



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

## FLORE

# Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

### **Trasmissioni magnetiche per propulsori, attuatori e pompe sommerse**

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

*Original Citation:*

Trasmissioni magnetiche per propulsori, attuatori e pompe sommerse / Pugi L.. - In: TRASMISSIONI DI POTENZA OLEODINAMICA PNEUMATICA LUBRIFICAZIONE. - ISSN 1122-5017. - STAMPA. - 10:(2013), pp. 28-38.

*Availability:*

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/822365> of the repository was last updated on

*Terms of use:*

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

*Publisher copyright claim:*

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

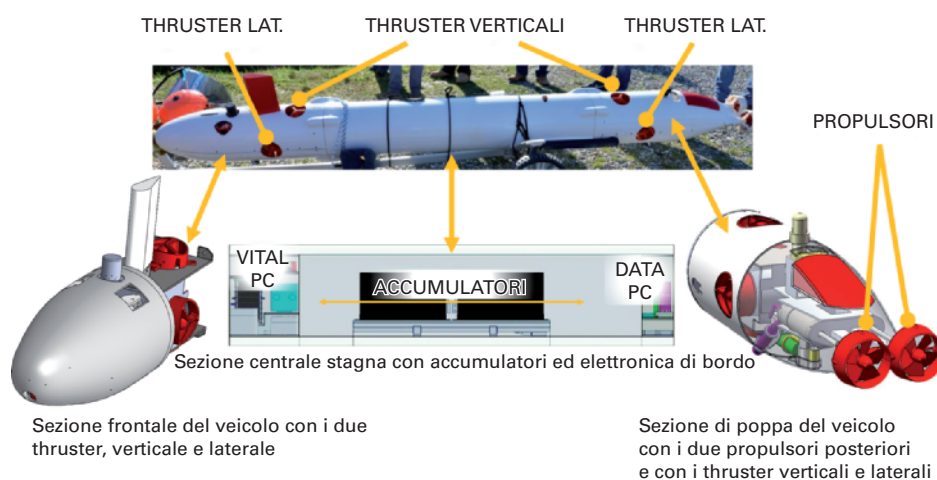
# Trasmissioni magnetiche per propulsori, attuatori e pompe sommerse

Luca Pugi  
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Firenze

*Per la costruzione e la messa a punto di AUV (Autonomous Underwater Vehicles) e ROV (Remotely Operated Vehicles), i ricercatori hanno dovuto risolvere alcuni problemi relativi alla progettazione e alla realizzazione dei motori e del sistema di propulsione da utilizzare per un veicolo destinato all'esplorazione e al monitoraggio di siti archeologici sottomarini sino a una profondità di 300 metri corrispondenti a una pressione esterna di almeno 30 bar.*

In applicazioni sottomarine si deve sovente fare uso di attuatori/motori elettrici utilizzati sia per la propulsione sia per l'azionamento di pompe o di altre attrezzature immerse. Se le profondità sono relativamente elevate, ad esempio maggiori di 50 m, l'uso di guarnizioni striscianti per garantire la tenuta stagna del motore risulta alquanto problematico con conseguenti problemi di durata e affidabilità. Analoghe condizioni di esercizio si ritrovano nella progettazione di pompe utilizzate per fluidi alimentari e/o corrosivi dove le particolari caratteristiche del liquido utilizzato e la necessità di evitare mutue contaminazioni possono rendere conveniente l'applicazione di trasmissioni "non convenzionali". In questa sede vengono proposte due soluzioni: quella del motore immerso in olio (o altro fluido protettivo) e quella della trasmissione magnetica sia di tipo assiale sia radiale.

Per la costruzione e la messa a punto di AUV (Autonomous Underwater Vehicles) e ROV (Remotely Operated Vehicles), i ricercatori dell'università di Firenze hanno dovuto risolvere alcuni problemi relativi alla progettazione e alla realizzazione dei motori e del sistema di propulsione da utilizzare per un veicolo denominato scherzosamente "Tifone"[1] destinato all'esplorazione e al monitoraggio di siti archeologici sottomarini sino a una profondità di 300 metri corrispondenti a una pressione



**Fig. 1 – Il veicolo sottomarino Tifone e il relativo sistema di propulsione.**

esterna di almeno 30 bar. Si riporta in figura 1 un semplice schema del Tifone e del sistema di propulsione e manovra previsto. In particolare il veicolo viene controllato utilizzando sei attuatori: per la propulsione due eliche contro-rotanti posteriori e per la manovra quattro tunnel-thruster o eliche intubate disposte secondo lo schema di figura 1.

I principali dati relativi al veicolo e alle caratteristiche del sistema propulsivo sono riportati in tabella 1. Alcuni dettagli relativi al disegno dei thruster laterali e verticali sono riportati in figura 2. Poiché il motore viene ad essere immerso in acqua salata con una pressione

esterna che può raggiungere i 30 bar diventa difficile se non impossibile assicurare la tenuta dell'involucro del motore specie nell'area corrispondente alle guarnizioni che assicurano la tenuta sulla superficie rotante dell'albero come visibile in figura 3.

Per impedire l'allagamento della sezione stagna in cui sono alloggiati motore e riduttore, la soluzione più comunemente adottata è quella della compensazione idrostatica tramite bagno di olio: il motore, il riduttore e più in generale tutta la sezione che si vuole garantire stagna viene riempita di un fluido dielettrico, generalmente un lubrificante. Nel caso del

Tifone è stato prescelto un olio dielettrico del tipo Agip ITE 360 G. Tale olio è stato successivamente sostituito con olio completamente bio-degradabile (Fuchs Planto Hyd 32 S) per ridurre al minimo l'impatto ambientale in caso di perdite anche minime visto che è previsto l'impiego del veicolo anche in zone soggette a vincoli di tutela ambientale.

In figura 4 si riporta un modello FEM semplificato del contenitore dell'attuatore che spiega il principio di funzionamento della compensazione idrostatica: la pressione esterna dell'acqua marina comprime le pareti del contenitore e quelle di un tubo flessibile utilizzato per il reintegro dell'olio. La rigidità delle pareti del contenitore e soprattutto del tubo di reintegro è relativamente bassa; di conseguenza la pressione esterna provoca un'apprezzabile variazione del volume interno e quindi un aumento della pressione dell'olio all'interno. È l'aumento della pressione interna dell'olio a compensare quella esterna dell'acqua: per effetto della ridotta differenza di pressione tra interno ed esterno del contenitore le pareti risultano modestamente sollecitate. In particolare, nel caso del Tifone, il tubo di PVC utilizzato per il contenitore dell'attuatore è progettato per resistere a differenze di pressione tra interno ed esterno, molto modeste, nell'ordine dei due-tre bar. Analisi effettuate con il modello FEM raffigurato in figura 4 e successive prove effettuate in camera a pressione fino a 35-40 bar, hanno permesso di verificare il corretto dimensionamento del sistema. Anche per quanto riguarda tenute e guarnizioni striscianti, la piccola differenza di pressione e la scarsa affinità chimica tra lubrificante all'interno e acqua all'esterno, ne facilita il funzionamento riducendo contaminazioni e trafileamenti.

Il principale vantaggio di questo tipo di soluzione è la relativa semplicità ed economicità della realizzazione.

Anche dal punto di vista termico e meccanico il funzionamento del motore elettrico risulta agevolato: la presenza dell'olio lubrificante infatti facilita il raffreddamento del motore aumentando la trasmissione del calore all'involucro e quindi all'acqua circostante. Prove eseguite in vasca sull'attuatore riportata in figura 2, hanno permesso di verificare la possibilità di incrementare le correnti assorbite dal motore del 100% con conseguente incremento

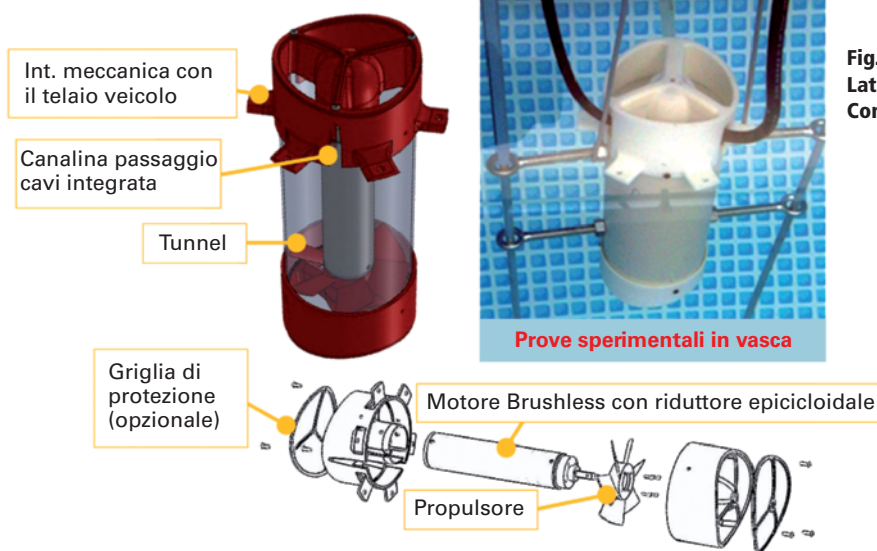
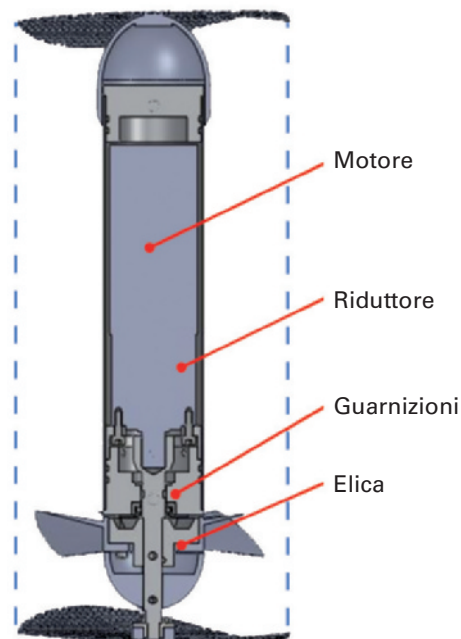


Fig. 2 – Thruster Laterale Principali Componenti.

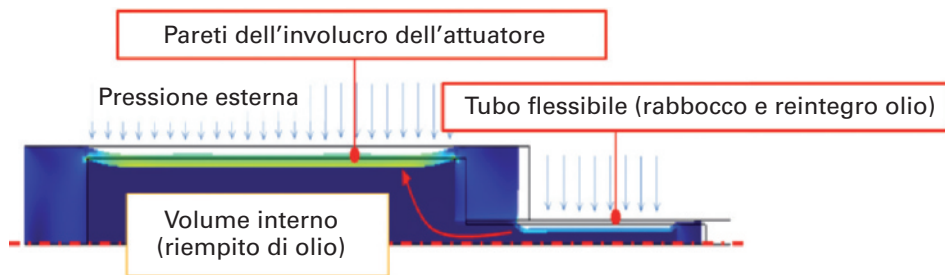
Fig. 3 – Sezione dell'attuatore e tenute striscianti sull'albero che aziona l'elica.

della coppia continuativa erogabile. Mantenendo il regime di rotazione previsto dal costruttore del motore questo incremento della coppia erogata corrisponde approssimativamente al raddoppio della potenza erogata dal motore rispetto alla corrispondente prestazione in aria. Per i thruster di manovra in cui l'utilizzo degli attuatori è discontinuo e di breve durata è possibile incrementare ulteriormente le prestazioni aumentando il regime di rotazione del motore. Tale aumento viene ottenuto incrementando la tensione di alimentazione tipicamente di un fattore due. Per motori DC brushed e brushless l'aumento del regime di rotazione è circa proporzionale a quello della tensione di alimentazione.

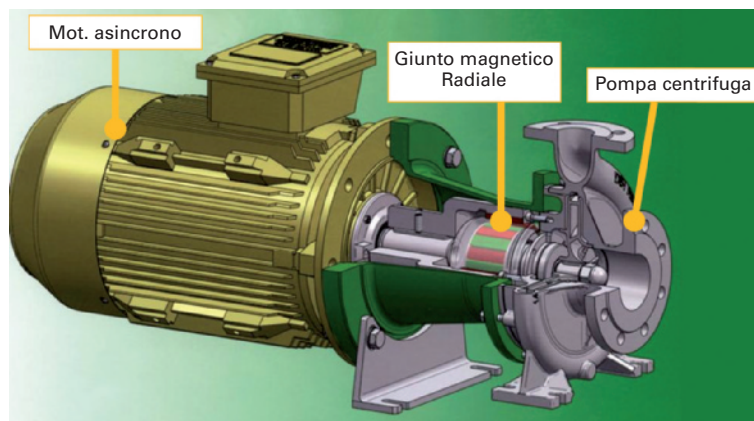


TAB. 1 – PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL VEICOLO E DEL SISTEMA PROPULSIVO.

Grandezza	Valore
Profondità max	300[m] pari a circa 30[bar]
Diametro esterno	340[mm]
Lunghezza (incluso eliche)	3,6[m]
Peso in aria	Circa 140-160 [kg] in ragione della strumentazione imbarcata
Peso in Acqua	0 – 0,5 [kg] il veicolo è neutro -legg. Positivo
Energia accumulate	4[Kwh]
Velocità massima	3,5-4[m/s]
Velocità di crociera	1-2[m/s]
Potenza max e max continuativa dei Propulsori	400[W] e 200W
Autonomia	8-12[h] pari a circa 170[km] percorsi



**Fig. 4 - Modello FEM semplificato del contenitore utilizzato per la verifica del contenitore (Modello FEM realizzato con Comsol Multiphysics™).**



**Fig. 5 - Pompa centrifuga con trasmissione magnetica radiale (tratto da doc. tecnica DST Dauermagnet-SystemTechnik GmbH).**

Anche in questo caso l'abbondante lubrificazione di cuscinetti, e ingranaggi del riduttore facilita l'incremento del regime di rotazione del motore. Di conseguenza, specialmente per i thruster di manovra, combinando un incremento del 100% delle correnti assorbite e delle tensioni di alimentazione è possibile ottenere un aumento della potenza erogabile dall'attuatore di un fattore 4 rispetto alla prestazione nominale del motore in aria. Tale criterio di dimensionamento di propulsori e thruster di manovra viene spesso adottato anche a livello di prodotti commerciali comunemente utilizzati per la propulsione di veicoli AUV (Autonomous Underwater Vehicle) e ROV (Remotely Operated Vehicle).

A dispetto delle elevate capacità di sovraccarico degli attuatori compensati in olio rispetto alla corrispondente prestazione in aria, questo tipo di soluzione presenta una serie di difetti difficilmente eliminabili:

- Non risulta possibile escludere a priori perdite anche piccole o semplici contaminazioni di olio lubrificante fuori-uscito dal motore. Nel caso specifico dell'applicazione del Tifone

le perdite sono molto piccole e il problema è di fatto trascurabile. Per altre applicazioni, quali ad esempio l'attuazione di pompe per fluidi alimentari, contaminazioni anche minime di fluido lubrificante potrebbero risultare inaccettabili.

- L'olio all'interno del motore è comunque soggetto a invecchiamento e usura cui si sommano inevitabili perdite e contaminazioni. Di conseguenza il lubrificante all'interno del motore non ha una vita indefinitamente lunga e necessità di essere sostituito o reintegrato periodicamente.

- Le guarnizioni necessarie per garantire la tenuta sulla superfici rotanti dell'albero introducono attriti e sono soggette a usura e quindi a eventuale manutenzione.

### **Progettazione di una trasmissione magnetica: giunti assiali e radiali**

Per assicurare la tenuta di un attuatore rispetto a un fluido esterno in pressione, eliminando la necessità di tenute striscianti si può realizzare una trasmissione di tipo magnetico: il moto tra l'attuatore e l'elica non viene trasmesso

attraverso un albero od altro collegamento meccanico, ma attraverso forze di natura magnetica generate utilizzando magneti permanenti che possono essere realizzati, in ragione di costo e prestazioni richieste, utilizzando materiali ferro-magnetici convenzionali (ferrite) o terre rare (samario-cobalto, più spesso neodimio-boro).

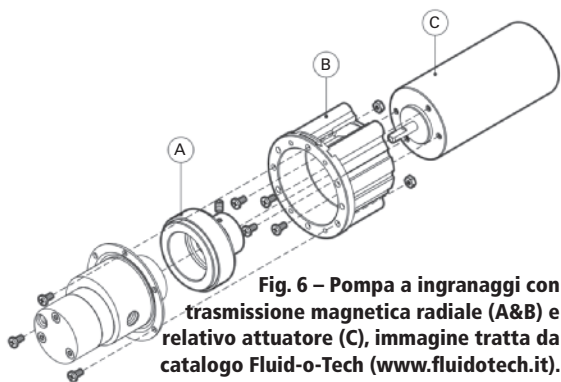
Questo tipo di trasmissione viene spesso utilizzata non solo per la propulsione di veicoli sottomarini, ma anche all'interno di pompe volumetriche o centrifughe, specie in presenza di fluidi chimicamente aggressivi o qualora si debba garantire condizioni di assoluta non contaminazione come nel caso di applicazioni alimentari o bio-medicali.

Si riportano in figura 5 e figura 6 esempi, di applicazioni esistenti, tratte da documentazione tecnica di produttori di pompe con trasmissione magnetica.

In relazione alla disposizione dei magneti e quindi del relativo flusso all'interno del giunto si distingue tra due configurazioni del circuito magnetico realizzato:

- Giunti a flusso Assiale o Assiali: si riporta in figura 7 un esempio di giunto assiale. Il giunto è costituito da due parti, tipicamente due anelli, perpendicolari all'asse di rotazione del giunto stesso, allineati in direzione assiale. In questo caso gli anelli sono suddivisi in settori circolari magnetizzati in direzione assiale rispetto all'asse di rotazione del giunto; di conseguenza il flusso magnetico realizzato è anche esso prevalentemente in direzione assiale.

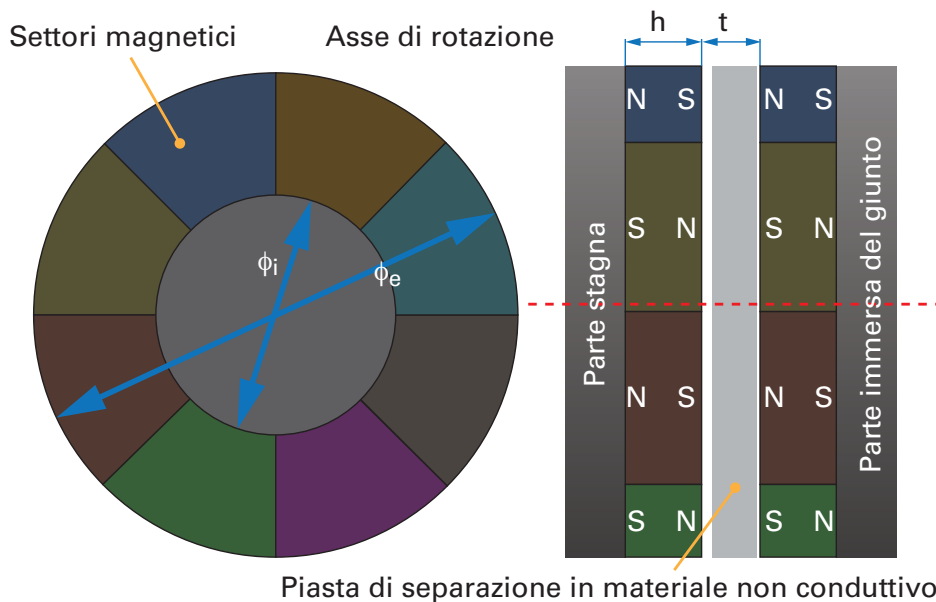
- Giunti a flusso Radiale o Radiali: si riporta in figura 8 un esempio; il giunto è costituito da due anelli cilindrici coassiali ciascuno solidale a uno dei due membri collegati. Sulle superfici interna ed esterna sono realizzati dei settori magnetizzati costruiti in modo da produrre flussi prevalentemente radiali rispetto all'asse di rotazione; di conseguenza le linee di flusso del circuito magnetico realizzato sono prevalentemente planari e perpendicolari all'asse di rotazione dell'albero. A seconda della serie di produzione e delle prestazioni richieste i settori magnetizzati possono essere realizzati con diverse tecnologie. Nel prototipo descritto in figura 8 Fig. , e prodotto presso i laboratori MDM (Modellazione Dinamica e Meccatronica) dell'Università di Firenze, i settori magnetizzati sono realizzati assem-



**Fig. 6 – Pompa a ingranaggi con trasmissione magnetica radiale (A&B) e relativo attuatore (C), immagine tratta da catalogo Fluid-o-Tech (www.fluidotech.it).**

**TAB. 2 – PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL VEICOLO E DEL SISTEMA PROPULSIVO.**

Caratteristica	Valore
Tipologia di giunto	Assiale con settori uniformemente magnetizzati
Numero di coppie polari	4
Spessore del traferro t	10 [mm]
Materiale	Ceramic 5
Diametro esterno Fe	81,28 [mm]
Diametro interno Fi	40,64 [mm]
Spessore h	12,7 [mm]



**Fig. 7 – Esempio di giunto magnetico assiale.**

blando magneti di forma elementare prismatica facilmente reperibili in commercio con costi e tempi contenuti.

Indipendentemente dalla tipologia di giunto considerato (assiale o radiale) si possono fare alcune considerazioni del tutto generali:

- Una delle maggiori fonti di costo del giunto sia esso radiale o assiale è rappresentato dai magneti permanenti. Per questo motivo l'ottimizzazione del circuito magnetico deve tener conto necessariamente di questo aspetto. Per ridurre ulteriormente quantità e caratteristiche dei magneti utilizzati è anche possibile realizzare configurazioni in cui solo uno dei due anelli componenti il giunto è magnetizzato, mentre l'altro è costituito da una parte in materiale ferro-magnetico opportunamente disegnata.

- La presenza di parti magnetizzate in movimento implica la possibilità di generare correnti parassite in tutte le parti del giunto fatte con materiali metallici o semplicemente conduttori. La generazione di correnti parassite può provocare la dissipazione di potenze rilevanti e/o addirittura inficiare la funzionalità del giunto. Per questo motivo tutte le parti sottoposte a rilevanti flussi magnetici quali gli alloggiamenti dei magneti e del giunto stesso devono essere realizzati con materiali isolanti quali ad esempio polimeri plastici (ABS, polimetacrilati etc., etc.). materiali ceramici o vetrosi (sono utilizzati anche particolari tipologie di vetri boro-silicati).

**Esempi di dimensionamento e simulazione di giunti assiali e radiali**

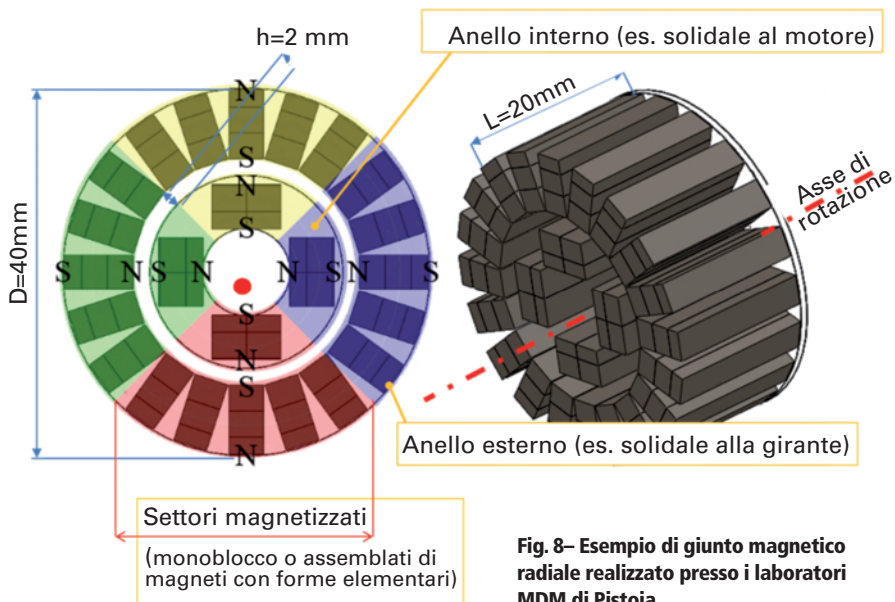
Per il dimensionamento di giunti magnetici sia assiali sia radiali si possono reperire in letteratura [2],[3],[4], alcune formule e procedure iterative/approssimate spesso riferite a particolari layout e configurazioni geometriche, nell'ipotesi semplificativa di valori di permeabilità magnetica dei materiali costante. Con il progredire degli strumenti di simulazione e della potenza di calcolo di personal computer e work-station, la realizzazione di modelli agli elementi finiti per il dimensionamento del giunto richiede tempi e risorse di calcolo modesti: analisi magnetostatiche complete realizzate con il metodo agli elementi finiti su software commerciali possono essere eseguite in tempi nell'ordine dei minuti anche su notebook con prestazioni non particolarmente elevate.

Tempi di calcolo anche minori (nell'ordine dei secondi) possono essere ottenuti nel dimensionamento di giunti radiali adottando modelli semplificati-approssimati planari o bi-dimensionali. In particolare in questa sede si fa riferimento a modelli realizzati utilizzando il software Comsol Multiphysics™ che presenta la possibilità di gestire/automatizzare tutta la fase di pre-processing e post-processing del modello utilizzando direttamente script di istruzioni in ambiente Matlab™.

Si riportano in figura 9 alcune immagini relative all'andamento calcolato del flusso magnetico all'interno di giunti radiali (A) e assiali (B) utilizzando modelli FEM in ambiente Comsol.

### Giunto assiale: Validazione dello strumento FEM rispetto a test case noti reperibili in letteratura

Per quanto riguarda il calcolo e il dimensionamento di giunti magnetici assiali con settori omogeneamente magnetizzati come quello riportato in figura 7, si possono reperire in bibliografia [2],[3], [4] alcuni test case in cui i risultati ottenuti con altri strumenti di calcolo (procedura numerica iterativa appositamente sviluppata per la particolare geometria di giunto considerata) sono confrontati con le corrispondenti misure sperimentali. Le principali caratteristiche del giunto simulato sono riportate in tabella 2. Per quanto riguarda il confronto tra i risultati previsti in letteratura e quelli del modello FEM, le differenze sono minime: in particolare in viene confrontato l'andamento delle coppie trasmesse in funzione dell'angolo di sfasamento assiale tra i due anelli componenti il giunto; con angolo di sfasamento si intende la rotazione relativa tra le due parti del giunto. Dal confronto dei risultati in tabella 2, si nota la sostanziale



**Fig. 8- Esempio di giunto magnetico radiale realizzato presso i laboratori MDM di Pistoia**

congruenza tra risultati sperimentali e simulazione FEM eseguita utilizzando gli stessi dati resi disponibili in letteratura. In realtà per la sperimentazione di giunti assiali si può ricorrere ad assemblati come quello riprodotto in figura 11, dove i magneti commerciali di forma cilindrica sono montati e incollati all'interno di alloggiamenti in plastica di forma molto

semplice disegnati e successivamente prodotti con tecnologie di prototipazione rapida. In particolare per il giunto rappresentato in figura si suppone di utilizzare magneti realizzati in Neodimio-Boro (magnetizzazione pari a 850.000 A/m) ciascuno con diametro 8 mm e spessore di 10 mm disposti su una circonferenza di raggio 13 mm come visibile nello

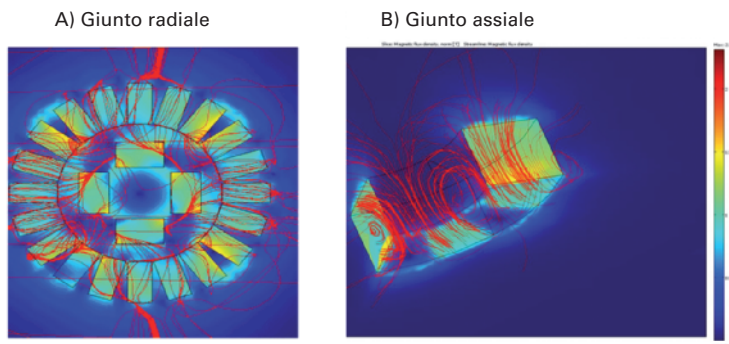
schema di figura 12. Per quanto riguarda il trasferimento si suppone una distanza di 1 mm. Anche per geometrie così semplici risulta comunque conveniente eseguire l'analisi del giunto tramite modello FEM. In figura 13 si riporta l'andamento della coppia trasmessa dal giunto in funzione dell'angolo di sfasamento del giunto. L'andamento calcolato presenta alcune lievi irregolarità probabilmente dovute al fatto che il calcolo il modello FEM viene generato in Comsol™ a partire da una procedura scritta in linguaggio Matlab in cui la creazione della mesh automatica per il calcolo privilegia la rapidità di esecuzione piuttosto che la precisione. E' interessante notare che il massimo della coppia trasmessa (poco meno di 1 Nm) si realizza per uno sfasamento angolare pari a  $p/2n$  dove  $n$  è il numero di coppie polari del giunto. Giunti assiali con caratteristiche simili a quello visibile in figura 11 sono stati effettivamente realizzati per alcune aziende operanti nel settore dell'automazione in Provincia di Firenze.

**Giunto radiale: Prototipazione Rapida e Sperimentazione**

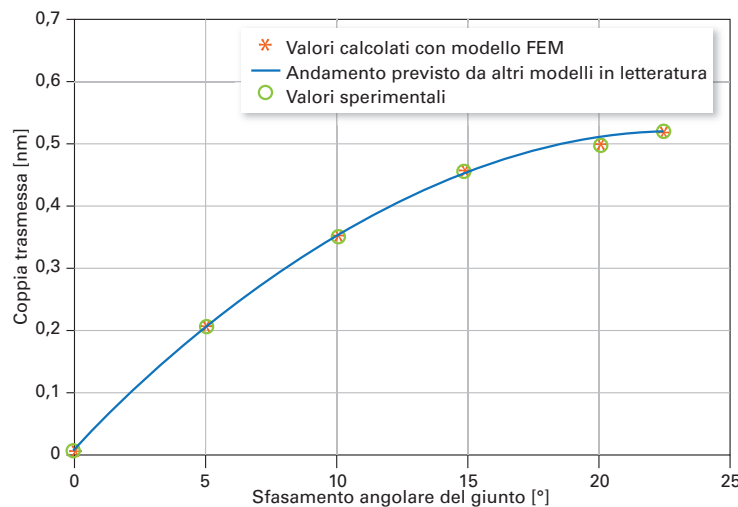
Il giunto radiale raffigurato in figura 8 è stato effettivamente realizzato presso i laboratori MDM Lab dell'Università di Firenze e adoperato con poche indispensabili modifiche per il montaggio, per la trasmissione magnetica di un propulsore utilizzato per un veicolo AUV che ha partecipato con successo al SAUCE, una competizione internazionale, in cui si confrontano team di giovani studenti e ricercatori. Il propulsore con trasmissione magnetica è visibile in figura 14. In particolare per la realizzazione del giunto, sono stati utilizzati magneti commerciali di forma prismatica, che sono stati assemblati all'interno di un alloggiamento realizzato in ABS utilizzando tecniche di prototipazione rapida. Come nel caso precedente i magneti sono del tipo Neodimio-Boro, con una magnetizzazione supporta ai fini del calcolo pari a 850.000 A/m. La stessa tecnologia di prototipazione rapida è stata applicata anche per la realizzazione dell'attrezzatura visibile in figura 14 utilizzata per verificare sperimentalmente la massima coppia trasmissibile dal giunto. In questo modo è stato possibile verificare l'entità delle massime coppie trasmissibili validando i risultati dei calcoli eseguiti sia con modelli FEM bi e tri-dimensionali come

**TAB. 3 – COMPARAZIONE DEI VALORI DI MASSIMA COPPIA TRASMISSIBILE CALCOLATA CON MODELLO FEM BI-TRI-DIMENSIONALE E CORRISPONDENTE MISURA SPERIMENTALE.**

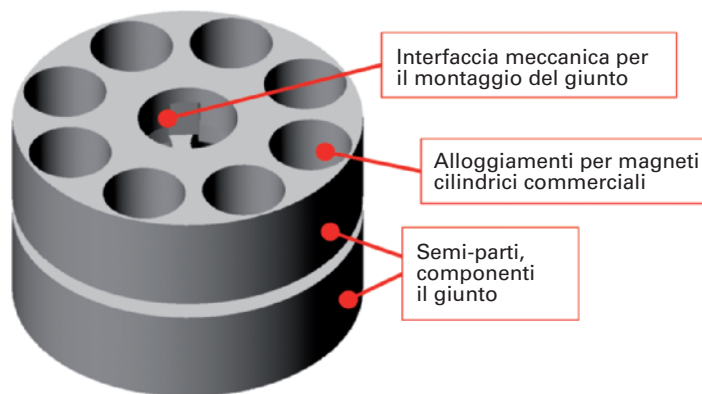
Modalità di calcolo della massima coppia trasmissibile	Valore	Errore relativo rispetto a misura sperimentale
FEM 2D	1,6 [Nm]	20%
FEM 3D	1,85[Nm]	7,5%
Misura sperimentale	2,0 [Nm]	0%



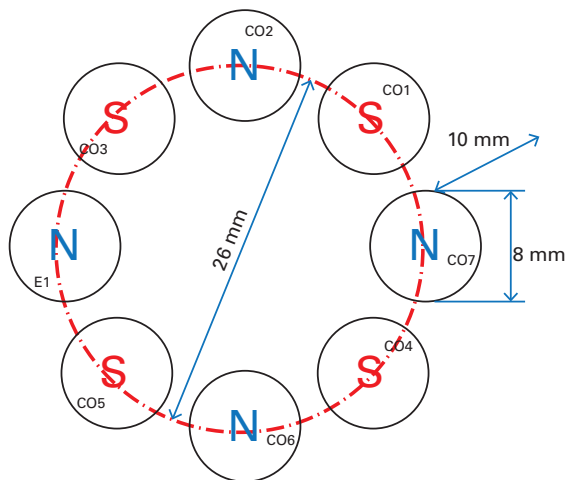
**Fig. 9 – Andamento del flusso magnetico all'interno di giunti magnetici, esempi di modelli agli elementi finiti di giunti radiali (A) e assiali (B).**



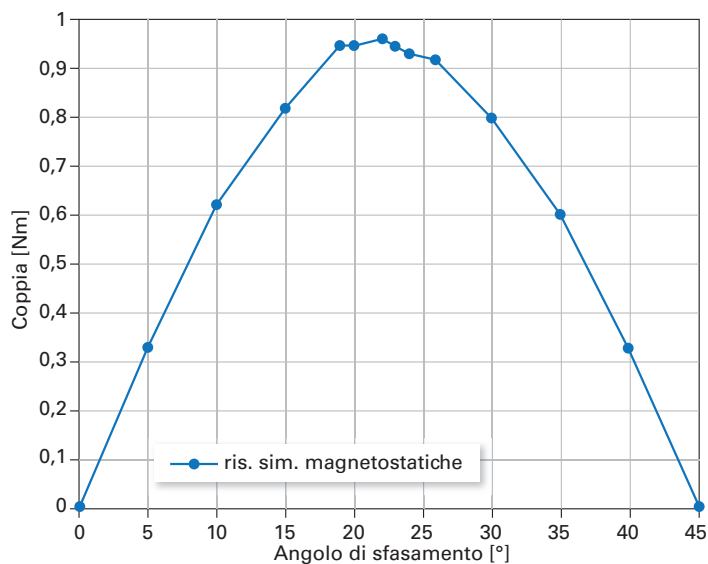
**Fig. 10 – Andamento della coppia trasmessa dal giunto in funzione dell'angolo di sfasamento in direzione assiale, confronto tra risultati sperimentali, andamento previsto in letteratura [4] e modello FEM.**



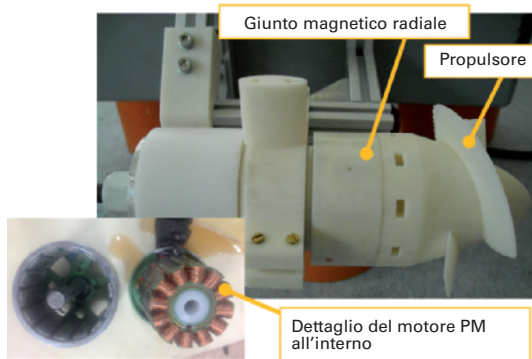
**Fig. 11 – Alloggiamenti dei magneti componenti le due semi-parti del giunto.**



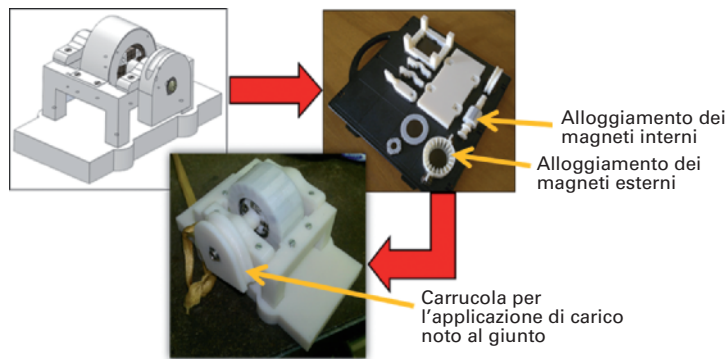
**Fig. 12 – Esempio-schema di giunto magnetico assiale costruito assemblando magneti commerciali di forma cilindrica**



**Fig. 13 – Andamento della coppia trasmessa dal giunto in funzione dello sfasamento angolare**



**Fig. 14 – Giunto magnetico radiale utilizzato per la propulsione del veicolo Turtle utilizzato dal team di studenti UNIFI alla competizione SAUCE 2012 [5].**



**Fig. 15 – Realizzazione del giunto e della attrezzatura necessaria con tecnologia di prototipazione rapida.**

visibile in tabella 3, dove i corrispondenti valori numerici vengono riportati: è interessante notare che il calcolo effettuato con il modello tri-dimensionale risulta più accurato di quello effettuato considerando una più semplice trattazione bidimensionale. A dispetto della minore accuratezza, la simulazione con modelli bidimensionali richiede tempi e risorse di calcolo estremamente brevi nell'ordine dei secondi su un PC o un notebook commerciale. È tuttavia interessante notare che entrambi i modelli forniscono risultati relativamente precisi e comunque cautelativi ai fini del dimensionamento del giunto. Queste differenze sono compatibili con tolleranze nella conoscenza dei principali parametri fisici e in particolare delle proprietà magnetiche dei materiali e con

gli errori introdotti nella soluzione da ipotesi semplificative e discretizzazione adottate nel modello FEM.

### **Realizzazione di rapporti di trasmissione non unitari: esempio i riduttori radiali**

La disponibilità di strumenti di calcolo relativamente rapidi e accurati e la necessità di poter realizzare rapporti di trasmissione diversi da quello unitario ha portato allo sviluppo di particolari tipologie di trasmissione magnetica, i cosiddetti “magnetic gearing” [6-14]: con questa generica denominazione vengono identificate diverse tipologie di trasmissioni e giunti magnetici che in analogia con i corrispondenti ruotismi consentono la realizzazio-

ne di rapporti di trasmissione diversi da quello unitario.

I principali vantaggi di queste soluzioni sono essenzialmente cinque:

- **Ridotta usura e manutenzione:** la trasmissione del moto avviene senza contatto eliminando quindi tutti quei fenomeni di usura che provocano il deterioramento delle superfici di dentature, pulegge o altri organi meccanici normalmente utilizzati per la trasmissione. In caso dell'applicazioni di sovraccarichi maggiori della massima coppia trasmissibile, si verifica uno scorrimento relativo tra le due parti del giunto senza che questo determini alcun danneggiamento meccanico dello stesso. E' comunque possibile costruire il riduttore in modo da limitare il massimo scorrimento

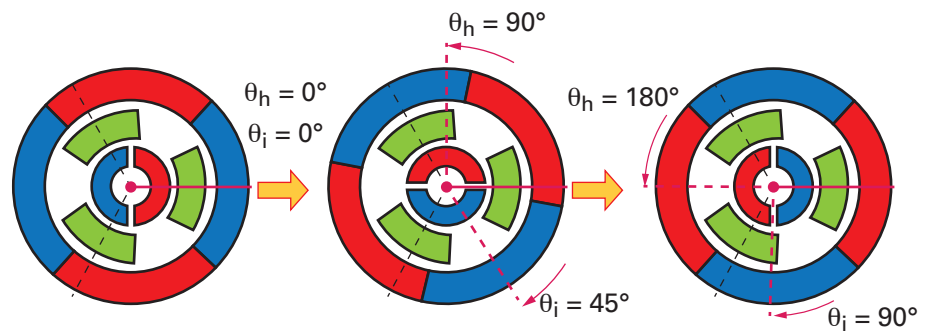
tra le due parti prevedendo comunque delle battute meccaniche non ingaggiate in normali condizioni di funzionamento.

– **Silenziosità:** l'assenza di contatti tra parti meccaniche determina la possibilità di trasmettere il moto in maniera estremamente silenziosa. Tale caratteristica può risultare estremamente utile o desiderabile in applicazioni militari.

– **Efficienza:** l'assenza di attriti e urti tipici tra superfici meccaniche in movimento a conseguenze positive sul rendimento di trasmissione che risulta relativamente elevato e costante per tutta la vita del meccanismo per la sostanziale assenza di parti soggette a strisciamenti e usure.

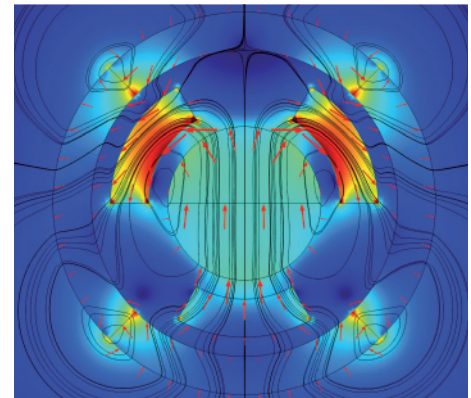
– **Ingombri:** gli ingombri di questo tipo di trasmissioni, pur essendo maggiori di quelli dei corrispondenti ruotismi con ruote dentate, risultano comunque modesti.

– **Tolleranze di Montaggio:** rispetto a trasmissioni con ruote dentate convenzionali le tolleranze di montaggio sono molto più grandi. Di conseguenza l'adozione di trasmissioni



**Fig. 16 – Principio di funzionamento di un riduttore radiale con  $p_h=1$  e  $p_l=2$  (in rosso e blu settori magnetici con diversa magnetizzazione, in verde i settori statorici in materiale ferromagnetico).**

magnetiche consente di risolvere problemi relativi a tolleranze di allineamento e montaggio degli alberi e più in generale della trasmissione. Tra le diverse tipologie di magnetic gearings oggetto di studio in letteratura si ritiene tra i più interessanti e tecnologicamente maturi, i cosiddetti riduttori magnetici radiali; il giunto, visibile nello schema di figura 16 è composto di due anelli magnetici concentrici ciascuno solidale rispettivamente a all'albero movente e a quello cedente del riduttore. Il numero delle coppie polari dell'anello interno è pari a  $p_h$ , quello dell'esterno pari a  $p_l$ .  $p_h$  e  $p_l$  sono due interi positivi primi tra loro e  $p_h$  risulta molto minore di  $p_l$ . Nel traferro tra i



**Fig. 17 – Esempio di andamento simulato del flusso magnetico in un riduttore magnetico radiale**

due anelli è riportato un anello fisso, solidale al telaio-statore del riduttore, che è costituito da una serie di settori di materiale ferro-magnetico e diamagnetico alternati.

In particolare il numero  $n_s$  dei settori di materiale ferro-magnetico viene scelto in modo da soddisfare la seguente relazione:

$$n_s = P_1 + P_h \quad (1)$$

Il rapporto di trasmissione  $\tau$  realizzato tra i due anelli magnetici risulta definito dalla relazione (2):

$$\tau = \frac{\omega_1}{\omega_h} = - \frac{P_h}{P_1} \quad (2)$$

La relazione (2), fatto eccezione per il segno, risulta del tutto analoga a quello calcolabile per una coppia di ruote dentate con un numero di denti di  $z_1$  e  $z_2$  rispettivamente pari al numero di coppie polari  $p_h$  e  $p_l$ .

Si riporta in figura 16 uno schema semplificato di un giunto riduttore che realizza un rapporto di riduzione pari a -0,5 essendo  $p_h$  e  $p_l$  rispettivamente pari a 1 e 2.

Anche in questo caso per la simulazione e il calcolo delle principali caratteristiche del giunto può essere agevolmente effettuato tramite modelli FEM come quello rappresentato in figura 17 realizzato sempre utilizzando Comsol Multiphysics™.

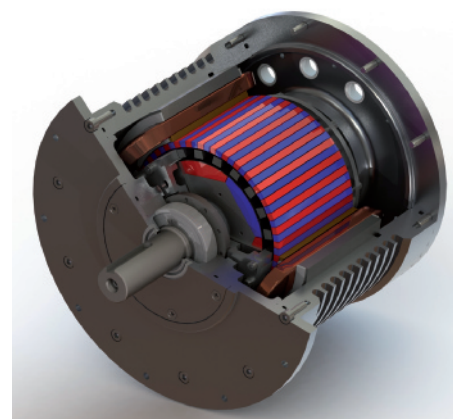
## Conclusioni e Sviluppi Futuri

In questo breve articolo sono descritti alcuni esempi relativi alla realizzazione di attuatori e pompe sommerse con particolare riferimento a soluzioni convenzionali come quella del motore immerso in olio e/o innovative come le trasmissioni di tipo magnetico. In particolare per il dimensionamento di questo tipo di soluzioni viene proposto l'uso strumenti FEM che consentono una rapida e precisa simulazione delle principali caratteristiche del giunto con tempi di calcolo che vanno da pochi secondi a pochi minuti in funzione di complessità di modello e sistema simulato. La prototipazione, la validazione e la verifica sperimentali risultano facilitati dalla disponibilità a costi contenuti sia dei magneti sia delle tecnologie di prototipazione rapida utili alla creazione delle altre parti del giunto.



**Fig. 18** – Esempio di ruote dentate magnetiche (possibili applicazione riduttori cicloidal magnetici 0), da catalogo in rete MGT ([www.magnetpowertransmission.com](http://www.magnetpowertransmission.com)).

Attualmente gli autori si stanno concentrando sulla realizzazione a basso costo di sistemi di trasmissione magnetica più complessi come cambi e riduttori magnetici la cui applicazione è ancora ristretta a pochi settori, ad alta intensità di capitali come quello, ad esempio, militare. Si riportano nelle figure 18 e 19 alcuni esempi di soluzioni particolarmente in-



**Fig. 19** – Esempio di moto-riduttore integrato (motore elettrico e riduttore magnetico radiale integrati in unica soluzione), immagine tratta da documentazione tecnica magnomatics ([www.magnomatics.com](http://www.magnomatics.com)).

novative tratti da cataloghi e doc. tecnica disponibile in rete. Di particolare interesse risultano anche applicazioni ai settore eolico o all'Oil&Gas, dove la ridotta manutenzione ed efficienza anche in condizioni ambientali difficili, risultano caratteristiche estremamente desiderabili.

© RIPRODUZIONE RISERVATA

## Bibliografia

- A. Ridolfi, B. Allotta, R. Costanzi, L. Pugi, G. Vettori: Design and simulation of an autonomous underwater vehicle, CD-ROM Proceedings of the 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), September 10-14, 2012, Vienna, Austria, Eds.: Eberhardsteiner, J.; Böhm, H.J.; Rammerstorfer, F.G., Publisher: Vienna University of Technology, Austria, ISBN: 978-3-9502481-9-7
- E.P. Furlani, R. Wang, H.Kusnadi "A Three-Dimensional Model for Computing the torque of radial couplings IEEE Transactions on Magnetics Vol.31 No. 5 September 1995
- E.P. Furlani, Formulas For the force and Torque of Axial Couplings IEEE Transactions on Magnetics Vol. 29 No. 5 September 1993
- E.P. Furlani, Formulas For the force and Torque of Axial Couplings IEEE Transactions on Magnetics Vol. 29 No. 5 September 1993
- B.Allotta, F.Bartolini, R.Costanzi, N.Monni, A.Ridolfi, G.Vettori, "SAUC-E 2012 - UNIFI Team - Turtle vehicle", Proceedings of SAUC-e (Student Autonomous Underwater Vehicle Challenge-Europe) 2012, La Spezia, Italy, 2012.
- K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear," Proc. Inst. Elect. Eng.—Electr. Power Appl., vol. 151, no. 2, pp. 135–143, Mar. 2004.
- P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, "Development of a high performance magnetic gear," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 3, pp. 764–770, May/June. 2005.
- J. Rens, K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "A Novel Magnetic Harmonic Gear," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, no. 1, pp. 206–212, Jan./Feb. 2010.
- R. Holehouse, K. Atallah, and J. Wang, "Design and Realization of a Linear Magnetic Gear," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 10, pp. 4171–4174, Oct. 2011.
- K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 4, pp. 2844–2846, Jul. 2001.
- E. Gouda, S. Mezani, L. Baghli, and A. Rezzoug, "Comparative Study Between Mechanical and Magnetic Planetary Gears," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 2, pp. 439–450, Feb. 2011.
- Jørgensen, T. Andersen, and P. Rasmussen, "The Cycloid Permanent Magnetic Gear," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 6, pp. 1659–1665, Nov./Dec. 2008.
- W. Frank and H. Toliyat, "Gearing Ratios of a Magnetic Gear for Wind Turbines," in Conf. IEMDC 2009, pp. 1224–1230.
- L. Shah, A. Cruden, and B. W. Williams, "A Variable Speed Magnetic Gear Box Using Contra-Rotating Input Shafts," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 2, pp. 439–450, Feb. 2011.