



FEDERAZIONE NAZIONALE IMPRESE
ELETTROTECNICHE ED ELETTRONICHE

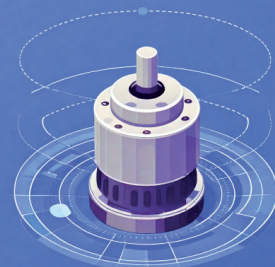
ANIE
AUTOMAZIONE

White Paper

RIDUTTORI INDUSTRIALI A SUPPORTO DELLA TRANSIZIONE 5.0

A cura del Gruppo Riduttori di ANIE Automazione

Maggio 2025



INTRODUZIONE

ANIE Automazione

Ad ANIE Automazione aderiscono le imprese, piccole medie e grandi, produttrici di beni e di servizi operanti nel campo dell'automazione dell'industria manifatturiera, di processo e delle reti di pubblica utilità. ANIE Automazione è una delle 14 Associazioni di settore di ANIE Federazione Nazionale delle Imprese Elettrotecniche ed Elettroniche, aderente a Confindustria.

Le oltre 100 Aziende associate ad ANIE Automazione rappresentano un settore che in Italia realizza un fatturato aggregato di circa 8 miliardi di euro. Si tratta di un network di imprese impegnate a sostenere e promuovere l'eccellenza tecnologica del comparto, avvalendosi del lavoro di un'organizzazione consolidata che offre ai propri Soci competenza, professionalità, formazione e supporto non solo nello specifico settore di riferimento, ma anche sui nuovi mercati dell'industria delle tecnologie.

Il Gruppo Meccatronica

I riduttori di velocità sono dei dispositivi facenti parte della trasmissione di potenza, la cui funzione è quella di trasferire potenza da un sistema ad un altro attraverso una catena cinematica. In particolare, i riduttori riducono la velocità di movimento della macchina alla quale sono connessi per adattarla alle esigenze di funzionamento.

Al Gruppo Riduttori aderiscono le principali aziende produttrici di motoriduttori, riduttori industriali e riduttori di precisione. L'attività principale del Gruppo Riduttori consiste nell'analisi statistica e nel monitoraggio del mercato dei riduttori. Punto di forte interesse e sul quale vengono sviluppate diverse attività riguarda lo sviluppo di progetti per la divulgazione della conoscenza delle tecnologie e per la promozione delle stesse sul mercato, con particolare riguardo ai produttori di macchine automatiche.

Gli obiettivi del White Paper

Nell'ambito dell'Automazione industriale i riduttori giocano un ruolo fondamentale nella transizione verso l'Industria 5.0, garantendo maggiore efficienza, sostenibilità, affidabilità e personalizzazione, elementi chiave per la creazione di un sistema produttivo intelligente e altamente evoluto.

Il White Paper del Gruppo Riduttori di ANIE Automazione intende essere uno strumento di approfondimento tecnologico per gli studenti che seguono percorsi scolastici o accademici a indirizzo automazione industriale, per chi intende intraprendere un percorso lavorativo in questo ambito o per gli operatori del settore interessati ad avere una panoramica completa dei prodotti disponibili sul mercato.



**SCOPRI LE AZIENDE
DEL GRUPPO**



INDICE

1. La funzione del riduttore	3
1.1 Principio generale	3
1.2 I vantaggi: efficienza, precisione, influsso sul controllo dell'asse	4
1.3 La meccanica è 5.0?	5
2. I principi di funzionamento	6
2.1 Ingranaggi cilindrici	6
2.2 Ingranaggi conici	8
2.3 Coppie ipoidi	10
2.4 Vite senza fine	11
2.5 Epicicloidale	13
2.6 Armonico	14
2.7 Cicloide	15
2.8 Principi ibridi	16
3. Nozioni costruttive	17
3.1 Design di un riduttore	17
3.2 Coassiali / Ortogonali / Ad assi paralleli	18
4. Breve guida alla scelta	19
4.1 Quale riduttore per quale utilizzo	19
4.2 I motoriduttori	19
4.3 Integrazione in macchina	20
5. Normative di riferimento	23
6. Trend di mercato	24
6.1 Panoramica del mercato italiano	24
6.2 Trend tecnologici	25

1. LA FUNZIONE DEL RIDUTTORE

1.1 Principio generale

Perché ridurre? La parola suggerisce il contenimento, la declinazione in chiave minore in quanto ciò a cui si fa implicitamente riferimento è la velocità di rotazione o di movimento di un generico organo meccanico. Al di là di considerazioni etimologiche il ruolo che il riduttore ricopre nel treno di trasmissione è tutt'altro che di minore rilevanza.

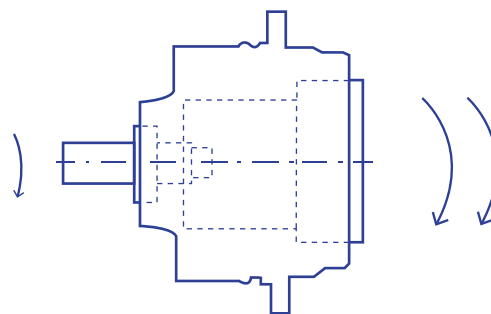
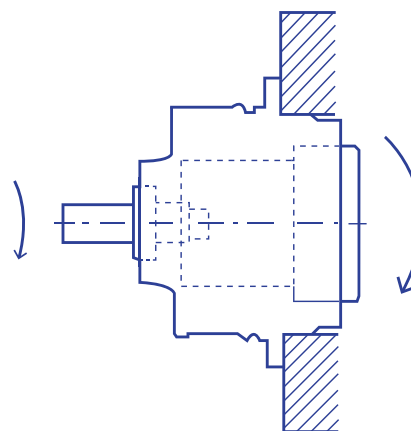
Se la velocità si abbassa al contempo la coppia fisica trasmessa viene moltiplicata, vengono ridotti elementi di difficile gestione, come l'inerzia del carico, e migliorate prestazioni chiave come la controllabilità. Da un punto di vista pratico ciò si rispecchia nel poter alleggerire il carico sul motore, così come scalando i rapporti della bici si alleggerisce lo sforzo richiesto sui pedali, e quindi poter utilizzare motori elettrici di dimensioni inferiori con caratteristiche di coppia e velocità meno stringenti. Soprattutto in tempi in cui i motori erano molto meno flessibili di oggi, ciò era di fondamentale importanza.

I vantaggi introdotti dal riduttore non sono ovviamente gratuiti: si ottengono a fronte dell'introduzione di un componente in più, che ha una massa e una dimensione proprie, un gioco e/o una cedevolezza e non ultimo un costo di cui bisogna tener conto nel design della trasmissione.

In generale i riduttori hanno un rapporto di riduzione fisso, in quanto la loro configurazione non prevede di intervenire sulla cinematica interna in modo attivo, altrimenti si parlerebbe di "cambi", e le interfacce di ingresso e di uscita vengono anche denominate, rispettivamente, albero veloce e albero lento.

Quest'ultima denominazione è assolutamente chiara anche nei casi in cui si utilizza il riduttore all'incontrario, ovvero in moltiplica, condizione in cui ingresso e uscita si scambiano.

Come avviene la riduzione della velocità di rotazione verrà esaminato nel prosieguo ma si tenga presente che è possibile utilizzare i riduttori coassiali, ovvero che hanno alberi di ingresso e uscita coassiali, anche come differenziali tramite messa in rotazione del corpo, o carcassa del riduttore stesso.



1.2 I vantaggi: efficienza, precisione, influsso sul controllo dell'asse

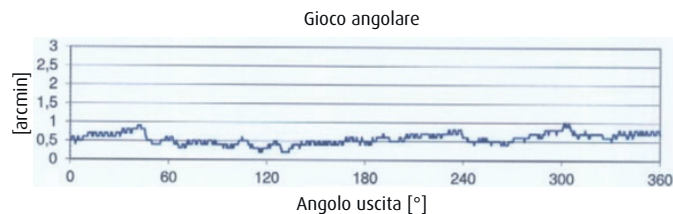
Il riduttore è un elemento passivo, nel senso che solitamente non necessita di alimentazione e trasforma il moto angolare che riceve tramite strutture meccaniche, come ad esempio ingranaggi, corone o altro, in un moto angolare più lento. La trasformazione può avvenire in modo più o meno efficiente a seconda della velocità di funzionamento, del principio di riduzione e delle condizioni ambientali in cui ci si trova. Tipicamente l'energia perduta in tale trasformazione, in gran parte dovuta ad attriti, viene smaltita sotto forma di calore da dissipare. Quando la dissipazione fosse importante se ne dovrà tenere conto realizzando opportune strutture dissipative come corpi radianti o collegamenti ad opportuni impianti di raffreddamento a liquido.

Dal momento che il riduttore lavora con elementi meccanici, la precisione all'uscita dello stesso è alterata dalle caratteristiche di tali elementi. In particolare la precisione di posizionamento è influenzata dal gioco e dalla cedevolezza dei componenti interposti tra ingresso e uscita. L'errore introdotto dal riduttore è composto quindi da:

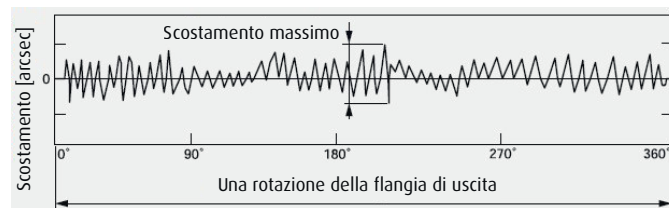
$$\varepsilon = j + T_{app} * C_t$$

Dove j è il gioco angolare del riduttore, T_{app} è la coppia dell'applicazione e C_t la rigidità torsionale del riduttore. Tutte queste grandezze devono essere riferite allo stesso lato del riduttore, o ingresso o uscita.

Il contributo del gioco e della rigidità possono essere simili o molto diversi, ancora una volta dipende da tipo, dimensioni e condizioni operative.



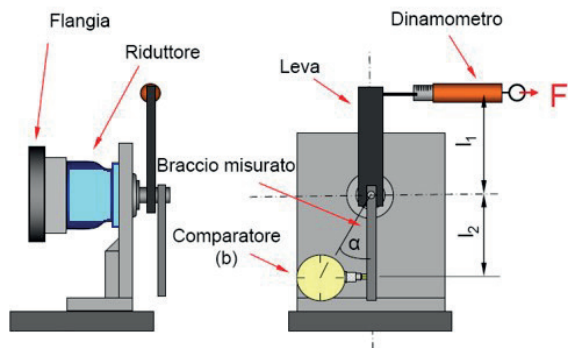
Un ulteriore contributo è dato dalla deviazione di sincronismo (true running) che caratterizza tutti i riduttori e che indica lo scostamento dell'angolo di rotazione effettivo del riduttore dal valore teorico. Tale contributo, solitamente nell'ordine dei secondi di arco (arcsec), è dovuto alle tolleranze di lavorazione, alle non idealità costruttive ad effetti termici e dinamici del riduttore.



Ai fini del controllo elettronico dell'asse l'errore, di qualsiasi origine esso sia, è equiparabile a un disturbo, intrinsecamente non lineare, che può essere compensato tramite regolazioni sull'azionamento stesso e opportuni filtri. L'effetto sull'azionamento, all'aumentare della rigidità e/o del gioco del riduttore, è quello di creare un ritardo nel controllo dell'asse stesso.

Allo stesso tempo tuttavia, il riduttore ha l'effetto di abbattere l'inerzia del carico vista dal motore, in particolare la riduce in misura inversamente proporzionale al quadrato del rapporto di riduzione e ciò consente di avere un sistema con rapporti inerziali più vantaggiosi, ovvero più bassi, a tutto vantaggio di una maggiore controllabilità del sistema.

Esempio di setup per la misurazione del gioco angolare:



creazione di modelli virtuali, o gemelli digitali (digital twin), che possono essere utilizzati per simulare in modo molto preciso il comportamento degli stessi ancora prima di realizzare un sistema prototipo. Il monitoraggio remoto invece può essere realizzato in modo abbastanza semplice tramite integrazione di sensori, quali termocoppie, accelerometri, strain gauge, o sensori più raffinati, che in modo diretto o indiretto consentono di controllare e intervenire sull'impianto in maniera smart.

Su queste basi è possibile mirare in modo preciso all'ottimizzazione energetica del riduttore in quanto si conoscono molto meglio le condizioni operative, le condizioni di maggiore e minore efficienza e l'utilizzo tipico che ne viene fatto. Per ridurre la dissipazione energetica si può quindi intervenire o sul punto di lavoro del riduttore stesso, oppure sulla sua struttura e in particolare sui materiali e componenti utilizzati in quanto, come già accennato, la primaria fonte di inefficienza nel riduttore sono gli attriti.

1.3 La meccanica è 5.0 ?

Nell'evoluzione delle tecnologie industriali siamo arrivati alla versione 5.0, ma la meccanica, a volte basata su principi di funzionamento maturi di qualche secolo, si può considerare tale?

I caposaldi del 5.0 mutuano quelli contenuti nella definizione di industria 4.0 che prevedeva, in estrema sintesi, una digitalizzazione della mecatronica, uniti alla sostenibilità nell'utilizzo delle risorse scarse ovvero all'efficienza energetica. La digitalizzazione degli organi meccanici si basa sulla loro interconnessione, e questo tipicamente avviene tramite l'utilizzo di sensori bordo riduttore e anche sulla

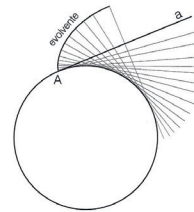
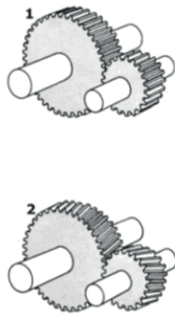
2. I PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

2.1 Ingranaggi cilindrici

Con ingranaggio si intende un meccanismo costituito dall'insieme di una coppia di ruote dentate, una definita movente (in un riduttore necessariamente la ruota dentata di diametro minore, definita pignone) e l'altra cedente (di diametro maggiore e definita ruota condotta). Lo scopo del meccanismo normalmente è di ridurre la velocità angolare dell'albero in ingresso e moltiplicare in egual misura (a meno del rendimento) il momento torcente sull'albero in uscita. La sua origine nella storia dell'uomo risale a tempi antichissimi, probabilmente attorno al II secolo a.C., contemporaneamente in diverse culture.

L'ingranaggio è definito cilindrico se le due ruote dentate hanno forma cilindrica e trasmettono il moto tra assi paralleli. Essendo utilizzato nei riduttori paralleli e coassiali, ma anche come stadio (normalmente) di uscita in riduttori ortogonali o pre-stadio (normalmente) in ingresso in riduttori a vite o di qualunque altro tipo, è di gran lunga il più diffuso, economico e semplice ingranaggio utilizzato a livello industriale, non solo nel campo dei riduttori.

Può presentare i denti diritti, cioè paralleli all'asse di rotazione (fig.1) o elicoidali, cioè inclinati di 15° - 25° gradi rispetto all'asse di rotazione (fig.2): poiché nei riduttori si utilizzano quasi sempre ingranaggi cilindrici elicoidali per motivi quali maggiore silenziosità, maggior capacità di carico e minori vibrazioni (i denti infatti si impegnano in modo progressivo e non di colpo uno a uno) si parlerà nel proseguo esclusivamente di ingranaggi cilindrici elicoidali impiegati nei riduttori.



La forma dei denti è sempre ad evolvente, il che significa che in una sezione normale al dente, il profilo che presentano è una curva detta evolvente, che è la curva che descrive un punto di una retta quando la retta rotola senza strisciare su una circonferenza. Questo profilo permette ai denti di impegnarsi tra di loro essenzialmente rotolando sulle loro superfici (non è del tutto vero, per lo meno non su tutto il profilo, ma per gli scopi di questa trattazione possiamo considerarlo vero), quindi senza che avvenga strisciamento, cosa che provocherebbe usura, perdita di rendimento, generazione calore e riduzione della vita dell'ingranaggio.

Le caratteristiche geometriche essenziali di un ingranaggio cilindrico sono riassunte di seguito (per semplicità utilizzeremo le definizioni del "Trattato teorico e pratico degli ingranaggi - G. Henriot"), dove con il pedice 1 ci si riferisce al pignone, con il pedice 2 alla ruota:

- z_1 , z_2 rispettivamente numero di denti del pignone e della ruota
- n_1 , n_2 velocità angolare (min^{-1}) degli alberi su cui insistono pignone e ruota
- d_1 , d_2 diametri primitivi, cioè il diametro teorico che avrebbero pignone e ruota se toccandosi rotolassero senza strisciare come ruote di frizione
- u rapporto di ingranaggio: è definito dal rapporto dei denti z_2/z_1 , o analogamente d_2/d_1 o n_2/n_1
- m_n modulo normale (il rapporto tra d/z , che in pratica identifica lo spessore del dente sul diametro primitivo
- angolo d'elica cioè l'inclinazione dei denti rispetto all'asse di rotazione
- a interasse
- b larghezza di fascia



Di tutte queste definizioni, quella veramente fondamentale è l'ultima: l'interasse "a", cioè la distanza tra gli assi di rotazione di pignone e ruota, di fatto identifica la "cilindrata" dell'ingranaggio, cioè analogamente alla cilindrata di un motore di un'automobile, esso qualifica al meglio quanto è "grande" e quanta coppia può trasmettere un ingranaggio (a parità di altre geometrie, evidentemente).

Poiché nel mondo industriale il proporzionamento dell'ingranaggio cilindrico ha ormai raggiunto una certa standardizzazione dovuta al raggiungimento di un buon rapporto costo/prestazione, questo genera un risvolto singolare. Infatti la resistenza di un ingranaggio dipende da quanto materiale si impiega nel costruirlo, e quindi da quanto volume di materiale è utilizzato, e quindi la prestazione di un ingranaggio dipende (in linea generale) dal cubo della grandezza lineare dell'interasse. Questo ha risvolti sorprendenti: un ingranaggio con interasse maggiore del 25% rispetto ad un altro, permette di trasmettere il doppio del momento torcente poiché $1,25$ al cubo fa 2 .

Un ingranaggio che debba trasmettere un dato momento torcente, (ovvero una data F_t tra i denti, assimilabili a mensole a sbalzo) deve essere proporzionato in modo che:

le superfici a contatto che si trasmettono la forza F_t siano tali da non riceverne un danno (resistenza a pressione superficiale).

la base del dente che trasmette all'albero il momento dato dalla F_t sia sufficientemente robusta per non rompersi a flessione (resistenza a flessione).

Quindi per svolgere compiutamente il loro lavoro gli ingranaggi cilindrici devono essere dimensionati secondo due criteri: per resistere ai fenomeni di pitting (cioè a pressione superficiale) oppure a rottura piede dente (fenomeni di flessione).

Pitting

Questo deterioramento superficiale si manifesta mediante piccoli fori o vaiolature sulla superficie delle dentature. Tale fenomeno è influenzato dalla pressione superficiale di Hertz che se troppo elevata provoca uno strisciamento molecolare tanto intenso ed un surriscaldamento locale sufficiente a causare la disgregazione del materiale sulla superficie.

È sempre un danno a fatica, cioè che compare nel tempo, dopo milioni di cicli.

Rottura al piede dente

Può essere una avaria che emerge immediatamente a fronte di un forte sovraccarico o viceversa dopo molto tempo, come fenomeno nel dominio della resistenza a fatica, anche sotto carichi moderati.

La prima presenta la superficie di rottura per lo più ruvida, di aspetto quasi vitreo, sull'intera sezione trasversale del piede dente; la seconda viceversa presenta una superficie di rottura differenziata: una parte costituita da superficie di rottura a fatica a grana fine e una seconda da una superficie di rottura residua da sovraccarico.

La rottura dei denti provoca l'avarìa immediata e il fermo del riduttore. Soltanto nel caso che si scheggi una piccola parte di uno o di più denti, l'esercizio può continuare con carico ridotto. Ma le schegge di metallo duro in sospensione nell'olio andranno comunque nei cuscinetti generando poi una progressiva distruzione di tutto il riduttore. Non solo l'ingranaggio va sostituito, ma l'intero riduttore.

In un ingranaggio è solitamente il pignone che arriva prima al limite del pitting, in quanto i suoi denti fanno più cicli rispetto a quelli della ruota, mentre è la ruota che cede per prima a rottura a piede dente essendo (per motivi costruttivi che qui non si esaminano) i suoi denti più "fini" rispetto a quelli del pignone. Da qui deriva l'impiego di materiali

diversi: fermo restando che per riduttori di concezione moderna si utilizza quasi esclusivamente acciaio da cementazione, si impiega acciaio più nobile per il pignone (nei riduttori di qualità è largamente impiegato il 18 NiCrMo5), e acciaio da cementazione un poco più economico per la ruota (è largamente impiegato il 20 MnCr5).

Acciaio da cementazione significa che il materiale costituente la ruota dentata, dopo una prima fase di dentatura è sottoposto ad un trattamento termico di indurimento superficiale (cementazione, cioè diffusione di carbonio negli strati superficiali del materiale ad elevata temperatura, attorno ai 900°C) che permette di raggiungere durezza superficiali attorno a 59-61 HRC, cosa che permette elevata resistenza a pitting mantenendo nel contempo una significativa tenacità a cuore, indispensabile per la resistenza a flessione al piede dente.

Grande rilevanza ha, a livello progettuale, la scelta del rapporto di ogni ingranaggio costituente un riduttore, che può presentare da uno a (mediamente) cinque stadi di riduzione. Poiché all'aumentare del rapporto (per lo stesso ingranaggio di interasse dato) diminuisce il modulo della dentatura (e cioè lo spessore del dente) è evidente che i rapporti troppo elevati portano ad un modulo così basso che la prestazione ne risulta così mortificata da rendere antieconomico la sua costruzione. La soluzione più economica è aggiungere un altro stadio di riduzione al riduttore, ripartendo il rapporto complessivo desiderato su un numero congruo di stadi (ingranaggi) di riduzione. Ogni costruttore di riduttori ha le sue politiche di progetto, ma mediamente nessuno propone ingranaggi cilindrici elicoidali con rapporti superiori a 7- 8 per singolo stadio.

Tantissime altre considerazioni si possono fare a proposito delle scelte progettuali necessarie per progettare un

riduttore che contiene ingranaggi cilindrici (elicoidali), ma esulano tutte dallo scopo di questa trattazione. Qui per semplicità si farà giusto un accenno al rendimento di un ingranaggio cilindrico elicoidale, essendo in questo periodo storico un argomento particolarmente sentito.

Il calcolo o la misura del rendimento di un ingranaggio (qualunque esso sia) pone seri problemi teorici e pratici: basti qui ricordare che il rendimento è variabile in funzione di molti parametri, alcuni controllabili e altri no come: tipologia della dentatura (varia tra l'altro con l'angolo di spirale), tipo di lubrificazione adottata (normalmente è a sbattimento, con le ruote dentate parzialmente immerse in modo variabile nel bagno d'olio), temperatura dell'olio lubrificante e quindi sua viscosità, tipologia dei cuscinetti che supportano l'albero, entità del carico e, non ultimo, la velocità (tant'è che paradossalmente se si applica una coppia in ingresso minore di quella necessaria ad iniziare la rotazione, il rendimento diventa semplicemente zero, cosa ben poco proponibile).

A livello industriale si accetta come valore di rendimento di un ingranaggio cilindrico a denti elicoidali facente parte di un riduttore lubrificato a sbattimento e che opera vicino al carico nominale a velocità nominale un prudenziale valore del 98%, essendo probabilmente il valore reale leggermente più alto.

2.2 Ingranaggi conici

Per trasmettere il moto tra assi incidenti è necessario un ingranaggio conico. Le superfici primitive di questo ingranaggio sono due coni che rotolano uno sull'altro senza strisciare lungo la generatrice comune, mentre erano due cilindri nel caso degli ingranaggi cilindrici esaminati nel paragrafo precedente.

Per semplicità, d'ora in avanti si parlerà solamente di ingranaggi conici ad assi ortogonali, poiché l'angolo di 90° è sempre quello necessario per costruire un riduttore ortogonale. Se gli assi ortogonali sono incidenti, cioè si incontrano in un punto (vertice dei coni primitivi), l'ingranaggio è "normale", se gli assi ortogonali sono sghembi, cioè non si incontrano in alcun punto, allora l'ingranaggio si definisce "ipoide" (si veda a tal proposito il paragrafo dedicato in questa stessa pubblicazione).

Per l'ingranaggio conico valgono tutte le considerazioni fatte finora per l'ingranaggio cilindrico, a cui si rimanda per evitare inutili doppioni. Qui nel proseguo si faranno notare solo le differenze peculiari che identificano questo ingranaggio.

A livello di calcolo delle prestazioni si tende a ricondurre l'ingranaggio conico ad un equivalente ingranaggio cilindrico, per poi effettuare la calcolazione con le stesse formule e considerazioni: anche in questo caso il rapporto massimo ottenibile è determinato dalla prestazione e dal pignone che diventa troppo piccolo.

A livello industriale sono due le geometrie della dentatura che vengono utilizzate con maggior frequenza: esse sono facilmente riconoscibili per l'andamento dell'altezza dente lungo il cono primitivo.

Una, presenta l'altezza del dente costante (dentatura KLINGELNBERG), l'altra, presenta l'altezza del dente decrescente lungo il cono primitivo (dentatura GLEASON). Questo secondo tipo è maggiormente diffuso per motivi storici e per motivi di costo: con il piano Marshall dopo la Seconda guerra mondiale tantissime macchine utensili (dentatrici) Gleason di fabbricazione americana sono state portate in Italia e quindi il profilo dominante presente a

partire dal secondo dopoguerra è divenuto il Gleason, che ha dalla sua anche vantaggi non indifferenti di semplicità e costo. Viene utilizzato dappertutto, compreso le macchine da cucire, per dare un esempio della larghissima diffusione che ha avuto.

La dentatura KLINGELBERG, di ideazione tedesca, è per certi versi più performante, ma è più costosa da realizzare, e con il tempo è rimasta relegata a settori dove la prestazione (a parità di dimensioni) ha il sopravvento sugli aspetti di costo.



In figura al lato un ingranaggio conico ad assi ortogonali incidenti: si notano gli assi di pignone e ruota che sono ortogonali e si intersecano. I denti sono ad altezza variabile sul cono, quindi la dentatura è spiroidale Gleason. I denti appaiono scuri ed opachi, poiché induriti mediante trattamento di cementazione e tempra e quindi successivamente rodati (lappati).

Nel mondo industriale, insieme all'ingranaggio conico, anche l'ingranaggio a vite è utilizzato per realizzare riduttori che presentino gli alberi di ingresso e di uscita ortogonali (si veda il paragrafo relativo in questa stessa pubblicazione), ma rispetto al vite, il conico presenta una complessità costruttiva maggiore e quindi anche un costo più elevato. In compenso presenta i vantaggi di un rendimento sensibilmente più elevato (molto vicino a quello degli ingranaggi cilindrici, attorno al 97-98%), una costanza di prestazione nel tempo e al variare delle condizioni operative, ed una aspettativa di vita molto più elevata, soprattutto a carichi elevati e continuativi. Di fatto per potenze elevate (in genere $> 11-15$ kW) e funzionamenti continui (per esempio nei settori pesanti) gli ingranaggi conici sono una scelta obbligata.

I materiali usati sono praticamente gli stessi impiegati nella costruzione degli ingranaggi cilindrici, a cui si rimanda. La costruzione, come detto, è però più complessa: infatti il taglio dei denti per motivi di costo e semplicità è effettuato scavando i vani tra due di essi, contigui, contemporaneamente, con un utensile che quindi genera tanto il profilo convesso di un dente quanto il profilo concavo dell'altro, il tutto su un cono sul quale il dente si avvolge con altezza variabile. Questo genera invariabilmente una certa quantità di errori che sono tollerati (se limitati) poiché riducono di poco la prestazione (a fronte di tempi molto più ridotti in produzione), ma inducono a volte rumorosità accentuate, fastidiose anche per applicazioni industriali. Altri errori sono indotti dal trattamento termico, che tende a deformare i denti con negativi effetti sul posizionamento delle impronte di contatto, per cui si rende necessaria una qualche operazione di finitura.

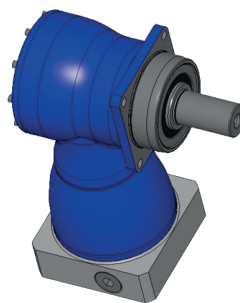
Una soluzione è la rettifica, come si fa sugli ingranaggi cilindrici, in modo da ricreare con una macchina utensile rigida e precisa i profili desiderati, asportando il sovrametallo che è stato appositamente lasciato; ma la rettifica degli ingranaggi conici è sensibilmente più complessa di quella dei cilindrici (per le stesse ragioni per cui è più difficile generare la dentatura, dove però gli errori di generazione del profilo non sono più accettabili), e non sempre viene effettuata. In sua sostituzione gli ingranaggi conici sono fatti brevemente rotolare insieme (pignone e ruota) su una macchina utensile specifica (lappatrice) in presenza di materiale abrasivo che contribuisce a consumare e ad adattare insieme i profili dei denti. Poiché ogni specifico pignone viene "sposato" ad una specifica ruota conica, l'ingranaggio ortogonale è sempre trattato a coppie, da cui deriva il nome comune di "coppie coniche".

L'ingranaggio conico ha inoltre una ulteriore peculiarità:

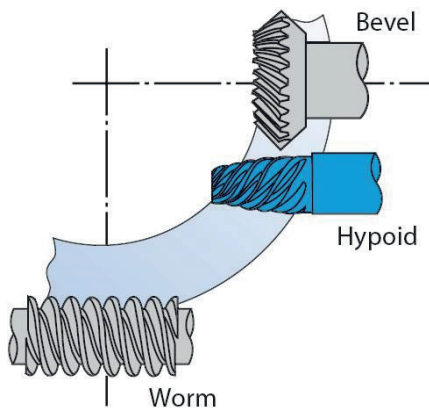
con semplici accortezze al montaggio è possibile regolare (entro certi limiti) il gioco della dentatura. Mentre in un ingranaggio cilindrico, infatti, il gioco tra i denti è esclusivamente funzione dello spessore dei denti e della distanza degli assi, che in un dato riduttore sono ovviamente ben definiti in sede di progetto e non variabili, in un ingranaggio conico, spostando in sede di montaggio il pignone un poco più dentro l'ingranamento (avvicinandolo al vertice del cono primitivo) si riduce il gioco tra i denti di pignone e ruota, realizzando un ingranaggio a "gioco ridotto". Ciò è estremamente utile nel caso di riduttori soggetti a inversioni del moto poiché si limitano urti e quindi sovraccarichi. L'effetto opposto si ottiene allontanando il pignone dal vertice del cono primitivo: il gioco aumenta, migliorando la lubrificazione e riducendo gli strisciamenti.

2.3 Coppie ipoidi

Questa tecnologia trova impiego nella realizzazione di riduttori ad assi ortogonali.

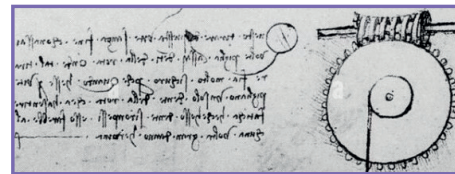


Si tratta di un'evoluzione della trasmissione ad ingranaggi conici, ed è caratterizzata da un disassamento tra la coppia di ruote che trasmette il moto. Nella figura sotto è rappresentato il concetto di disassamento, le coppie coniche hanno assi perfettamente allineati, tra ingresso e uscita, al contrario della tecnologia vite/corona, che è caratterizzata dalla presenza di un'altezza d'asse ben definita. La coppia ipoide si colloca tra le due tecnologie, cercando di migliorare ed ottimizzare gli aspetti limitanti, che caratterizzano le due tipologie di trasmissioni.



2.4 Vite senza fine

Questo tipo di riduttori appartiene alla famiglia di rotismi con cinematismo ad assi 'sghebbi' ed ortogonali fra loro, in cui il moto è trasmesso mediante una coppia vite - ruota elicoidale. È un sistema noto da centinaia d'anni, come riportato nell'immagine seguente tratta dagli scritti di Leonardo Da Vinci.



Vantaggi

- **Maggiore coppia trasmissibile.** Grazie al disassamento, il pignone può essere realizzato con un angolo di spirale maggiore. Di conseguenza c'è un aumento delle superfici a contatto, che permette di avere maggiore coppia trasmissibile. Indicativamente tra il 50% ed il 70% in più, rispetto ad una coppia di ingranaggi conici.
- **Efficienza.** La trasmissione garantisce livelli di efficienza elevati, tipicamente superiori al 90%. Il livello di efficienza della coppia ipocicloidale risulta però inferiore alla coppia conica, a causa dello strisciamento maggiore che si verifica sui fianchi dei denti, durante la rotazione. Il livello di efficienza decresce all'aumentare della quota relativa al disassamento.
- **Silenziosità di funzionamento.** Il design della dentatura permette una trasmissione del moto uniforme, e caratterizzata da un livello sonoro più basso, rispetto ad una coppia conica tradizionale.
- **Idoneità ad applicazioni con alberi cavi.** La corona conica, che ingrana sul pignone ipocicloidale presenta, normalmente, dimensioni generose. Questa caratteristica permette di sfruttare il diametro interno per passaggio di cavi o per fissaggio dell'asse lento, mediante calettatore.

Principio di funzionamento

Nei riduttori a vite senza fine, il movimento di rotazione dell'albero di ingresso viene trasmesso all'albero di uscita, con asse ortogonale, attraverso l'utilizzo di una vite senza fine e di una corona, entrambe a dentatura elicoidale.

La caratteristica principale di questo cinematismo è la capacità di ridurre fortemente la velocità di uscita rispetto all'ingresso con l'utilizzo di un solo stadio di riduzione, ovvero di un solo ingranamento.

La natura del contatto tra la vite e la corona avviene prevalentemente con strisciamento portando ad una forte dipendenza dell'efficienza dall'attiro tra le parti. Normalmente si utilizzano il bronzo per la corona e l'acciaio cementato per la vite proprio per contenere gli attriti e mantenere l'efficienza di trasmissione a valori accettabili.

Rapporti di riduzione raggiungibili. Nei riduttori a vite senza fine, il valore del rapporto di riduzione è definito dal numero di denti della corona e dal numero di principi con cui è realizzata la vite.

Tale rapporto è definito come segue:

$$i = n_1 / n_2 = z_2 / z_1$$

Dove:

z_1 , z_2 sono rispettivamente numero di principi della vite e di denti della ruota.

n_1 , n_2 sono le velocità angolari degli assi rispettivamente di vite e corona.

Considerando che possiamo avere viti anche ad un solo principio, questi riduttori offrono il vantaggio di una grande gamma di rapporti di riduzione nell'ambito di uno stesso interasse, e quindi di una unica cassa, andando a variare il numero di denti della corona e il numero di principi sulla vite. Questa grande flessibilità, in termini di riduzione di velocità che può spaziare da 1:4 a oltre 1:100, consente la personalizzazione per una ampia varietà di applicazioni.

Trasmissione di coppia e compattezza. Grazie all'ampio contatto tra i fianchi dente della vite senza fine con quelli della ruota elicoidale, il riduttore è in grado di trasmettere un momento torcente relativamente elevato in relazione alle dimensioni di vite e corona. Questa caratteristica rende il riduttore a vite senza fine ideale per applicazioni che richiedono la trasmissione di una coppia intermittente e con picchi di carico, riducendo il pericolo di danneggiamenti per deformazione permanente delle dentature.

Silenziosità. Oltre ad essere esteso, il contatto tra le dentature è suddiviso contemporaneamente tra più fianchi durante l'ingranamento. In questo modo le fasi di accesso e recesso tra i denti che sono a contatto tra loro avviene senza variazioni significative di rigidità. Ne consegue che questo tipo di riduttore è noto per la sua silenziosità funzionamento, riducendo al minimo la generazione di rumore durante la rotazione sotto carico.



Moto retrogrado. In generale buona parte dei rotismi ordinari permette la reversibilità del moto e quindi l'inversione del flusso di potenza dall'albero lento a quello veloce (funzionamento da moltiplicatore). Per il riduttore a vite senza fine, invece, con un rapporto di riduzione sufficientemente elevato, il movimento si può sviluppare in una sola direzione, rendendo impossibile il moto retrogrado. Questa caratteristica rende i riduttori a vite senza fine utili in applicazioni dove il movimento in una sola direzione è un requisito imprescindibile. In pratica, quando il rapporto di riduzione supera un certo valore, generalmente tra 30:1 e 60:1, consideriamo il moto retrogrado praticamente impossibile.

Limitazioni

Efficienza di trasmissione. Tuttavia, è importante considerare un aspetto chiave dei riduttori a vite senza fine: a causa dell'elevato strisciamento specifico tra le dentature di vite e corona, i valori di efficienza raggiungibili ne risentono fortemente e dipendono dal rapporto di riduzione.

Per questi riduttori c'è una relazione tra efficienza e irreversibilità, cioè l'impossibilità di moto retrogrado. Con valori di efficienza inferiori a circa il 50%, generalmente si ottiene l'irreversibilità del moto, nella trasmissione di potenza da asse veloce ad asse lento.

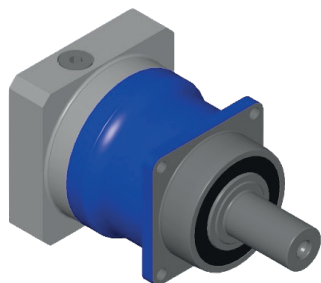
In conclusione, il riduttore a vite senza fine è un dispositivo meccanico versatile che consente di ridurre sensibilmente la velocità e trasmettere coppia in spazi relativamente contenuti. Offre un'efficienza di trasmissione ancora accettabile per molte applicazioni (in particolare quelle con un funzionamento discontinuo) con il vantaggio di un design compatto, economico e un funzionamento silenzioso.

Queste caratteristiche lo rendono adatto a un'ampia gamma di applicazioni industriali e di ingegneria.

2.5 Epicicloidale

Le origini del sistema epicicloidale

Il termine "epicicloidale" deriva dal moto epicicloidale degli ingranaggi all'interno del riduttore. Questo cinematismo, noto da secoli, ha trovato ampio utilizzo nell'industria moderna ed è ampiamente utilizzato in applicazioni di automazione industriale grazie alla sua compattezza, efficienza e precisione.



Principio di funzionamento

Il riduttore epicicloidale è costituito da quattro elementi principali:

- Un ingranaggio centrale (solare)
- I satelliti ingranano sul solare ed orbitano attorno ad esso
- Una corona dentata, con la quale ingranano simultaneamente i satelliti
- Un porta-satelliti, che ruota coassiale al solare, trascinato dai centri di rotazione dei satelliti

Nei riduttori epicicloidali comunemente usati in automazione industriale, il solare è di solito collegato all'albero di ingresso e quindi trascinato da un motore elettrico. A seconda della configurazione poi, il moto può essere trasmesso all'uscita tramite il porta-satelliti (che è la disposizione più comune nei riduttori di precisione) o attraverso la corona, ottenendo rapporti di riduzione

differenti con una trasmissione uniforme della coppia. Quando il moto è trasmesso dal porta-satelliti, la corona funge da elemento di collegamento al telaio della macchina, e viceversa.

Vantaggi

Compattezza e leggerezza. Grazie alla distribuzione dei carichi su più ingranamenti, i riduttori epicicloidali offrono un'elevata densità di coppia, risultando ideali per applicazioni dove lo spazio è limitato.

Semplicità costruttiva. La cinematica del sistema epicicloidale, essendo autocentrante, consente un migliore bilanciamento delle forze scambiate tra gli ingranaggi e non richiede l'utilizzo di cuscinetti per supportare i vari elementi del cinematismo. Il numero di cuscinetti impiegato è quindi minore rispetto ad altre tecnologie.

Alta Efficienza. I riduttori epicicloidali hanno una efficienza solitamente abbastanza elevata per singolo stadio di riduzione, migliore rispetto ad altre soluzioni di altissima precisione (quali i riduttori armonici o cicloidali), ma inferiore rispetto ad altre tecnologie nelle quali il numero di ingranamenti contemporanei è inferiore.

Distribuzione bilanciata dei carichi. Il contatto simultaneo tra denti di diversi satelliti, equamente distribuiti intorno al solare, consente una trasmissione della coppia più uniforme e una maggiore resistenza ai sovraccarichi. Questo si traduce in una maggiore durata operativa e in una riduzione delle sollecitazioni meccaniche sui componenti.

Modularità e flessibilità. Un singolo elemento epicicloidale (stadio di riduzione) realizza tipicamente rapporti di riduzione interi, ad esempio compresi tra 3 e 10. E' poi possibile collegare in cascata diversi stadi epicicloidali,

ottenendo un rapporto finale che è la moltiplicazione dei rapporti dei singoli stadi. In questo modo, i riduttori epicicloidali si possono adattare da applicazioni ad altissime velocità (es. nel Converting), ad applicazioni pesanti nell'industria mineraria (velocità estremamente basse e rapporti di riduzione molto alti).

Costo contenuto. I riduttori epicicloidali hanno una complessità costruttiva intermedia, più elevata dei riduttori a cascata di ingranaggi, ma di realizzazione e/o assemblaggio più semplice rispetto a soluzioni ad altissima precisione (come i riduttori cicloidal e armonici). Tendono ad avere quindi un costo piuttosto bilanciato, nel panorama delle diverse tecnologie. Inoltre, grazie alla lunga durata operativa, è possibile ammortarne il costo in un orizzonte di tempo ampio.

Limitazioni

Rumore e vibrazioni. In alcune applicazioni ad alta velocità o con carichi variabili, i riduttori epicicloidali possono generare rumore e vibrazioni superiori rispetto ad altre tecnologie di trasmissione, a causa dell'elevato numero di contatti tra i denti e della corona dentatura interna (generalmente utilizzata come cassa), richiedendo un'adeguata progettazione per minimizzare questi effetti.

Applicazioni industriali

I riduttori epicicloidali trovano impiego in numerosi settori dell'automazione industriale, come robotica, macchine utensili, packaging e movimentazione di materiali. La loro capacità di combinare precisione, affidabilità e compattezza li rende una soluzione ideale per molteplici scenari applicativi. Sono particolarmente adatti per applicazioni che richiedono una trasmissione di coppia elevata con ingombri ridotti e alta efficienza.

2.6 Armonico

Le origini del riduttore Armonico

Il riduttore con principio di funzionamento Armonico nasce negli anni 50, a seguito di uno studio eseguito da un ingegnere di origini americane.

Il suo funzionamento è basato sull'elasticità meccanica dei metalli, che grazie alla loro deformazione ed al design esclusivo dei componenti in movimento, permette di ottenere elevati rapporti di riduzione in un design leggero e compatto.

Principio di funzionamento

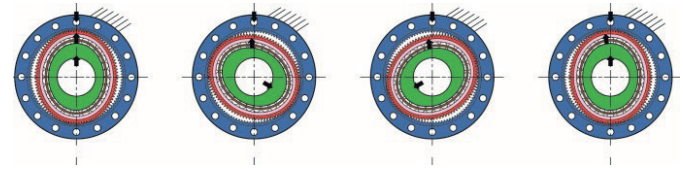
Il riduttore armonico, in configurazione tipica, è costituito da questa serie di elementi:

- Cuscinetto dell'albero veloce, con profilo eccentrico;
- Ruota dentata interna di tipo elastico;
- Ruota dentata esterna fissa (tipicamente 2 denti in più della ruota dentata interna).

Il cuscinetto eccentrico si inserisce nella ruota dentata interna, generando un profilo esterno di forma ellittica. Nel momento in cui il cuscinetto eccentrico effettua in rotazione di un giro in senso orario, la ruota dentata interna si deforma elasticamente, ruotando in senso antiorario.

La differenza del numero dei denti, tra la ruota dentata interna elastica e la ruota dentata esterna fissa, determinerà la posizione finale della ruota elastica.

Essendo la ruota dentata interna elastica, direttamente collegata all'asse lento, per ogni giro di albero motore si otterrà una differenza di velocità tra l'asse di ingresso e quello di uscita, come da schema rappresentato sotto.



Vantaggi

- **Design compatto.** I componenti che costituiscono il riduttore sono concentrici, di conseguenza, la linea di trasmissione risulta di dimensioni molto contenute, specialmente in senso assiale.
- **Rapporti di riduzione elevati.** Sfruttando il principio di funzionamento, si riesce ad ottenere rapporti di riduzione elevati, con ingombri molto ridotti.
- **Densità di coppia elevata.** Possibilità di sviluppare coppie elevate in dimensioni molto contenute, a causa di un maggior numero di denti in presa, rispetto alle tecnologie ad ingranaggi più tradizionali.
- **Efficienza elevata.** Il principio di funzionamento, basato principalmente da contatti di rotolamento tra le parti, garantisce rendimenti elevati, tipicamente superiori al 90%.

2.7 Cicloide

Le origini del sistema CYCLO

Il nome Cyclo deriva da Kyklos - l'espressione greca per cerchio - e si riferisce al disco Cyclo la cui sezione esterna descrive una curva cicloidale.

Il principio di funzionamento del sistema ciclo è stato sviluppato nel 1925, dall'ingegnere tedesco Lorenz Braren, e si rivela assolutamente valido ed attuale grazie ai continui sviluppi, posti in esso. L'azienda che lo ha inventato è oggi conosciuta con il marchio Sumitomo Drive Technologies.

Principio di funzionamento

Il sistema unico di trasmissione CYCLO è basato su un semplice principio ingegnoso, che offre diversi vantaggi al progettista e all'utilizzatore della trasmissione. In linea di principio il riduttore ha solo tre componenti principali in movimento:

La rotazione dell'eccentrico porta in trascinamento i dischi a camme, lungo la circonferenza interna dell'anello portaperni fisso. Il movimento che viene generato, è assimilabile a quello di una ruota all'interno di un anello.



Mentre la ruota (disco a camme) si muove in senso orario, all'interno dell'anello (anello portaperni), la ruota stessa gira lentamente intorno al proprio asse in senso antiorario. Nel sistema CYCLO, il profilo cicloidale del bordo esterno del disco, fa presa progressivamente nei rulli dell'anello portaperni, generando così una rotazione contraria a velocità ridotta. Ogni giro completo dell'albero in entrata, muove il disco cicloidale di un passo del dente cicloidale, in direzione opposta.

In generale, ogni disco ha almeno un dente a profilo cicloidale in meno, rispetto ai perni presenti nell'anello portaperni, per cui il rapporto di riduzione corrisponde, normalmente, al numero di denti a profilo cicloidale del disco.

La rotazione a velocità ridotta dei dischi



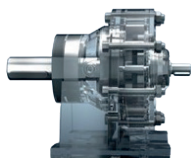
cicloidali, viene trasmessa all'albero in uscita, mediante perni di trascinamento e rulli, che fanno presa nella serie di fori, appositamente creata, sui dischi. A seconda della tipologia di prodotto, e sua configurazione si utilizza un sistema a 2 o 3 eccentrici e, relativo set di dischi a camme, in modo da garantire un adeguato aumento della coppia, ed una trasmissione dolce e priva di vibrazioni.

Vantaggi

Resistenza ai sovraccarichi. Il sistema Cyclo presenta numerosi punti di contatto adiacenti, assicurando una distribuzione dei carichi d'urto su circa il 30% dei denti a profilo cicloidale; è così in grado di sopportare carichi d'urto intermittenti istantanei, fino al 500% della coppia nominale.



Ingombri ridotti. Il sistema ammette rapporti di riduzione molto elevati (da $i=6$ fino a $i=119$) in singolo stadio. Se si considerano altre tecnologie di trasmissioni, e si vuole ottenere rapporti di riduzione assimilabili, è necessario realizzare diversi stadi di riduzione, con conseguente maggiore ingombro del prodotto.



Efficienza elevata. Le parti in movimento lavorano mediante contatto di rotolamento, di conseguenza l'attrito tra le parti è quasi esclusivamente di tipo radente. Ne conseguono valori di efficienza molto elevati, maggiori di 95%, in tutto il range dei rapporti di riduzione ammissibili.

Bassa Inerzia in movimento. La massa in rotazione è principalmente concentrata nell'eccentrico, di conseguenza l'inerzia è assimilabile a quel particolare. Ne consegue un prodotto molto adatto ad applicazioni

dinamiche, con elevati cicli di start / stop e continue inversioni del senso di rotazione.

2.8 Principi ibridi

I vari principi di riduzione descritti nei paragrafi precedenti possono anche essere combinati tra di loro in modo da realizzare dei sistemi di trasmissione che sfruttano tecnologie di riduzione diverse, compensando vicendevolmente i propri punti deboli e raggiungendo prestazioni di elevato livello per applicazioni specifiche.

Nel combinare gli stadi bisogna tener conto delle caratteristiche intrinseche delle diverse tecnologie, per cui uno stadio a coppia conica con rapporti elevati dovrà rispettare gli ingombri a volte molto diversi delle coppie coniche, così come uno stadio epicicloidale non potrà offrire un albero cavo per il passaggio delle utenze o uno stadio a vite senza fine impiegato a bassa velocità non potrà avere efficienza elevata.

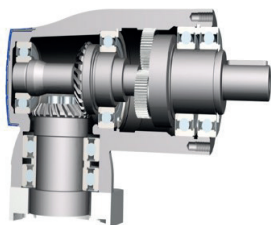
Un esempio sono le architetture angolari dove si combinano coppie coniche o ipoidi a stadi di riduzione epicicloidale. Lo stesso dicasi per riduttori a vite senza fine che sfruttano prestadi di riduzione epicicloidale. In tali strutture gli stadi più robusti, ovvero con maggior capacità di trasmissione di coppia vengono posizionati a valle della struttura, verso l'uscita lenta, mentre stadi di riduzione più idonei ad operare ad alte velocità e con minore precisione vengono posizionati tra i primi stadi dell'architettura ibrida. Altri esempi possono essere le combinazioni di stadi cicloidi e stadi epicicloidali oppure di uno stadio ad assi paralleli con stadi ortogonali.

Nel concetto di ibridi possiamo includere anche le integrazioni con motori elettrici e/o attuatori e ciò amplia

notevolmente il numero di combinazioni possibili e soprattutto propone soluzioni per quasi qualsiasi specifica di progetto.

Tipicamente ogni combinazione ha trovato un ben definito campo applicativo e di conseguenza i costruttori si sono specializzati in combinazioni proprie.

Esempio di combinazione conico-epicicloidale:



3. NOZIONI COSTRUTTIVE

3.1 Design di un riduttore

Il termine anglosassone corretto è gearbox, che possiamo tradurre con scatola di ingranaggi, e ciò rende molto più evidente quale sia la sostanza del riduttore e lascia meglio immaginare quali possano essere le caratteristiche costruttive di tale scatola.

Ecco le principali:

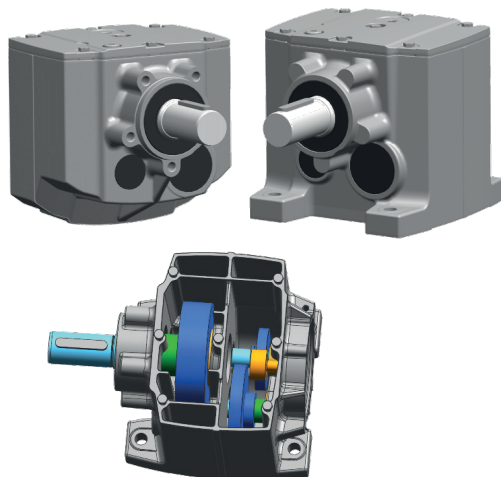
1. **Carcassa:** è il corpo del riduttore, deve contenere le strutture interne, ma costituendo anche l'interfaccia verso l'ambiente esterno deve presentare robustezza, buono scambio termico per smaltire il calore da dissipare e offrire degli accessi per montaggio/smontaggio, cambi lubrificanti o ispezioni. Tipicamente realizzata in acciaio più o meno legato (riduttori più robusti e potenti), ghisa (per realizzazioni robuste ma più economiche) o anche alluminio per riduttori leggeri, di piccola potenza;
2. **Lubrificazione:** generalmente a olio o grasso. Sui riduttori di bassa e media potenza si privilegiano lubrificanti sintetici, mentre su quelli di potenza più elevata prevalgono i minerali anche per ragioni economiche. Da notare che la commistione dei due tipi è da evitare, soprattutto in presenza di tenute in Viton. Nel caso di applicazioni in ambienti a contatto con alimenti è necessario utilizzare lubrificanti foodgrade che non utilizzano additivi tossici la cui assenza però può declassare le prestazioni del lubrificante;
3. **Tenute:** dette anche guarnizioni sono generalmente in elastomero combinato con parti di lamierino metallico e/o molle che garantiscono la corretta aderenza della tenuta alla superficie dell'albero in rotazione. Quelle più diffuse per riduttori da automazione sono in **NBR** (Nitrile Butadiene Rubber), **FKM** (gomma fluorurata o Viton), **PTFE** (Politetrafluoroetilene);
4. **Supporti (cuscinetti):** sono i componenti che sorreggono

le parti in movimento e a seconda dei carichi e della precisione richiesta si può optare, dalle forme più semplici ed economiche alle più complesse: a sfere, sfere contatto obliquo, rulli, rulli conici e possono essere montati liberamente o con precarico più o meno spinto, fattore che da una parte aumenta la capacità di carico del cuscinetto ma dall'altra ne aumenta la coppia assorbita a vuoto, la rumorosità, l'efficienza.

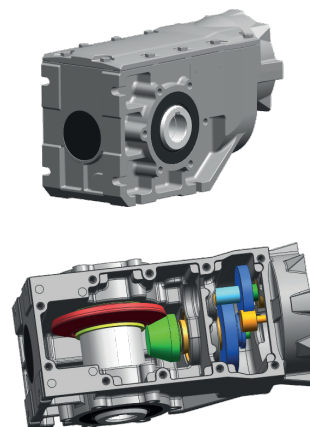
5. Elementi di connessione con l'esterno: tra questi citiamo valvole di sfiato, finalizzate a compensare i delta di pressione che si creano tra camera interna ed ambiente esterno, gli accessi per ispezionare la camera interna del riduttore, gli attacchi di mandata e ritorno per eventuali circuiti di raffreddamento dell'olio, i tappi di sfiato per facilitare riempimento o svuotamento di lubrificante, sedi meccaniche per l'applicazione di eventuali sensori.

3.2 Coassiali / Ortogonali / Ad assi paralleli

Riduttori coassiali



Riduttore ortogonale



Riduttore assi paralleli



4. BREVE GUIDA ALLA SCELTA

4.1 Quale riduttore per quale utilizzo

Come già accennato, la funzione del riduttore è quella di trasformare l'energia utilizzando ingranaggi meccanici che riducono la velocità e aumentano la coppia tramite un rapporto definito, in modo raggiungere un punto di funzionamento il più vicino possibile a quello ottimale dell'applicazione.

La selezione del riduttore deve essere integrata con quella di tutti gli altri componenti che costituiscono la catena del moto (motore, azionamento, eventuali freni, ulteriori elementi di riduzione come cinghie, ecc.).

Prima di procedere alla selezione dei componenti è necessario effettuare un calcolo di quali sono le potenze e le forze/coppie richieste da una determinata applicazione. Tali calcoli, chiamati dimensionamenti, si basano sulle leggi della fisica, della meccanica e dell'elettrotecnica.

Bisogna poi tenere conto di esigenze specifiche dell'applicazione quali ad esempio: precisione dei posizionamenti, spazi limitati, posizione dell'albero da mettere in moto rispetto a quella del motore, sollecitazioni esterne, necessità di dissipare o utilizzare l'energia prodotta in fase di frenatura, presenza di umidità e/o polveri nell'ambiente, certificazioni richieste.

A questo punto si passa alla scelta vera e propria del riduttore che avviene generalmente tramite la selezione delle configurazioni messe a disposizione dal costruttore in modo appunto da avvicinarsi il più possibile a quanto richiesto dall'applicazione.

A questo proposito, ogni costruttore mette a disposizione per la selezione svariati rapporti di riduzione e taglie. Le varie configurazioni possibili portano quindi ad avere una

larga quantità di possibili varianti (Es forma del riduttore, tipologia e diametro dell'albero in uscita, tipologia di lubrificante utilizzato).

Se fino a qualche anno fa i dimensionamenti venivano effettuati a mano e la selezione del riduttore avveniva tramite un catalogo, al giorno d'oggi molti costruttori mettono a disposizione dei programmi che permettono di effettuare (o di verificare) i dimensionamenti e/o dei configuratori online che permettono di selezionare il riduttore o il motoriduttore desiderato.

Più recentemente si stanno creando dei tool online che permettono di unire queste due funzionalità effettuando prima il dimensionamento e poi la configurazione dei prodotti che costituiscono la catena del moto riduttore incluso.

Tali strumenti semplificano notevolmente la scelta del riduttore corretto, riducono le tempistiche e la possibilità di errore e permettono in alcuni casi di generare un codice prodotto finito con relativo datasheet e disegno CAD.

In base alla politica del costruttore, possono essere utilizzati o solo dai suoi collaboratori o messi a disposizione online anche ai clienti.

4.2 I motoriduttori

Abbiamo, fin qui, visto tutti gli aspetti del riduttore ma esso, per essere movimentato, ha bisogno di un motore elettrico che, a sua volta, nella maggior parte dei casi, è gestito e movimentato da un azionamento.

I motori che possono essere accoppiati ai riduttori principalmente li possiamo dividere in due gruppi:

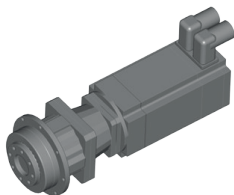
Motori asincroni e motori sincroni.

Per quanto riguarda i motori asincroni, l'accoppiamento meccanico col riduttore è relativamente semplice quando vengono realizzati con alberi e flange secondo la normativa IEC 60072.

Per i motori sincroni, invece, non esiste una normativa guida per le dimensioni di alberi e flange per cui è importante verificare le dimensioni di accoppiamento se il riduttore e il motore sono di due fornitori distinti.

In entrambi i casi i motori possono essere sprovvisti di freno o autofrenanti, ovvero, equipaggiati di freno elettromeccanico che si sblocca solo se alimentato da corrente elettrica.

Sapere che il motore è dotato di freno è importante in quanto, in caso di mancanza di tensione di rete, il freno blocca la rotazione del rotore quasi istantaneamente e di conseguenza il riduttore deve reggere la coppia di emergenza generata dal freno.



Fattore di servizio

Nella scelta dell'accoppiamento motore-riduttore, un indice utile da tenere in considerazione è il fattore di servizio. Esso è definito come il rapporto della coppia massima che il riduttore può sopportare in continuo e la coppia nominale del motore moltiplicata per il rapporto di riduzione e per l'efficienza del riduttore.

In generale, non deve essere minore di 1 perché altrimenti il motore potrebbe portare a rottura il riduttore. Non deve nemmeno essere troppo alto, altrimenti una buona parte

della coppia del motore servirebbe solo per mettere il movimento il riduttore stesso.

Benefici del riduttore in abbinamento ai motori

Le funzioni del riduttore in abbinamento al motore sono:

Ridurre la velocità del motore. La velocità dell'albero lento è pari a quella del motore divisa per il rapporto di riduzione.

Moltiplicare la coppia del motore. La coppia disponibile all'albero lento è data dalla coppia del motore moltiplicata per il rapporto di riduzione. Questo valore viene poi moltiplicato per l'efficienza del riduttore

Ridurre l'inerzia dell'applicazione "vista" dal motore. Soprattutto in applicazioni molto dinamiche è importante che il motore e il suo azionamento riescano a controllare adeguatamente il movimento della macchina. Perché questo sia garantito, è necessario avere un rapporto tra l'inerzia dell'applicazione e l'inerzia del motore non elevato. Le due inerzie devono essere rapportate alla stessa velocità, quindi l'inerzia dell'applicazione viene divisa per il quadrato del rapporto di riduzione.

Queste caratteristiche rendono il riduttore un elemento fondamentale nell'automazione industriale.

4.3 Integrazione in macchina

L'integrazione in macchina di un riduttore, ovvero il fissaggio del riduttore, può sembrare a prima vista un "dettaglio" che può essere definito all'ultimo momento, ma in realtà è un "fondamentale" che va studiato in modo accurato poiché è parte integrante del progetto di una macchina, e come tale, ha importanti implicazioni sul risultato finale.

Ci sono aspetti tecnici, ma anche economici, da valutare attentamente, cosa che impone che il fissaggio sia sempre competenza dei progettisti e non di collaboratori delegati «a valle» che non possono fare scelte strutturali e strategiche sul progetto.

Il fissaggio dei riduttori può essere essenzialmente:

1. Con piedi
2. Con flangia
3. Pendolare

Fissaggio con piedi

È il più classico ed sfruttato dei metodi di fissaggio: il riduttore è dotato di piedi che vengono imbullonati ad una superficie piana di appoggio. Il collegamento alla macchina avviene nella stragrande maggioranza dei casi mediante alberi maschi con l'impiego di un giunto, oppure, se è necessario posizionare in modo diverso il riduttore per problemi di spazio o anche per realizzare una ulteriore riduzione a valle, mediante un pignone per una trasmissione a cinghia, a catena o a cascata di ingranaggi. In questo caso una verifica del carico radiale sopportabile dal riduttore è sempre obbligatoria.

È preferito soprattutto nelle applicazioni dove si usano riduttori di medio/grandi dimensioni, o dove serve effettuare la manutenzione semplificando di molto la rimozione del riduttore dalla macchina. Applicazioni tipiche sono nel campo della siderurgia e minerario, ma in realtà trova applicazione in qualunque settore.

Esempio di riduttore coassiale fissato con piedi in un impianto di stoccaggio di cereali. In uscita c'è una trasmissione a catena (sotto al carter di protezione).



PREGI (quando utilizzato con giunto)	DIFETTI
<ul style="list-style-type: none"> • Consente disallineamenti (paralleli ed angolari) tra albero macchina e albero riduttore, poiché il giunto interposto è capace di assorbire questi disallineamenti (i valori dipendono dal giunto impiegato); • Previene ogni carico radiale sul riduttore e sulla macchina poiché trasmette solo momento torcente, incrementando la vita dei cuscinetti; • Consente di introdurre un elemento elastico (o cedevole) nella catena cinematica utile ad assorbire eventuali urti o sovraccarichi; • Consente un taglio termico tra gli alberi macchina e riduttore utile quando la macchina genera calore; • Semplifica lo smontaggio del riduttore e quindi la manutenzione. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita di una superficie piana (lavorata) su cui appoggiare il riduttore, poiché se la superficie non è piana, durante il serraggio delle viti di fissaggio si rischia di rompere la carcassa (rigidissima) del riduttore; • Necessita di allineamento preciso in fase di montaggio tra gli alberi (riduttore e macchina), quindi necessita di sistemi di spessoramento o regolazione sotto al riduttore; • Ha un costo aggiuntivo a causa del giunto; • Ha un ingombro proprio, in senso assiale, che può rendere il fissaggio ingombrante; • Necessita di una protezione antinfortunistica, poiché c'è una parte rotante esposta; • Il giunto se contiene parti in materiale plastico (tipico dei giunti elastici) può avere un deterioramento delle prestazioni (minor rigidità e maggior gioco) con l'usura e/o in presenza di elevate temperature.

Fissaggio con flangia

Questo fissaggio di tipo estremamente rigido consiste nell'impiego di una flangia di connessione tra il riduttore ed una parete della struttura della macchina azionata. Si può avere l'albero del riduttore maschio oppure cavo. La flangia può essere nativa sulla carcassa del riduttore (in questo caso una B14, con fori filettati ciechi e centraggio maschio) oppure una flangia B5 con fori lisci passanti e centraggio maschio, montata sulla B14 nativa.

PREGI	DIFETTI
<ul style="list-style-type: none"> • Estremamente rigido e preciso; • Nessuna parte rotante è esposta; • Ha un ingombro ridotto pur con un albero maschio; • Se molto ben realizzato (lavorazioni d'utensile precise sulla carpenteria della macchina azionata), previene ogni carico radiale aggiuntivo sul riduttore e sulla macchina; • E' indicato per ambienti aggressivi poiché protegge l'accoppiamento; • Può essere impiegato per avere a disposizione un albero maschio (quello del riduttore) al di là di una parete senza necessità di cuscinetti aggiuntivi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita di lavorazioni molto precise sulla carpenteria (lavorazioni di utensile), altrimenti si rivela pericolosissimo poiché gli errori di accoppiamento creano l'insorgenza di carichi radiali elevati e non noti che possono portare alla prematura distruzione dei cuscinetti; • Ha un costo elevato diretto (la flangia), ma soprattutto indiretto per la necessità di precisione delle lavorazioni; • Ha un ingombro proprio, anche in senso assiale; • Non ne è possibile l'impiego quando gli alberi macchina sono poco precisi (presentano errori di oscillazione radiale) o sono deformati (o sono deformabili dal carico).

Esempio di fissaggio con flangia su ruote di carroponete (sinistra) e su valvola rotante (destra).

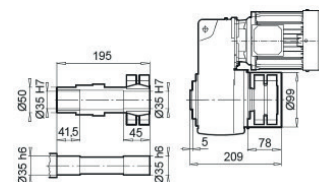


Fissaggio Pendolare

Questa esecuzione consente di calettare direttamente il riduttore che presenta l'albero lento cavo sull'albero maschio della macchina azionata. Si possono usare entrambi gli alberi con linguetta (non chiavetta) o anche alberi macchina lisci, per i quali l'albero cavo del riduttore deve prevedere una unità di bloccaggio (shrink disc). In questo caso la trasmissione del momento torcente avviene per attrito e non per interferenza geometrica come nel caso precedente. E' necessario prevedere un vincolo contro la rotazione del riduttore, che di solito è realizzato con un braccio di reazione o con dispositivi analoghi (talvolta anche solo con semplici tamponi di gomma che appoggiandosi lateralmente alla carcassa riduttore ne impediscono la rotazione e quindi permettono la trasmissione del momento torcente).

Può essere fatto per qualunque dimensione di riduttore: anche per gruppi di comando (cioè riduttore + basamento + motore) con massa complessiva superiore a 20 t che rimangono tutti "appesi" all'albero della macchina azionata. L'albero macchina non deve essere surdimensionato per sostenere il riduttore ed il suo peso poiché il carico aggiuntivo è ridotto rispetto alla sollecitazione imposta dalla trasmissione del momento torcente per il quale è comunque dimensionato l'albero.

Riduttori ad albero cavo con unità di bloccaggio (coperto da carter di protezione) per fissaggio pendolare. A sx schema di fissaggio, a dx una applicazione dove è visibile il braccio di reazione che realizza il vincolo contro la rotazione.



5. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

Le normative a cui i riduttori devono essere conformi variano in base al tipo di utilizzo e alle normative vigenti nel paese in cui vengono prodotti e installati. La legislazione impone dei requisiti sia tecnici che di utilizzo per tutelare la sicurezza degli operatori. Le principali norme di riferimento sono:

1. Normative di sicurezza

- **Direttiva Macchine (2006/42/CE):** Questa è una direttiva dell'Unione Europea che riguarda la sicurezza delle macchine e degli impianti industriali. Il riduttore deve essere progettato in modo da minimizzare i rischi per gli operatori, come il rischio di schiacciamento o di contatto con parti in movimento.
- **Normativa ATEX 2020, e EN 1127-1:** Riguarda la sicurezza contro il rischio di esplosioni, se il riduttore viene utilizzato in ambienti con atmosfere esplosive per presenza di gas e/o polveri infiammabili.
- **Low Voltage Directive (LVD) 2014/35/UE** riguarda i componenti elettrici destinati ad essere adoperati entro taluni limiti di tensione. Da considerarsi per i riduttori con motore integrato (motoriduttori).

2. Normative ambientali

- **RoHS (Restriction of Hazardous Substances) e REACH:** Queste normative regolano l'uso di materiali pericolosi e chimici nel processo produttivo e nell'assemblaggio dei riduttori, in modo da proteggere l'ambiente e la salute degli utenti.
- **Presenza di PFAS:** la necessità di ridurre la presenza di PFAS sta spingendo i costruttori a trovare alternative in particolare alle guarnizioni che sono il principale componente contenente tali sostanze.
- **Direttiva 2012/19/UE (RAEE):** Normativa relativa al trattamento e allo smaltimento dei rifiuti elettronici, applicabile se il riduttore è parte di un sistema più complesso che include componenti elettronici.
- **EHEDG:** norme stabilite da un consorzio per l'utilizzo dei riduttori in ambienti igienici.

PREGI	DIFETTI
<ul style="list-style-type: none">• Estremamente compatto• Estremamente poco costoso (se con alberi con linguetta)• Agevola e velocizza il montaggio• Consente l'impiego di alberi macchina lavorati poco precisi o addirittura deformati• Se ben realizzato previene ogni carico radiale aggiuntivo oltre al peso proprio e alla reazione sul riduttore e sulla macchina, sempre agevolmente sopportabile dagli alberi.• Permette l'utilizzo (nel braccio di reazione) di una cella di carico per la registrazione del momento torcente e con funzione di sicurezza.	<ul style="list-style-type: none">• Permette antiestetici movimenti del riduttore in caso di alberi con forti errori di oscillazione radiale;• Può causare carichi radiali incontrollati sull'albero macchina e sul riduttore (e portare perfino a rottura) se effettuato male (iperstatico) o modificato successivamente da manutentori poco preparati, che tendono erroneamente a bloccare il movimento del riduttore introducendo dei vincoli aggiuntivi (causando iperstaticità) per impedirne il naturale movimento (il riduttore deve infatti seguire l'albero deformato);• Può danneggiare le sedi linguetta in presenza di inversioni del moto a pieno carico;• Non consente un taglio termico tra gli alberi macchina e riduttore con passaggio di calore all'olio del riduttore e al motore elettrico;• Lo smontaggio può risultare impedito da fretting-corrosion o da deformazione della linguetta e la manutenzione può risultare conseguentemente difficoltosa.

6. TREND DI MERCATO

6.1 Panoramica del mercato italiano

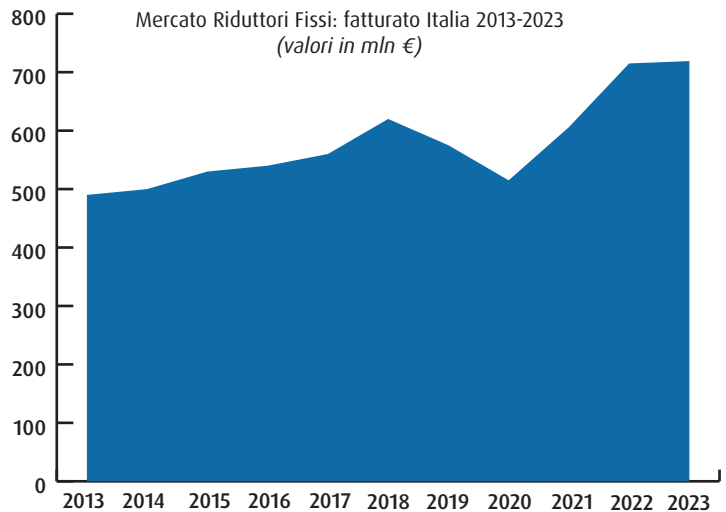
Esistono delle normative di cui tenere conto nella progettazione e dimensionamento della parti dentate dei riduttori, tra le quali ricordiamo la ISO 6336 (parte 1-6) per il calcolo degli ingranaggi, la ISO 14179 per la progettazione degli ingranaggi epicicloidali, con particolare attenzione agli aspetti di calcolo delle forze e delle sollecitazioni sulle varie componenti, la DIN 3990 che riguarda la progettazione degli ingranaggi.

Per quanto riguarda le vibrazioni e il rumore si applicano la ISO 10816, per il monitoraggio delle vibrazioni meccaniche nei componenti, la ISO 3744 e ISO 3746, che riguardano la misurazione del rumore emesso.

A livello nazionale o regionale, possono infine applicarsi ulteriori regolamentazioni locali.

Nell'analisi statistica di ANIE Automazione, il mercato dei riduttori in Italia è segmentato sulla base dei valori di coppia nominale trasmissibile e di gioco angolare. Si considerano riduttori "industriali" i componenti che hanno valori di coppia nominale superiore a 20 kNm e gioco > 15 arcmin mentre sono definiti riduttori di precisione quelli con gioco angolare inferiore a 15 arcmin.

Guardando la totalità delle categorie si può dire che il mercato italiano negli ultimi tra il 2013 e il 2023 è cresciuto di circa il 50%, ed oggi prossimo a raggiungere il milione di unità.

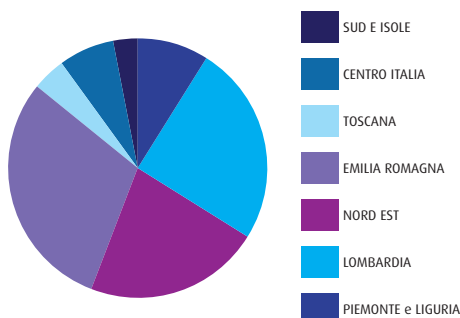


In questa analisi rientrano tutti i riduttori venduti sul territorio nazionale, siano essi di costruzione nazionale che internazionale. Al 2023 la quota dei costruttori nazionali rappresenta circa il 60% del mercato italiano.

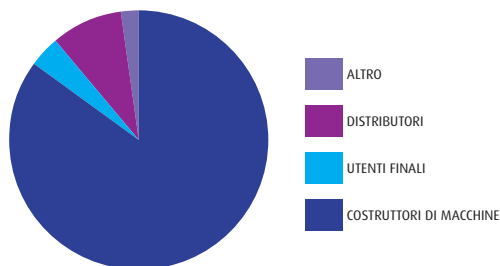
Ovviamente, tenendo conto della grande quota di export del nostro manifatturiero, solo una parte sono anche installati sul territorio nazionale, ma nel conteggio sono da aggiungere tutti i componenti che vengono già importati a bordo delle macchine e impianti.

La distribuzione territoriale delle vendite nazionali è strutturalmente concentrata nelle aree settentrionali del Paese che coprono oltre il 50% del fatturato. Oltre l'80% delle vendite nazionali sono destinate agli costruttori di macchine (OEM). Di questi principalmente, OEM che operano nel food & beverage, nel packaging, nella logistica e material handling.

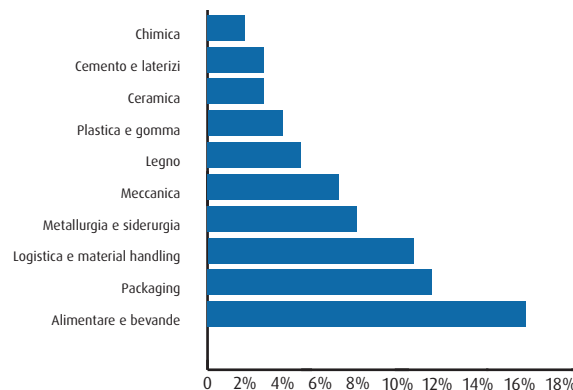
Aree geografiche
Distribuzione % del fatturato Italia 2023



Canali di vendita
Distribuzione % del fatturato Italia 2023



I primi 10 settori finali (canale diretto)
Distribuzione % del fatturato Italia 2023



6.2 Trend tecnologici

Ad oggi esistono alcuni macrotemi nel mondo dei riduttori, industriali e di precisione, tra i quali il primo è l'utilizzo di nuovi materiali che potrebbero consentire di alzare ulteriormente l'asticella delle performance in particolar modo per sovraccaricabilità ma anche per leggerezza dei riduttori.

Quest'ultima è determinante nei casi di cinematiche composte, sistemi in movimento o applicazioni speciali, come ad esempio sistemi con caratteristiche idonee al volo. La realizzazione di riduttori che funzionano con principi consolidati ma sono realizzati in materiali innovativi, in particolare polimeri, può aprire nuovi campi applicativi soprattutto nell'ambito delle potenze medio-basse.

Un driver sempre attuale è l'efficiamento per ridurre il consumo di risorse scarse, alcune tecnologie sono già a livelli molto elevati di efficienza ma per tutte c'è ancora margine di miglioramento perché in questo campo ogni

incremento di efficienza, anche marginale, conta. Inoltre c'è da considerare il contributo assoluto che questi miglioramenti portano al bilancio energetico complessivo dell'impianto o della fabbrica, ai fini dell'industria 5.0.

La distribuzione delle motorizzazioni e il crescente numero di asservimenti anche su assi che tradizionalmente erano manuali o comunque non controllati (registri, cambi formato, assi di set-up) continuano a promuovere la crescita dell'automazione in termini di volumi ma anche di requisiti tecnologici e ciò porta a una maggiore specializzazione della componentistica, progettata per task specifiche.

Per poter semplificare l'utilizzo dei riduttori è fondamentale anche agire sull'efficacia delle interfacce degli stessi e per questo si lavora sulla modularità per ottimizzare e rendere il più flessibile possibile l'interfacciamento verso i motori e le applicazioni, ovvero il fissaggio o l'integrazione bordo macchina.

Infine, un tema legato alla sostenibilità, è la valutazione del riutilizzo delle parti se non dei componenti interi, in modo da rendere circolare l'utilizzo dei componenti industriali a beneficio anche di temi di assistenza e manutenibilità dei riduttori.

Si ringraziano per la collaborazione:

