \frac{z_1}{z_1+z_3}$ si ottiene $\tau = \frac{-\tau_0}{1-\tau_0}$ il cui reciproco è $1 + \frac{1}{-\tau_0}$

Dalla formula di Willis con pochi passaggi si può estrapolare ω_p :

$$\omega_p = \frac{\omega_3 - \tau_0 \omega_1}{1 - \tau_0}$$

È importante conoscere ω_p perché corrisponde alla velocità di rotazione dell'albero cedente, cioè quello collegato alle ruote.

Si evidenzia in questa formula come la velocità di rotazione del planetario sia ottenibile come combinazione delle velocità del solare e della corona.

L'ultimo concetto espresso è il fulcro del funzionamento dei cambi CVT o trasmissione a infiniti rapporti basati sul rotismo epicicloidale standard.

Nella formula di Willis bisogna prestare attenzione ai versi delle velocità e al segno di τ_0 . Infatti le velocità del solare e della corona come già detto, possono essere concordi o discordi. Questo si traduce in un segno positivo piuttosto che negativo di una delle due velocità. Per convenzione consideriamo sempre positiva la velocità del solare. Conseguentemente la velocità della corona sarà positiva se concorde con la velocità del solare,

negativa se discorde. Questi segni si riflettono sul segno della velocità del planetario chiaramente. Ricordando che τ_0 è sempre un valore negativo, l'equazione è ancora una volta corretta nei segni, infatti la velocità del portasatelliti è positiva se concorde con quella del solare, negativa altrimenti.

Ponendosi nella condizione di comandare la velocità di rotazione della corona, e imponendo una velocità del solare, è possibile quindi determinare la velocità di rotazione dell'albero in uscita, cioè quello collegato al portasatelliti.

È possibile procedere anche in modo inverso. Ovvero una volta impostata una velocità di rotazione del solare, che verrà mantenuta costante, si può scegliere la velocità desiderata sull'albero condotto e da questi due dati, si risale alla velocità che è necessario conferire alla corona per verificare la riduzione.

Per controllare la validità della formula di Willis anche per questo sistema è possibile procedere attraverso un metodo alternativo. Questo metodo consiste nel proiettare le velocità periferiche dei un satellite lungo un suo diametro, in particolare il diametro avente come estremi i punti di tangenza tra le circonferenze primitive del solare e del satellite da un lato e della corona e del satellite dall'altro.

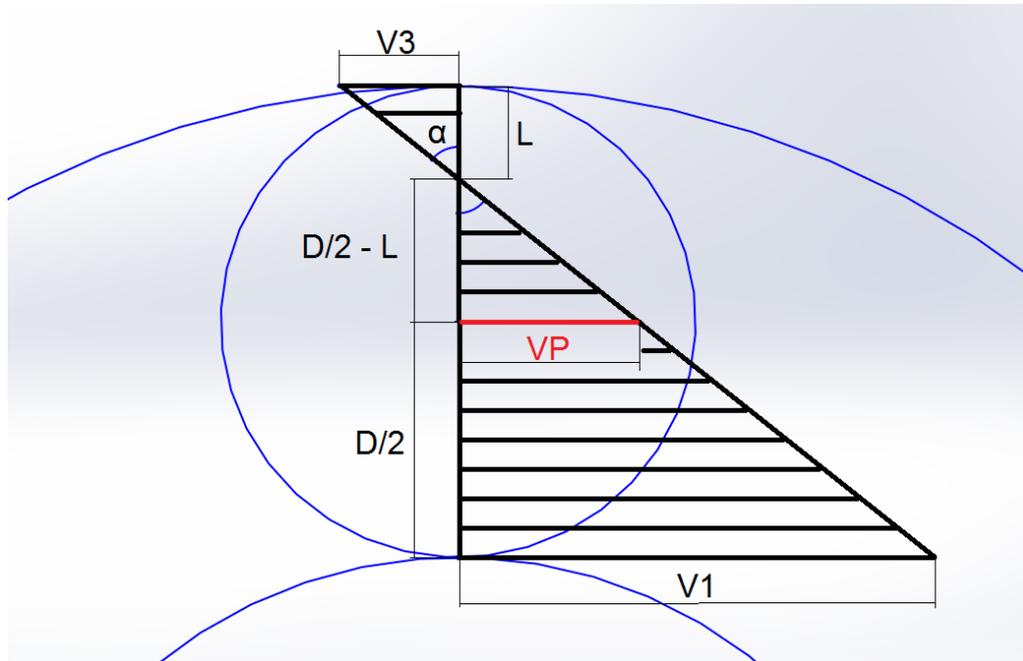
Questo passaggio si è reso necessario a causa della complessità dei sistemi di questo tipo. Il rotismo epicicloidale nella sua configurazione standard è un rotismo ad un grado di libertà, in quanto nota la velocità del solare e il rapporto di trasmissione è univocamente determinata la velocità di rotazione del planetario.

In questa configurazione, in cui la corona non è fissata al telaio, invece il rotismo assume due gradi di libertà. Infatti nota la velocità di rotazione del solare è necessario conoscere, oltre al rapporto di trasmissione, la velocità di un altro elemento per poter descrivere completamente il sistema.

Per esempio è necessario conoscere la velocità angolare della corona, solo in queste condizioni si può calcolare la velocità del planetario.

Procediamo quindi alla verifica delle ipotesi effettuate sulla formula di Willis.

Nella seguente immagine sono mostrate le circonferenze primitive dei tre ingranaggi che caratterizzano il riduttore, in particolare al centro si trova la circonferenza primitiva di uno dei satelliti del rotismo.



D = diametro primitivo satellite V_3 = velocità periferica corona = $\omega_3 \times r_3$
 r_1 = raggio solare V_1 = velocità periferica solare = $\omega_1 \times r_1$
 r_p = raggio portasatellite = $\frac{r_3}{2} + \frac{r_1}{2}$ V_p = velocità periferica portasatellite

Analizzando la figura si può scrivere il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} V_3 = L \times \operatorname{tg}(\alpha) \\ V_1 = (D - L) \times \operatorname{tg}(\alpha) \end{cases} \rightarrow \frac{V_1}{D-L} = \frac{V_3}{L} \rightarrow V_1 \times L = V_3(D - L)$$

Da cui segue che:

$$\begin{cases} L = \frac{V_3 \times D}{V_1 + V_3} \\ \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{V_3}{L} \end{cases}$$

Sostituendo quanto appena determinato in $V_p = \left(\frac{D}{2} - L\right) \operatorname{tg}(\alpha)$

Si ottiene $V_p = \left(\frac{D}{2} - \frac{V_3 \times D}{V_1 + V_3}\right) V_3 \left(\frac{V_1 + V_3}{V_3 \times D}\right)$

E siccome $V = \omega \times r$ possiamo riscrivere V_p come

$$\left(\frac{D}{2} - \frac{(\omega_3 \times r_3) \times D}{(\omega_1 \times r_1) + (\omega_3 \times r_3)}\right) (\omega_3 \times r_3) \left(\frac{(\omega_1 \times r_1) + (\omega_3 \times r_3)}{\omega_3 \times r_3 \times D}\right)$$

Che semplificato diventa:

$$V_p = \frac{\omega_1 \times r_1}{2} - \frac{\omega_3 \times r_3}{2}$$

V_p è esprimibile anche attraverso la velocità angolare:

$$V_p = \omega_p \times r_p = \omega_p \times \left(\frac{r_1}{2} + \frac{r_3}{2}\right)$$

Confrontando le due equazioni otteniamo

$$\omega_p \times \left(\frac{r_1 + r_3}{2}\right) = \frac{(\omega_1 \times r_1) - (\omega_3 \times r_3)}{2}$$

Che dopo qualche passaggio risulta equivalente a

$$\omega_p = \frac{(\omega_1 \times r_1) - (\omega_3 \times r_3)}{r_1 + r_3}$$

Siccome $r = \frac{z}{2m}$ c'è proporzionalità diretta tra r e z , quindi si può

riscrivere τ come $\tau = \frac{r_1}{r_1 + r_3}$ e ω_p di conseguenza diventerà

$$\omega_1 \tau - \frac{\omega_3 \tau}{\tau_0}$$

L'ultimo passaggio da effettuare sull'espressione di ω_p per poter facilmente confrontare il risultato con quello ottenuto applicando il metodo di Willis è sostituire $\tau = \frac{-\tau_0}{1-\tau_0}$, ottenendo

$$\omega_p = \frac{-\tau_0 \omega_1}{1-\tau_0} - \frac{-\tau_0 \omega_3}{1-\tau_0 \tau_0} = \frac{-\tau_0 \omega_1 + \omega_3}{1-\tau_0}$$

Quest'ultima è esattamente uguale alla formula ottenuta con il metodo di Willis, a conferma della validità di entrambi i metodi.

Dopo aver trattato analiticamente il riduttore e averlo caratterizzato completamente si può dire che l'idea è innovativa e possiede un notevole potenziale su molti campi.

2.4 Vantaggi e svantaggi

L'idea di utilizzare il rotismo epicicloidale dunque sembra un'ottima soluzione per attuare una trasmissione a infiniti rapporti.

Infatti questa soluzione consente di ottenere tutti i rapporti di trasmissione. Più correttamente si può dire che questa soluzione consente, indipendentemente dal valore della velocità di rotazione del solare, di ottenere qualsiasi regime di rotazione del portasatellite.

Teoricamente infatti non c'è limite alle differenze tra le suddette velocità. Un limite si introduce però quando dalle velocità si passa alle potenze, ovvero quando a queste velocità si associa una coppia. Infatti a questo punto maggiore è la differenza tra le velocità, maggiore è la coppia trasferita in uscita. Quindi il limite è imposto dalla resistenza dei materiali con cui viene costruito il cambio.

Dal vantaggio appena descritto deriva quello che è il pregio di maggior rilievo di questa trasmissione ovvero la possibilità di mantenere il motore termico a velocità costante, indipendentemente dalla velocità della vettura.

Sotto l'aspetto prestazionale, economico e ambientale questo vantaggio è sensazionale. Infatti in base alla richiesta di coppia dell'utente è possibile decidere se far ruotare il motore ad un regime di coppia massima o potenza massima o a qualsiasi regime si voglia.

Per esempio nella guida a velocità costante, qualsiasi sia la velocità, è possibile utilizzare il motore al regime di coppia massima e utilizzando un motore elettrico come attuatore, impostare la corretta velocità angolare della corona che permette di ottenere la velocità del veicolo desiderata. In questo modo il motore termico avrà rendimento massimo, con una notevole riduzione delle emissioni inquinanti e dei consumi.

Per quanto appena detto, l'elemento fondamentale per la gestione della velocità è il motore elettrico. Questo sarà accoppiato meccanicamente con la corona e potrà svolgere al meglio la propria funzione, grazie ai moderni sistemi di gestione dei motori elettrici.

Un altro vantaggio, probabilmente già noto dopo aver osservato lo sviluppo delle formule, è quello della possibilità di ottenere una velocità nulla del portasatelliti e quindi del veicolo in due modalità.

La prima modalità è quella banale, ovvero quella in cui tutte le velocità sono nulle. Questa modalità comporta l'utilizzo di una frizione per l'innesto e il disinnesto del motore termico. Il motore elettrico ovviamente non ha alcun problema per questa funzione.

La seconda possibilità per ottenere la velocità nulla del portasatelliti è quella di applicare velocità periferiche uguali al solare e alla corona.

Osservando la formula della velocità angolare del portasatelliti ottenuta col metodo delle proiezioni delle velocità

$$\omega_p = \frac{(\omega_1 \times r_1) - (\omega_3 \times r_3)}{r_1 + r_3}$$

si nota subito che il numeratore, e quindi l'equazione, si annullano quando $\omega_1 \times r_1 = \omega_3 \times r_3$ cioè $V_1 = V_3$.

Questa possibilità consente di omettere la frizione per il motore termico, riducendo peso e costi del sistema. Vantaggi indiretti ma non trascurabili.

Utilizzando, come nei veicoli dotati di cambio automatico, sistemi automatici di gestione del circuito dei freni si consente di massimizzare quest'ultimo vantaggio. Si può utilizzare il motore elettrico di guida del cambio CVT come sistema di avviamento del motore termico, potendo quindi rimuovere il sistema di avviamento originale. In questo modo, anche se di poco, si riduce il peso del veicolo.

Ancora, sempre dalla formula di cui sopra, si vede la possibilità di invertire il moto, imponendo una velocità periferica della corona maggiore della velocità periferica del solare. Questa possibilità dota il cambio CVT a rotismo epicicloidale, del rapporto inverso o retromarcia. Da notare che questa funzione viene ottenuta senza alcun elemento addizionale, quindi mantenendo invariata la massa del sistema.

Intuitivamente la presenza di un motore elettrico è un'apertura verso i sistemi ibridi, sistemi che negli ultimi anni sono sempre più diffusi sul mercato.

Allo stato di sviluppo attuale del sistema non risultano ulteriori vantaggi rispetto ai cambi CVT già in commercio. Non si deve però dimenticare che

questa tipologia di cambi rispetto alle altre tipologie presenta di per se numerosi vantaggi.

I cambi a variazione continua infatti offre molteplici migliorie rispetto ai cambi a doppia frizione, che invece vengono considerati i migliori.

Questi ultimi infatti necessitano di pochi millisecondi per passare da una marcia all'altra, ma i cambi CVT consentono la trasmissione continua di coppia, senza alcuna interruzione, paragonabile quindi ad una cambiata istantanea. Tale vantaggio si traduce in un maggior confort della vettura nell'utilizzo stradale, ancorpiù in una miglior guidabilità e migliori prestazioni nell'ambito delle competizioni.

In un circuito infatti si effettuano mediamente 30 cambi marcia in accelerazione ad ogni giro. Considerando un tempo di 150ms per ogni cambiata (cambio DSG) risulta che per un totale di 4,5 secondi al giro non viene trasmessa coppia motrice alle gomme.

Il cambio CVT consente invece di trasmettere coppia anche in questi preziosi secondi, ottimizzando quindi l'accelerazione del veicolo.

L'assenza di innesti e disinnesti inoltre aumenta l'aderenza del veicolo, grazie alla continuità con cui viene erogata la coppia, in contrapposizione all'impulsività generata inevitabilmente dal rapido innesto del cambio a doppia frizione.

Parallelamente, nella fase di decelerazione e frenata del veicolo, si ottimizzano le prestazioni: la continuità di trasmissione diminuisce notevolmente il rischio di bloccaggio, causato da eventuali bruschi innesti della marcia, invece assenti nel il cambio CVT.

La possibilità di ottenere qualsiasi rapporto di trasmissione, quindi qualsiasi velocità del portatellite, consentirebbe inoltre di omettere la riduzione finale sul differenziale. Si tratta di un ultimo stadio di riduzione ottenuto tramite l'ingranaggio del differenziale. Solitamente gli ingranaggi di questo riduttore sono conici a denti elicoidali e per questa soluzione i rendimenti sono di poco inferiori al 99%.

Tuttavia questa possibilità rimane solo teorica, infatti si deve comunque inserire un collegamento meccanico per trasmettere il moto il quale avrà un rendimento difficilmente superiore al 99%, si elimina quindi solo il vincolo di effettuare una riduzione con un rapporto di trasmissione circa 4.

Un vantaggio sicuro invece è quello della massa del sistema. In particolare la massa degli elementi "passivi", cioè di quegli elementi che non

producono potenza meccanica. Mentre il cambio M32 è composto di soli componenti passivi per un totale di 47 Kg, con la soluzione CVT epicycloidale, questo peso viene stimato attorno ai 15 Kg del riduttore, più circa 5 Kg di carter di supporto. Queste stime sono state effettuate con un margine di sicurezza, quindi facilmente rispettabili.

La presenza di un motore elettrico, come già detto favorisce l'implementazione di un sistema ibrido. Installando una potenza più o meno elevata per quanto riguarda il motore elettrico si possono ottenere numerose configurazioni diverse.

Partendo da una situazione in cui la parte elettrica ha la sola funzione di guida del cambio, si può incrementare la potenza del motore elettrico, trasformando quindi il veicolo in un sistema a propulsione ibrida, ovvero un sistema in cui la propulsione è generata in parte dal motore endotermico e in parte dal motore elettrico.

Aumentando ancora la potenza del motore elettrico e alimentandolo tramite batterie si può giungere poi a sistemi in grado di funzionare solo in modalità elettrica o in modalità "duale".

Lo studio di questa trasmissione però si ferma al caso di un motore elettrico di media taglia, alimentato per la maggior parte del tempo da un alternatore collegato al motore termico.

Ultimo vantaggio ma non di minore importanza è la funzione KERS, importata dalla Formula 1. Si tratta cioè della possibilità di recuperare energia in frenata, in particolare di trasformare l'energia cinetica del veicolo in energia elettrica.

Questa possibilità fino a qualche anno fa si traduceva nella necessità di installare batterie pesantissime, che portavano ad uno squilibrio della distribuzione delle masse del veicolo.

Con l'introduzione delle batterie agli ioni di litio ad alta capacità invece, sono disponibili sul mercato batterie di media taglia con masse simili alle batterie già installate sulla vettura, quelle con tecnologia al piombo-acido.

La sostituzione di queste ultime con una batteria agli ioni di litio consente quindi di accumulare una carica elettrica superiore, senza aumentare il peso del veicolo e quindi utilizzare l'energia accumulata per migliorare l'accelerazione o per minimizzare i consumi della vettura.

IL MOTORE

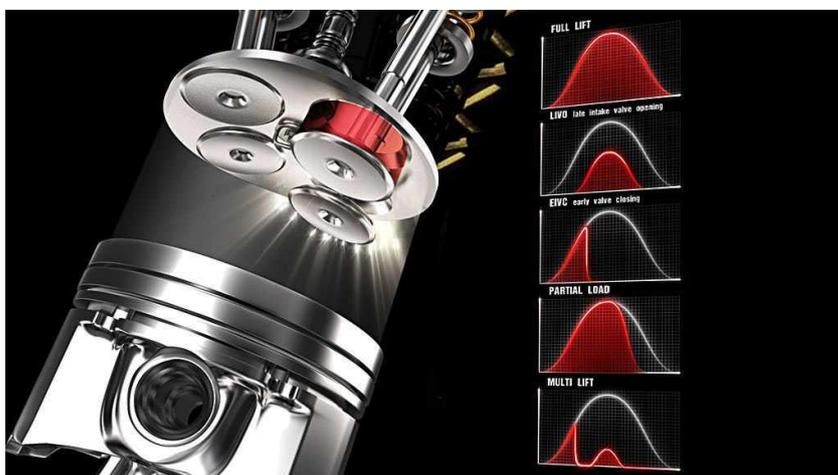
3.1 Descrizione del motore

Analizzando le necessità finora descritte risulta che per il cambio CVT e per il veicolo che si vuole motorizzare sia opportuno utilizzare un motore di media potenza, con masse e ingombri ridotti. La possibilità di gestire il cambio indipendentemente dal regime di rotazione del motore non pone limiti a tale regime teoricamente. Il motore Diesel non è esattamente in linea con queste caratteristiche, essendo più pesante e avendo dimensioni maggiori, con regimi di rotazione piuttosto bassi.

I motori a ciclo otto inoltre, con l'inseverimento delle normative anti inquinamento hanno subito un notevole sviluppo negli ultimi anni. La parola d'ordine è stato "downsizing", cioè la riduzione della cilindrata ai minimi indispensabili. Di pari passo è cresciuta invece la potenza specifica, ovvero il rapporto tra potenza e cilindrata.

Grazie alle tecnologie di gestione dell'aria in aspirazione, del turbocompressore, e grazie ai nuovi ed ottimizzati sistemi di iniezione diretta di benzina si può ottenere facilmente una potenza specifica superiore ai 100 Cv/litro, a regimi non eccessivamente elevati.

Nel 2009 Fiat presenta il primo motore di serie dotato della tecnologia Multiair, che consiste in una gestione innovativa dell'alzata delle valvole di aspirazione. La prima importante conseguenza di questa gestione valvole è l'eliminazione della valvola a farfalla, con una conseguente notevole riduzione delle perdite di carico nel condotto di aspirazione. In realtà la valvola a farfalla è ancora presente ma la sua gestione è notevolmente cambiata, infatti difficilmente la sua apertura scende al di sotto del 60%.

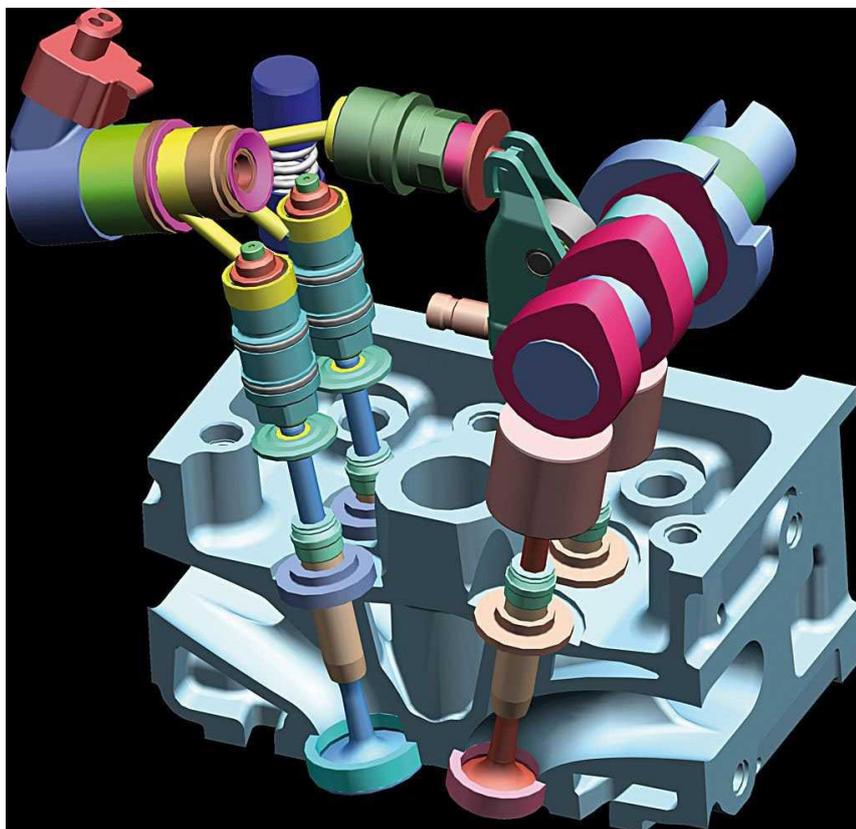


Questo è dovuto al fatto che la limitazione dell'aria che entra in camera di combustione è ottenuta limitando l'alzata della valvola di aspirazione o in

alcuni casi aprendo la valvola in due volte in uno stesso ciclo, sfruttando anche le onde di pressione generate nel condotto.

Fiat dichiara che con questa tecnologia si ottiene a pari cilindrata, una riduzione dei consumi del 25% e un contemporaneo aumento di coppia e potenza del 20%.

Le strabilianti potenzialità di questo sistema sono collocate nella gestione delle valvole di aspirazione tramite un circuito di olio in pressione. L'utilizzo di un solo albero a camme che comanda direttamente e meccanicamente le valvole di scarico e indirettamente / idraulicamente le valvole di aspirazione, limitando anche la potenza dissipata nelle molle di queste ultime valvole.



Sezione del motore con tecnologia Multiair

Al salone dell'auto di Ginevra, nel 2010, il settore Fiat Powertrain Technologies, presentò con il motto "When two makes four" il motore 900 Twinair. Si tratta di un motore bicilindrico di cilindrata 900 cc appunto proposto per l'occasione con una potenza di 85 Cv.

Questo motore, unisce la tecnologia multi-air, alla cilindrata unitaria perfetta secondo Fiat di 450 cc.

Nel 2013 a tali tecnologie venne aggiunto il turbocompressore, portando un aumento di potenza fino a 105 Cv.

Nella seguente immagine si possono notare i successi ottenuti nel 2011 dalla versione Twinair del 2010.



Nella versione 2013, nonostante i 105 Cv vince il premio Best Green Engine, grazie soprattutto alla modalità eco disponibile su questi motori che riduce consumi e emissioni.

Tutta la gamma Twinair è omologata Euro 5 ma già in linea con le normative Euro 6.

Negli anni a venire è attesa una versione del motore Twinair 135Cv e una versione ibrida.

Il motore bicilindrico con disposizione dei cilindri in linea risulta più compatto e leggero rispetto ai motori di simile potenza. In particolare le dimensioni sono più contenute del 23-25 % rispetto ai motori a 4 cilindri in linea .

La versione con turbocompressore pesa 95 Kg, un peso notevolmente inferiore rispetto ai motori di media potenza reperibili in commercio. Ovviamente confrontando i 95 Kg con i 181 Kg del 1.9 MJT, il dato ha

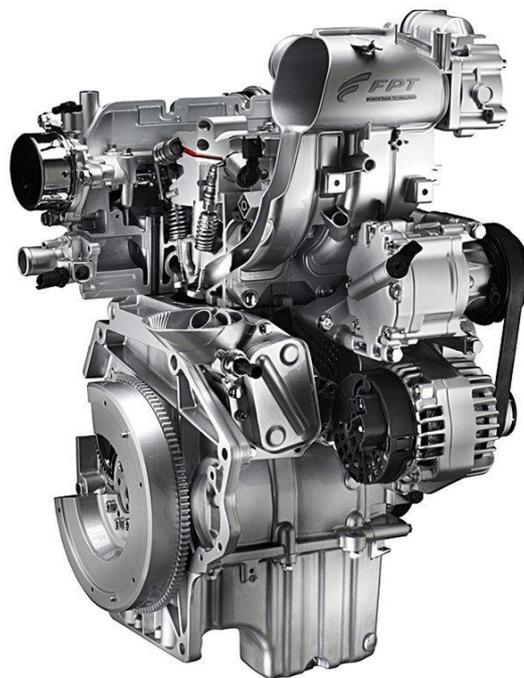
ancor più dell'incredibile ma si deve considerare che il 1.9 MJT eroga 170 Cv di potenza e 320 Nm di coppia.

Il 0.9 Twinair, in versione 105 Cv eroga invece una coppia massima di 145 Nm. Nonostante sia un motore alimentato a benzina, grazie all'impiego del turbocompressore, questa coppia viene erogata al regime relativamente basso di 2000 giri al minuto.

Per quanto analizzato al capitolo 1.3 (problemi riscontrati in vettura), il motore risponde bene alle esigenze di alleggerimento e in particolare all'esigenza di ridurre gli ingombri per trasferire la trazione sull'assale posteriore.

L'allineamento con le normative euro 6 consente un salto in avanti per quanto riguarda le emissioni e la messa in commercio della vettura. Il problema della commercializzazione del veicolo è di estrema importanza, infatti da Gennaio 2011 non è più possibile immatricolare automobili con omologazioni precedenti all'Euro 5.

Per i motivi di cui sopra la scelta del motore ricade sul 0.9 Twinair in versione 105 Cv.



Fiat 900 Twinair 105 Cv

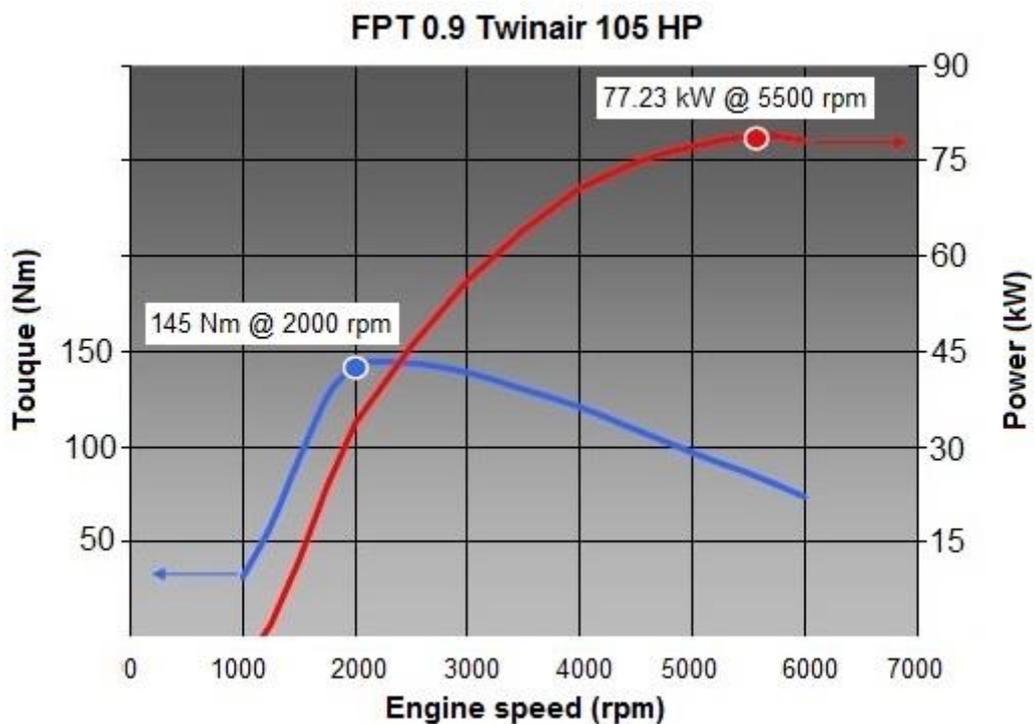
3.2 Dati tecnici e dimensioni

I punti forti del motore sono le dimensioni estremamente contenute, specialmente in direzione trasversale. Risulta infatti più corto del 23% rispetto al 1400 Multiair, e addirittura il 28% più corto (13 cm) del 1900 MJT.

L'elevata potenza specifica del motore di 116,67 Cv/l è una delle più alte nei motori di serie per automobili, non troppo distante dai 127 Cv/l del motore della Ferrari 458 Italia.

La coppia massima disponibile già dal regime di 2000 giri al minuti, si mantiene pressochè invariata fino al regime di potenza massima.

Questo parametro garantisce un ottima guidabilità del motore a tutti i regimi, con prontezza di risposta e riduzione dei consumi.



MOTORE 0.9 Twinair 105 Cv	
Cilindrata: 900 cc	N° Cilindri: 2 in linea
Alimentazione: Benzina	Normativa: Euro 5 (ready Euro 6)
Potenza max: 105 Cv a 5500rpm	Coppia max: 145 Nm a 2000rpm
Peso: 95 Kg	Lunghezza: 340 mm

3.3 Vantaggi e svantaggi

I principali vantaggi della sostituzione del motore 1900 MJT con il 0.9 Twinair sono stati già ampiamente trattati nelle pagine precedenti.

Resta però da aggiungere l'eliminazione del filtro antiparticolato, con conseguente ulteriore riduzione delle masse, la possibile implementazione di tecnologie derivate dalla Formula 1, come ad esempio i sistemi MGU-H, ovvero il recupero di energia tramite il turbocompressore.

Le dimensioni compatte e limitate consentirebbero inoltre di collocare la trazione sull'asse posteriore, ottimizzando quindi la guidabilità del veicolo.

Di prassi infatti i veicoli sportivi, sia ad uso competitivo che ad uno stradale, sono basati sulla trazione posteriore e possibilmente vedono il motore collocato a ridosso della trazione, per ottimizzare l'aderenza delle gomme che esercitano la trazione.

Con il motore 1900 MJT questo era possibile solo intaccando l'abitacolo.

Con il motore 0.9 Twinair e il nuovo cambio CVT, presumibilmente di dimensione minore rispetto al cambio M32, risulterà più facile spostare la trazione senza apportare modifiche eccessive all'abitacolo.

SCELTA DEL RIDUTTORE EPICICLOIDALE

4.1 Analisi dei dati e ricerca modello ottimale

La scelta del riduttore va effettuata in base ai dati di coppia massima che il riduttore stesso deve sopportare durante l'esercizio della sua funzione.

Chiaramente il dimensionamento va effettuato nelle condizioni più critiche che il riduttore deve affrontare.

Il dato di partenza del dimensionamento è la coppia massima erogata dal motore termico. 145 Nm al regime di 2000 giri al minuto è un valore molto basso per l'industria, quindi la ricerca del riduttore va orientata verso riduttori di piccola taglia.

Per determinare la coppia sull'albero lento si deve effettuare un bilancio di potenza sul riduttore.

La somma delle potenze entranti, cioè conferite dagli elementi moventi, deve essere uguale alla potenza uscente, cioè conferita all'albero cedente.

Siccome il cambio a infiniti rapporti, per come è stato pensato, è un sistema a due gradi di libertà, non è sufficiente un solo dato per la determinazione di tutti i parametri.

Si deve quindi imporre un'altra condizione affinché il sistema sia correttamente determinato.

Le soluzioni sono svariate, per esempio si può imporre un rapporto di trasmissione e calcolare tutte le velocità conseguenti, oppure si può imporre una coppia massima sull'albero lento, ovvero il portasatelliti, o ancora si può impostare il problema in modo che, ad una determinata velocità del veicolo, consegua forzatamente una velocità del motore termico e una del motore elettrico.

Per una completezza progettuale conviene ripetere il dimensionamento più volte, secondo metodi diversi, confrontando i risultati. Si dovrà infine effettuare un compromesso tra le soluzioni ottenute, cercando di ottimizzare tutti i parametri per quanto possibile.

In prima approssimazione si procede con l'imporre una velocità del veicolo e conseguentemente le velocità del motore termico ed elettrico.

La velocità classica per questa tipologia di dimensionamento è la velocità di crociera autostradale, cioè 120 km/h.

Imposta questa velocità è facile ricondursi alla velocità di rotazione del portasatelliti. È sufficiente conoscere il raggio del pneumatico. Il raggio è noto essendo nota la dimensione del cerchio e del pneumatico.

Con pneumatico 235/40 R18:

Larghezza battistrada (L)	Percentuale spalla (p)	Raggio del cerchio in pollici (Rp)	Raggio del cerchio (R)	Altezza spalla (S)
-	-	-	$(Rp \times 25,4)$	$(L \times p) / 100$
235 mm	40%	18"	457,2 mm	94 mm
Raggio pneumatico (Rt)			Sviluppo pneumatico	
$\frac{R}{2} + S$			$2 Rt \times \pi$	
322,6 mm			2026,96 mm	

Quindi uno sviluppo in metri pari a 2,2027 m.

Ora, si trasforma la velocità del veicolo da km/h a m/s:

$$120 \frac{km}{h} \div 3,6 = 33,3 m/s$$

Questa velocità si traduce in giri al minuto del portasatellite come:

$$(33,3m/s \div 2,2027m/giro) \times 60 = 985,713 rpm$$

o come velocità angolare di 103,172 rad/s.

Nota questa velocità, bisogna scegliere con criterio le velocità dei motori.

Ricordando che essendo si tratta di una velocità di crociera è opportuno mantenere i motori al regime più economico possibile.

La soluzione è ovvia per il motore termico, leggermente meno intuitiva per l'elettrico. Il motore a benzina infatti ha il massimo rendimento al regime di coppia massima. In particolare a questo regime ha il minimo consumo specifico, cioè al regime di coppia massima si minimizza la quantità di

combustibile necessaria per ottenere 1 kW di potenza. Per questo motivo è conveniente mantenere il motore al regime di coppia massima.

Per quanto riguarda il motore elettrico invece questo discorso non è valido, si deve però pensare che essendo una velocità di crociera, ed essendo il motore elettrico utilizzato principalmente come “guida” del cambio. Infatti se a questa velocità, il motore elettrico fosse alla velocità massima, difficilmente sarebbe possibile ottenere rapporti di trasmissione più elevati.

Resta ora da decidere se a 120 km/h la rotazione del motore elettrico debba essere concorde o discorde con la rotazione del motore.

Si può notare che se a questa velocità la direzione di rotazione è concorde, quando la velocità di rotazione del motore elettrico è nulla, la velocità del veicolo è più bassa. Ciò comporta un range di utilizzo del motore elettrico più ampio per le basse velocità, il che consente una gestione migliore e più precisa del cambio a velocità medie e basse.

Considerando il classico range dei motore elettrici a corrente alternata a 2 poli di circa 3000 rpm, imponiamo dunque una velocità della corona esterna del riduttore epicicloidale (quindi del motore elettrico) pari a 500 rpm, cioè 1/6 del range ipotetico.

500 rpm corrispondono a 52.33 rad/s. Adesso sono note le velocità di tutti gli elementi del riduttore epicicloidale. Possiamo quindi calcolarne il rapporto di trasmissione secondo la formula di Willis.

$$\tau_0 = \frac{\omega_3 - \omega_p}{\omega_1 - \omega_p} = \frac{52,33 - 103,172}{209,33 - 103,172} = -0,4788$$

Ai fini della ricerca di un riduttore commerciale, questo numero con molteplici decimali, e per nulla simile ad una “cifra tonda” è abbastanza insignificante. Si effettua quindi un arrotondamento al valore più prossimo di -0,5.

Come esposto nel capitolo 2.3, il valore importante per i cataloghi commerciali è il rapporto di riduzione del riduttore epicicloidale standard, ottenibile dal valore appena determinato come:

$$i = 1 + \frac{1}{-\tau_0} = 1 + \frac{1}{0,5} = 3$$

Il dato ottenuto è attendibile, infatti analizzando i cataloghi dei principali produttori di riduttori epicicloidali risultano facilmente reperibili riduttori con rapporto di riduzione 3.

Tramite questo metodo si ottiene facilmente la stima di un rapporto di trasmissione che consentirà, almeno per un regime di rotazione, un funzionamento corretto e ottimizzato.

Non è ancora possibile però effettuare un bilancio di potenze perché ancora il sistema è ancora incompleto.

Ipotizzando di voler trattare il problema analiticamente, ci si trova a dover risolvere un sistema di due equazioni in tre incognite.

Le due equazioni sono il bilancio delle potenze e il bilancio delle coppie applicate. Queste derivano da una condizione di equilibrio del sistema ovviamente.

$$\begin{cases} \omega_1 M_1 + \omega_p M_p + \omega_3 M_3 = 0 \\ M_1 + M_p + M_3 + M_c = 0 \end{cases}$$

dove M_1, M_p, M_3 e M_c sono le coppie rispettivamente applicate al solare, al portasatellite, alla corona e l'ultima al carter di supporto della trasmissione a infiniti rapporti.

È allora necessario porre un ulteriore vincolo per poter completare il sistema.

Un vincolo fondamentale potrebbe essere la coppia massima che il veicolo è in grado di trasmettere a terra. Determinando questo valore si ottiene un ulteriore valore, il valore massimo della coppia agente sul portasatellite, quindi diventa possibile risolvere il sistema.

Per calcolare la coppia massima che il veicolo è in grado di trasmettere a terra ci si pone in una condizione di sicurezza, cioè si ipotizza che una sola gomma sia in condizione di aderenza. Questa approssimazione è effettuata considerando il funzionamento del differenziale, cioè che se una ruota inizia a slittare, tutta la coppia viene trasmessa su quella ruota, cioè tutta su una sola ruota.

Secondo un modello molto diffuso l'aderenza massima di un pneumatico si può calcolare come: $f_a \times F \times g$

Nella formula f_a rappresenta il coefficiente di attrito della gomma, F la reazione vincolare verticale del pneumatico espressa in kg (un quarto della massa del veicolo) e g l'accelerazione gravitazionale.

Si ottiene quindi una coppia massima di $0,7 \times \frac{1525}{4} \times 9,81 = 2618 \text{ Nm}$

Imponendo questa coppia come coppia massima del portasatelliti, si hanno dati a sufficienza per una caratterizzazione del sistema in buona approssimazione.

Analizzando i cataloghi commerciali dei principali produttori di riduttori epicicloidali, si può trovare una vasta gamma di riduttori in grado di resistere la coppia massima sull'albero cedente di 2618 Nm.

Analogamente non ci saranno problemi per la coppia applicata all'albero movente, considerando il modesto valore di 145 Nm.

Si deve prestare attenzione nel calcolo della coppia agente sulla corona esterna. Infatti, nella configurazione standard del riduttore epicicloidale, questa coppia può essere calcolata come differenza tra la coppia del cedente e la coppia del movente. Nel riduttore utilizzato per la trasmissione a infiniti rapporti invece, la corona non è fissata a telaio. Per questo motivo, nel bilancio delle coppie si deve aggiungere la coppia trasferita al quarto elemento, ovvero il telaio o carter.

Ad ogni modo, la coppia esercitata sulla corona, risulta minore di quella che verrebbe esercitata nel funzionamento classico del riduttore. Nel funzionamento da cambio CVT infatti la coppia viene suddivisa tra corona e carter.

Per questo motivo possiamo trascurare il dato della coppia sulla corona nel dimensionamento del riduttore.

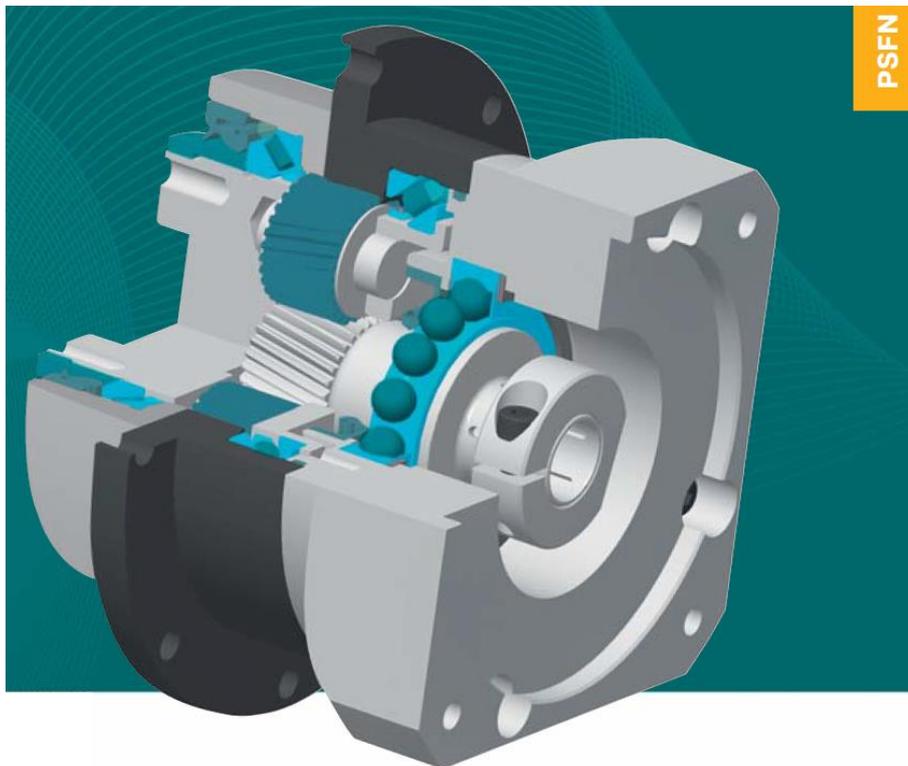
L'unica problematica riscontrata nella ricerca del riduttore dai cataloghi è risultata la velocità massima ammissibile sull'albero del solare, il movente.

Infatti le prestazioni massime in velocità ammessa per questi riduttori sono all'incirca di 4000-5000 rpm, contro i 6500 giri a cui interviene il limitatore nel motore 0.9 Twinair.

Dai cataloghi esaminati, il riduttore compatibile con le coppie d'esercizio che ammette la velocità massima sull'albero movente, è risultato il riduttore NEUGART PLFN 200.

Questo riduttore però risulta leggermente sottodimensionato sia per quanto riguarda la coppia massima sull'albero lento, sia per la velocità massima sull'albero veloce di 6000 rpm. Si tratta inoltre di un riduttore con ingranaggi a denti dritti, che si traduce in una rumorosità di funzionamento di 74 dB.

Nel catalogo NEUGART, una nota suggerisce di rivolgersi direttamente all'azienda per ottenere modifiche personalizzate. Effettuata la richiesta di modifiche per migliorare la coppia massima, la velocità massima e la rumorosità, la risposta è stata rapida e risolutiva. Il consiglio di adottare un riduttore PSFN 140, di taglia più piccola quindi, ma con modifiche apportata dalla casa costruttrice, riguardanti i materiali e i trattamenti termici e chimici effettuati sul prodotto.



Il riduttore PSFN 140 infatti, ammette una velocità massima di 6500 rpm, ma nella versione a catalogo resiste a coppie limitate a 470 Nm, ben lontano dalle esigenze dell'applicazione.

Con le modifiche del materiale e i dovuti trattamenti termici e chimici invece riesce a supportare con margine di sicurezza la coppia massima di

2618 Nm che l'applicazione richiede, garantendo una durata minima di 30.000 ore di lavoro.

Rispetto al riduttore PLFN 200 offre inoltre dentatura elicoidale, che consente la riduzione di rumorosità durante il funzionamento.

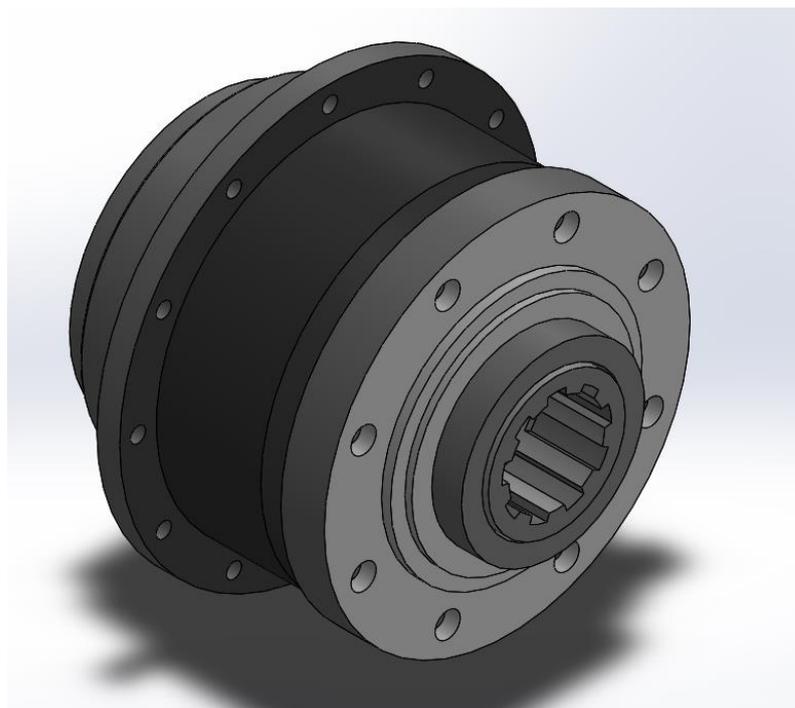
Da non trascurare è la rotazione del riduttore attorno al proprio asse.

L'attenzione è stata rivolta a questa tipologia della serie compatta, perché la forma del carter cui è solidale la corona del riduttore è perfettamente circolare (l'immagine riportata rappresenta la versione con flangia UNI).

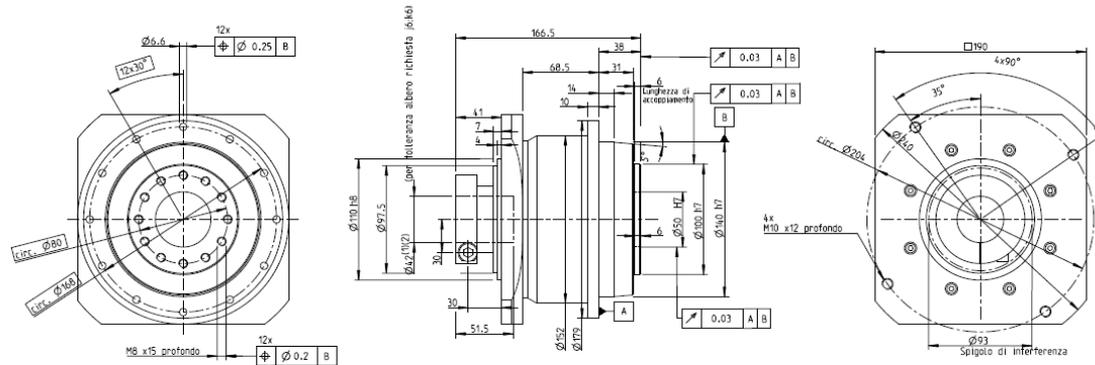
La forma circolare consente di assemblare il riduttore senza particolari attenzioni all'equilibrio delle masse in rotazione. Diversamente invece si deve prestare attenzione ad eventuali masse sbilanciate che possono innescare vibrazioni o causare problematiche rilevanti.

Ultima differenza rilevata tra le caratteristiche offerte dal riduttore e le necessità del sistema è il rapporto di riduzione. La gamma PSFN infatti prevede un rapporto minimo pari a 4. Dalle stime effettuate finora invece, il rapporto ottimale è 3.

Sempre contattando il produttore risulta possibile ottenere la modifica di variazione del rapporto di riduzione. Verrà utilizzato il gruppo di ingranaggi di un altro modello.



Neugart si è dimostrata disponibile alla collaborazione, mettendo a disposizione i disegni tecnici del modello a catalogo e fornendo il modello tridimensionale del riduttore nella variante richiesta e personalizzate per le esigenze di questa applicazione.



Materiali:

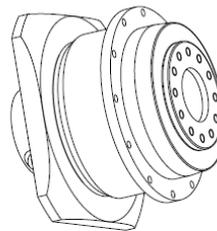
Flangia di ingresso: alluminio - non trattato
 Alloggiamento: acciaio - nero
 Flangia di uscita: acciaio - grezzo

Attenersi alle istruzioni di montaggio
 Attenersi alle istruzioni per l'uso
 Con riserva di modifiche!

(1) Le misure dipendono dal motore	
(2) Diametro albero motore standard	38/42
(3) Diametro dell'albero del motore max.	42

	Scala: 2:5	DIN A3	ISO
	Ultima revisione: K del: 01.07.2013		
Precedente revisione: J del: 05.01.2012			
Tolleranze generali DIN ISO 2768-CL	Schema tecnica: PLFN 14.0, monostadio Diametro albero motore più grande flangia uni		
Neugart GmbH Kettstr. 16 D-77971 Kippenheim	MB-2072	Foglio 1/2	

Dati generali		
Tipo dentatura del riduttore planetario		Denti diritti
Durata in servizio (L10)	h	20000
Durata in servizio a T2N e 0.85 (L10h)	h	30000
Cuscinetto dell'albero di uscita		Cuscinetto a rulli conici
Guarnizione		Anello di tenuta per albero radiale
Grado di protezione		IP 65
Lubrificazione		Lubrificazione a olio
Temperatura di esercizio consentita	°C	-25 / +90
Montaggio motore		M2
Modo operativo		S1
Fattore operativo		0.8/1
Peso max. consentito del motore, statico	kg	50
Regime di riferimento (n2)	rpm	100
Carico assiale ammesso per cuscinetti motore riferito al centro dell'albero di uscita flangiato a L10h/F1-0/20000 h	N	8500
Carico radiale ammesso per cuscinetti motore riferito al lato frontale dell'albero di uscita flangiato a L10h/F1-0/20000 h	N	12000
Carico assiale ammesso per cuscinetti motore riferito al centro dell'albero di uscita flangiato a L10h/F1-0/30000 h	N	7500
Carico radiale ammesso per cuscinetti motore riferito al lato frontale dell'albero di uscita flangiato a L10h/F1-0/30000 h	N	11000
Carico radiale ammesso max. riferito al lato frontale dell'albero di uscita flangiato a T2+0 Nm	N	30000
Posizione di montaggio		a stella
Precisione flangia motore richiesta		DIN 42955-R
Tolleranza albero motore richiesta		h6-h9
lunghezza albero motore utile min.	mm	26
Capita di serraggio vite di arresto	Nm	95



Dati in funzione del rapporto di trasmissione						
Rapporto di trasmissione		4	5	7	8	10
Capita di uscita nominale T2N	Nm	600	750	530	450	305
Capita di uscita max. T2max per 30000 giri sull'albero di uscita	Nm	960	1200	848	720	488
Capita di emergenza 1000 volte ammessa	Nm	1300	1500	1300	1000	750
Giro angolare max. - standard riferito al albero di uscita	arcmin	+ 3	+ 3	+ 3	+ 3	+ 3
Giro angolare max. - ridotto (SPB) riferito al albero di uscita	arcmin	+ 1	+ 1	-	+ 1	+ 1
Rendimento a T2N e temperatura di riferimento 70 °C e n1=1000 rpm	%	97	97	96	96	95
Regime limite meccanico (n1) Non superare la temperatura di esercizio!	rpm	6500	6500	6500	6500	6500
Numero di giri di entrata medio max. (n1) al 50% T2N e S1 (a) Non superare la temperatura di esercizio!	rpm	600	950	1350	1550	1900
Numero di giri di entrata medio max. (n1) al 100% T2N e S1 (a) Non superare la temperatura di esercizio!	rpm	650	700	1050	1250	1650
Inerzia riferita all'albero di uscita e diametro albero motore d=42 mm	kgcm²	15.39	13.31	12.31	11.32	11.01
Capita a vuoto a n1=3000 rpm e 20 °C temperatura riduttore	Nm	9.45	6.5	4	3.4	2.65
Capita accelerante media a n1=3000 rpm e 20 °C temperatura riduttore	Nm					
Peso	kg	14	14	14	14	14
Rigidità torsionale	Nm/arcmin	200	200	200	200	200
Stato di esercizio a n1=3000 rpm senza carico a distanza di 1 m	dB(A)	70	70	70	70	70

(a) Riferito a una temperatura ambiente di 20 °C.
 In caso di temperature maggiori ridurre il numero di giri.
 Con riserva di modifiche!

Schema tecnica: PLFN 14.0, monostadio Diametro albero motore più grande flangia uni	
MB-2072	Foglio 2/2
Ultima revisione: K del: 01.07.2013	

4.2 Vantaggi del modello scelto

Il riduttore neugart PSFN 140 è parte di una gamma particolare di riduttori epicicloidali. Si tratta di riduttori e ridotto ingombro longitudinale. Il riduttore infatti ha una lunghezza totale di 166 mm, un valore estremamente ridotto.

Le dimensioni estremamente ridotte si traducono in una massa limitata. Il riduttore a catalogo ha una massa di 12 kg. A causa dei materiali altoresistenziali utilizzati il peso è stimabile in 14 kg. Il dato è attendibile in quanto coincide con i dati riportati nei disegni tecnici del riduttore da cui verranno estrapolati gli ingranaggi, disegni forniti dalla Neugart.

Ricordando l'esigenza di ridurre l'ingombro del sistema cambio-motore, il vantaggio di cui sopra non è trascurabile.

PSFN inquadra una gamma di riduttori a gioco ridotto ($<1^\circ$) con elevata coppia in uscita ed elevata rigidità.

Neugart garantisce rendimenti superiori al 98%, grazie alla dentatura levigata e rettificata di ogni ingranaggio.

La dentatura elicoidale associata al rispetto degli standard qualitativi ISO 9001 e l'aggiunta di un sincronismo appositamente ottimizzato, consentono la riduzione della rumorosità al di sotto della soglia dei 60 dB.

Un aspetto molto importante è il sistema di lubrificazione interno, il quale non richiede manutenzione: il riduttore è "lubrificato a vita". Questo tipo di lubrificazione inoltre consente il montaggio in ogni posizione, senza pericolo di fuoriuscita di liquidi di lubrificazione.

La conformazione circolare del carter esterno è ottimale per l'applicazione nel cambio CVT. La forma circolare infatti non comporta masse eccentriche, evitando l'emissione di vibrazioni e oscillazioni del riduttore.

SCelta DEL GRUPPO ELETRICO

5.1 Analisi dei dati e confronto delle soluzioni

Per il funzionamento della trasmissione a infiniti rapporti con riduttore epicicloidale è inevitabile l'utilizzo di uno motore elettrico per la guida della corona esterno.

Si sceglie di utilizzare il motore elettrico per l'estrema flessibilità della caratteristica meccanica di questo motore. È indispensabile infatti poter regolare correttamente la velocità di rotazione del motore e soprattutto mantenere valori elevati della coppia ad ogni regime di rotazione.

Esistono però motori elettrici di svariati tipi, e con diverse alimentazioni. Nel caso del riduttore, essendo un applicazione mobile, si deve considerare che l'energia elettrica proviene a volte da accumulatori, altre volte invece da un alternatore guidato dal motore elettrico.

Per questo motivo si possono analizzare in primo luogo motori alimentati a corrente continua. Infatti la corrente accumulata nelle batterie sarà di tipo continuo.

Questi motori offrono ottime caratteristiche di coppia. Sono caratterizzati da una coppia massima in fase di avviamento, che poi diminuisce linearmente all'aumentare della velocità di rotazione. Purtroppo però per questi motori, a elevate potenze corrispondono elevate dimensioni e masse.

Un motore elettrico a corrente continua dell'ordine dei 15 kW ha una massa di circa 100-120 kg.

Utilizzando un motore di queste dimensioni si vanificherebbero i miglioramenti sin ora apportati in termini di alleggerimento. A questo andrebbe aggiunta una difficoltà di collocamento del motore a causa degli ingombri e della massa elevata. Il posizionamento di 120 kg infatti modifica notevolmente il bilanciamento della vettura, rischiando di peggiorare enormemente l'handling e l'aderenza del veicolo.

Conviene escludere questa tipologia di motori e rivolgere l'attenzione ai motori elettrici a corrente alternata.

La corrente continua si può facilmente convertire in corrente alternata con l'utilizzo di un inverter, componente elettronico di dimensione e massa contenuta. Le ultime versioni di inverter possono inoltre gestire il motore nella velocità e nella modalità di erogazione della coppia.

Una particolare categoria di motori elettrici è quella dei motori Brushless.

Mentre nei motori elettrici normali il circuito elettrico che alimenta il rotore è chiuso da elementi striscianti sull'albero motore denominati spazzole, i motori brushless (dall'inglese "senza spazzole") non necessitano di questi ultimi per il funzionamento. L'eliminazione di queste spazzole permette una riduzione degli attriti durante la rotazione, l'eliminazione delle scintille all'aumentare della velocità, ma soprattutto consente l'aumento della vita del motore. Infatti il consumo delle spazzole nei motori elettrici è motivo di vita breve del motore.

In sostituzione delle spazzole vengono utilizzati transistor di potenza controllati da un microcontrollore il quale, conoscendo la posizione del rotore tramite un sensore resolver, controlla la commutazione della corrente.

Si tratta di motore dotati di magneti permanenti, fissati al rotore. I magneti ottenuti con particolari materiali risultano molto leggeri, limitando quindi l'inerzia rotorica. In questo modo è possibile ottenere un controllo preciso della velocità e dell'accelerazione del motore.

L'assenza di attriti e sfregamenti limita notevolmente anche la rumorosità del motore, aggiungendo un'ulteriore caratteristica positiva.

I motori brushless funzionano sempre in condizioni di rendimento elevati non dovendo generare il campo magnetico rotorico, grazie alla presenza dei magneti permanenti.

Con la diminuzione dei costi della componentistica elettronica di controllo, quindi dei microcontrollori indispensabili per il funzionamento del motore brushless, lo sviluppo e l'utilizzo di questi motori ha fatto grandi passi avanti.

In particolare questa tecnologia ha invaso il mondo dei servomotori e dei motori per propulsione.

I rendimenti estremamente migliori di questi motori sono dovuti anche al posizionamento degli avvolgimenti nella parte esterna dello statore. Questo consente lo smaltimento di un'enorme quantità di calore, senza dover utilizzare alette di raffreddamento in grande quantità come nei motori a spazzole.

Nelle immagini seguenti si vede la differenza dei carter del motore a spazzole (a sinistra) e del motore brushless (a destra).



I motori brushless sono i più diffusi anche nel settore delle auto ibride.

Grazie alla loro estrema compattezza e alle masse limitate sono semplici da installare a bordo e non comportano problemi a livello di dissipazione del calore.

Inoltre per i motori elettrici sono entrati in vigore gli standard internazionali di efficienza IE.

Attualmente lo standard prevede l'omologazione di sistemi con livello minimo IE2.

Come la normativa Euro per i motori automobilistici, lo standard IE sta contribuendo alla progettazione e produzione sempre più efficienti a livello di rendimenti.

Dopo aver analizzato numerosi cataloghi di motori elettrici brushless si è notato che anche utilizzando standard IE 2, i motori per l'applicazione con cambio CVT risultano troppo pesanti.

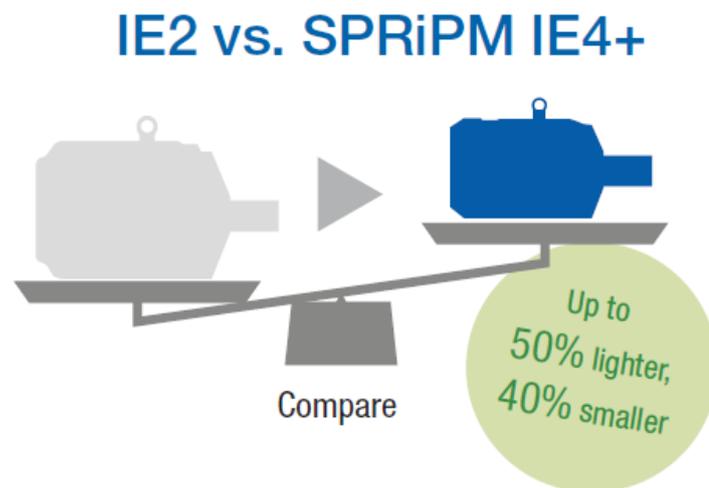
Lo standard IE ad oggi prevede un massimo, lo standard IE4, con possibilità di inserire la denominazione plus “+” se l’efficienza del motore è superiore a quanto previsto dalla normativa per IE4.

Dai cataloghi YASKAWA, industria leader nel settore servomotori elettrici, si può trovare un servomotore elettrico brushless, che rispetta lo standard IE4+.

Si tratta di un motore delle caratteristiche strabilianti. Il produttore propone il motore in un pack denominato SPRiPM. Il pacchetto comprende il motore SPRiPM e l’inverter rigenerativo di controllo V1000.

L’azienda dichiara che le caratteristiche del sistema SPRiPM eccedono alla classificazione standard IE4, da qui la denominazione IE4+.

Il sistema riduce del 20% i consumi di energia elettrica, del 40% le dimensioni e del 50% la massa rispetto ad un motore di pari potenza di standard IE2.



Effettivamente i motori da 15-20 kW di potenza disponibili dai cataloghi hanno un peso non inferiore ai 60-70 Kg. Il motore di SPRiPM a due poli di taglia più grossa invece, ben 18,5 kW di potenza, pesa soltanto 33 Kg.

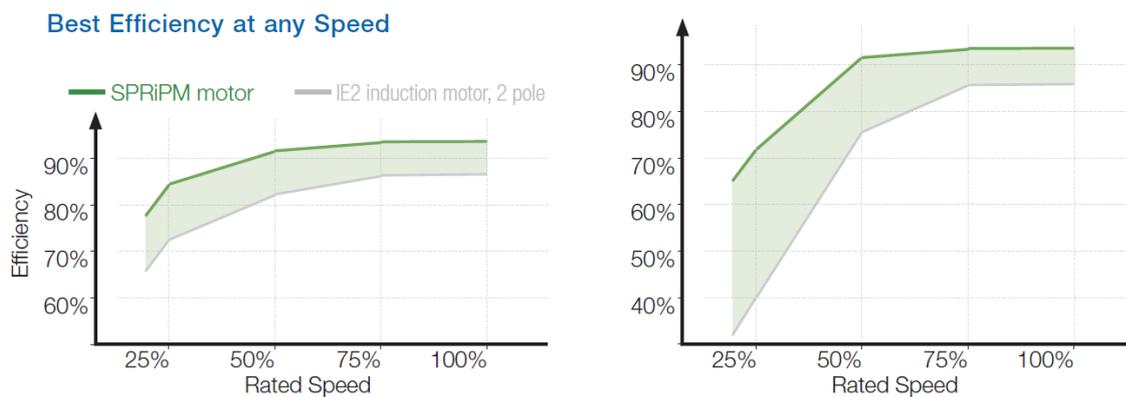
Il motore proposto con inverter V1000 è di facile installazione. Il Kit infatti è già predisposto per essere utilizzato in accoppiamento. Il produttore sostiene che in 3 minuti può essere operativo.

5.2 Motore-inverter-alternatore

Per l'utilizzo nella trasmissione a infiniti rapporti è stata utilizzata la taglia massima del pacchetto SPRiPM perché considerandone il rapporto peso-potenza, risulta un modo ottimo di incrementare le prestazioni del veicolo, specialmente in accelerazione. L'applicazione inoltre richiede un'elevata precisione nel controllo della velocità e dell'accelerazione. Questa precisione è più facile da ottenere se la potenza del motore è superiore a quella effettivamente necessaria.

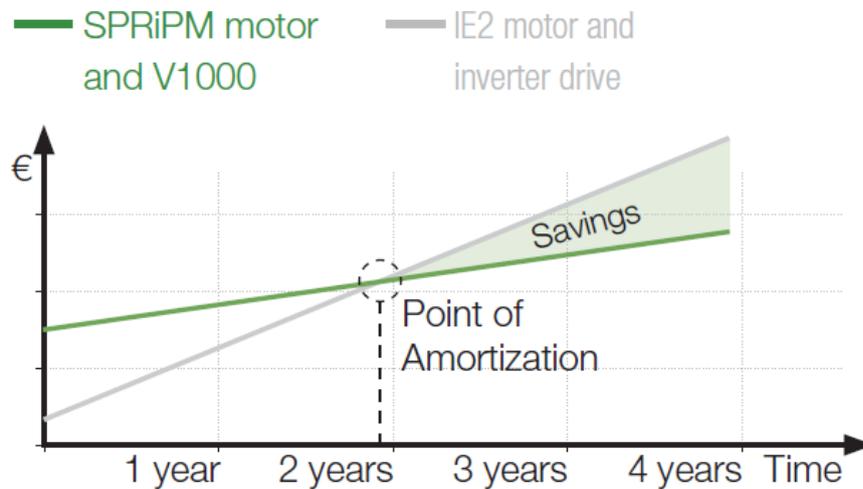
Il punto debole di questo motore ovviamente è il costo, che risulta notevolmente superiore ad un motore di classe IE2 ovviamente. Il produttore punta sull'efficienza più elevata ad ogni regime di rotazione.

Come si vede dai seguenti grafici, il rendimento è notevolmente maggiore rispetto ad un motore di classe IE2.



I grafici si riferiscono all'andamento dell'efficienza alle variazioni di velocità a coppia costante, nel primo caso e a coppia variabile nel secondo.

Sulle basi di questa differenza, YASKAWA dichiara un tempo di pareggio dell'investimento inferiore ai 2 anni.



Ulteriori vantaggi di questo motore sono la coppia di spunto superiore al 100% della coppia nominale, la possibilità di gestione delle frequenza di alimentazione attraverso inverter drive. Questo vantaggio in particolare consente al motore di erogare la coppia nominale da una velocità di rotazione pari al 10% della velocità massima, fino alla velocità massima di 3000 giri al minuti.

L'inverter V1000 consente inoltre di erogare una coppia pari al 150% della coppia nominale per brevi periodi, compatibilmente con i tempi di smaltimento del calore generato dai sovraccarichi.

Un elemento importante di questo sistema è dunque l'inverter.

La versione fornita insieme al motore è un inverter drive di tipo rigenerativo.

Il termine inverter drive identifica un componente elettronico che non solo converte la corrente da continua a alternata, bensì gestisce la corrente per ottenere i diversi comportamenti del motore.

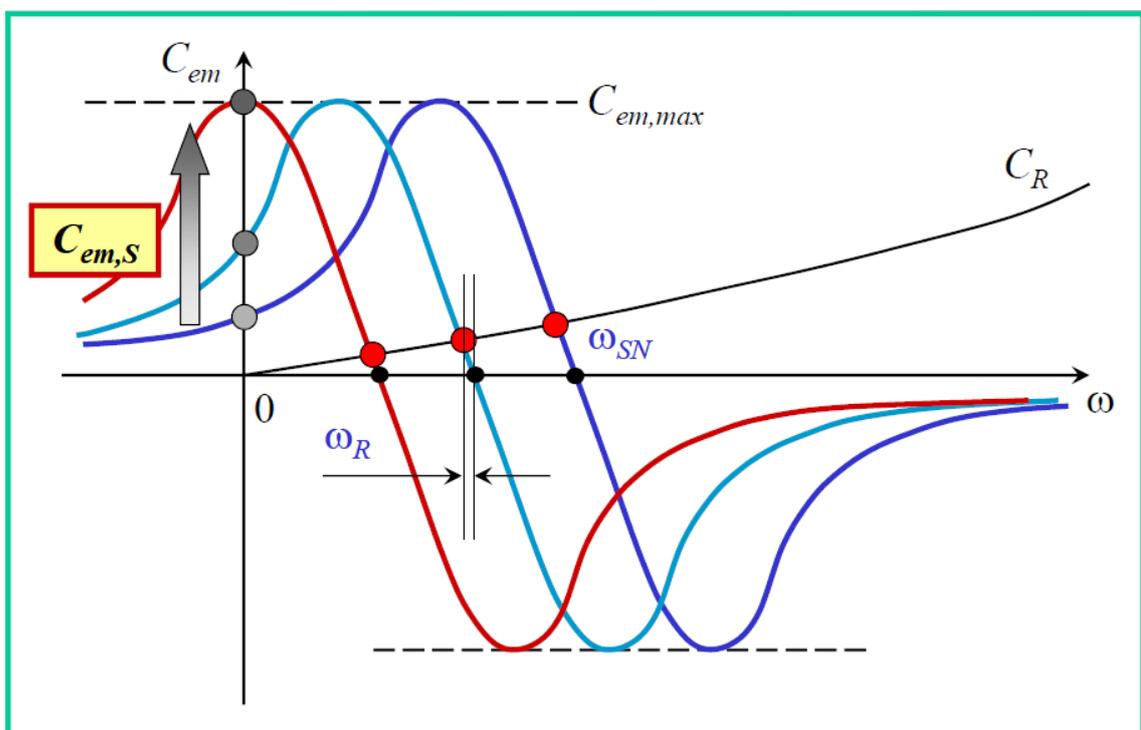
Consente variazioni di frequenza e tensione, adoperando quindi un controllo V/f costante. Si tratta di una delle migliori tecnologie di controllo in quanto consente di "appiattire" al massimo la caratteristica di coppia.

La trasmissione CVT richiede coppia elevata a regimi di rotazioni bassi, ma richiede anche velocità di 2500-2800 rpm.

Il rendimento rimane sempre molto elevato poiché la velocità di funzionamento è sempre prossima a quella di sincronismo.

La corrente inoltre rimane sempre limitata, visto che anche la caratteristica di assorbimento trasla analogamente a quella meccanica. Questo consente di utilizzare il motore sempre al regime in cui la corrente richiesta è minima, limitando i consumi. Questo funzionamento è detto a “basso scorrimento”.

Traslando opportunamente la curva è possibile poi far coincidere la coppia massima del motore, con la coppia di spunto.



Conseguenza di questo funzionamento è la disponibilità di coppia elevata sia a bassi regimi che a regimi prossimi a quello di sincronismo, cioè il regime di rotazione massimo teoricamente raggiungibile. In questo modo il motore elettrico si interfaccia perfettamente con i requisiti del sistema.

La presenza di un encoder, in aggiunta al resolver, consente un ottimo controllo in velocità, posizione e accelerazione del motore elettrico.

L'inverter V1000 per il motore in versione da 18,5 kW è un componente dal peso di 5,2 Kg ma dalle dimensioni contenute.



Altezza	Larghezza	Profondità
290mm	180mm	163mm

Richiede un'alimentazione a corrente continua con una tensione di 24 V con corrente continua o 380 V alternata trifase.

Il motore richiede una corrente massima di 38A, di conseguenza l'output massimo dell'inverter è esattamente di 38A ovviamente.

Analogamente le tensioni di input del motore coincide con quella di output dell'inverte: corrente trifase con tensione che può andare da 380 a 480V.

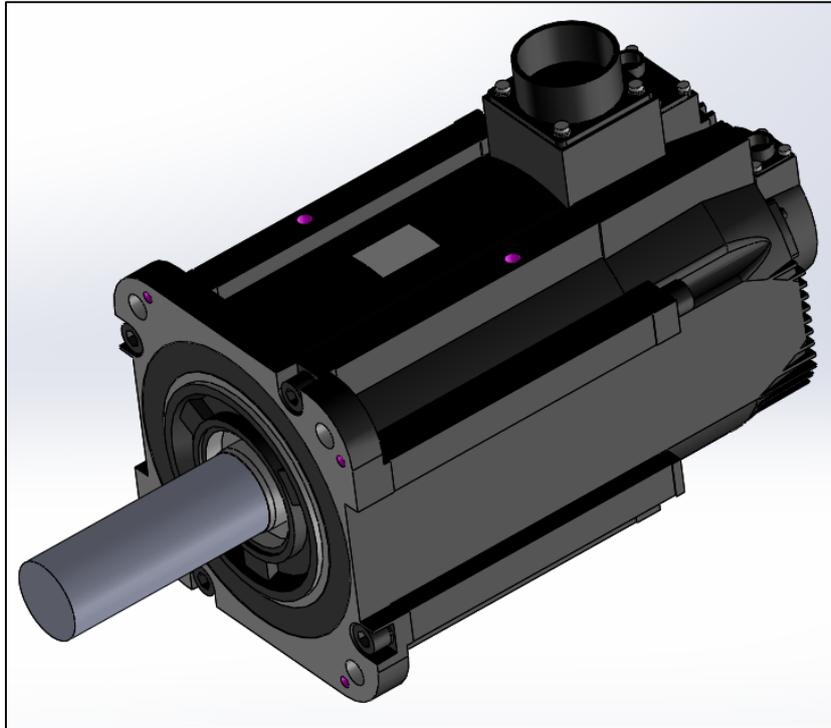
Lo schema elettrico dell'inverter è ottimizzato per ottenere un controllo preciso della frequenza della corrente in output fino a 400Hz.

La classe di efficienza IE4+ non è ottenuta con il solo motore quindi, bensì è l'insieme motore-inverter a consentire l'omologazione "*Super Premium Efficiency*".

Non utilizzare il motore in coppia con l'inverter V1000 risulterebbe dannoso sia per l'efficienza del sistema che per l'ottimizzazione delle interfacce tra motore e inverter.

Oltre che rampe di accelerazione e modalità di funzionamento l'azienda fornisce connettore specifici per un'installazione plug and play.

YASKAWA mette a disposizione dati tecnici e modelli tridimensionali dei motori. Il motore utilizzato ha dimensioni medie che ben si prestano all'utilizzo per la trasmissione a infiniti rapporti.



Lunghezza	Dimensione flangia frontale
378mm	180mm x 180mm

Come già detto, l'inverter V1000 è un inverter di tipo rigenerativo, cioè un inverter predisposto alla funzione di recupero di energia cinetica. Questa funzione è importante per l'utilizzo in accoppiamento con il cambio CVT.

Il cambio infatti propone l'opportunità di recuperare l'energia cinetica del veicolo in fase di frenata, alimentando un generatore collegato alla corona del rotismo epicicloidale.

Il generatore quindi potrebbe essere il motore SPRiPM, che grazie alla funzione rigenerativa dell'inverter, trasforma l'energia cinetica della vettura in energia elettrica accumulata in una batteria.

Non utilizzare questa opportunità significa dissipare tutta l'energia sotto forma di energia termica prodotta dai freni a disco. La possibilità di recuperarla, senza dover apportare alcuna modifica rende l'applicazione sicuramente vantaggiosa, senza dover vagliare la convenienza economica di un sistema di questo tipo, come avviene invece per i veicoli a propulsione ibrida.

Del resto, tutti i componenti necessari per il recupero dell'energia in frenata, sono comunque presenti per l'ordinario funzionamento del cambio. Quindi il recupero non comporta costi aggiuntivi o aumento di peso o dimensioni della trasmissione.

L'energia elettrica accumulata, potrebbe essere usata per svariate funzioni. Si può utilizzare per l'avviamento del motore termico piuttosto che per alimentare il motore elettrico, evitando così che quest'ultimo venga alimentato dall'alternatore. Il funzionamento dell'alternatore infatti va ad aumentare la richiesta di potenza al motore termico, con conseguente aumento del consumo di carburante.

Per quanto riguarda l'alternatore invece si nota una scarsa disponibilità di prodotti, specialmente considerando le caratteristiche necessarie per l'installazione in vettura.

Gli unici prodotti disponibili in commercio sono risultati alternatori per l'energia eolica. In questo campo non sono richiesti né ingombri né masse particolarmente ridotte. Infatti si trovano facilmente alternatori di peso elevato (400-500 Kg) e ingombri radiali eccessivi.

Una soluzione semplice si trova negli alternatori dei gruppi elettrogeni. Questi alternatori, studiati per il trasporto, hanno invece caratteristiche valide per quanto riguarda masse e ingombri. Sono disponibili gruppi elettrogeni che erogano 20 kW e pesano 220 Kg.



Il gruppo elettrogeno Lombardini da 20 Kw è alimentato da un motore diesel 2,2. Il peso del motore è circa 190 Kg, da cui segue che il peso del solo alternatore è di circa 25 Kg.

Si tratta di un alternatore già impostato per funzionare collegato ad un motore termico, quindi si adatta perfettamente alle esigenze di progetto.

Il gruppo elettrogeno, e quindi l'alternatore ha un output di corrente di 20Kw a 380V con corrente trifase. Questi dati risultano perfetti per alimentare l'inverter.

Rimane quindi da scegliere soltanto il gruppo di accumulatore da installare in vettura.

5.3 Il pacco accumulatori

Il pacco accumulatori è un insieme di batterie che consentono di immagazzinare grandi quantità di corrente elettrica. Fortunatamente il problema non è solo di interesse per il settore automotive, bensì anche nel settore edile.

Le aziende produttrici degli impianti ad energia rinnovabile infatti hanno iniziato pensare a soluzioni per lo stoccaggio dell'energia elettrica. Notoriamente infatti, l'energia prodotta in eccesso, ad oggi, non è totalmente immagazzinata. Solitamente viene immessa nella rete, quindi venduta al gestore. Nelle situazioni in cui l'impianto non è in grado di fornire energia elettrica in sufficienza, si richiede l'energia alla rete, comprandola dal gestore, ovviamente ad un prezzo più alto di quello a cui si è precedentemente venduta l'energia.

Questa compravendita svantaggiosa crea scetticismo nella popolazione riguardo la convenienza economica di un investimento in impianti elettrici ad energie rinnovabili.

Di conseguenza le aziende leader nel settore hanno iniziato degli studi riguardo lo stoccaggio delle grandi quantità di corrente caratteristiche delle abitazioni.

Questi studi hanno dato vita a sistemi di accumulatori, che possono essere ideali per l'installazione a bordo dell'Astura.

Si tratta infatti di batterie con tecnologie agli ioni di litio, come quelle utilizzati per i cellulari.

La differenza sta soprattutto nella capacità e quindi nella durata della batteria.

Infatti chiaramente le applicazioni nella domotica richiedono potenze elettriche di circa 3,5 kW da erogare per periodi abbastanza lunghi elevate. Potenze medie per periodi lunghi si traduce quindi in una quantità di energia abbastanza elevata.

L'utilizzo per case private inoltre richiede anche ingombri ridotti, il che si traduce in masse contenute e quindi ancora in facilità di collocamento in vettura.

Analizzando la disponibilità sul mercato di accumulatori di questo tipo si può trovare una vasta gamma di batterie.

Per quando detto escludiamo i sistemi con tecnologia piombo-acido, sistemi pesanti e che a grandi quantità di energia elettrica accumulata associano grandi dimensioni.

Gli accumulatori agli ioni di litio disponibili vanno dalle più piccole dimensioni delle batterie per orologi a batterie ideate per potenze orarie di 5 kWh, aventi una massa di 58 Kg.

Le caratteristiche non sono ancora soddisfacenti per l'applicazione in questione.

Una batteria che ha caratteristiche perfette per l'applicazione è una batteria di ultima generazione prodotta da Panasonic, principalmente per l'utilizzo nei sistemi fotovoltaici.

Si tratta di un pacco di 18650 batterie di dimensioni simile alle stilo (diametro 18 mm e 65 mm di lunghezza) con tecnologia agli ioni di litio accoppiate in un volume totale di 7 litri e con un peso totale di 8 Kg.

Panasonic offre l'accumulatore in forme personalizzate. La forma standard è un semplice parallelepipedo a base rettangolare di dimensione 250 x 400 mm e di altezza 70 mm.

La batteria permette di erogare 1,7 kWh. Noto questo calcolo è facile effettuare una stima della durata teorica della batteria.

La durata risulta infatti come rapporto tra le potenze elettriche della batteria e del motore.

Il motore richiede una potenza elettrica massima pari alla potenza meccanica massima aumentata tenendo conto del rendimento. Il rendimento al regime di potenza massima è del 97 % per questo motore, grazie alla classe di efficienza IE4+.

La potenza elettrica richiesta risulta quindi di circa 19 kW.

Dal rapporto tra la potenza oraria della batteria e la potenza elettrica richiesta dal motore si può ottenere la durata quindi.

$$\text{durata batteria (h)} = \frac{1,7 \text{ kWh}}{19 \text{ kW}} = 0,0895 \text{ h}$$

La batteria è in grado di alimentare il motore alla potenza massima per un tempo di 5 minuti e 22 secondi.

Si tratta di un valore puramente teorico, infatti nella realtà intervengono fenomeni che diminuiscono questa durata, ad esempio va considerato che la batteria fornisce corrente a 25,2 V e l'inverter richiede una tensione minima di 24 V.

Man mano che la batteria alimenta il motore la tensione cala. Al raggiungimento dei 24 V l'alimentazione da batteria non sarà più sufficiente per un corretto funzionamento del gruppo elettrico.

Per sopperire a questa durata limitata si può effettuare una modifica banale al veicolo.

La modifica consiste semplicemente nel sostituire la batteria del veicolo, quella solitamente con tecnologia piombo-acido o nei casi più moderni con tecnologia a gel, con una o due batterie agli ioni di litio, come quelle di cui sopra.

Questa modifica non comporta importanti variazioni della massa ne del volume degli accumulatori. Infatti una batteria media per auto (70Ah) pesa circa 15 Kg e occupa un volume di circa 8 litri.



Esempio: batteria BOSCH 70Ah.

Dimensioni:

*27,5 Cm x 17,2 Cm x 17,2 Cm =
8135,6 cc ≈ 8 litri*

Peso: 16,27 Kg

Da questi dati si può affermare che installando due batterie della tipologia proposta da Panasonic si ottiene un pacco di accumulatori dal peso di 16 Kg, di dimensioni totali 25 Cm x 40 Cm x 14 Cm. In aggiunta però, una potenza erogabile di 3,4 kWh.

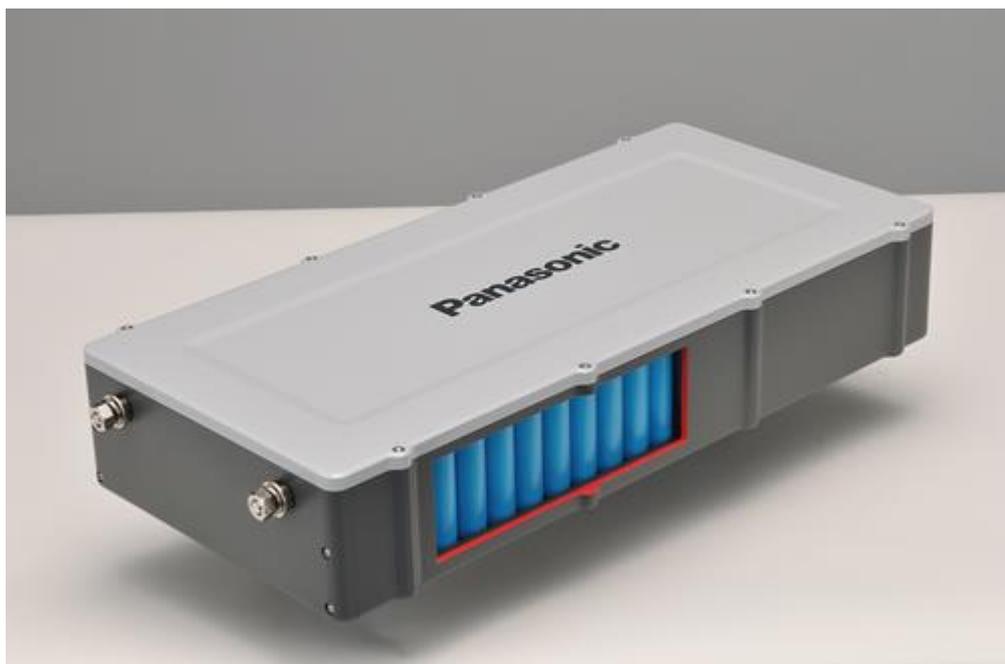
Questa potenza consente una durata teorica di circa 10 minuti e 44 secondi.

Applicando le condizioni di tensione di output precedentemente descritti si considera una durata minima di 5 minuti circa, sufficiente per svolgere qualsiasi funzione, dall'avviamento del motore termico, ad una vera e propria alimentazione "stand-alone" del motore elettrico, cioè senza utilizzo dell'alternatore.

La batteria supporta i sistemi di carica rapida, quindi consente l'utilizzo delle funzioni AEC, cioè il sistema di rigenerazione attiva che varia la tensione e l'intensità della corrente fornita alle batterie in base alla quantità di energia recuperata dal motore elettrico.

In questo modo si ottimizza la ricarica delle batterie e quindi si massimizza l'energia recuperata dal sistema.

Di seguito si riporta la batteria Panasonic nella forma standard:



GESTIONE DELLA TRASMISSIONE

6.1 Ottimizzazione dei regimi di funzionamento

Una volta scelti e interfacciati tutti i componenti della trasmissione a infiniti rapporti si può finalmente iniziare l'ottimizzazione di funzionamento del cambio.

I punti cardine della trasmissione sono i dati caratteristici dei componenti precedentemente scelti. Quindi i valori inerenti il riduttore epicicloidale NEUGART, il gruppo elettrico YASKAWA con l'alternatore e ovviamente il motore FIAT Twinair.

Nell'ottimizzazione è giusto valutare eventuali miglioramenti ottenibili variando i parametri caratteristici del sistema.

I dati di partenza per l'ottimizzazione del sistema sono principalmente le potenze erogate del motore Twinair ai vari regimi, la potenza del motore elettrico e il rapporto di trasmissione caratteristico del riduttore epicicloidale.

Questi dati però, come già spiegato durante la scelta del riduttore, non sono sufficienti per una completa descrizione del sistema.

Infatti ci sono infiniti modi per ottenere una determinata condizione di funzionamento.

Imponendo alcuni vincoli si limitano le possibilità, consentendo in pochi passaggi di scegliere la soluzione ottimale.

Per effettuare l'ottimizzazione del cambio si deve analizzare il funzionamento a tutte le velocità del veicolo, osservando in che modo variano i dati al modificarsi di uno o più parametri.

Ovviamente non è possibile analizzare tutte le velocità, quindi si analizza il comportamento solo a quelle più importanti.

Nel caso in questione si è optato per analizzare le velocità a step di 10 radianti al secondo. Si è scelto questo dato poiché coincidente con la velocità angolare del portasatelliti.

Nota la dimensione del pneumatico si può facilmente risalire alla velocità del veicolo. Questo step di 10 radianti al secondo non è rispettato in coincidenza di velocità di particolare interesse, come ad esempio la partenza oppure le velocità di 120 Km/h e 200 Km/h.

Una volta determinato il rapporto di trasmissione si devono solo mappare i regimi di funzionamento dei due motori, elettrico e termico, che consentono le migliori prestazioni con il minimo dispendio energetico.

In particolare, la prima valutazione è volta a massimizzare la coppia trasferita alle gomme, senza però superare la soglia massima, oltre la quale si produrrebbe lo slittamento degli pneumatici.

La coppia massima ammissibile è stata già calcolata in fase di dimensionamento del riduttore epicicloidale e vale 2618 Nm.

Per determinare i regimi di rotazione ottimali dei due motori si impone la coppia massima ammissibile di 2618 Nm come coppia resistente sul portasatelliti, ovvero la si considera con segno negativo.

In primo luogo, tramite un foglio di calcolo, si deve determinare la velocità di un motore, nota quella dell'altro e del portasatelliti. Questo passaggio è semplice ma si deve prestare attenzione ai segni delle velocità. Si effettua estrapolando dalla formula di Willis la velocità di uno dei due motori e imponendo la velocità dell'altro motore e del portasatelliti. Estrapolando la velocità angolare della corona esterna (quindi del motore elettrico) dalla formula di Willis si ottiene:

$$\omega_3 = \tau_0 \omega_1 + (1 - \tau_0) \omega_p$$

A questo punto risulta ancora più chiaro il motivo della scelta della velocità angolare come riferimento per l'ottimizzazione. Questo dato infatti è pronto all'utilizzo in tutte le formule, al contrario della velocità della vettura.

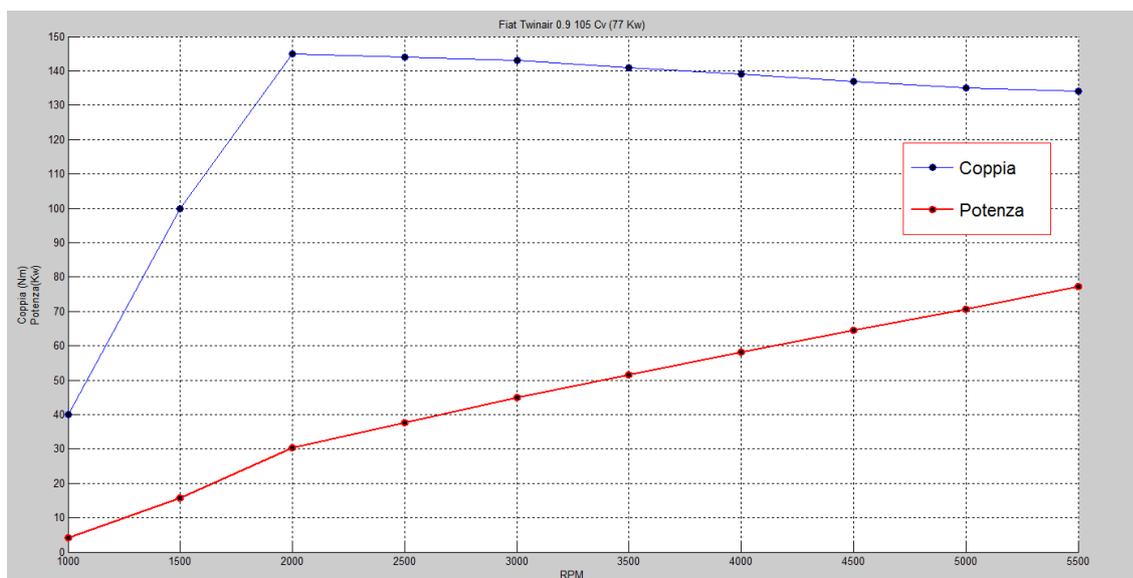
Nella formula sopra riportata si faccia variare la velocità angolare del motore dal regime minimo al massimo per step corrispondenti a 500 rpm. Facendo variare, come descritto precedentemente, la velocità angolare del

portasatelliti si ottiene una mappa delle corrispondenti velocità della corona. (tabella 1 pag. 64)

La seconda mappa riguarda la coppia da applicare alla corona per ottenere sul portasatelliti la coppia massima ammissibile. Ancora una volta il regime di rotazione del motore termico deve variare dal regime minimo al massimo a step corrispondenti a 500 rpm.

Conseguentemente a questa variazione vi sarà una variazione della coppia erogata dal motore termico. La coppia erogata è determinabile, essendo nota la curva di potenza del motore. Procedendo a ritroso è quindi possibile determinare la coppia corrispondente al regime di rotazione di interesse.

Per facilitare l'implementazione dei calcoli conviene trasferire la curva in un ambiente di calcolo matematico, come nel seguente grafico:



Sarà sufficiente effettuare un bilancio di potenze in cui l'unica incognita è la coppia da applicare alla corona. Estrapolando tale valore con una formula inversa si ottiene:

$$M_3 = \frac{P_1 - \omega_p M_p}{\omega_3}$$

Facendo variare i valori della potenza del motore, di velocità angolare del portasatelliti (la coppia sul portasatelliti è quella massima ammissibile) e la velocità angolare della corona (precedentemente mappata) si ottiene la 2 tabella (pagina 64).

Dalle tabelle sin ora calcolate è facile ottenere la potenza che deve erogare il motore elettrico. La terza tabella (pag. 65) descrive proprio questo valore.

Si nota che per ottenere la coppia massima ammissibile ad ogni velocità del veicolo è necessaria una potenza del motore elevatissima.

Per questo motivo occorre creare una quarta mappa in cui si determinino i valori di coppia massima erogabile compatibilmente con la potenza massima del motore elettrico.

Ricalcolando il bilancio di potenza, imponendo questa volta non la coppia massima del portasatelliti, bensì la potenza massima del motore elettrico, si ottiene come unica incognita la coppia generata sul portasatelliti.

$$M_p = \frac{P_1 + P_3}{\omega_p}$$

In questa formula, la potenza del motore elettrico è costante e massima, la potenza del motore varia di pari passo alla velocità di rotazione del motore.

La quarta tabella (pag. 65) riassume quindi il valore di coppia massima erogabile oltre una certa velocità, cioè la massima velocità a cui è possibile fornire la coppia massima ammissibile alle gomme.

In ogni formula si deve tener conto dei rendimenti degli ingranaggi, rendimenti che sono del 99% per il rotismo epicicloidale e ancora del 99% per gli organi di trasmissione del moto tra motore elettrico e corona.

Nelle tabelle di seguito riportate sono evidenziati con colore verde le condizioni di funzionamento determinate in base alla coppia massima ammissibile alle gomme. Di colore giallo le condizioni determinate in base alla potenza massima ammissibile.

TABELLA 1

ωp n1	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	103.28	110	120	130	140	150	160	170	172.12
1000	-50.8333	-37.3333	-22.3333	-7.33333	7.66667	22.6667	37.6667	52.6667	67.6667	82.6667	102.5867	112.6667	127.6667	142.6667	157.6667	172.6667	187.6667	202.6667	205.8467
1500	-77	-63.5	-48.5	-33.5	-18.5	-3.5	11.5	26.5	41.5	56.5	76.42	86.5	101.5	116.5	131.5	146.5	161.5	176.5	179.68
2000	-103.167	-89.6667	-74.6667	-59.6667	-44.6667	-29.6667	-14.6667	0.333333	15.33333	30.33333	50.25333	60.33333	75.33333	90.33333	105.3333	120.3333	135.3333	150.3333	153.5133
2500	-129.333	-115.833	-100.833	-85.8333	-70.8333	-55.8333	-40.8333	-25.8333	-10.8333	4.16667	24.08667	34.16667	49.16667	64.16667	79.16667	94.16667	109.1667	124.1667	127.3467
3000	-159.5	-142	-127	-112	-97	-82	-67	-52	-37	-22	-2.08	8	23	38	53	68	83	98	101.18
3500	-181.667	-168.167	-153.167	-138.167	-123.167	-108.167	-93.1667	-78.1667	-63.1667	-48.1667	-28.2467	-18.1667	-3.16667	11.83333	26.83333	41.83333	56.83333	71.83333	75.01333
4000	-207.833	-194.333	-179.333	-164.333	-149.333	-134.333	-119.333	-104.333	-89.3333	-74.3333	-54.4133	-44.3333	-29.3333	-14.3333	0.666667	15.66667	30.66667	45.66667	48.84667
4500	-234	-220.5	-205.5	-190.5	-175.5	-160.5	-145.5	-130.5	-115.5	-100.5	-80.58	-70.5	-55.5	-40.5	-25.5	-10.5	4.5	19.5	22.68
5000	-260.167	-246.667	-231.667	-216.667	-201.667	-186.667	-171.667	-156.667	-141.667	-126.667	-106.747	-96.6667	-81.6667	-66.6667	-51.6667	-36.6667	-21.6667	-6.66667	-3.48667
5500	-286.333	-272.833	-257.833	-242.833	-227.833	-212.833	-197.833	-182.833	-167.833	-152.833	-132.913	-122.833	-107.833	-92.8333	-77.8333	-62.8333	-47.8333	-32.8333	-29.6533

TABELLA 2

ωp n1	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	103.28	110	120	130	140	150	160	170	172.12
1000	30.85902	-589.107	-2157.01	-10139.1	13113.04	5590.294	4059.115	3400.127	3033.3	2799.597	2594.883	2518.876	2427.99	2356.215	2298.097	2250.077	2209.734	2175.362	2168.719
1500	169.8961	-165.039	-755.876	-1875.82	-4811.89	-32914.3	12293.91	6323.019	4668.434	3892.389	3332.728	3147.746	2940.493	2786.609	2667.833	2573.379	2496.471	2432.635	2420.471
2000	268.8401	46.54275	-294.732	-807.598	-1664.93	-3389.21	-8640.45	458720	11679.57	6767.033	4776.473	4270.055	3767.345	3431.587	3191.456	3011.191	2870.887	2758.581	2737.592
2500	271.0979	99.28058	-145.587	-476.039	-946.447	-1669.61	-2924.08	-5635.35	-15854.8	47505.6	9661.239	7325.854	5623.322	4716.779	4153.768	3770.124	3491.908	3280.913	3242.567
3000	271.9228	131.8451	-58.7244	-300.339	-616.68	-1048.76	-1674.3	-2660.73	-4446.97	-8669	-108406	30384.75	11706.87	7774.684	6068.264	5114.676	4505.759	4083.245	4009.766
3500	269.9174	151.4747	-4.61589	-194.598	-430.855	-732.638	-1131.6	-1683.67	-2497.95	-3819.38	-7743.71	-13008.8	-82896.9	24396.08	11734.17	8152.518	6461.472	5476.664	5318.483
4000	267.4098	164.741	32.53532	-123.805	-311.554	-541.231	-828.648	-1198.71	-1693.04	-2386.89	-3899.64	-5183.13	-8726.09	-19684.6	462488	21351.4	11761.48	8471.504	8033.619
4500	264.5684	173.9093	59.20681	-73.5591	-229.02	-413.539	-636.103	-909.831	-1254.66	-1702.42	-2554.73	-3169.55	-4497.89	-6810.2	-11842.9	-31254.6	78745.11	19514.51	17023.07
5000	261.4939	180.2838	78.94964	-36.4154	-168.942	-322.768	-503.476	-718.787	-979.694	-1302.39	-1871.13	-2248.24	-2981.76	-4045.35	-5726.52	-8783.18	-16072.2	-56161.5	-108975
5500	260.2608	186.7783	96.10601	-5.76802	-121.056	-252.595	-404.081	-580.423	-788.286	-1036.95	-1453.94	-1716.48	-2198.03	-2835.2	-3717.95	-5022.19	-7144.4	-11205.7	-12594.6

TABELLA 3

ω/p n1	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	103.28	110	120	130	140	150	160	170	172.12
1000	1568.667	-21993.3	-48173.3	-74353.3	-100533	-126713	-152893	-179073	-205253	-231433	-266200	-283793	-309973	-336153	-362333	-388513	-414693	-440873	-466423
1500	13082	-10480	-36660	-62840	-89020	-115200	-141380	-167560	-193740	-219920	-254687	-272280	-298460	-324640	-350820	-377000	-403180	-429360	-434910
2000	27735.33	4173.333	-22006.7	-48186.7	-74366.7	-100547	-126727	-152907	-179087	-205267	-240034	-257627	-283807	-309987	-336167	-362347	-388527	-414707	-420257
2500	35062	11500	-14680	-40860	-67040	-93220	-119400	-145580	-171760	-197940	-232707	-250300	-276480	-302660	-328840	-355020	-381200	-407380	-412930
3000	42284	18722	-7458	-33638	-59818	-85998	-112178	-138358	-164538	-190718	-225485	-243078	-269258	-295438	-321618	-347798	-373978	-400158	-405708
3500	49035	25473	-707	-26887	-53067	-79247	-105427	-131607	-157787	-183967	-218734	-236327	-262507	-288687	-314867	-341047	-367227	-393407	-398957
4000	55576.67	32014.67	5834.667	-20345.3	-46525.3	-72705.3	-98885.3	-125065	-151245	-177425	-212192	-229785	-255965	-282145	-308325	-334505	-360685	-386865	-392415
4500	61909	38347	12167	-14013	-40193	-66373	-92553	-118733	-144913	-171093	-205860	-223453	-249633	-275813	-301993	-328173	-354353	-380533	-386083
5000	68032	44470	18290	-7890	-34070	-60250	-86430	-112610	-138790	-164970	-199737	-217330	-243510	-269690	-295870	-322050	-348230	-374410	-379960
5500	74521.33	50959.33	24779.33	-1400.67	-27580.7	-53760.7	-79940.7	-106121	-132301	-158481	-193248	-210841	-237021	-263201	-289381	-315561	-341741	-367921	-373471

TABELLA 4

ω/p n1	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	103.28	110	120	130	140	150	160	170	172.12
1000	-21186.7	-2118.67	-1059.33	-706.222	-529.667	-423.733	-353.111	-302.667	-264.833	-235.407	-205.138	-192.606	-176.556	-162.974	-151.333	-141.244	-132.417	-124.627	-123.092
1500	-32700	-3270	-1635	-1090	-817.5	-654	-545	-467.143	-408.75	-363.333	-316.615	-297.273	-272.5	-251.538	-233.571	-218	-204.375	-192.353	-189.984
2000	-47353.3	-4735.33	-2367.67	-1578.44	-1183.83	-947.067	-789.222	-676.476	-591.917	-526.148	-458.495	-430.485	-394.611	-364.256	-338.238	-315.689	-295.958	-278.549	-275.118
2500	-54680	-5468	-2734	-1822.67	-1367	-1093.6	-911.333	-781.143	-683.5	-607.556	-529.435	-497.091	-455.667	-420.615	-390.571	-364.533	-341.75	-321.647	-317.685
3000	-61902	-6190.2	-3095.1	-2063.4	-1547.55	-1238.04	-1031.7	-884.314	-773.775	-687.8	-599.361	-562.745	-515.85	-476.169	-442.157	-412.68	-386.888	-364.129	-359.644
3500	-68653	-6865.3	-3432.65	-2288.43	-1716.33	-1373.06	-1144.22	-980.757	-858.163	-762.811	-664.727	-624.118	-572.108	-528.1	-490.379	-457.687	-429.081	-403.841	-398.867
4000	-75194.7	-7519.47	-3759.73	-2506.49	-1879.87	-1503.89	-1253.24	-1074.21	-939.933	-835.496	-728.066	-683.588	-626.622	-578.421	-537.105	-501.298	-469.967	-442.322	-436.873
4500	-81527	-8152.7	-4076.35	-2717.57	-2038.18	-1630.54	-1358.78	-1164.67	-1019.09	-905.856	-789.378	-741.155	-679.392	-627.131	-582.336	-543.513	-509.544	-479.571	-473.664
5000	-87650	-8765	-4382.5	-2921.67	-2191.25	-1753	-1460.83	-1252.14	-1095.63	-973.889	-848.664	-796.818	-730.417	-674.231	-626.071	-584.333	-547.813	-515.588	-509.238
5500	-94139.3	-9413.93	-4706.97	-3137.98	-2353.48	-1882.79	-1568.99	-1344.85	-1176.74	-1045.99	-911.496	-855.812	-784.494	-724.149	-672.424	-627.596	-588.371	-553.761	-546.94

Ovviamente queste sono le condizioni di massime prestazioni. Prestazioni minori sono facilmente ottenibili limitando le potenze erogate dai due motori.

Per l'ottimizzazione del sistema le tabelle sono state ottenute nella condizione più critiche, cioè quando il motore elettrico è alimentato dalle batterie e non dall'alternatore. Per determinare le condizioni di funzionamento quando l'energia elettrica è fornita dall'alternatore è sufficiente traslare la curva di potenza del motore elettrico di una potenza pari a quella assorbita dall'alternatore.

Invece per determinare la condizione di minimo consumo carburante, è sufficiente mantenere sempre il motore al regime di coppia massima ed effettuare la regolazione di velocità tramite il motore elettrico.

Il primo valore della velocità angolare del portasatelliti rappresenta la partenza. Si utilizza il valore uno poiché il valore 0 falsifica i risultati delle formule applicate.

Alla luce dei risultati appena ottenuti è possibile procedere ad una stima delle prestazioni della vettura.

6.2 Studio delle prestazioni del modello

Una prima stima è quella della velocità massima del veicolo. In collaborazione con una tesi di laurea contemporanea si sono determinati tutti i dati necessari per il calcolo della velocità massima.

È necessario conoscere la resistenza di rotolamento dei pneumatici e la resistenza aerodinamica del veicolo.

La resistenza può essere calcolata come:

$$R_{rot} = f \times m \times g = 0,013 \times 1525 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2$$

Dove f rappresenta un coefficiente d'attrito che per pneumatici sportivi vale 0,013.

$$R_{rot} = 194,5 \text{ N}$$

Per passare alla potenza sottratta da questa resistenza è sufficiente moltiplicare per la velocità.

Dalla tesi parallela è noto che la resistenza a 250 Km/h è di 110 kW.

Con sufficiente approssimazione possiamo ipotizzare che la potenza resistente aerodinamica sia $P_{air} = 22,8 \times v^2$

Dove 22,8 è un coefficiente determinato come costante di proporzionalità tra la resistenza aerodinamica di 110 kW a 250 Km/h.

$$\text{Cioè } 22,8 = \frac{110 \times 1000}{(250/3,6)^2}$$

Sommando le potenze resistenti alla potenza massima installata sul veicolo si ottiene un'equazione di secondo grado rispetto la velocità.

$$22,8 v^2 + 194,5 v - (77,23 + 18,5)1000 = 0$$

L'ultimo termine rappresenta la somma delle potenze del motore termico e del motore elettrico in kW poi trasformati in Watt.

Risolvendo l'equazione in v si ottiene una velocità massima di 60,672 m/s cioè 218,42 Km/h.

Sono stati trascurati i rendimenti poiché la resistenza aerodinamica stimata a 250 Km/h è sicuramente superiore alla resistenza effettiva alla velocità massima ottenuta (il fenomeno non è proporzionale).

Una seconda stima è quella delle prestazioni della vettura in fase di accelerazione.

Questa stima si può effettuare suddividendo l'accelerazione da 0 a 100 Km/h in piccoli step.

Ancora per semplicità di calcolo si sceglie di suddividere in step di radianti al secondo piuttosto che Km/h.

Per ogni intervallo di velocità si deve calcolare la resistenza di rotolamento e la resistenza aerodinamica.

La resistenza di rotolamento si calcola come:

$$R_{rot} = f \times m \times g = 0,013 \times 1525 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$R_{rot} = 194,5 \text{ N}$$

La resistenza aerodinamica invece si può calcolare secondo la seguente formula:

$$R_{air} = \rho \times S \times Cx \times v^2$$

$$\rho = \text{densità aria} = 0,0625 \quad Cx = 0,42$$

$$S = \text{superficie frontale vettura} = 2,09 \text{ m}^2$$

In un foglio di calcolo implementiamo le operazioni fino alla velocità di 100 Km/h (80 rad/s).

1	10	20	30	40	50	60	70	80	ω_p
0.06	5.61	22.43	50.46	89.71	140.18	201.85	274.75	358.85	Rair(N)
194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	194.50	Rrot(N)
194.56	200.11	216.93	244.96	284.21	334.68	396.35	469.25	553.35	Rtot(N)

Si ottiene così la resistenza totale della vettura.

Per calcolare il tempo si deve determinare la forza risultante che agisce sulla vettura.

Si calcola come differenza della forza generata dalla coppia applicata al pneumatico e la resistenza totale appena calcolata.

La forza motrice si calcola come segue $F_{motrice} = M_p/r_{pneumatico}$ dove con M_p si indica la coppia alla gomma e con $r_{pneumatico}$ il raggio del pneumatico.

1	10	20	30	40	50	60	70	80	ω_p
7709.547	7709.547	7709.547	7381.17	6930.583	5544.484	4620.398	3959.315	3465.291	F motrice
194.5561	200.1071	216.9283	244.9637	284.2133	334.6771	396.355	469.247	553.3533	R tot (N)
7514.991	7509.44	7492.619	7136.206	6646.369	5209.807	4224.043	3490.068	2911.938	F real (N)

F real è la risultante che agisce sul veicolo. Ricordando che $F = m \times a$ cioè la forza è uguale alla massa per l'accelerazione, si deriva che l'accelerazione è pari al rapporto tra la forza applicata e la massa del veicolo.

Ipotizzando un'accelerazione costante in ogni intervallo di velocità, si può scrivere che l'accelerazione vale:

$$a = \frac{(v - v_0)}{t}$$

Da cui si ricava che il tempo di accelerazione per un intervallo vale:

$$t = \frac{(v - v_0)}{a}$$

La seguente tabella riporta i valori dell'accelerazione e dei tempi parziali impiegati per ogni intervallo fino a 80 rad/s cioè 100 km/h circa. Questi valori sono ottenuti ipotizzando che il peso della vettura sia ancora 1525 Kg.

1	10	20	30	40	50	60	70	80	ω_p
4.927863	4.924223	4.913193	4.67948	4.358275	3.416267	2.769865	2.288569	1.909468	a (m/s ²)
0.065499	0.589931	0.65695	0.689761	0.740596	0.94481	1.1653	1.410367	1.690378	t (s)

Ora sommando tutti i tempi, si ottiene la stima del tempo totale di accelerazione 0-100 Km/h.

Senza modificare il peso del veicolo il tempo risulta pari a 7,95 secondi.

Il risultato è ottimo, considerando che Fiat 500L con motore Twinair 105Cv, dal peso di 1335 Kg impiega ben 12,3 secondi per andare da 0 a 100 Km/h.

Audi TT con motore 1.8 turbo 160 Cv, dal peso di 1240 Kg impiega invece 7,2 secondi. Una differenza di 0,8 secondi rispetto all'Astura, con 55 Cv in più e 285 Kg in meno.

Ricalcolando il tempo di accelerazione ipotizzando di utilizzare il telaio dell'Audi TT, quindi una massa del veicolo di 1240 Kg si ottiene un risultato eccezionale: 6,46 secondi.

Con margine di sicurezza si può affermare che la trasmissione a infiniti rapporti consenta di ottenere prestazioni simili se non leggermente inferiori rispetto ad un cambio tradizionale, utilizzando il 20 % in meno di potenza installata.

6.3 Modalità di funzionamento

La trasmissione può svolgere diverse funzioni senza dover effettuare modifiche sostanziali al veicolo.

In primo luogo ovviamente svolge il ruolo di cambio per cui è stata ideata.

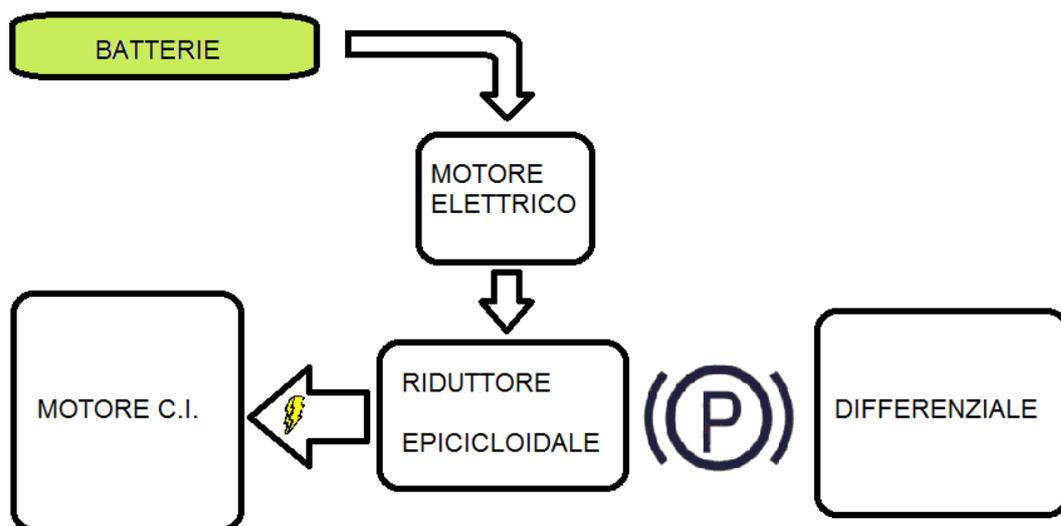
Una funzione di cui ci si è accorti solo in fase di studio della trasmissione è quella di avviamento del motore Twinair.

Questa possibilità consentirebbe di eliminare il motorino di avviamento originale del motore, risparmiando tempo ed eliminando possibilità di guasti e malfunzionamenti.

Questi motorini sono motori elettrici dal peso di 3 Kg circa e spesso origine di guasti.

Dotando la vettura di un sistema automatico di gestione dei freni, come in tutte le auto con cambio automatico è possibile azionarli quando il veicolo è spento.

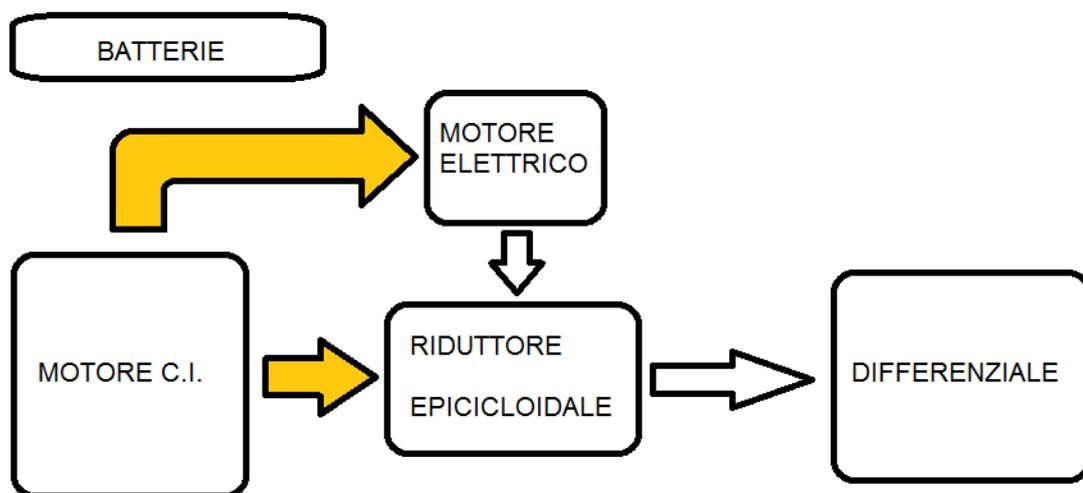
In questo modo il portasatelliti è fermo e vincolato. Azionando il motore elettrico, si attiva la corona, che a sua volta mette in movimento i satelliti e quindi il solare cui è collegato il motore termico.



Funzione di avviamento del motore termico.

Il funzionamento standard della trasmissione invece è quello di semplice cambio CVT, azionato da un motore elettrico che a sua volta viene alimentato da un alternatore. L'alternatore è movimentato dal motore termico. In questa fase quindi il motore termico deve fornire la potenza necessaria all'alternatore, consentendo quindi prestazioni inferiori.

Con l'utilizzo dei sistemi di recupero di energia elettrica e la doppia batteria questa fase dovrebbe essere limitata solo ai tratti di percorrenza a velocità costante.



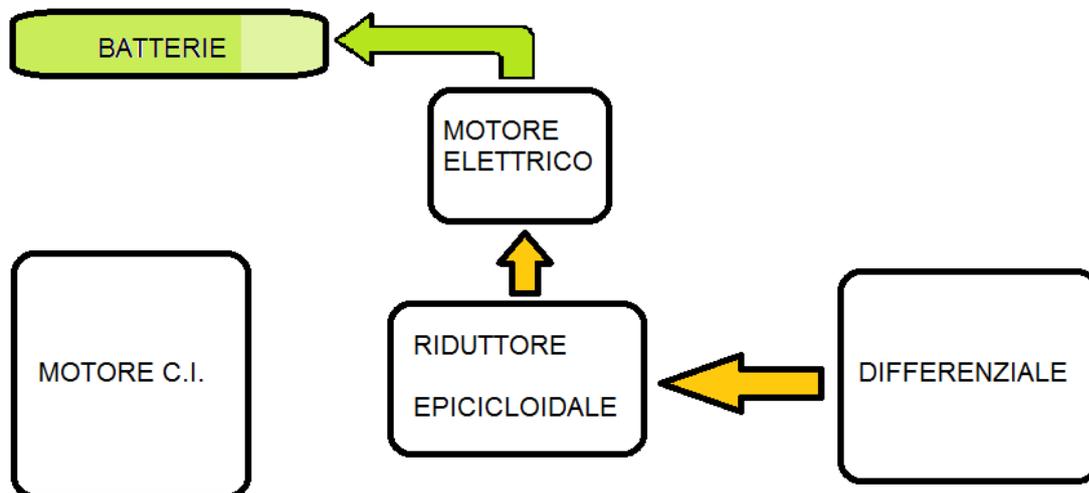
Funzionamento standard della trasmissione.

La batteria infatti consente l'alimentazione del motore elettrico per circa 8 minuti. L'utilizzo dei sistemi di recupero dell'energia cinetica consente la ricarica della batteria elettrica. Sono disponibili inoltre sistemi di recupero dell'energia termica del motore, che sfruttano l'energia termica dei gas di scarico a valle del turbocompressore per generare corrente.

Già utilizzando solo i recuperi di energia cinetica però, l'energia potrebbe essere sufficiente per alimentare il motore elettrico, senza dubbio in percorsi urbani. Considerando la massa del veicolo di 1525 Kg infatti, l'energia cinetica è notevole.

Questo recupero avviene tramite il motore elettrico, il quale in fase di frenata funziona come un generatore. L'inverter poi converte la corrente generata per ricaricare le batterie.

Potrebbe risultare conveniente applicare un freno sull'albero del motore termico per massimizzare la frazione di energia cinetica che alimenta il motore elettrico.



Funzionamento in fase di frenata.

Questa modalità di funzionamento consente l'ultima modalità, basata sull'alimentazione del motore solo tramite le batterie.

In questo modo il motore termico non deve movimentare utilizzatori di media taglia come l'alternatore e può erogare potenze più elevate.

Con l'espansione dei cambi automatici la gestione della marcia è basata sulla posizione del pedale. Infatti se si effettua un tratto a percorrenza costante, con il pedale poco premuto, la trasmissione opererà per un rapporto lungo per minimizzare il consumo di carburante.

Se invece si abbassa il pedale, la trasmissione valuterà se scalare marcia o continuare con la stessa marcia.

Nelle ultime versioni di cambi automatici o semi-automatici, è presente la funzione "Kick down".

Quando si affonda completamente il pedale dell'acceleratore, il sensore a pedale comunica la richiesta di coppia massima. Di conseguenza la trasmissione imposterà il rapporto più corto possibile, in modo da ottenere la miglior accelerazione.

Con un termine di derivazione sportiva si introduce l'ultima modalità:

6.4 Modalità “push to pass”

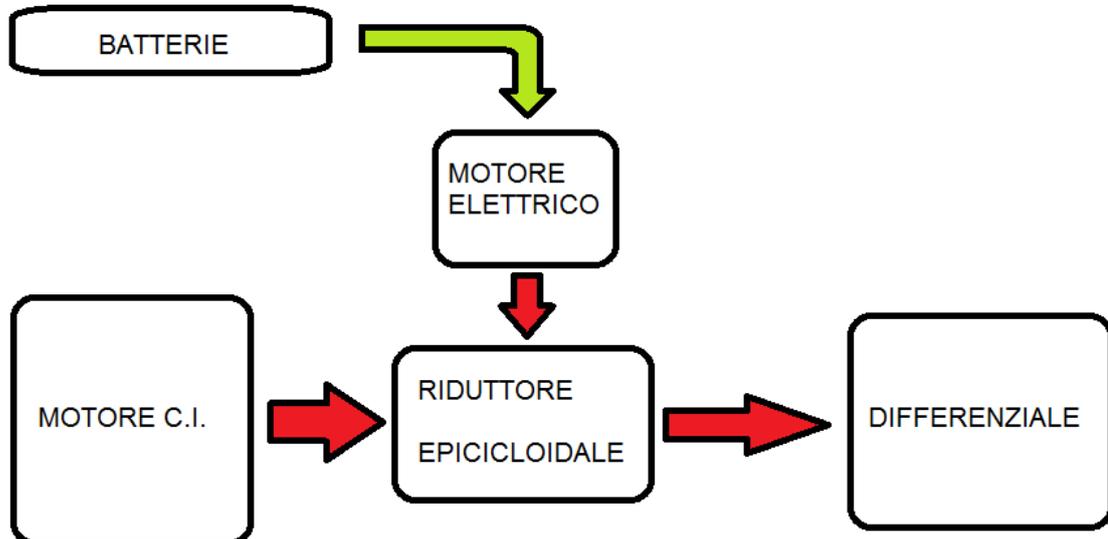
Questa modalità interviene quando si effettua il “Kick down”, cioè quando si affonda il pedale per effettuare un sorpasso o per ottenere un'accelerazione bruciante.

Il funzionamento riguarda sia la gestione del regime di funzionamento che la gestione delle fonti di alimentazione.

L'alimentazione del motore elettrico in particolare, avviene solo per mezzo delle batterie, lasciando il motore termico “libero di sfogare tutta la potenza”.

In aggiunta si seleziona il regime di massima potenza del motore termico e tramite la regolazione V/F costante si imposta il motore elettrico in modo da ottenere la potenza massima al regime necessario.

In questo modo il veicolo eroga costantemente tutti i 130 Cv installati, sommando la potenza massima del motore termico alla potenza massima del motore elettrico.



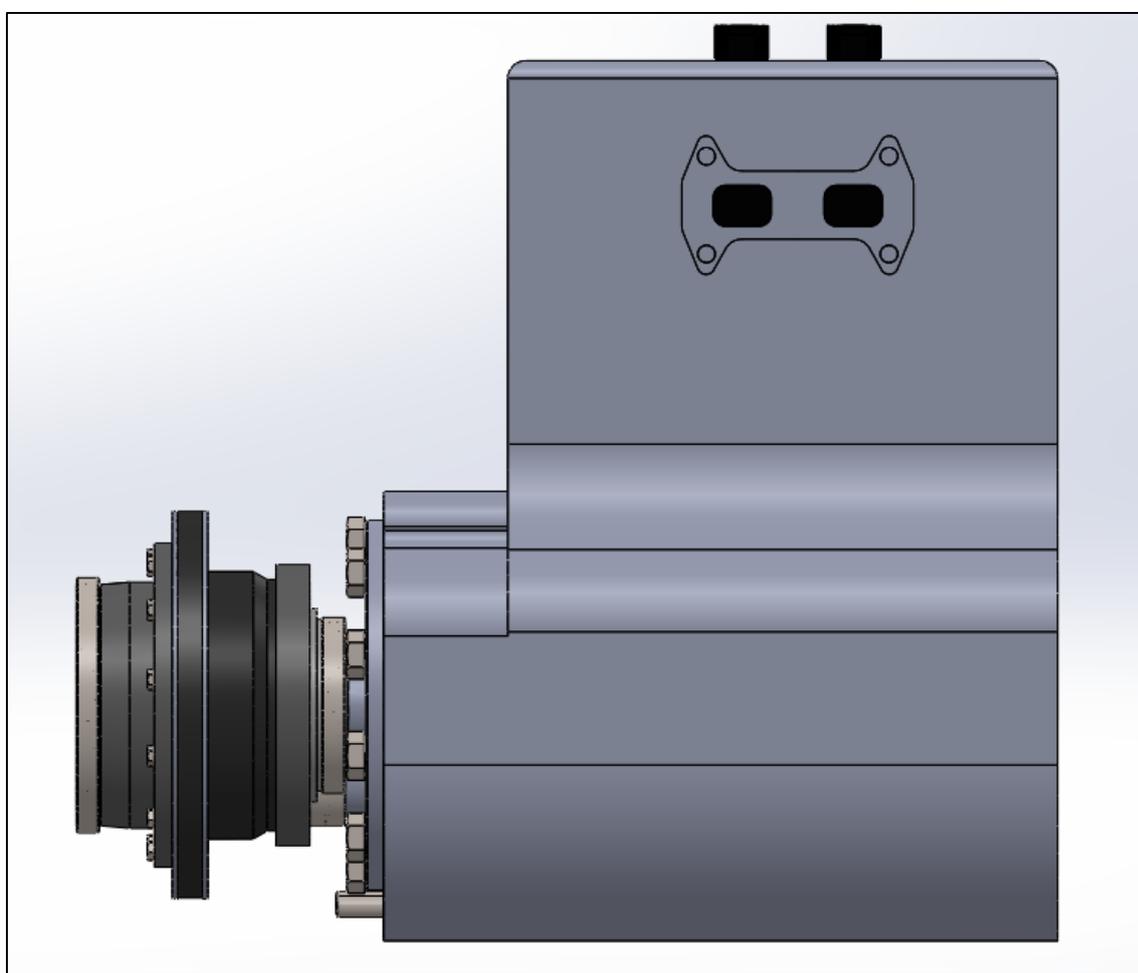
Modalità push to pass

In questo modo sono state ottenute le prestazioni precedentemente dichiarate.

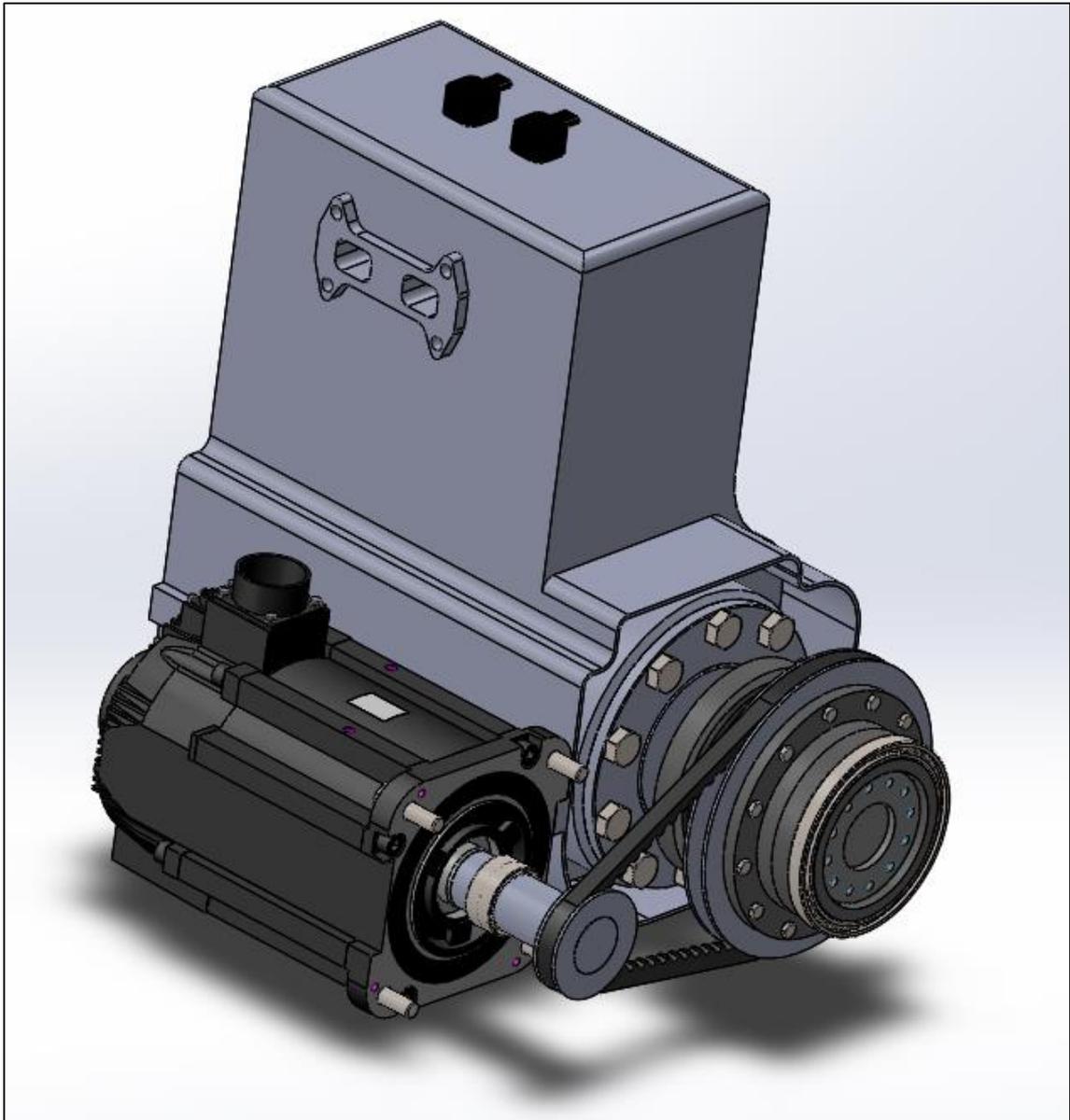
Ovviamente questa modalità non può essere mantenuta per molto tempo, poiché ovviamente le batterie si scaricano e il motore elettrico si surriscalda.

A batterie completamente cariche si tratta di un tempo non inferiore ai 5 minuti, un tempo molto elevato se confrontato con le alternative disponibili sul mercato.

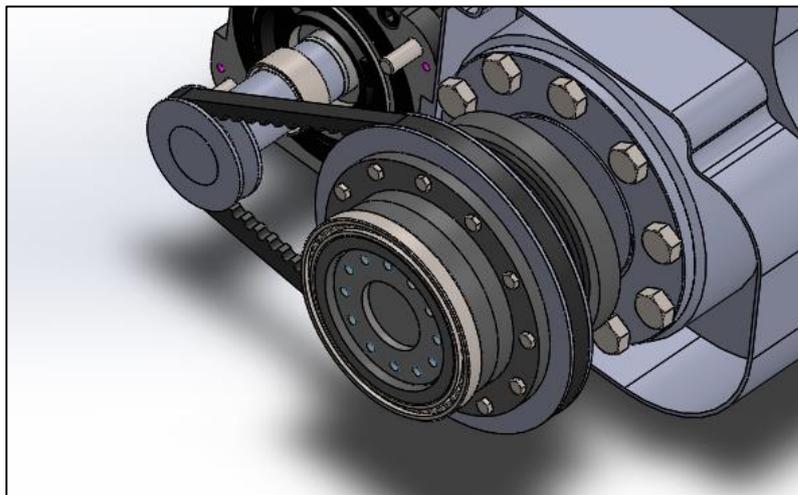
RENDERING E VISTA ESPLOSA



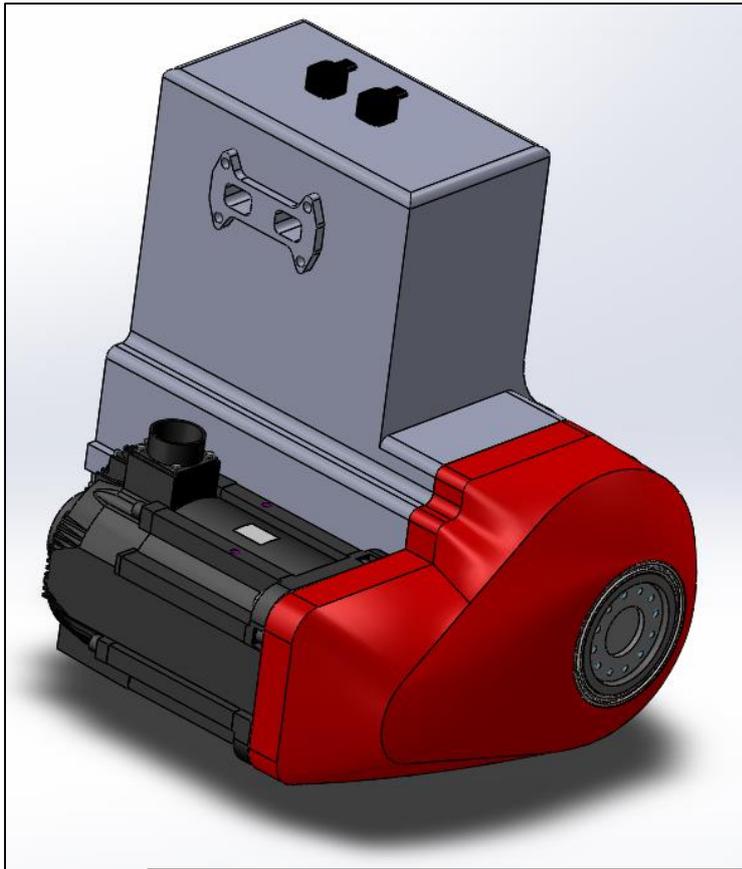
*Nella vista laterale risalta la dimensione estremamente ridotta del cambio.
Solo 55Cm di lunghezza considerando motore e cambio.*



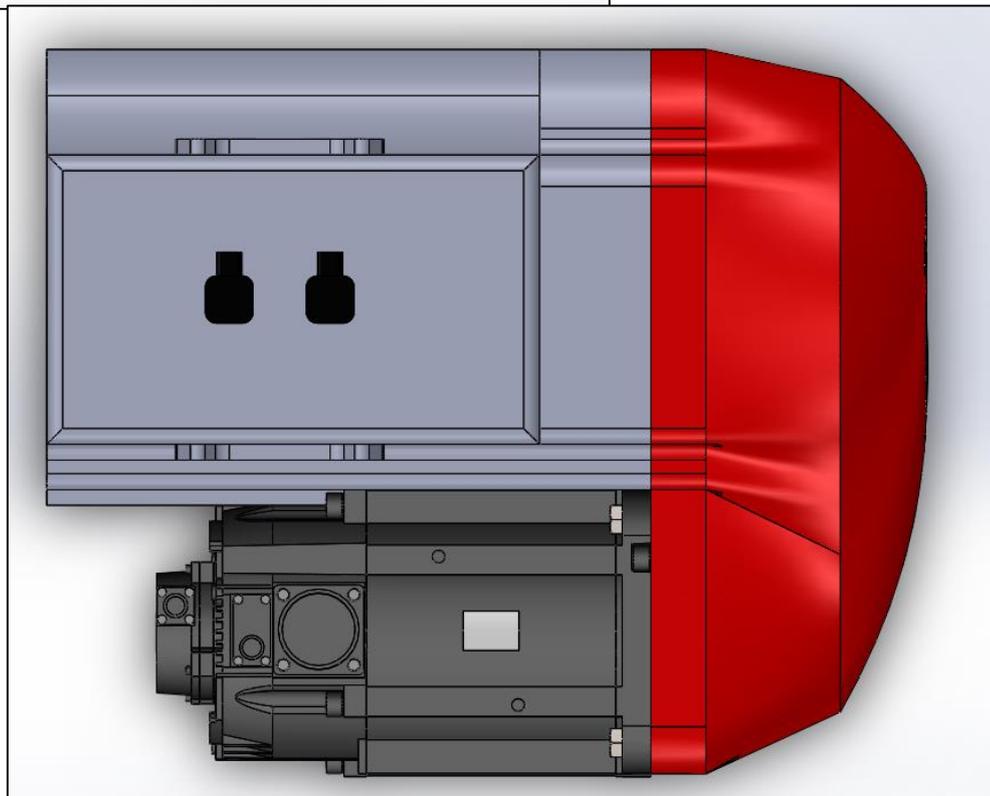
Vista trimetrica del gruppo motore termico, motore elettrico e riduttore.



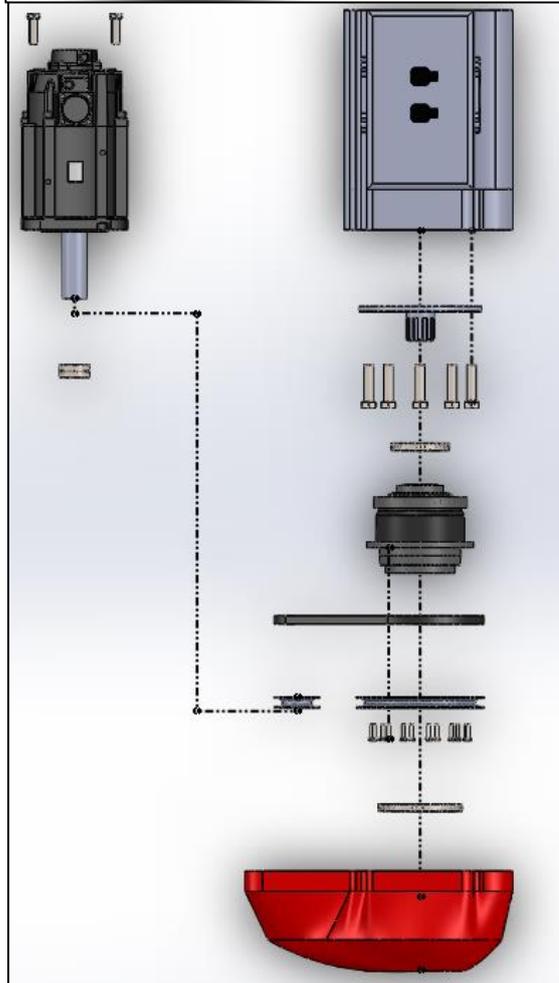
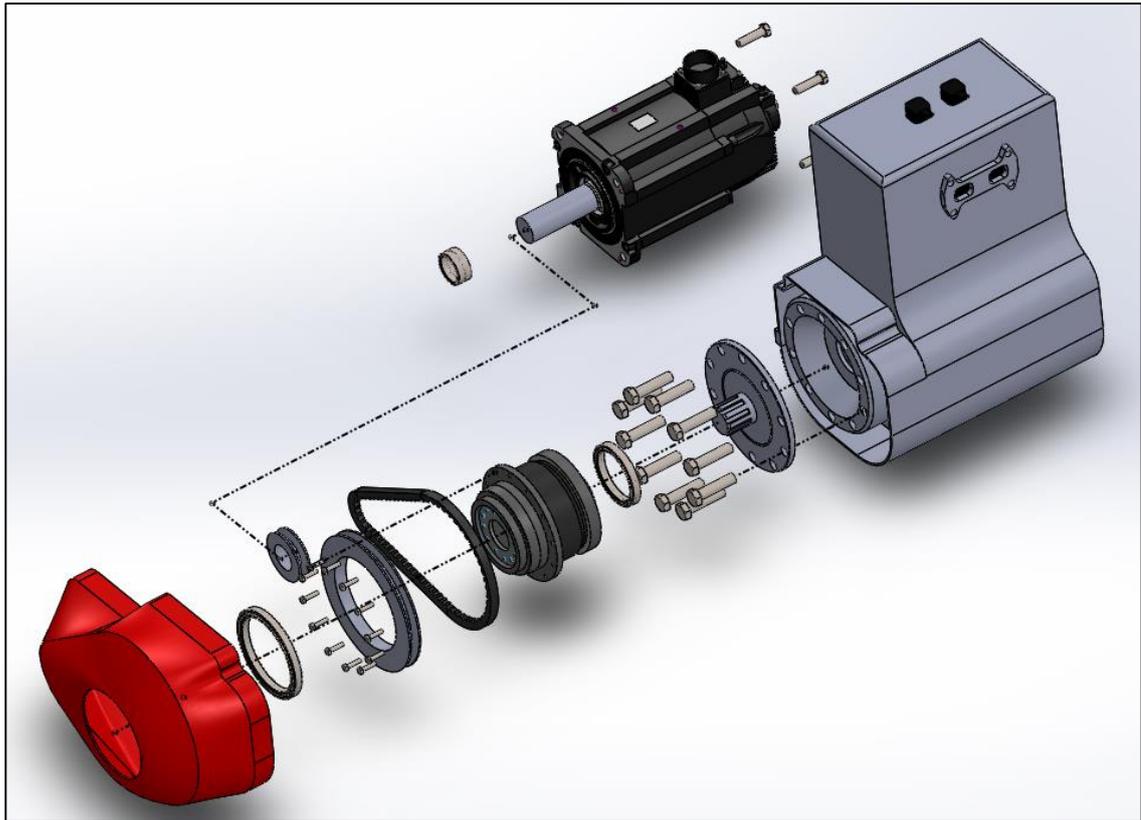
Dettaglio riduttore.



Vista trimetrica del gruppo con carter di supporto (in rosso).



Vista superiore.



L'immagine superiore riporta la vista esplosa isometrica. Si nota l'assenza della frizione.

È possibile grazie alla capacità del riduttore epicicloidale di rotazione folle.

A sinistra invece la vista esplosa in pianta evidenzia la semplicità costruttiva e il numero limitato di componenti.

Conclusioni

L'ottimizzazione e lo studio, in un certo senso di fattibilità, del modello di trasmissione a infiniti rapporti ha dato un esito positivo.

In particolare analizzando i dati spiccano i valori prestazionali ottenuti.

L'utilizzo del cambio CVT consente riduzione di consumi, emissioni, e massa del veicolo.

Effettuando una rapida valutazione per quanto riguarda la massa infatti, si ottiene una riduzione di circa 60 Kg.

Non si deve trascurare che il peso è stato ridotto pur installando sistemi di recupero energetico.

Si potrebbe ridurre ancor più il peso eliminando il generatore e installando ulteriori batterie. In questo modo però interviene una problematica di autonomia della vettura che va oltre lo studio della trasmissione.

Trascurando la riduzione di peso ottenuta il veicolo effettua l'accelerazione da 0 a 100 Km/h in 8 secondi. Non si tratta di un valore estremo ma assume importanza se confrontato con veicoli dotati dello stesso motore dell'Astura o di motori più potenti.

Il motore Twinair 105 Cv utilizzato per l'Astura è il propulsore installato su Fiat 500 L. Questa vettura pesa 1335 Kg e impiega ben 12,3 secondi per effettuare l'accelerazione 0-100 Km/h.

Audi TT 1.8 turbo 160 Cv, dal peso di 1240 Kg, ferma il cronometro a 7,2 secondi, per la stessa accelerazione.

Per concludere, un veicolo dotato del motore precedentemente installato sull'Astura.

Alfa Romeo Giulietta 2000 MJT 170 Cv con cambio robotizzato a doppia frizione TCT impiega 7,9 secondi per l'accelerazione 0-100.

Il peso di questa vettura è 1320 Kg, ben 205 Kg in meno dell'Astura.

Parallelamente a queste prestazioni si possono ottenere riduzioni dei consumi sensazionali, utilizzando il motore Twinair al regime di coppia massima.

Bibliografia

S. Bissoli, *Studio ed ottimizzazione di una portiera automobilistica per diversamente abili*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, relatore Prof. Ing. L. Piancastelli, Università degli studi di Bologna, A.a. 2006/2007.

L. Ercolani, *Studio e design di un'automobile con sistemi integrati per persone diversamente abili*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, relatore Prof. Ing. L. Piancastelli, Università degli studi di Bologna, A.a. 2006/2007.

A. Arfelli, *Studio e dimensionamento della meccanica di trazione anteriore della vettura Astura*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, relatore Prof. Ing. L. Piancastelli, Università degli studi di Bologna, A.a 2003/2004.

Dispense di “*Meccanica degli azionamenti*” del professor Troncosi Marco.

Dispense di “*Azionamenti elettrici*” del professor Tani Angelo.

E. Funaioli, A. Maggiore, U. Meneghetti, *Lezioni di Meccanica Applicata alle Macchine – Seconda parte: Elementi di Meccanica degli Azionamenti*, Patron, Bologna, 2009.

Software utilizzati

SolidWorks 2013

Microsoft Word 2013

Microsoft Excel 2013

Microsoft Power Poin 2013

Matlab 2013a

Ringraziamenti

Un ringraziamento speciale al professor ingegner

Piancastelli Luca.

*La dedica dell'esposto va alla famiglia e a tutti coloro che mi
hanno sostenuto durante il percorso di studi e la redazione della
tesi di laurea...*

...a Pierangelo, Lidia, Marco, Giorgia, Diana e Francesca.