



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA
MECCANICA AVANZATA E TECNICA DEL VEICOLO
METODI DI SIMULAZIONE E PROGETTAZIONE MECCANICA
XXV CICLO

**METODI DI PROGETTAZIONE INTEGRATA E
SIMULAZIONE DI SERVOMECCANISMI AD
ELEVATE PRESTAZIONI PER LA ROBOTICA E
L'AUTOMAZIONE INDUSTRIALE**

Tutor
Prof. Angelo Oreste Andrisano

Candidato
Ing. Alessandro Guerra

Co - Tutor
Ing. Marcello Pellicciari

Sommario

Abstract	4
1. Stato dell'arte	5
1.1. Automazione industriale.....	5
1.2. Macchine Automatiche.....	8
1.2.1. Macchine di tipo I1 (Mos stazionari, trasferimento prodotto intermittente, up semplice)	9
1.2.2. Macchine di tipo I1c (Mos stazionari, trasferimento prodotto intermittente, up composta)	11
1.2.3. Macchine di tipo I2 (macchine a trasferimento intermittente sincrono)	11
1.2.4. Macchine tipo I2c operanti su unità di prodotto composte	14
1.2.5. Macchine di tipo C1 (up con moto continuo, Mos con moto alternativo)	16
1.2.6. Macchine di tipo C2 (up con moto continuo, Mos a teste operatrici multiple con moto continuo).....	16
1.3. Servomeccanismi.....	19
1.3.1. Azionamenti elettrici	20
1.3.2. Tecniche controllo del moto	50
1.4. Progettazione	53
1.4.1. Meccanica.....	53
1.4.2. Controllo.....	54
1.4.3. Leggi di moto	55
2. Soluzioni attuali	62
2.1. Metodi di progettazione sequenziali.....	62
2.2. Simulazione meccanica tramite software multibody a corpi rigidi.....	62
2.3. Sistemi di controllo più utilizzati.	64
2.3.1. P.I.D.....	64
2.3.2. Controlli in cascata	67
2.3.3. Feed Forward.....	68
2.3.4. Gain Scheduling	71
2.4. Metodi di simulazione a parametri concentrati.	72
3. Obiettivi della tesi	73
3.1. Integrazione tra meccanica e sistemi di controllo.	73
3.2. Metodo di progettazione.....	73
4. Metodo utilizzato	75

4.1.	Strumenti utilizzati	76
4.1.1.	Software MFBD.	76
4.1.2.	Software a parametri concentrati	77
4.1.3.	Cosimulazione.	77
4.2.	Confronto con altri metodi	78
4.2.1.	Analisi usando solamente ambienti programmabili con diagrammi a blocchi.	78
4.2.2.	Analisi utilizzando sistemi MBD.	79
5.	Case Study	79
5.1.	La macchina Borghi	79
5.1.1.	Componenti e loro funzioni.	79
5.1.2.	Cambio formato	83
5.1.3.	Azionamenti desmodromici e cambio formato.	83
5.1.4.	Nuovo design della macchina.	83
5.2.	Applicazione del metodo	83
5.2.1.	Creazione del modello multibody	83
5.2.2.	Cinematica inversa.	92
5.2.3.	Creazione di un prototipo reale	93
5.2.4.	Differenza tra modello e dati sperimentali	94
5.2.5.	Integrazione del sistema di controllo	95
5.2.6.	Implementazione attriti	100
5.2.7.	Integrazione della dinamica del motore	102
5.2.8.	Analisi MFBD	106
5.2.9.	Parametrizzazione della cinematica del modello	106
5.3.	Risultati ottenuti	108
6.	Conclusioni.	115
7.	Bibliografia	116

Abstract

Nelle moderne macchine automatiche trovano sempre più spazio sistemi elettronici per l'attuazione del moto. L'utilizzo sempre più frequente di meccanismi comandati da motori elettrici, detti servomeccanismi, segue l'esigenza di ottenere macchine automatiche che concilino alte prestazioni con una maggiore flessibilità operativa [1].

La progettazione di un servo meccanismo racchiude però per il progettista una sfida complessa, in quanto per riuscire a determinare quali siano le prestazioni di una macchina in termini di precisione e velocità di esecuzione è necessario tener conto di molteplici fattori, appartenenti a campi dell'ingegneria differenti, che molte volte sono interdipendenti tra loro. Per questo motivo un approccio mirato ai singoli problemi non è efficace, ma diventa necessario affrontare il problema nella sua globalità.

Allo stato dell'arte è possibile trovare molti studi che si occupano con grande dettaglio di problematiche inerenti al mondo delle macchine automatiche, ma non è presente a nostro avviso nessuno strumento che aiuti il progettista ad avere un approccio complessivo al problema.

Questa mancanza si riflette anche sul processo progettuale delle aziende che operano nel settore. Infatti al giorno d'oggi il processo di progettazione è composto di un flusso che parte dall'ufficio meccanico, che progetta la macchina al fine di ottenere un prototipo, per poi passare all'ufficio che si occupa di controlli, che si trova ad operare su una macchina finita senza possibilità di effettuare cambiamenti significativi. Nel caso in cui decisioni prese a monte si manifestino successivamente come problematiche o totalmente inadeguate, spesso non è possibile effettuare le modifiche necessarie senza dover ricominciare il processo progettuale dall'inizio, con enormi spese di tempo e denaro.

Lo scopo del lavoro di questi tre anni è stato lo studio e l'implementazione di un metodo di simulazione e progettazione integrata per macchine automatiche ad alte prestazioni, che permettesse ai progettisti di poter valutare a priori le conseguenze delle proprie scelte progettuali e permettesse di evidenziare le interdipendenze tra i vari parametri costruttivi.

Il metodo, basato sull'integrazione di diversi sistemi CAE, avrà come risultato la creazione di un prototipo virtuale in grado di predire con accuratezza quali saranno le prestazioni della macchina in esame.

Il prototipo virtuale sarà inoltre caratterizzato da un alto grado di parametrizzazione delle variabili di sistema, in modo da permettere al progettista di procedere alla sua ottimizzazione secondo i metodi classici presenti in letteratura.

1. Stato dell'arte

1.1. Automazione industriale

Le scelte di programmazione a medio e lungo termine di una qualunque azienda moderna sono principalmente finalizzate al miglioramento del business . Oltre ad una mirata strategia aziendale, il raggiungimento di un tale obiettivo richiede il massimo impegno e la più stretta collaborazione tra tutti i reparti che costituiscono l'azienda. Focalizzando l'attenzione sul settore manifatturiero, possiamo dire che l'ottimizzazione e una buona sinergia dei reparti di progettazione e produzione, che molto interessano l'Ingegneria, determinano in buona parte la crescita che l'azienda può ottenere in termini di competitività sul mercato.

In base alla tipologia di azienda, alle caratteristiche dei prodotti e ai relativi volumi di produzione, esistono differenti strategie produttive che, agendo sui processi e il layout della fabbrica, consentono l'applicazione di una soluzione vincente per il perseguimento dell'obiettivo di miglioramento del business: una tra le più importanti è sicuramente quella che riguarda l'automazione industriale.

In generale, con il termine "automazione" si intende la scienza che studia il controllo e la regolazione dei processi fisici. Applicata al mondo industriale, essa riveste un ruolo chiave nello studio e nell'ottimizzazione delle soluzioni atte a realizzare processi produttivi automatizzati che minimizzino i tempi e i costi di produzione. Negli anni è diventata uno dei principali fattori di sviluppo e modernizzazione dell'industria: gli investimenti sempre più importanti delle aziende leader continuano ad alimentare questa fonte inesauribile di innovazione che garantisce un costante sviluppo di soluzioni produttive completamente automatizzate e sempre più flessibili.

La crescente necessità di adeguamento della produzione alla variabilità del mercato sta determinando un progressivo avvicinamento all'idea della fabbrica digitale, dove le fasi di progettazione dei prodotti e dei loro sistemi di produzione avviene di pari passo, attraverso un sempre maggiore scambio di informazioni (in tempo reale), reso possibile da sistemi informatici sempre più evoluti.

Per comprendere il ruolo fondamentale che l'automazione industriale riveste nel mondo moderno è sufficiente rendersi conto del fatto che abbraccia tutto il settore produttivo: a partire dall'industria di processo fino al settore automotive, dall'industria tessile all'alimentare, dall'elettronica al manifatturiero, fino all'industria chimico farmaceutica e al packaging.

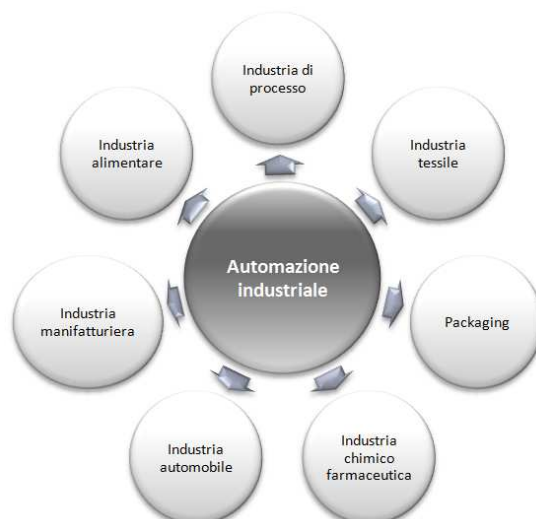


Figura 1.1: Campi di applicazione dell'automazione industriale

L'assenza di automazione renderebbe una moltitudine di processi produttivi moderni se non impossibili da realizzare, decisamente poco redditizi dal punto di vista economico. L'automazione industriale è un settore in continua evoluzione, che comprende aziende e centri di ricerca dedicati al progetto e alla sperimentazione di soluzioni tecnologiche e di impianto capaci di automatizzare un processo produttivo, limitando (se non addirittura escludendo) la necessità dell'intervento diretto dell'uomo.

Lo strumento che rende possibile convertire l'idea di automazione in risultati operativi è la macchina automatica: si tratta di una macchina speciale, che permette un'esecuzione ciclica di una predeterminata sequenza di operazioni a velocità molto elevate e ne garantisce un'ottima ripetibilità. L'inserimento in serie di più macchine automatiche costituisce una linea automatizzata.

I vantaggi che derivano dall'introduzione di una macchina automatica (o una linea automatizzata) in un processo produttivo possono essere molteplici, ma i principali sono sicuramente quelli legati alla riduzione del tempo ciclo e all'innalzamento della qualità media del prodotto. Questi sono due importanti fattori che possono influenzare il livello di competitività di un'azienda, in particolare se sono in gioco volumi di produzione decisamente elevati. Compatibilmente con le tecnologie disponibili (e i relativi costi), il massimo risultato operativo è perseguibile solamente attraverso uno studio combinato delle soluzioni progettuali e produttiva con cui si andrà a realizzare il prodotto. Infatti, l'automazione non deve essere intesa come solo limitata alla fase di realizzazione, ma al fine di sfruttarne a pieno le incredibili potenzialità è necessario prenderla in considerazione fin dalle primissime fasi di definizione e sviluppo del prodotto. L'idea di automazione deve quindi essere fortemente integrata nella filosofia aziendale: solo dalla ricerca della massima sinergia tra il processo e il prodotto è possibile ottenere il massimo risultato.

Nei processi industrializzati, la progressiva riduzione dei tempi è soprattutto vincolata alla capacità di completare la sequenza di operazioni con velocità sempre maggiori. È per questo motivo che sono richieste macchine “speciali”, in quanto appositamente studiate e costruite per raggiungere l'eccellenza delle prestazioni nel compimento di un dato processo produttivo.

Se tali macchine sono nate allo scopo di migliorare l'efficienza di un processo, hanno però anche sempre manifestato dei forti limiti di flessibilità. Su questo aspetto l'azienda deve porre una grandissima attenzione all'atto di decidere se automatizzare o meno un dato processo produttivo: infatti, deve essere ben chiaro che l'ottimizzazione delle prestazioni necessita di costruire la macchina in modo tale che si adatti perfettamente alle esigenze specifiche del prodotto ma che, una volta costruita, difficilmente potrà in seguito essere riadattata ad eventuali future modifiche sul prodotto. Per questa ragione, quando i volumi sono fortemente diversificati o si prevede uno sviluppo a breve del prodotto, l'automazione perde di efficacia, in quanto per sua stessa natura difficilmente si adatta alle modifiche di prodotto. Nella situazione contraria, in cui i prodotti sono caratterizzati da volumi e da un tasso di standardizzazione elevato, l'automazione è una soluzione di sicuro interesse per la crescita dell'azienda.

La tipologia di prodotto che nel corso del tempo ha ricevuto il maggiore beneficio dall'automazione della sua produzione è caratterizzata da forme e dimensioni chiare e immutabili nel tempo: un esempio classico sono le confezioni di sigarette. Per questo genere di prodotto non è infatti richiesta una personalizzazione della forma: si faccia caso al fatto che i pacchetti di sigarette presentino in linea generale forma e dimensioni standard.

Nell'ultimo ventennio il pesante impatto dell'elettronica ha consentito un ulteriore accrescimento delle prestazioni che hanno portato a realizzare macchine eccezionali, si pensi solo che le moderne macchine per il confezionamento automatico dei pacchetti di sigarette sono in grado di realizzare dalle 4000 alle 20000 sigarette al minuto, il che significa dai 200 ai 1000 pacchetti al minuto. La progettazione di una macchina capace di tali prestazioni è straordinariamente complessa, in quanto sono richieste conoscenze specifiche e integrate di meccanica, elettronica e informatica. Inoltre, la necessità delle aziende di seguire l'incostante andamento del mercato, sta determinando il significativo incremento delle richieste di macchine in grado di superare l'innato limite della mancanza di flessibilità, introducendo almeno la possibilità di ampliare la compatibilità a lotti modulari. Nella pratica, questo significa riuscire ad utilizzare una stessa macchina per prodotti appartenenti sempre ad una stessa famiglia, ma con una dimensione che può essere variata tra due o più valori discreti.

Queste richieste di flessibilità stanno spingendo i costruttori di macchine automatiche a creare una prima classe di macchine flessibili che, attraverso una rapida sostituzione di parti e/o la modifica dei profili di moto degli assi macchina (permesso dall'utilizzo di servomeccanismi e camme elettroniche) compiano un primo piccolo passo verso un maggiore adattamento dei piani di produzione alle richieste del mercato.

Queste ultime considerazioni possono aiutare a comprendere quali possano essere oggi (e quali potranno essere nell'immediato futuro) le caratteristiche che determinano il livello di competitività e che spingono le aziende a volgere la loro ricerca in determinate direzioni.

1.2. Macchine Automatiche

Parlare di automazione industriale vuol dire parlare di macchine automatiche. Le macchine automatiche svolgono all'interno dell'industria contemporanea le mansioni più svariate. Esistono diversi tipi di macchine automatiche, dalle più rigide, in grado di fornire performance di produttività assai elevate, alle più flessibili, che garantiscono la possibilità di gestire prodotti tra loro molto differenti. In base alle diverse tipologie di automazione richiesta, sono nate diverse architetture operative che andremo di seguito a mostrare brevemente.

Si intende per architettura operativa di una macchina automatica l'organizzazione interna dei mezzi per trasferire il prodotto e di quelli per operare su di esso. L'architettura di una macchina viene definita attraverso la considerazione dei seguenti aspetti:

- modalità di trasferimento del prodotto e tipologia del mezzo di trasferimento;
- numero e tipologia dei Mos (Mezzi operativi specifici) presenti sulla macchina per la esecuzione delle varie funzioni previste dal ciclo produttivo;
- numero di up (unità prodotto) lavorate simultaneamente da parte di un Mos;
- tipo di coordinamento operativo esistente tra i vari Mos.

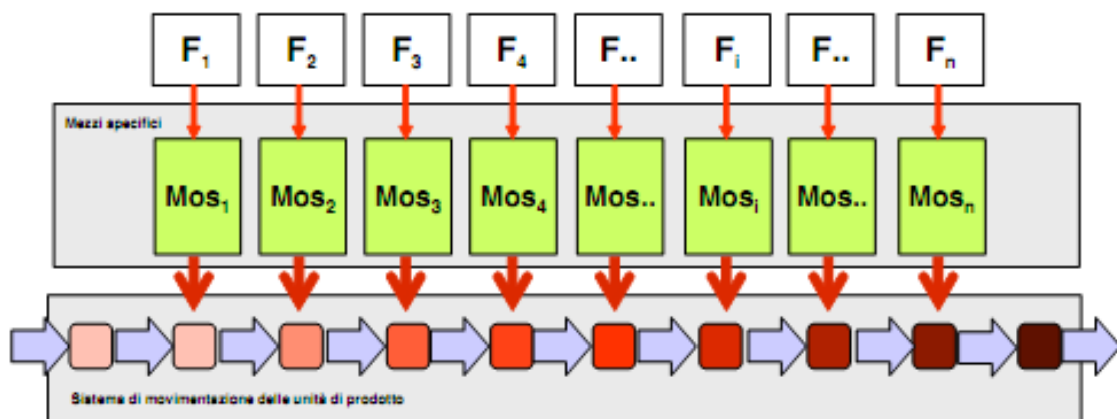


Figura 1.2: schema generico dell'architettura di una macchina automatica

Schema generico dell'architettura di una macchina automatica.

In particolare, con riferimento alla Figura 1.3, si possono individuare due famiglie principali di architetture: nella prima (le cui tipologie sono indicate con la lettera I), i vari Mos operano su up in sosta ed il moto del prodotto è di tipo intermittente; nella seconda famiglia (le cui tipologie sono indicate con la lettera C), i Mos operano su up in movimento, quindi devono disporre di una o più estremità attive (teste operatrici) in grado di muoversi assieme al prodotto durante le fasi attive.

Moto del prodotto	Moto delle teste operatrici del Mos	Tipo di up		Coordinamento tra i Mos
		Semplice	composta	
Intermittente	Mos stazionari	I1 / I1B	I1c	In successione
		I2	I2c	Contemporaneo
Continuo	Alternativo	C1	C1c	Contemporaneo
	Continuo	C2		Contemporaneo

Figura 1.3: principali architetture di una macchina automatica

Come si può notare, esistono quattro architetture operative di base, denominate nel seguito I1, I2, C1, C2, operanti su unità di prodotto semplici, cui possono essere associate delle varianti costruttive operanti su up composte. Con tale termine si intende una unità di prodotto formata raggruppando più up semplici e facendo agire il Mos su tale insieme. Si è trascurato in questa classificazione di considerare la traiettoria del prodotto, che può essere di tipo lineare, curvilineo, misto.

1.2.1. Macchine di tipo I1 (Mos stazionari, trasferimento prodotto intermittente, up semplice)

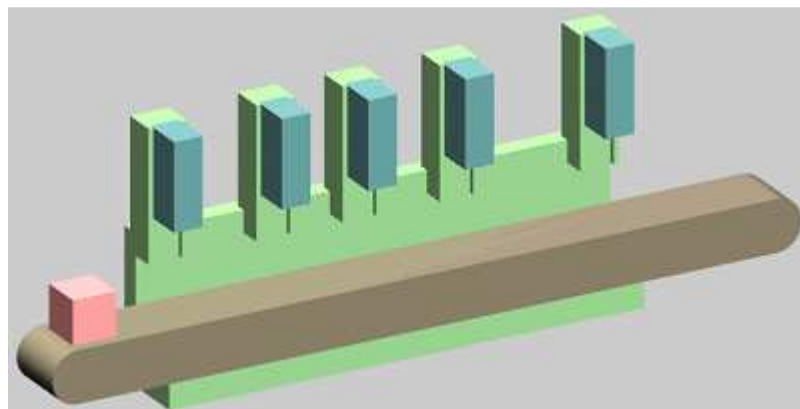


Figura 1.4: Schema di una macchina automatica di tipo I1

Come si può vedere dallo schema di Figura 1.4, la macchina dispone di un certo numero di mezzi operativi disposti lungo il percorso della unità di prodotto, la quale viene movimentata da una stazione alla successiva ad opera del sistema di trasferimento del prodotto.

Si può notare come i vari Mos possano essere collocati a distanze diverse, imponendo al sistema di trasporto corse diverse di volta in volta. Una sola up è presente sul sistema di trasporto. Esiste un solo mezzo specifico in operazione in un istante generico, precisamente quello della stazione in cui si trova l'up, mentre gli altri restano inattivi. L'unità di prodotto viene trasferita dal sistema di trasporto da un mezzo operativo all'altro dopo il completamento delle rispettive operazioni: l'unità di prodotto successiva entrerà nella macchina solo dopo l'uscita di quella che è stata ultimata. Questa architettura non è di frequente impiego e può essere adottata in macchine semplici e lente in cui sia richiesto un numero di funzioni molto limitato. Questa configurazione è adottata necessariamente quando architetture a più alta produttività non sono giustificabili per motivi funzionali, (ad esempio per impossibilità di movimentare simultaneamente più unità di prodotto) oppure per insufficienti motivazioni economiche (l'adozione di una pluralità di mezzi specifici per una data funzione non risulta conveniente, specie se essi risultano complessi e ad alta specializzazione tecnologica).

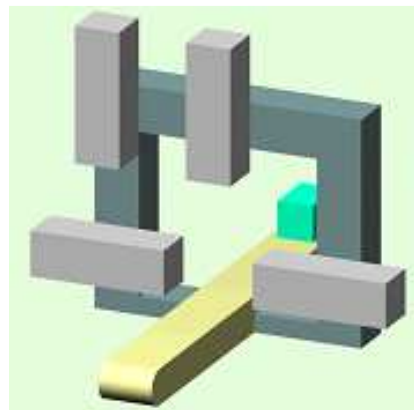


Figura 1.5: Schema di una macchina automatica di tipo I1B

Una variante della architettura I1 (che indicheremo I1B) usata molto di frequente prevede per l'unità di prodotto una sola sosta in una posizione di lavoro definita; sulla unità di prodotto intervengono i vari Mos che, in successione eseguono le funzioni richieste. Uno schema di tale architettura è illustrato in Figura 1.5. Nelle macchine sopra esaminate, l'organizzazione seriale della sequenza operativa eseguita su una sola unità di prodotto, con i vari mezzi specifici operanti singolarmente e in successione, risulta una scelta motivata dalla esigenza di ritmi produttivi non elevati oppure imposta dalla constatazione che, pur essendo appetibili ritmi produttivi elevati, esistono limitazioni strutturali ed economiche alla creazione di macchine con architettura più complessa.

1.2.2. Macchine di tipo I1c (Mos stazionari, trasferimento prodotto intermittente, up composta)

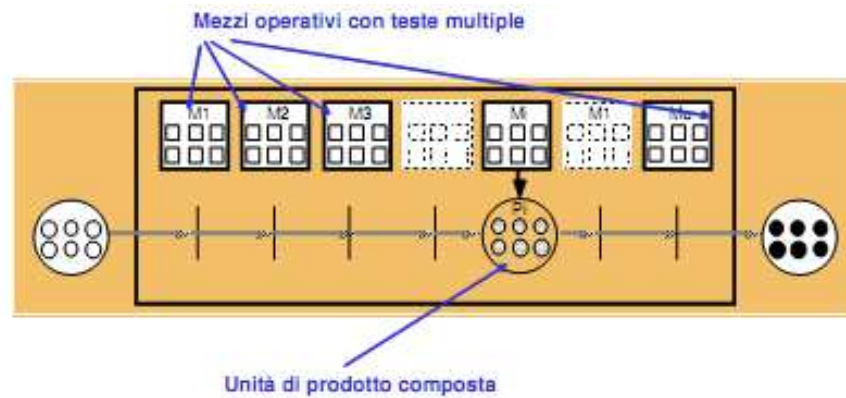


Figura 1.6: schema di una macchina automatica di tipo I1c operante su up composta.

Si definisce unità di prodotto composta una up costituita da più up semplici raggruppate secondo uno schema determinato (numero, giacitura relativa). Normalmente corrisponde ad un raggruppamento di unità semplici significativo ai fini della successiva confezione e commercializzazione del prodotto: la disposizione può essere in fila di up semplici oppure matrice di up semplici. Una up composta può essere trattata come una unità semplice, con le stesse architetture operative delle macchina già esaminate, a condizione che i mezzi specifici siano dotate di teste operatrici multiple, in modo da agire contemporaneamente su tutte le unità semplici presenti entro l'unità composta. E' possibile adottare teste operatrici multiple quando le funzioni svolte sono semplici e la testa operatrice ha ridotte dimensioni, semplicità costruttiva e funzionale, basso costo.

1.2.3. Macchine di tipo I2 (macchine a trasferimento intermittente sincrono)

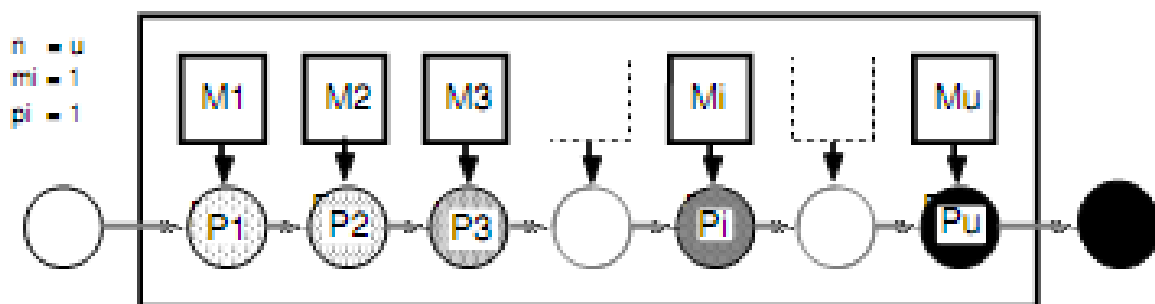


Figura 1.7: schema di una macchina automatica di tipo I2 a trasferimento intermittente sincrono.

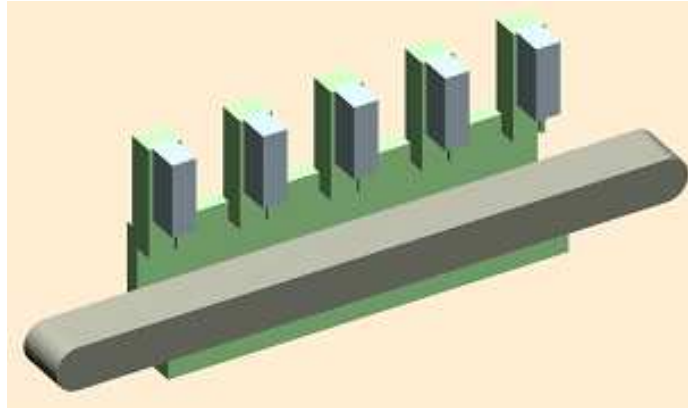


Figura 1.8: schema di una macchina automatica di tipo I2.

Questa architettura operativa risulta quella più spesso adottata nella automazione di processi discreti di massa e si presenta in una varietà molto grande di forme applicative. Con riferimento allo schema di Figura 1.7 e alla Figura 1.8, le caratteristiche fondamentali di questa architettura sono:

- i mezzi specifici sono disposti lungo la traiettoria del prodotto distanziati di un passo costante o di multipli interi di tale passo (passo macchina);
- il trasferimento di tutte le up presenti nella macchina è sincrono, cioè eseguito da un mezzo di trasferimento comune in grado di muovere simultaneamente con corsa uguale al passo macchina tutte le unità di prodotto presenti; ogni punto di sosta delle unità di prodotto viene genericamente indicato come stazione;
- normalmente ogni mezzo operativo opera su una unità di prodotto presente nella relativa stazione durante il periodo di sosta;
- i mezzi specifici operano simultaneamente, ciascuno sulla propria unità di prodotto;
- tutte le unità di prodotto sono fatte avanzare simultaneamente di un passo macchina, da parte del sistema di trasferimento, solo dopo che tutti i mezzi specifici hanno terminato le rispettive funzioni;
- al progressivo avanzamento di ogni up corrisponde la progressiva esecuzione delle funzioni previste dal ciclo produttivo.

Le configurazioni operative di base sono due (Figura 1.9):

- disposizione in linea
- disposizione circolare

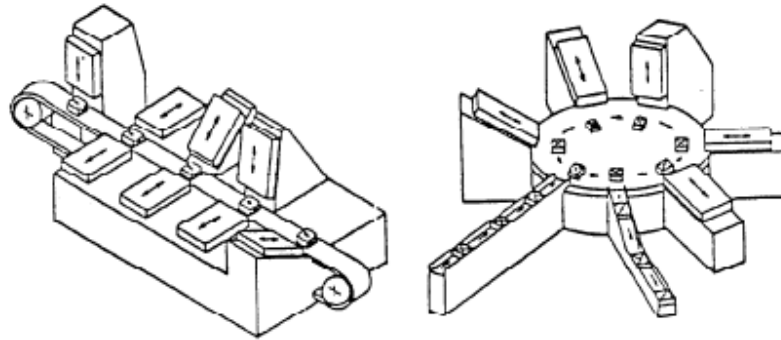


Figura 1.9: esempi di disposizione in linea (a sinistra) e disposizione circolare (a destra).

Disposizione delle stazioni in linea: le stazioni con i relativi mezzi specifici, sono disposte in modo da operare su unità di prodotto traslanti in direzione rettilinea, con avanzamenti a passo costante provocati da un dispositivo capace di generare un movimento lineare intermittente dell'organo di trascinamento. Ogni unità di prodotto è convenientemente fissata al sistema di trascinamento, in modo da garantire il corretto posizionamento al termine di ogni fase di trasferimento.

Disposizione delle stazioni su percorso circolare: l'unità di prodotto è vincolata in punti angolarmente equidistanti su una tavola portapezzo dotata di moto rotatorio intermittente. Ogni pezzo descrive una traiettoria circolare, portandosi in ciascuna delle stazioni di lavoro; due stazioni sono usualmente adibite all'inserimento ed allo scarico delle up. Il piano di traiettoria può essere orizzontale oppure verticale. Questa ultima soluzione è frequente in caso di modesti valori del raggio della traiettoria di trasferimento e per piccoli valori delle masse movimentate.

Una legge di moto intermittente può essere generata in diversi modi:

- direttamente da parte di un attuatore idoneo ad essere controllato in modo da inseguire in retroazione un profilo di posizione/velocità preso come riferimento;
- indirettamente, trasformando mediante un opportuno meccanismo (detto intermittore) un moto in ingresso generato da un attuatore mobile a velocità costante in un moto di uscita con le caratteristiche volute.

I principali vantaggi dei sistemi con trasferimento in linea sono:

- Il prodotto non è soggetto a forze centrifughe (solo se non si utilizzano i tratti curvi);
- si può avere un buon rapporto tra il valore delle masse da movimentare (up) e la massa totale degli organi di trasporto;
- il sistema è adatto anche a parti di notevoli dimensioni;
- l'accessibilità alle singole stazioni è buona;
- all'aumentare del numero delle stazioni la crescita di ingombri ed inerzie risulta accettabile in quanto aumenta solo la dimensione longitudinale della macchina.

I principali inconvenienti sono:

- se si utilizzano organi di trascinamento articolati, la precisione di posizionamento può essere compromessa dai giochi, accentuabili con l'usura;
- in certe configurazioni si utilizza solo una parte delle stazioni disponibili;
- la struttura del sistema è complessa, con necessità di guida e precarico dell'organo di trascinamento (catena, nastro, etc.);
- ingombri longitudinali elevati.

Le architetture operative delle macchine in linea si differenziano principalmente in base alla conformazione del sistema adottato per muovere in modo sincrono tutte le unità di prodotto. I principi operativi più usati sono:

- trasferimento mediante mezzi di vincolo solidali ad un organo di trascinamento flessibile o articolato (nastro o catena), dotato di moto intermittente unidirezionale lungo una traiettoria chiusa di tipo mistilineo;
- trasferimento mediante mezzi solidali ad organi rigidi dotati di moto intermittente alternativo, in grado di impegnarsi sull'unità di prodotto durante la corsa di lavoro e disimpegnarsi durante la corsa di ritorno (sistemi "a pettine");
- trasferimento mediante organi di riferimento rigidi e separati (pallet porta-pezzo) movimentati a spinta da organi dotati di moto alternativo intermittente.

1.2.4. Macchine tipo I2c operanti su unità di prodotto composte

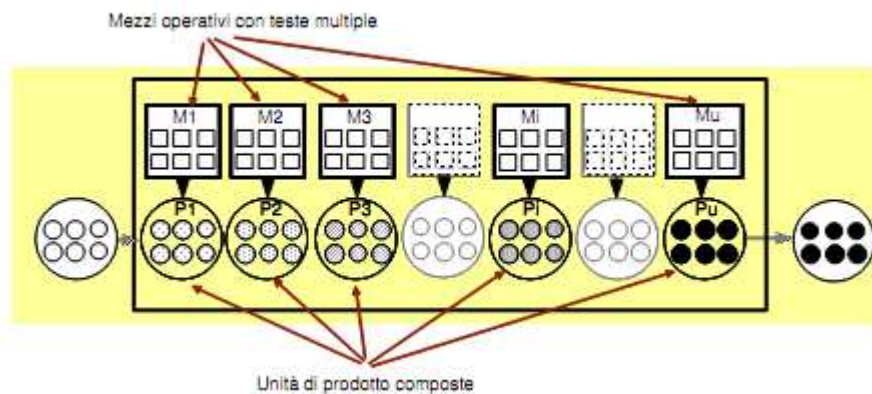


Figura 1.10: schema di una macchina automatica di tipo I2c operante su up composte.

Uno schema concettuale di macchine di questo tipo è mostrato in Figura 1.10. L'unità di prodotto è costituita da un raggruppamento di up semplici con disposizione univocamente definita, le quali vengono trasferite in modo sincrono intermittente entro la macchina, passando sotto i vari Mos; questi sono dotati

di teste operatrici multiple, in numero e disposizione corrispondenti alle up presenti in ogni unità composta.

Le macchine di tipo I1 ed I2 esaminate nei capitoli precedenti sono caratterizzate dal fatto di svolgere le previste funzioni mediante mezzi stazionari operanti su up in quiete. I vantaggi di tale soluzione sono principalmente i seguenti:

- maggiore semplicità dei Mos destinati alle varie funzioni;
- relativa semplicità della struttura di macchina;
- facilità di controllo delle sequenze operative dei vari Mos;
- facilità di alimentazione dei vari Mos con energia e materiali ausiliari.

I principali inconvenienti sono:

- si sottopone il prodotto ad un moto intermittente, con continue variazioni di velocità, quindi intense accelerazioni ed effetti dinamici non sempre sopportabili da parte del prodotto, specie se delicato;
- il sistema di trasporto prodotto opera in condizioni di forte criticità, specie a ritmi produttivi molto elevati, con rilevanti effetti dovuti alla dinamica del moto, quindi urti, vibrazioni, rumorosità, elevata dissipazione di energia;
- l'architettura di macchina è tale che il valore della produzione nominale è comunque dipendente dal tempo richiesto per l'esecuzione della funzione più lenta, quindi la produttività ottenibile è comunque limitata.

Si sono quindi sviluppate architetture di macchina in cui le up vengono lavorate mentre si muovono di moto uniforme, (velocità lineare costante ed accelerazione nulla) lungo il percorso che attraversa la macchina. Con riferimento al prodotto si ottengono sicuramente dei vantaggi, dato che si riducono tutti gli effetti dovuti alla variazione dei parametri cinematici, quindi forze di inerzia, urti, vibrazioni, etc.. I sistemi di trasporto prodotto risultano più semplici (non c'è più l'intermittente) ed il loro consumo energetico risulta notevolmente più basso. Per quanto riguarda invece i mezzi operativi si va in generale incontro ad un aumento, anche notevole, della complessità della macchina.

1.2.5. Macchine di tipo C1 (up con moto continuo, Mos con moto alternativo)

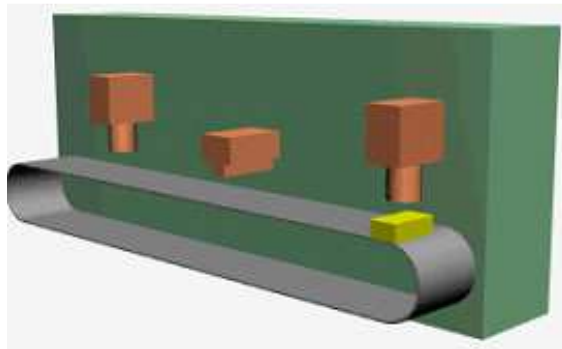


Figura 1.11: schema di una macchina automatica di tipo C1.

Si tratta di una soluzione di impiego non frequente, in cui ogni funzione viene svolta da un mezzo operativo caratterizzato dalla presenza di una testa operatrice mobile con moto alternativo: tale testa segue per un certo tratto l'up in movimento e durante questa fase esegue la funzione prevista (dato che la velocità relativa è nulla, la testa opera sulla up come se entrambe fossero stazionarie). Al termine della fase di inseguimento la testa operatrice ritorna velocemente nella posizione iniziale, mentre l'up prosegue verso il Mos successivo. In presenza di più funzioni da svolgere saranno presenti più Mos, ciascuno caratterizzato da una propria testa operatrice mobile (Figura 1.11). In pratica si vedono rare applicazioni di questo concetto operativo, limitate a casi in cui non è assolutamente possibile accettare il moto intermittente delle unità di prodotto, perché di massa molto elevata oppure molto sensibili alle accelerazioni oppure le velocità di avanzamento sono limitate e i tempi di lavoro sono relativamente brevi. Qualche volta si vedono, in macchine continue di tipo C2, singole teste operatrici movimentate di moto alternativo, secondo la tipologia C1. È quindi un'architettura che può risolvere problemi in situazioni particolari, ma normalmente non viene utilizzata come architettura operativa di una intera macchina.

1.2.6. Macchine di tipo C2 (up con moto continuo, Mos a teste operatrici multiple con moto continuo)

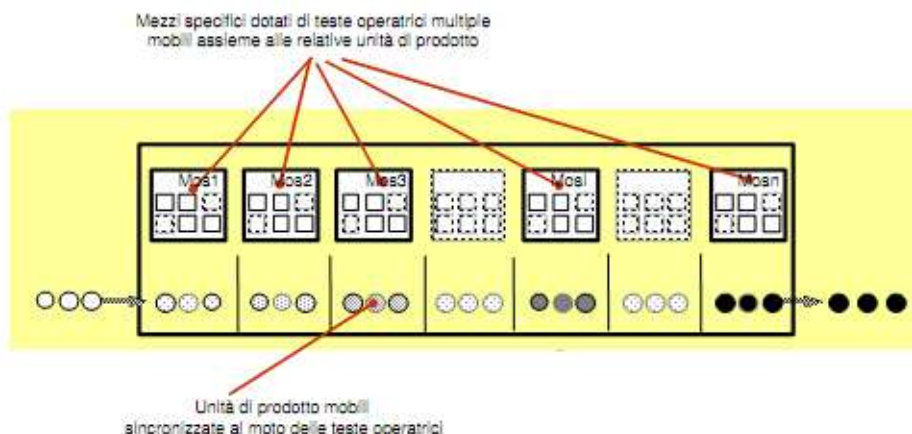


Figura 1.12: schema di una macchina automatica continua, tipo C2.

Una schematizzazione generica di una macchina di questo tipo è presentata in Figura 1.12: un flusso di up distanziate a passo costante attraversa la macchina a velocità costante, attraversando progressivamente i vari Mos; ciascuno di questi è dotato di un certo numero di teste operatrici uguali, mobili su un percorso chiuso, in grado di operare sulle up in movimento per una certa frazione di tale percorso.

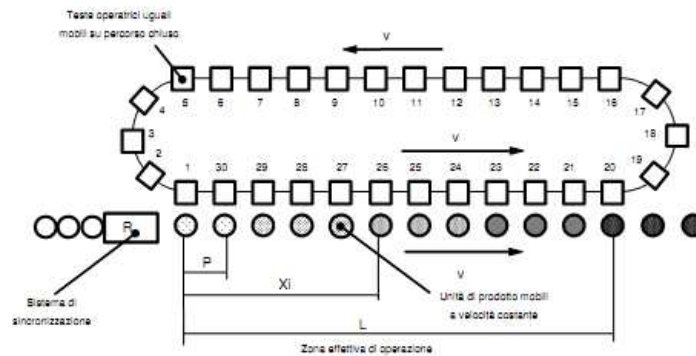


Figura 1.13: schema di macchina continua in linea.

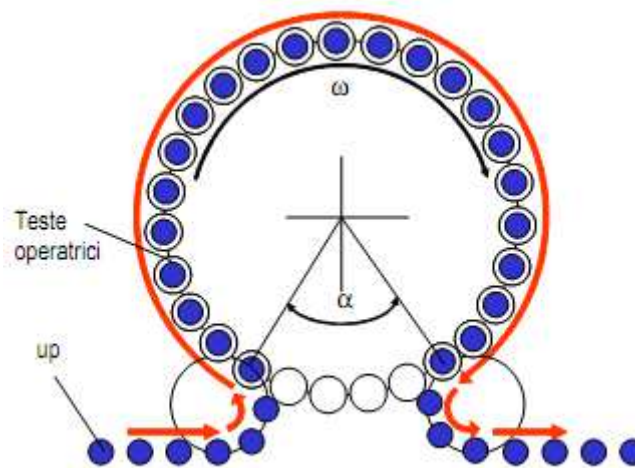


Figura 1.14: schema di macchina continua circolare.

La configurazione rappresentata in Figura 1.13 viene definita configurazione in linea, in quanto le up viaggiano su una traiettoria rettilinea e le teste operatrici sono movimentate lungo un percorso che presenti almeno un tratto rettilineo di interfacciamento. Sono molto diffuse anche macchine a configurazione circolare (dette anche continue a giostra), in cui le teste operatrici sono disposte su un percorso circolare; pertanto il percorso delle up deve essere anch'esso, almeno parzialmente, coincidente con tale traiettoria Figura 1.14. Le up arrivano da una sezione di ingresso già messe a passo e fasate e vengono convogliate verso la traiettoria circolare percorsa dalle teste operatrici, normalmente solidali ad un tamburo rotante a velocità angolare costante. Tra il punto di interfacciamento ed il punto di uscita le up percorrono in sincronismo con le teste un arco di traiettoria di lunghezza pari a $R(2\pi-\alpha)$, avendo a disposizione per eseguire la funzione un tempo $T_0 = R(2\pi-\alpha)/\omega$.

Rispetto allo schema di macchina in linea, il numero di teste operatrici in lavoro è percentualmente più alto rispetto al numero di teste complessivo. Un altro aspetto positivo è legato al fatto che la movimentazione delle teste operatrici nel sistema a traiettoria circolare è molto più semplice che nel caso di traiettoria mistilinea, dove si devono guidare le teste operatrici su apposite guide di scorrimento, trascinandole a mezzo di nastri flessibili o catene.

Le macchine con Mos operanti su prodotto mobile su traiettoria circolare sono molto diffuse in quanto offrono diversi vantaggi:

- le teste operatrici sono disposte sulla circonferenza di una struttura rotante, cui sono rigidamente collegate; il loro moto è circolare uniforme a velocità periferica costante e non presenta le discontinuità cinematiche presenti sulle macchine in linea (in particolare quando si passa da moto lineare a moto curvilineo si manifestano discontinuità nei valori delle accelerazioni centripete); non ci sono variazioni di posizione relativa tra le teste;
- la distanza tra ogni testa operatrice e l'asse di rotazione del sistema di trascinamento si mantiene costante e questo rende più facile connettere ciascuna testa con eventuali sistemi di alimentazione energetica, di materiale o di segnali;
- a parità di numero totale di teste operatrici, la configurazione circolare consente di avere un numero di unità in lavoro superiore rispetto alle macchine in linea.

Per contro, presentano alcuni inconvenienti:

- il prodotto è soggetto all'azione della forza centrifuga;
- occorrono sistemi abbastanza complessi per passare dal moto rettilineo tra un Mos e l'altro al moto circolare all'interno di ciascuno di essi;
- se il numero di teste operatrici diventa elevato, le dimensioni radiali della giostra crescono considerevolmente.

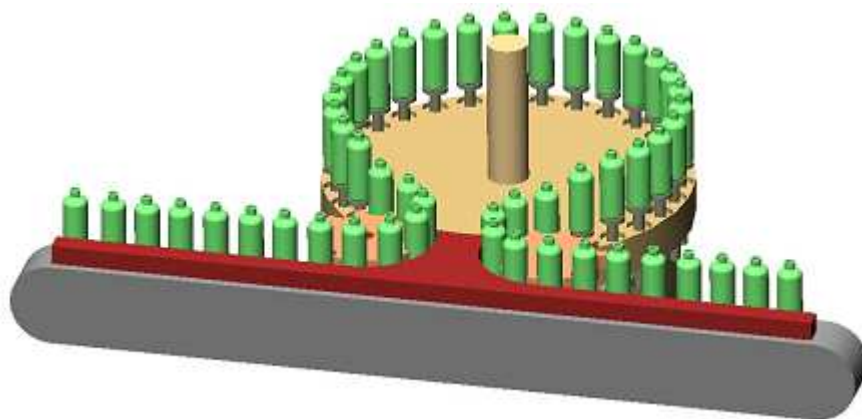


Figura 1.15: percorso delle up in una macchina a giostra.

Si indicano col termine generico di attrezzature di banco quei sistemi in grado di modificare la direzione del flusso di up in ingresso o uscita da un Mos di tipo rotativo continuo. Un esempio è schematizzato in Figura 1.15, dove è mostrata una macchina rotativa privata del tamburo con le teste operatrici. Oltre ai sistemi a coclea solitamente agenti sul flusso in linea per distanziare e sincronizzare le up in arrivo, l'attrezzatura di banco si compone di ruote a stella (star wheels) e da sistemi fissi di convogliamento opportunamente sagomati. Le up appoggiano su nastri motorizzati durante il moto lineare e su apposite basi di appoggio solidali alle star-wheels durante il trasferimento circolare. Le star-wheels sono sagomate in funzione della forma del prodotto che devono accompagnare e devono garantire nel moto curvilineo velocità periferica uguale a quella del moto lineare e del moto sulla giostra principale.

Specialmente nel settore delle astucciatrici verticali per prodotti minuti, granulari o in polvere viene spesso adottata un'architettura di macchina continua che potremmo definire di tipo misto, in quanto vede la presenza di elementi tipici delle macchine in linea (sistema di trasferimento prodotto) e di macchine continue (giostre rotative di dosaggio e deposito del prodotto entro i contenitori).

Le macchine di tipo continuo offrono grandi potenzialità in termini di velocità operativa e produzione nominale elevata, ma non possono essere considerate una risposta valida in ogni caso alle esigenze di incremento della produttività.

- Non tutti i processi possono essere realizzati moltiplicando a dismisura il numero delle teste operatrici o rendendo le stesse mobili lungo un percorso chiuso, principalmente a causa di ingombri e masse elevati, o di difficoltà nel trasferire alle teste operatrici energia, segnali o eventuali materiali di consumo.
- In ogni caso la macchina continua è una macchina costosa, ingombrante e strutturalmente più complessa rispetto ad altri tipi di architettura.
- In molti casi è difficile introdurre flessibilità (ad esempio per i cambi formato) quindi la macchina di questo tipo si presta particolarmente solo per processi massa.

1.3. Servomeccanismi

Un servo meccanismo è solitamente composto da un sistema di controllo, un azionamento elettrico (composto da drive e motore), una parte di azionamento meccanica.

Il servomeccanismo è l'elemento costitutivo principale di una macchina automatica moderna, in quanto permette di ottenere prestazioni elevate unitamente ad un eccellente grado di flessibilità operativa.

Dalle sue prestazioni, che dipendono a loro volta dall'integrazione delle prestazioni dei singoli componenti, deriva la qualità delle performance della macchina automatica. Andremo quindi, nel corso di questo capitolo, ad analizzare lo stato dell'arte delle sue componenti.

1.3.1. Azionamenti elettrici

Come riporta la norma UNI-CEI 301-1 (Azionamenti elettrici: Dizionario) un azionamento elettrico (Power Drive System) è un “sistema che converte energia elettrica in meccanica, con l'uso di apparecchiature elettroniche di potenza, in accordo con una funzione di comando (e secondo un programma stabilito)”.

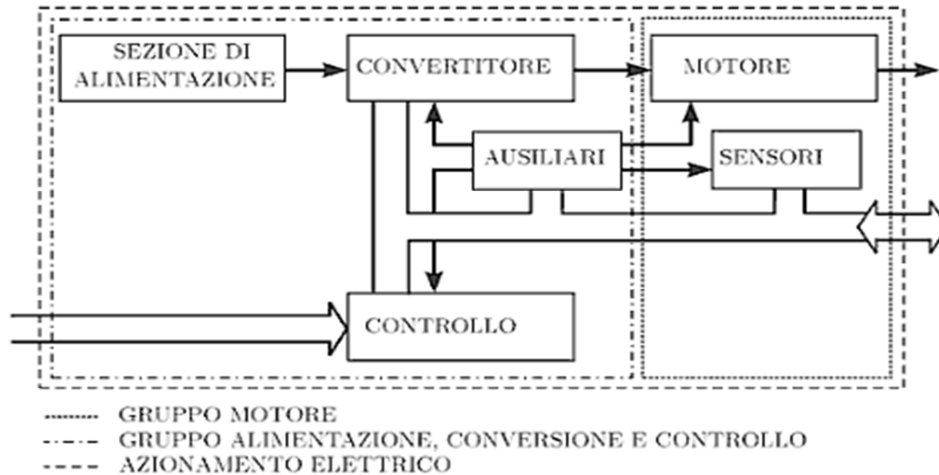


Figura 1.16: struttura di un azionamento elettrico (UNI-CEI 301-1).

Quando si parla di un azionamento elettrico, generalmente si intende l'insieme di motore, convertitore, sensori ed elettronica di comando. Si può esaminare un generico azionamento elettrico come l'unione di un gruppo motore e di un gruppo di alimentazione, conversione e controllo [2].

Il gruppo motore comprende il motore elettrico (o i motori elettrici dell'azionamento), i sensori e le protezioni e gli ausiliari del motore.

Il motore è la macchina elettrica che opera la conversione di energia elettrica in meccanica. Esso è collegato a monte elettricamente alla rete elettrica ed a valle al carico, cioè alla macchina operatrice o il dispositivo che si vuole controllare. Quando è necessario pilotare il motore con precisione possono essere utilizzati uno o più trasduttori per rilevare la posizione, la velocità o la coppia trasmessa dal motore.

I segnali in uscita dai trasduttori vengono campionati, letti in modo seriale o parallelo; i segnali così ottenuti sono segnali discreti, noti come segnali analogici, che andranno poi convertiti in segnali digitali per poter esser letti ed elaborati da un controllore. Una volta inviati al controllore e/o al convertitore, esso provvederà a compararli con i relativi valori di riferimento, a correggere i parametri di alimentazione del motore ed a pilotare quest'ultimo, affinché il moto effettivo sia il più simile possibile a quello desiderato. Il movimento desiderato può essere indicato direttamente dall'operatore nei casi più semplici, nei casi più complessi, invece, è previsto l'uso di un controllore programmabile per poter realizzare complessi cicli di movimentazione.

Il collegamento tra motore e carico può avvenire tramite un dispositivo meccanico di trasmissione per adattare le caratteristiche del moto in uscita al motore alle esigenze del carico. Solitamente, si tratta di un riduttore di velocità, poiché normalmente le velocità ottimali per il progetto dei motori (spesso dai 1000 ai 6000 giri/min) sono superiori a quelle utili per il carico. Quando si devono realizzare movimenti lineari, utilizzando motori elettrici rotativi, è necessario operare una trasformazione che si può ottenere, ad esempio, con un dispositivo costituito da una coppia vite/madrevite o da una coppia pignone/cremagliera o da una trasmissione con cinghia. Tale dispositivo funziona anche da "riduttore", in quanto permette di scegliere, entro certi limiti, il rapporto tra avanzamento del carico e rotazione del motore, sicché se il motore non è troppo veloce si può eliminare il riduttore vero e proprio. Quando è necessario produrre moto vario possono essere impiegati altri componenti, ad esempio camme o sistemi articolati. In alcune applicazioni, di diffusione ancora limitata in ambito industriale, l'accoppiamento tra motore e carico avviene in modo diretto (applicazioni "direct drive"): trasmissione e riduttore non sono necessari in quanto coppia e velocità disponibili dal motore si adattano alle esigenze del carico. Va infatti ricordato che tale dispositivo è responsabile di varie cause di degrado dei servomeccanismi come l'attrito, l'elasticità torsionale e il gioco.

Il gruppo di alimentazione, conversione e controllo è formato da una sezione di alimentazione, da un modulo di conversione e controllo e dagli ausiliari.

L'alimentazione comprende le apparecchiature e i componenti elettrici che permettono l'accoppiamento tra la sorgente di alimentazione di potenza ed il modulo di conversione. Essa provvede all'eventuale adattamento fra la tensione fornita dalla linea di alimentazione e quella richiesta dal modulo di conversione e controllo. Sono solitamente previsti un interruttore generale; dispositivi di protezione; un trasformatore (nel caso di alimentazione da rete in A.C.) se la tensione richiesta dal motore differisce da quella di rete, e/o un raddrizzatore se il motore o il modulo di conversione funzionano in C.C.

Il modulo di conversione e controllo è suddiviso in una parte di potenza ed in una sezione di controllo.

La sezione di potenza è il convertitore elettronico di potenza vero e proprio (solitamente un amplificatore) che comprende, a sua volta, due sezioni: quella di comando e quella di potenza.

La prima (sempre più diffusamente del tipo a microprocessori) serve per regolare i valori di tensione e corrente di alimentazione del motore per muoverlo come richiesto. La parte di potenza si occupa della effettiva erogazione di tensione e corrente assegnati. Il convertitore si dice “statico” perché non esistono parti in movimento. In alcuni casi l'alimentazione è a batteria. Il collegamento tra motore ed alimentazione può anche essere diretto, in questo caso si realizzano azionamenti a velocità costante.

La sezione di controllo è costituita dall'insieme dei dispositivi che svolgono tutte le funzioni di controllo dell'azionamento, tra cui il pilotaggio delle valvole a semiconduttore, la determinazione del comportamento statico e dinamico del motore, le funzioni di diagnostica, di protezione e di interfaccia con il processo. Il controllore è un dispositivo opzionale presente nei casi in cui sia necessario regolare la velocità di rotazione del motore o fargli assumere una legge di moto prefissata. I controllori basati su sistemi a microprocessore tipicamente utilizzati sono i controlli numerici computerizzati (CN o CNC) oppure i PLC (Programmable Logic Controllers). I primi riescono a gestire sistemi complessi che necessitano della generazione di leggi di moto e traiettorie complesse e richiedono precise interpolazioni dei movimenti di più motori. Quando si tratta di implementare pochi calcoli e qualora il coordinamento consista per la massima parte in una verifica di consensi e valori dello stato di sensori, comandi o attuatori sono sufficienti semplici PLC. L'integrazione di CN e PLC permette la gestione di sistemi più complessi.

Gli elementi ausiliari di un azionamento sono i dispositivi, apparecchi e circuiti che, pur senza far parte in senso funzionale dell'azionamento, sono utilizzati per il corretto funzionamento dell'intero sistema (elettroventilatore/i sul gruppo di alimentazione, conversione e controllo, elettroventilatore sul motore, freno meccanico sul motore, innesti, giunti sulla presa di forza del motore, le alimentazioni di servizio, ecc.).

Le macchine più semplici richiedono uno o più azionamenti monomotore tra loro indipendenti. Nei casi più complessi (ad esempio macchine utensili, robot industriali, macchine a controllo numerico) si realizzano azionamenti plurimotore nel quale più attuatori generano movimenti tra loro coordinati.

Negli azionamenti multiasse ogni motore è normalmente alimentato da un proprio convertitore, ognuno dei quali è collegato ad un unico controllore.

Il fine ultimo che guida la scelta dei vari componenti da parte del progettista è chiaramente è l'ottenimento di un sistema ottimizzato sia dal punto di vista funzionale che economico.

1.3.1.1 Attuatori elettrici

Nel seguente paragrafo si presenteranno le tipologie di motore più usate e diffuse nell'ambito degli azionamenti elettrici.

I motori elettrici possono essere suddivisi a livello funzionale in motori a velocità fissa e motori a velocità regolabile.

I primi vengono utilizzati per la generazione del movimento base negli azionamenti meccanici o per muovere macchine operatrici negli azionamenti idraulici o pneumatici. Il motore realizza quindi o uno stato di fermo, o di marcia avanti o marcia indietro e possono assumere una velocità compresa tra un ridotto numero di valori positivi e/o negativi.

I motori a velocità regolabile trovano applicazione quando sia necessario operare una variazione continua sulla velocità. La variazione di velocità, lenta o molto veloce, è ottenuta grazie ad un'elettronica di comando. I comandi possibili sono: un comando in velocità quando si deve regolare la velocità di una macchina la quale deve poi funzionare a velocità costante (ad esempio un trapano, un ventilatore, ...), un comando in posizione qualora si vogliano effettuare movimentazioni più complesse (ad esempio macchine a controllo numerico, robot industriali, ...). La regolazione di coppia è di norma impiegata solo come componente di regolazioni più raffinate di velocità o posizione.

Se si effettua una classificazione in base alle caratteristiche costruttive si hanno:

- motori sincroni, che presentano avvolgimenti alimentati con correnti variabili a frequenza prestabilita che creano dei campi magnetici rotanti ad una velocità proporzionale alla frequenza di alimentazione. Il rotore si aggancia a questo campo e ruota alla sua stessa velocità, che quindi può essere regolata con precisione senza l'aggiunta di ulteriori trasduttori;
- motori asincroni, anche in questo caso è generato un campo rotante, ma il rotore assume solo una velocità approssimativamente uguale a quella del campo. Motori sincroni e asincroni sono regolabili attraverso dispositivi elettronici di regolazione della frequenza detti inverter;
- motori a collettore, normalmente alimentati in corrente continua. Sono motori caratterizzati da una commutazione meccanica, che necessitano di spazzole e si dividono in motori a magneti permanenti (in cui il campo magnetico statorico è generato da magneti permanenti) e in motori a campo avvolto (nei quali il campo statorico è generato da avvolgimenti disposti sullo statore ed alimentati in c.c.).

Risulta interessante considerare una classificazione in base alla potenza installata, come riportato in Figura 1.17.

Classe di potenza		Applicazioni
Frazionaria	< 1kW	Piccole macchine operatrici
Piccola	1 kW – 10 kW	Macchine utensili, automazione
Media	10 kW – 100 kW	Impianti, medie macchine operatrici
Grossa	> 100 kW	Trazione, grandi macchine operatrici

Figura 1.17: classificazione degli attuatori elettrici in funzione della potenza.

Si può notare che applicazioni che concernono la robotica industriale e l'automazione sono caratterizzate da piccole potenze generalmente inferiori o a cavallo dei 10kW.

Particolarmente adatti a questo tipo di applicazioni risultano essere i motori brushless come risulta dalla Figura 1.18.

	C.C. a collettore	asincrono con inverter	asincrono contr. vettoriale	passo passo
<i>regolazione</i>	ottima	bassa (anello aperto)	eccellente	buona
<i>inseguimento</i>	ottimo	scadente	eccellente	buono
<i>dinamica</i>	eccellente	discreta	eccellente	scarsa
<i>picchi di coppia</i>	6 ÷ 8	2 ÷ 3	4 ÷ 6	no
<i>picchi di velocità</i>	no	sì	sì	no
<i>taglia</i>	10 W ÷ 1 MW	0.5 kW ÷ 1 MW	< 500 kW	< 5 kW
<i>diffusione</i>	ampia	ampia (standard)	modesta (in crescita)	ampia
<i>costo</i>	basso (piccole potenze)	minimo (per kW)	elevato (in calo)	basso

	brushless DC	brushless AC	coppia	lineare
<i>regolazione</i>	ottima	ottima	ottima	ottima
<i>inseguimento</i>	buono	eccellente	ottimo	ottimo
<i>dinamica</i>	buona	eccellente	buona	ottima
<i>picchi di coppia</i>	2 ÷ 4	4 ÷ 6	no	2 ÷ 4
<i>picchi di velocità</i>	no	no	no	sì
<i>taglia</i>	< 5 kW	< 10 kW	< 300 Nm	< 20000 N
<i>diffusione</i>	ampia (in calo)	ampia (standard)	bassa	bassa (in crescita)
<i>costo</i>	basso	alto (in calo)	molto alto	molto alto

Figura 1.18: confronto tra le diverse tipologie di azionamento elettrico.

Oltre ad avere alte prestazioni dinamiche, possibilità di regolazione, inseguimento di posizione e controllo di coppia, i motori brushless rappresentano un buon compromesso in termini di costo se confrontati con i motori coppia o i motori lineari (Figura 1.19).

	brushless DC	brushless AC	coppia	lineare	C.C. a collettore	asincrono con inverter	asincrono contr. vettoriale	passo passo
variazione di velocità					◇	◇		◇
regolazione di velocità	◇	◇			◇	◇	◇	◇
regolazione di posizione	◇	◇	◇	◇	◇		◇	◇
inseguimento di posizione	◇	◇	◇	◇				

Figura 1.19: predisposizione dei diversi azionamenti elettrici alle esigenze di progetto.

1.3.1.2 Motori in corrente continua

Il motore a collettore in corrente continua (c.c.) viene comunemente chiamato “*motore in c.c.*”. Sono possibili due realizzazioni del motore a collettore:

- statore con avvolgimento di eccitazione (avvolgimenti sulle espansioni polari collegati in serie);
- statore con magneti permanenti (lo statore produce il flusso di eccitazione; le linee di campo si richiudono attraverso il rotore, la corona di statore e le espansioni polari).

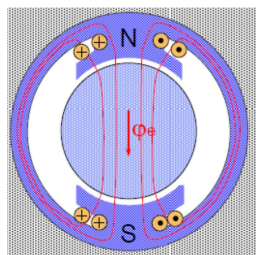


Figura 1.20: motore c.c. con statore con avvolgimento di eccitazione, sezione trasversale.

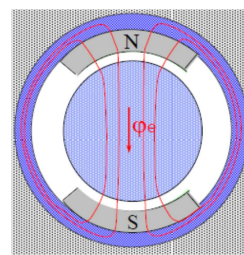


Figura 1.21: motore c.c. con statore con magneti permanenti, sezione trasversale.

Il motore a corrente continua a magneti permanenti è costituito da un cilindro mobile di materiale ferromagnetico, detto rotore, su cui sono avvolte le spire, collegate a formare un circuito chiuso detto di armatura, mentre i magneti permanenti che generano il campo magnetico vengono posti sulla parte fissa, o statore, che comprende anche l'alloggiamento.

Il rotore è immerso nel campo magnetico generato dallo statore. Questo campo magnetico può essere generato da un magnete permanente o da un elettromagnete (motori a campo avvolto).

Il traferro, cioè lo spazio anulare di forma cilindrica compreso fra rotore e statore, è sede di un campo magnetico le cui linee di forza, assumendo infinita la permeabilità magnetica del ferro, sono dirette in senso radiale.

I conduttori attivi sono disposti parallelamente all'asse del rotore, che individua quindi anche la direzione del campo elettrico equivalente indotto dal moto dei conduttori. Le spire del circuito di armatura fanno capo ad un collettore o commutatore, posto a sua volta a contatto con le spazzole (una o più coppie), realizzate in grafite o metallo prezioso. Le spazzole vengono mantenute a contatto con il commutatore durante la rotazione, consentendo il collegamento con un circuito elettrico esterno e fornendo quindi potenza ai circuiti di armatura. Il commutatore è costituito da segmenti di rame, isolati con mica o plastica, alle cui sporgenze (risers) sono collegati i terminali delle spire. Il numero di tali segmenti coincide con il numero di spire, in generale, maggiore è il numero di segmenti e più uniforme risulta la coppia generata. Esistono vari modi di avvolgere le spire e connettere i terminali ai risers. Le spire sono connesse ad anello l'una all'altra, in modo che la corrente d'armatura venga ripartita in due circuiti. La corrente fluisce verso l'alto sotto il polo nord e verso il basso nella parte di spira sotto il polo sud, invertendo la polarità della sorgente di potenza la direzione della corrente e la coppia si invertono. Il numero di conduttori in serie è pertanto circa la metà del numero totale di conduttori e la corrente che fluisce in ogni conduttore è la metà della corrente impressa dal circuito di alimentazione. Il sistema spazzole-collettore consente la commutazione del verso di percorrenza della corrente in una spira. Ogni spazzola è solitamente a contatto con due o più segmenti del commutatore ed una o più spire sono cortocircuitate da essa. Supponendo che il rotore ruoti in senso orario, la corrente scorre in senso antiorario nella spira prima che questa venga cortocircuitata dalla spazzola connessa al morsetto positivo dell'alimentazione, mentre dopo la cortocircuitazione il verso di tale corrente risulta invertito. Nella spira sottoposta a commutazione, non essendo i conduttori di questa sottoposti al flusso del campo magnetico, non viene indotta alcuna forza elettromotrice. Le aree dove non esiste flusso sono chiamate zone neutre, per differenziarle dalle aree in cui tale flusso esiste, dette aree polari.

La generazione di coppia nei motori elettrici è basata sull'interazione di due onde di intensità di campo magnetico, una generata da magneti o avvolgimenti posti sullo statore, l'altra generata da magneti o avvolgimenti posti sul rotore. Alimentando opportunamente gli avvolgimenti si cerca di mantenere uno sfasamento di 90° fra le due onde di intensità di campo magnetico, al fine di ottenere la massima generazione di coppia a parità di ogni altra condizione. Nel caso del motore a corrente continua la condizione di perpendicolarità viene mantenuta dal collettore, si ottiene pertanto una coppia intrinsecamente indipendente dalla posizione la cui ampiezza è proporzionale all'ampiezza della corrente di alimentazione.

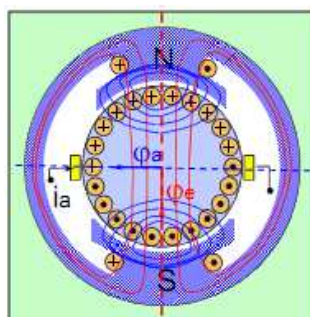


Figura 1.22: distribuzioni di campo (Φ_e flusso di eccitazione, Φ_a flusso di armatura).

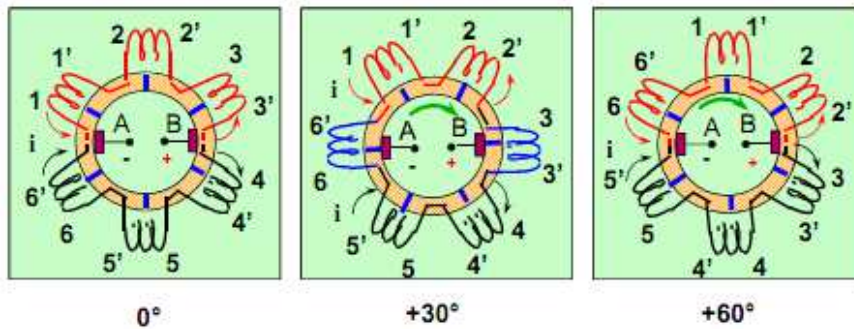


Figura 1.23: commutazione, azione delle spazzole e del collettore.

L'utilizzo di magneti permanenti per la generazione del campo induttore e soprattutto l'utilizzo della configurazione a collettore rappresentano la soluzione ideale dal punto di vista della regolazione della coppia elettromagnetica. Il problema di regolazione è infatti notevolmente semplificato dal fatto che la coppia sia legata alla corrente di armatura da una semplice costante di proporzionalità e dalla linearità del sistema, che modella il comportamento dinamico della corrente al variare della tensione impressa alle spazzole. La regolazione di coppia potrà quindi essere realizzata controllando direttamente la corrente di armatura, agendo sulla tensione. D'altro canto l'utilizzo del collettore comporta problemi di scintillamenti ed usure, legati proprio alla sua funzione specifica di dispositivo di commutazione della corrente nelle spire. L'insorgenza di tali problemi si può comprendere modellizzando il distacco fra una spazzola e una lamella mediante l'apertura di un interruttore. Assumendo che ad ogni segmento del collettore corrisponda una sola spira e modellizzando la spira come una semplice induttanza L_s , consideriamo un transitorio di commutazione, conseguente all'apertura dell'interruttore. L'energia elettromagnetica immagazzinata nel circuito, data da $L_s I^2 / 2$, è costretta a scaricarsi nel brevissimo tempo di apertura dell'interruttore, mettendo così in gioco una elevata potenza. Questo provoca la comparsa ai morsetti dell'interruttore di una sovratensione pari a $L_s di/dt$, capace di provocare la perforazione del dielettrico posto tra i morsetti dell'interruttore, originando una scarica che persiste fino a quando l'energia immagazzinata nell'induttanza non è stata interamente dissipata in calore.

È per questo motivo che al momento del distacco fra lamella e spazzola si possono originare delle scintille. Scintille di debole entità sono ben sopportate dalle spazzole e dai segmenti di collettore, mentre scintille di maggior entità e ripetute possono provocare la bruciatura delle spazzole e la volatilizzazione del metallo delle lamelle, determinando l'usura progressiva della superficie del collettore. Di qui la necessità di una sostituzione periodica delle spazzole e della rettifica del collettore. È possibile ridurre gli effetti dello scintillamento, soprattutto in termini di usura e necessità di manutenzione periodica, progettando spire caratterizzate da una minore induttanza, mentre è possibile rimuovere completamente il problema nei motori brushless ("senza spazzole") abbandonando la configurazione spazzole-collettore. Si elencano di seguito i principali vantaggi e svantaggi del motore in corrente continua.

I vantaggi sono i seguenti:

- una delle caratteristiche principali è il fatto di poter controllare in modo diretto la coppia. In questo caso la variabile di controllo è la corrente che circola nell'armatura, controllando la corrente si riesce a controllare la coppia. Si potrebbe anche controllare la coppia controllando la costante di tempo elettrica del circuito di armatura, però i tempi di risposta del circuito di eccitazione sarebbero più lenti almeno di un ordine di grandezza. Quindi quando si vuole fare un controllo di coppia rapido tipicamente si controlla la corrente nel circuito di armatura;
- Nella versione a magneti permanenti è richiesta una singola alimentazione in continua, quindi è abbastanza semplice;
- Il controllo è semplice perché c'è il legame diretto tra coppia e corrente.

Gli svantaggi sono i seguenti:

- Presenza del collettore a contatti striscianti, tutto ciò comporta la necessità di manutenzione;
- Questa macchina dissipa, per effetto Joule, una potenza nella parte rotante, quella che è alimentata con un amplificatore di potenza, dove avviene la conversione di energia elettrica in meccanica. Quindi il calore viene generato nella parte più interna della macchina, nel rotore e producendo calore all'interno è più difficile estrarlo e raffreddare la macchina;
- Non è idoneo in particolari ambienti per la presenza del contatto strisciante, che provoca delle scintille che sono disturbi di natura elettromagnetica. Questi piccoli archi elettrici fanno sì che non si possa usare questo motore in impianti in cui si usano sostanze pericolose, infiammabili, ecc.;
- La presenza del collettore determina limitazioni sulle massime velocità di rotazione;
- Ha un sovraccarico limitato, questo è dovuto alla presenza del collettore. Far passare correnti più elevate vuol dire determinare un'usura del collettore più pronunciata, riducendone la durata in termini di ore di funzionamento prima dell'intervento di manutenzione.

Almeno per quanto riguarda le potenze medio-basse, si stanno progressivamente sostituendo i motori a collettore con motori brushless, motori di estremo interesse per l'automazione industriale, particolarmente adatti alla generazione di leggi di moto ad elevata dinamica con elevata qualità nell'inseguimento di profili di moto determinati [3].

1.3.1.3 Motori asincroni (a induzione)

Le tipologie principali di un motore asincrono sono:

- a gabbia
- a rotore avvolto

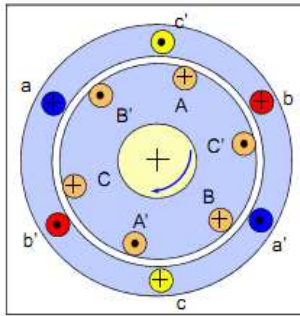


Figura 1.24: motore asincrono, tre circuiti di statore, tre circuiti di rotore.

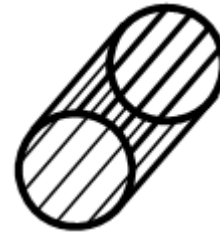


Figura 1.25: struttura del rotore a "gabbia di scoiattolo".

Il motore può essere alimentato direttamente da rete in corrente alternata monofase o trifase e nella comune versione "a gabbia di scoiattolo" non richiede una particolare manutenzione a causa della mancanza delle spazzole. La versione a rotore avvolto permette anche alcune modalità di regolazione senza la necessità di circuiti elettronici. Il motore a gabbia, nato per funzionare a velocità costante alimentato direttamente da rete trifase, si può anche controllare con inverter o attraverso un controllo di tipo vettoriale o controllo diretto di coppia. I motori asincroni sono disponibili in diverse taglie, da potenza frazionaria a migliaia di kW e costano generalmente meno di motori c.c. di pari taglia ma hanno velocità massime più basse.

In riferimento ad un motore trifase a gabbia, lo statore è un cilindro cavo di materiale ferromagnetico laminato, munito di cave in cui sono alloggiati gli avvolgimenti. Questi ultimi alimentati a corrente trifase a frequenza f , generano un campo magnetico rotante alla velocità angolare

$$\omega_0 = \frac{\omega_g}{p} \quad [1.1]$$

con p numero di paia di poli. La velocità ω_0 è detta velocità di sincronismo.

Questo campo genera un flusso magnetico la cui intensità dipende anche dalle correnti che si inducono nel rotore. Il rotore è costituito da un cilindro di materiale ferromagnetico laminato, nel quale è inserito un circuito elettrico costituito da sbarre di rame o alluminio, la cui forma ricorda quella di una gabbia (Figura 1.25). Il materiale ferromagnetico ha il compito di favorire il passaggio del flusso magnetico, mentre la gabbia quello di favorire il passaggio della corrente. Per ridurre le perdite dovute a correnti parassite il rotore è laminato.

Detta ω la velocità di rotazione del rotore, esso vedrà il campo magnetico statorico ruotare ad una velocità pari a

$$S = \omega_0 - \omega ; \quad [1.2]$$

lo scorrimento relativo è definito invece come

$$s = \frac{S}{\omega_0} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} . \quad [1.3]$$

Ai capi di ogni spira si indurrà una f.e.m. di frequenza

$$f = pS/(2\pi) \quad [1.4]$$

e valore efficace

$$\xi_r = \frac{d\phi}{dt} = k_1 S \phi \quad [1.5]$$

che tende a far circolare nel rotore la corrente efficace

$$I_r = \frac{\xi_r}{\sqrt{R_r^2 + S^2 L_r^2}} . \quad [1.6]$$

(con R_r, L_r resistenza ed induttanza del rotore).

Poiché i conduttori percorsi da corrente sono immersi in un campo magnetico, si generano su di essi forze proporzionali a $I_r \phi$ e in totale sul rotore si crea una coppia pari a

$$C = k_2 I_r \phi \quad [1.7]$$

In caso di scorrimento nullo la corrente di rotore sarebbe nulla e non si genererebbe alcuna coppia motrice. La corrente di rotore creerà a sua volta un campo rotante alla velocità S rispetto a quello del rotore e quindi pari a quella del campo di statore. Anche sullo statore si indurranno delle f.c.e.m. ξ_s .

Detta V_f la tensione di alimentazione di fase e I_s la corrente di statore si può scrivere

$$V_f = \xi_s + I_s \sqrt{R_s^2 + p^2 \omega_0^2 L_s^2} \quad [1.8]$$

(con R_s, L_s resistenza ed induttanza di statore).

Si può dedurre che le correnti di rotore e statore sono tra loro proporzionali, osservando che gli avvolgimenti di statore e rotore formano un trasformatore in cui il circuito primario è costituito dagli avvolgimenti di statore e quello secondario dagli avvolgimenti di rotore chiusi in corto circuito.

Quindi, trascurando la corrente di magnetizzazione

$$I_\mu = (G + jB)V_f \quad [1.9]$$

si ha che

$$I_r = kI_s \quad [1.10]$$

dove con $k = \frac{\xi_s}{\xi_r} = \frac{\xi_1}{\xi_2} = \frac{n_1}{n_2}$ si è indicato il rapporto di spire equivalenti.

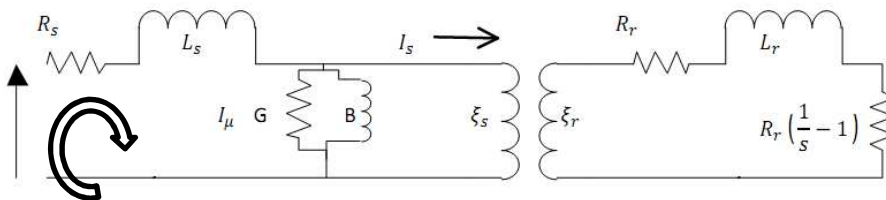


Figura 1.26: schema elettrico equivalente per ogni fase.

Dove $\xi_s = \xi_1$ è la f.e.m. di statore, $\xi_r = \xi_2$ la f.e.m. di rotore, $R\left(\frac{1}{s} - 1\right) = R^*$ la resistenza equivalente che rappresenta il carico meccanico (coppia resistente), G e B la conduttanza e l'ammettanza equivalenti che permettono di considerare le perdite a vuoto e della corrente di magnetizzazione.

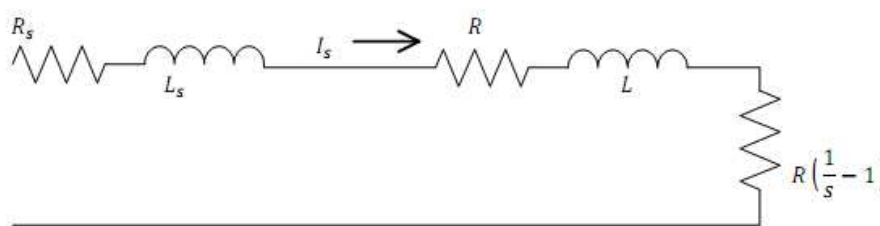


Figura 1.27: schema elettrico equivalente modificato e semplificato.

Trascurando I_μ e considerando $R = k^2 R_r \gg R_s$, $L = k^2 L_r \gg L_s$ (resistenza ed induttanza di rotore riportate allo statore) e la tensione concatenata $V = \sqrt{3}V_f$ si può convertire lo schema di Figura 1.26 in quello di Figura 1.27 e la corrente efficace di fase risulta pari a:

$$I = \frac{V/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R}{s}\right)^2 + (\omega_0 p(L_s + L))^2}} \approx \frac{V s/\sqrt{3}}{\sqrt{R^2 + (s\omega_0 pL)^2}} \quad [1.11]$$

dove si sono trascurati i termini dovuti alle perdite a vuoto ed alla corrente di magnetizzazione che tuttavia sarebbero proporzionalmente significativi a basso carico.

Considerando la resistenza equivalente al carico R^* si ha che la potenza elettrica convertita in potenza meccanica è

$$W_m = C\omega = C(1-s)\omega_0 \quad [1.12]$$

e quindi la coppia C e la potenza meccanica sul rotore valgono

$$C = \frac{W_m}{\omega} = \frac{W_m}{(1-s)\omega_0} = \frac{1}{\omega_0} \frac{sRV^2}{R^2+(s\omega_0 pL)^2} \quad e \quad W_m = \frac{1-s}{s} \frac{RV^2 s^2}{R^2+(s\omega_0 pL)^2}. \quad [1.13]$$

Un altro parametro che si può definire è il rendimento dato dal rapporto tra potenza uscente e potenza entrante e per bassi valori di scorrimento vale

$$\eta = \frac{W_m}{W_m+W_p} \simeq \frac{R^*}{R^*+R} = 1-s \quad [1.14]$$

con W_p potenza persa nelle fasi per effetto Joule.

Per $\omega > \omega_0$ e cioè $s < 0$ il rendimento sarebbe maggiore di uno, ciò indica che in questo caso il motore funziona da generatore restituendo energia alla rete. In tal caso il rendimento vale

$$\eta = \frac{W_e}{W_m} = \frac{W_m-W_p}{W_m} = \frac{-R^*+R}{-R^*} = \frac{1}{1-s} \quad [1.15]$$

con W_e potenza elettrica.

Dallo studio di $C(\omega)$ si dimostra che la coppia è massima per $s = R/(\omega_0 pL) = R/\omega_g L$ e quindi si può scrivere

$$C_{max} = \frac{V^2}{2\omega_0^2 pL} \quad e \quad \omega_{Cmax} = \omega_0 - \frac{R}{pL}. \quad [1.16]$$

Si osserva che la corrente tende ad aumentare parecchio con scorrimenti elevati e ciò crea diversi inconvenienti tra cui extracorrenti di avviamento e riscaldamento del motore per effetto Joule (RI^2) (il rendimento peggiora). Per problemi termici il motore non può sopportare in maniera continuativa una corrente massima detta nominale cui corrisponde una coppia nominale C_{nom} (Figura 1.28).

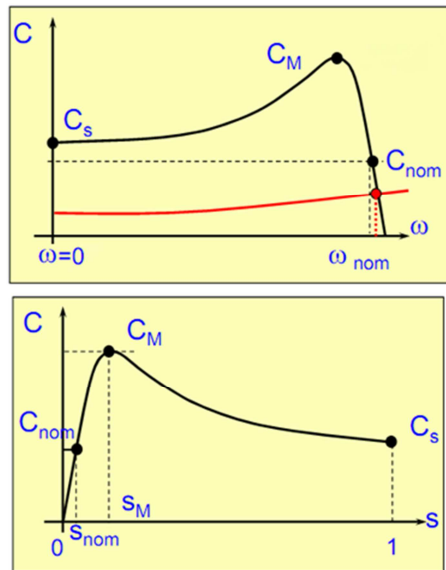


Figura 1.28: andamento della coppia in funzione della velocità di rotazione (sopra) e in funzione dello scorrimento (sotto); curve per $\xi_s = cost$, $\omega_g = cost$.

Per problemi di stabilità dell'accoppiamento carico-motore si utilizza soltanto la parte di curva di coppia a destra del valore di coppia massima (zona decrescente). La zona compresa tra $C_{max}=C_M$ e C_{nom} è la zona intermittente, quella compresa tra C_{nom} e 0 è quella continuativa. La zona a sinistra di $C_{max}=C_M$ è utilizzata solo in fase di avviamento. Solitamente $s = 3\%$ quindi $s_{nom} = 3 - 5\%$ da cui $C_s = 1.2 - 1.8 C_{nom}$ e $s_{max} = s_M = 10 - 15\%$ ed infine $C_{max}=C_M = 1.8 - 2.5 C_{nom}$.

Poiché il rendimento è positivo per $s < 0$ e negativo per $s > 0$, da un punto di vista elettrico, un motore asincrono può funzionare da generatore se una coppia motrice esterna lo trascina oltre la velocità di sincronismo ($s < 0$). In questo caso restituisce potenza elettrica alla rete assorbendo potenza meccanica. Nell'intervallo $0 < s < 1$ si comporta come motore assorbendo potenza elettrica ma erogando potenza meccanica. Per scorrimenti maggiori di 1 si comporta come freno assorbendo sia potenza elettrica che meccanica. Si ricorda che per bassi scorrimenti il rendimento vale $\eta \approx (1 - s)$ e per alti scorrimenti è anche peggiore e quindi il motore non può funzionare a lungo con alti valori di scorrimento, poiché altrimenti il rendimento sarebbe troppo scarso e la potenza persa farebbe scaldare eccessivamente il motore. Durante il transitorio di avviamento lo scorrimento è elevato soprattutto se il motore è alimentato direttamente da rete; in questa fase viene generato quindi molto calore e avviamenti molto frequenti possono surriscaldare il motore.

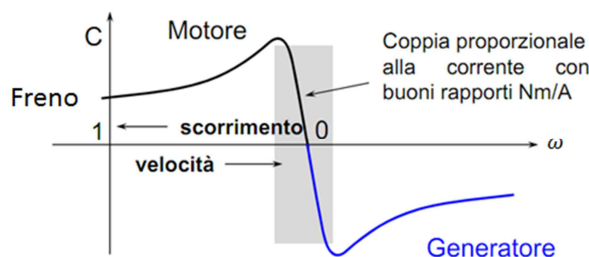


Figura 1.29: caratteristica meccanica di un motore asincrono, campo di funzionamento.

In funzione della tipologia dell'applicazione può essere necessario avere motori a basso scorrimento, a basso valore di corrente di spunto o ottimizzare altri parametri ed è necessario agire sul valore di R e L. Per aumentare l'induttanza la gabbia viene costruita lontana dal traferro per aumentare il flusso disperso. Per variare la resistenza si agisce sulla sezione delle sbarre o sul materiale che lo compone. Esistono forme normalizzate delle curve di coppia motrice denominate di classe A, B, C, D adatte per alcune applicazioni (si veda la Figura 1.30).

Classe	C_s	I_s	s	C_{max}	Applicazione
A	Normale	Elevata	Basso	Elevata	Ventilatori, compressori, pompe, torni ed altre macchine utensili
B	Normale	Bassa	Basso	Normale	Hanno sostituito i motori di classe A nelle nuove installazioni
C	Elevata	Bassa	Normale	$< C_s$	Carichi che richiedono elevata coppia d'avviamento: pompe a forte prevalenza, compressori, convogliatori
D	Elevata	Bassa	Elevato	Assente	Accelerazione di carichi con elevata inerzia (grossi volani di presse o cesoie)

Figura 1.30: caratteristiche ed applicazioni dei motori asincroni suddivisi per classe.

Le possibili tecniche di regolazione di un motore asincrono sono:

- variazione del numero di poli: alimentando tutti o parte degli avvolgimenti (ed eventualmente variando il verso della corrente in alcuni di essi) si può generare un campo magnetico con differente numero di poli quindi, a parità di frequenza di alimentazione, ottenere diverse velocità di sincronismo.
- variazione della resistenza: usato su motori a rotore avvolto, si collegano reostati in serie al rotore. È un metodo che veniva usato prima dell'avvento dei circuiti elettronici per ridurre la corrente o aumentare la coppia allo spunto.
- regolazione di tensione e frequenza: va posta attenzione al fatto che aumentando eccessivamente la tensione o riducendo troppo la frequenza si provocherebbe un aumento del flusso che porterebbe il motore oltre il limite di saturazione magnetica e quindi, perdite maggiori e forte distorsione della corrente assorbita.
- controllo vettoriale: permette di controllare in coppia il motore ottenendo prestazioni di poco inferiori a quelle dei brushless. A tal fine è necessario l'impiego di un convertitore opportuno dotato di stadio di potenza e modulo di controllo a processore. Si ripartisce, dopo aver stimato la posizione del campo magnetico rotorico e dopo averne generato uno statorico opportunamente sfasato, una data corrente fra le tre fasi in maniera tale da garantire la coppia massima generabile sul rotore (a parità di corrente).

1.3.1.4 Motori stepper

I motori passo-passo sono nati con l'idea di ottenere motori economici pilotabili in posizione senza la necessità di costosi controllori retroazionati. Vengono usati in applicazioni di bassa potenza e di dinamica non troppo elevata quali sistemi di posizionamento lineare e/o angolare con carichi ridotti, sistemi "pick and place" leggero, strumentazione ottica, biomedica e di laboratorio, testine di stampanti e di plotter, distribuzione/dosatura di liquidi o adesivi. I motori stepper sono particolari motori sincroni a commutazione elettronica; per essere azionato necessita di un'elettronica di comando. Il sistema di controllo invia al driver di potenza un treno di impulsi (segnali logici); in corrispondenza di ogni impulso, il driver commuta l'alimentazione in c.c. delle fasi del motore in modo che il campo statorico subisca una rotazione idealmente istantanea di un angolo predeterminato α_p (angolo di passo) dipendente dalle caratteristiche costruttive del motore. Per una certa rotazione del campo di statore il rotore subisce una uguale rotazione sia pure con un certo transitorio. L'angolo giro è diviso in un numero intero $n_p = 2\pi/\alpha_p$ di passi. Se un sistema driver-motore passo viene pilotato a frequenza costante f , cioè a velocità costante, il rotore ruota ad una velocità media pari a quella imposta dalla frequenza di comando. Tuttavia a questa velocità media sono sovrapposte piccole oscillazioni che divengono trascurabili non appena tale frequenza diviene elevata.

Risulta assai semplice regolare la posizione del motore inviando un opportuno numero di impulsi di comando. Le posizioni raggiungibili nel giro sono solo n_p ma la risoluzione fornita dall'angolo di passo è generalmente sufficiente per diverse applicazioni.

Generando con opportuna successione temporale gli impulsi di comando è possibile realizzare il controllo nel tempo della posizione e della velocità del motore.

Questo controllo è realizzato in catena aperta senza alcun trasduttore di posizione e velocità e richiede un semplice sistema di comando che scandisca nel tempo un numero determinato di impulsi. Il sistema di controllo consente di realizzare in modo economico l'automazione flessibile delle macchine; tuttavia, affinché il motore non perda il passo è necessario pianificare correttamente le movimentazioni.

A questi vantaggi si contrappongono limitazioni nelle prestazioni come, ad esempio, le modeste potenze massime erogabili (normalmente si resta nel campo delle potenze frazionarie) e alcune irregolarità di comportamento che, nei casi più gravi portano alla perdita del passo e quindi del controllo di posizione.

Per questo normalmente i motori passo-passo sono impiegati in applicazioni in cui i carichi resistenti ed inerziali varino poco nel tempo, in particolare è preferibile che l'inerzia ridotta sia minore di quella del motore.

Le principali tipologie di motori passo-passo sono:

- a riluttanza: non hanno magneti permanenti ed il rotore è costituito da poli salienti in ferro dolce. Hanno una coppia residua ridotta al minimo e dipendente solo dall'attrito dei cuscinetti. Svantaggi sono rappresentati dall'alto costo (analogo a quelli ibridi), pessimo smorzamento e coppia limitata. Sono sempre meno impiegati a vantaggio dei motori ibridi.
- a magneti permanenti: hanno un rotore di materiale magnetico (generalmente ceramico) magnetizzato in maniera permanente in modo da avere sulla superficie cilindrica una successione di poli nord e sud. Il loro maggior pregio è l'economicità ma presentano scarsa precisione e prestazioni limitate in coppia e velocità.
- ibridi: il rotore è formato da un magnete permanente pregiato che magnetizza i poli salienti (denti) realizzati in ferro dolce alle due estremità. Sono molto precisi e possiedono elevate prestazioni in termini di coppia e velocità.

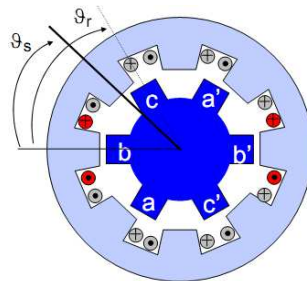


Figura 1.31: motore stepper a riluttanza variabile.

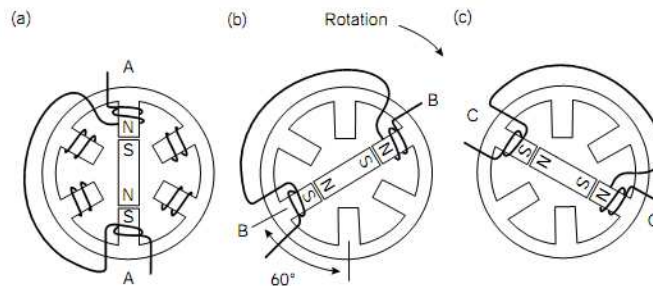


Figura 1.32: motore stepper a magneti permanenti.

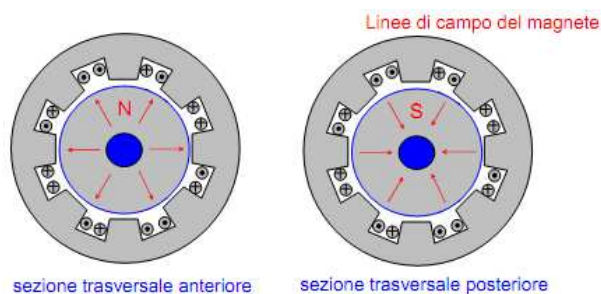


Figura 1.33: motore stepper ibrido.

Tra le caratteristiche comuni:

- si pilotano in posizione e possono raggiungere solo alcune posizioni angolari predefinite;
- il funzionamento in comando di posizione funziona correttamente solo se la coppia resistente non supera un valore massimo consentito;
- la rotazione non è perfettamente regolare e l'accoppiamento motore-carico può generare fenomeni di risonanza;
- la presenza di magneti permanenti o di magnetismo residuo fa sì che anche a motore non alimentato sia presente una piccola coppia che tende a mantenere fermo il motore;
- il motore può facilmente generare una coppia (coppia di "hold-on") che tende a mantenere la sua posizione costante anche in presenza di coppia resistente esterna.

Per motori passo-passo si fa riferimento a curve di pull-in e curve di pull-out. La velocità è normalmente espressa in passi al secondo facendo così riferimento alla frequenza di eccitazione delle fasi in Hertz. La conversione in rad/s o in giri/min dipende dal numero di passi in un angolo giro dello specifico motore:

$$\omega = \frac{2\pi f}{n_p} = f \alpha_p \quad [1.17]$$

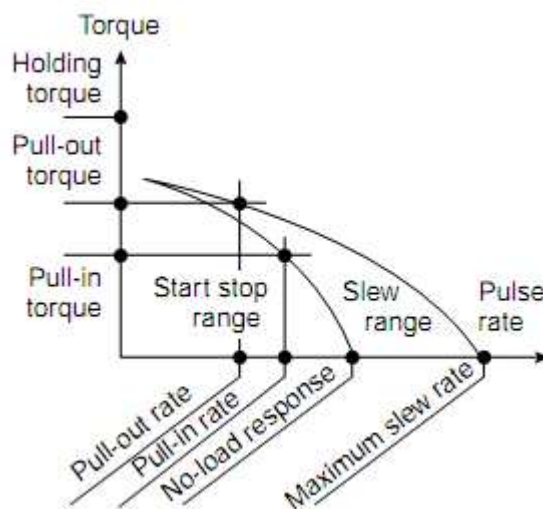


Figura 1.34: motore stepper, curva di pull-in e curva di pull-out.

La curva di pull-in rappresenta, in funzione della coppia resistente supposta costante e della velocità del motore, le condizioni nelle quali il motore può avviarsi ed arrestarsi senza perdere passi. La curva di pull-out racchiude tutte le condizioni di funzionamento che possono essere mantenute stabilmente. Il motore può essere avviato partendo da una qualsiasi condizione contenuta nell'area di pull-in e poi portata lentamente nell'area di pull-out. Prima di arrestare il motore, per non perdere passi, è necessario riportarlo nell'area di pull-in.

Le variazioni di regime nell'area di pull-out vanno fatte con basse accelerazioni; cioè in ogni istante la coppia resistente più quella d'inerzia non devono mai superare quella di pull-out. Poiché a basse velocità questi motori funzionano male di solito vengono avviati richiedendo bruscamente una velocità iniziale non nulla, per questo spesso i fabbricanti non forniscono curve di pull-out nel range $0 \div 200 \text{ Hz}$.

Spesso i costruttori forniscono solo la le curve di coppia di pull-out e cioè della coppia sopportabile ad una certa velocità (o frequenza di alimentazione) senza perdere il passo. Per progettare una legge di moto è necessario conoscere la coppia di pull-in.

La coppia motrice ad un certo istante è data dalla somma della coppia resistente e di quella d'inerzia che non devono mai superare quella di pull-out: $C_r + J\dot{\omega} \leq C_0$ dove $J = J_m + J_r$. Si pensi di avviare istantaneamente il motore da velocità nulla a quella richiesta ω ; se la coppia resistente è limitata e se il ritardo angolare non supera i due passi, la coppia motrice sarà sufficiente ad avviare il motore ed esso raggiungerà la velocità ω nel tempo $T_p = 2/f$ necessario a compiere due passi. La coppia di pull-in, coppia resistente massima sopportabile in queste condizioni vale

$$C_i = C_0 - J\dot{\omega} = C_0 - \frac{J\pi f^2}{n_p} = C_0 - J\frac{f^2}{2}\alpha_p \quad [1.18]$$

Talvolta per sicurezza si assume un ritardo massimo di un passo, l'accelerazione sarà dunque doppia e C_i varrà

$$C_i = C_0 - Jf^2\alpha_p \quad [1.19]$$

La curva di pull-in si ottiene quindi per punti, noti J_m e J_r (inerzia del motore e del carico), calcolandola a partire da quella di pull-out. Si parte a calcolarla per velocità nulla ($f = 0$) e si procede per velocità via via crescenti fino a quella per cui si ha $C_i = 0$. L'inerzia massima pilotabile dal motore ad una data frequenza vale

$$J_r \leq \frac{C_0(f) - C_r}{f^2\alpha_p} - J_m \quad [1.20]$$

1.3.1.5 Motori brushless

I motori brushless sono motori di tipo sincrono a commutazione interna ma alimentati attraverso un apposito circuito elettronico in grado di variare a piacere la frequenza di alimentazione e quindi la velocità. Gli avvolgimenti trifase, posti sullo statore, generano un campo magnetico rotante d'intensità ed orientamento arbitrari. Sul rotore sono presenti magneti permanenti con alta densità di campo ed alta forza coercitiva spesso a terre rare (Samarium-Cobalto o Neodimio-Ferro-Boro).

Un trasduttore legge la posizione angolare del rotore ed un opportuno circuito elettrico alimenta le fasi dello statore in modo da generare un campo magnetico sfasato di 90 gradi elettrici. Questa condizione, a parità di flusso magnetico generato, garantisce la coppia massima. Il motore non perde mai il passo perché il circuito elettronico garantisce che il campo di statore abbia uno sfasamento sempre costante rispetto a quello di rotore.

Poiché la commutazione della corrente nelle fasi la si ottiene tramite il trasduttore di posizione angolare stesso ed un circuito elettronico è possibile eliminare le spazzole normalmente presenti nei motori c.c. e il collettore. Ciò ha come benefici la riduzione delle perdite per attrito e la scomparsa dei problemi dovuti a usura, scintillio, resistenza elettrica. Si ha inoltre, un miglior smaltimento del calore (ora generato sullo statore e non nel rotore), una minor inerzia del rotore (e quindi maggior accelerazione e maggior banda passante) e minori limitazioni di coppia dovute alla velocità.

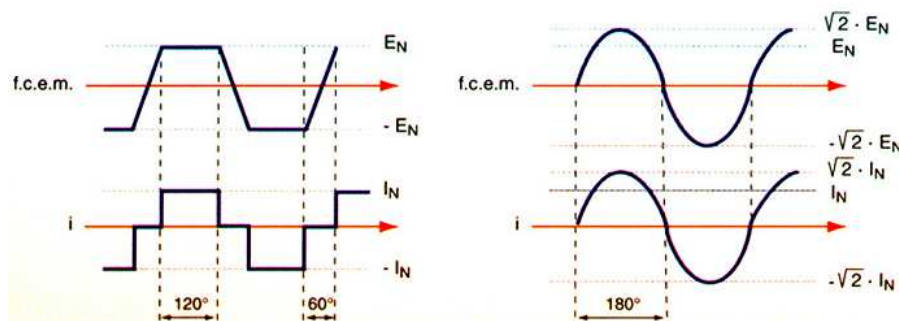


Figura 1.35: eccitazione di fase, D.C. brushless (a sinistra) e A.C. brushless (a destra).

Esistono due tipi di motore brushless: a f.c.e.m. sinusoidale (A.C. brushless) ed a f.c.e.m. trapezoidali (D.C. brushless). In entrambi i casi gli avvolgimenti sono normalmente collegati a stella (Y).

A.C. brushless

I magneti permanenti del rotore sono magnetizzati opportunamente e gli avvolgimenti di statore sono realizzati in modo che quando il rotore ruota a velocità costante nello statore si generano forze controelettromotrici.

Ciò garantisce che alimentando gli avvolgimenti con corrente trifase sinusoidale si ottiene un campo magnetico di modulo e velocità angolari costanti. Quindi se il rotore ha una posizione angolare in fase opportuna si genera una coppia costante. Un sensore di posizione angolare molto preciso (solitamente un resolver) legge la posizione angolare α del rotore e le tre fasi vengono alimentate con correnti trifase in modo che si generi un campo magnetico sfasato di 90 gradi elettrici rispetto al rotore e di intensità proporzionale alla coppia da generare.

Essendo le f.c.e.m. sinusoidali si ottengono una potenza e quindi una coppia costanti. Nei moderni azionamenti le elaborazioni necessarie al pilotaggio delle correnti sono gestite da un microprocessore; la modulazione della corrente è ottenuta attraverso la tecnica PWM (Pulse Width Modulation).

Dette I la corrente efficace di fase del motore e C la coppia motrice, si dice costante di coppia K_t quella costante che in condizioni stazionarie soddisfa la relazione $C = K_t I$. La costante di corrente K_e mette in relazione la velocità angolare con la forza controelettromotrice efficace concatenata:

$$V = K_e \omega . \quad [1.21]$$

Da un bilancio di potenza del motore per piccole correnti si ha

$$K_t = \sqrt{3} K_e \quad [1.22]$$

Studiando più in generale il legame tra grandezze elettriche e meccaniche si può affermare che:

$$\begin{cases} V = \sqrt{3}(R + j\omega_m pL)I + k_e \omega_m \\ C = k_t I \end{cases} \quad [1.23]$$

dove si è indicato con R ed L resistenza ed induttanza di fase, con p il numero di paia di poli, con ω_m la velocità di rotore. Ne segue la tensione efficace concatenata:

$$V = \sqrt{\left(\sqrt{3}R \frac{C}{k_t} + k_e \omega_m\right)^2 + 3\left(p\omega_m L \frac{C}{k_t}\right)^2} \leq V_{max} \quad [1.24]$$

Poiché la tensione di alimentazione non può superare un valore massimo V_{max} che dipende dall'elettronica di comando, si avranno un valore limite per la coppia motrice generabile e una velocità limite raggiungibile.

D.C. brushless

I motori brushless trapezoidali hanno struttura di rotore simile a quelli sinusoidali ma magneti ed avvolgimenti sono progettati in modo che la forza controelettromotrice di ogni fase sia trapezoidale.

Affinché il motore produca coppia costante la corrente di fase deve essere costante nel periodo in cui la f.c.e.m. è costante e nulla quando questa varia.

La coppia totale generata risulta costante e proporzionale al valore di corrente.

Per questa tipologia di motore per le definizioni di costante di coppia e di tensione si fa riferimento ai valori di picco. La corrente di ogni fase non va modulata durante la rotazione, ma solo mantenuta ad un valore nullo, positivo o negativo.

In un ciclo di 360 gradi elettrici rimane accesa positiva per 120 gradi, negativa per 120 gradi e spenta per due periodi di 60 gradi ciascuno. La sovrapposizione con opportuno sfasamento di 120 gradi tra le fasi fa sì che, per determinare la sequenza di accensione delle fasi, sia sufficiente un trasduttore di posizione meno raffinato di quello previsto per il motore sinusoidale, spesso sono trasduttori ad effetto Hall.

Se i sensori posti sullo statore sentono il campo magnetico del rotore ed identificano quale sia l'intervallo attivo tra i sei possibili (in un arco di 360 gradi prevedo sei intervalli), un circuito elettronico accende quindi le fasi opportune con corrente di intensità proporzionale alla coppia da generare. L'intensità della corrente è pilotata con modalità PWM.

Tutte queste elaborazioni non richiedono per forza circuiti digitali, ma sono realizzabili anche analogicamente.

Si possono definire due campi di lavoro: intermittente e continuativo.

Le velocità massime dipendono essenzialmente da fenomeni meccanici (resistenza cuscinetti, vibrazioni, ...); il limite di coppia continuativa è determinato invece da fenomeni termici.

Il campo di funzionamento con coppia intermittente ha una limitazione superiore dovuta alla corrente massima oltre la quale si avrebbe smagnetizzazione del rotore per superamento del valore di campo magnetico coercitivo.

Se è previsto che un motore sia accoppiato ad un convertitore nascono ulteriori limitazioni: una di corrente massima (e quindi sulla coppia massima) di picco e continuativa fornibile dal motore, una di tensione massima che provoca un limite di coppia massima di picco alle alte velocità.

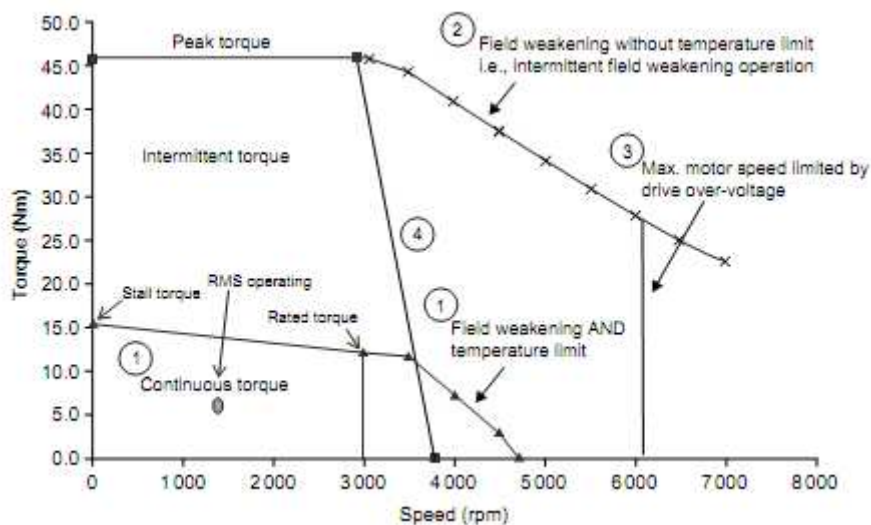


Figura 1.36: andamento della coppia in funzione della velocità di rotazione per un motore brushless, campo di funzionamento.

Modello analitico

Si prende in esame una macchina sincrona trifase.

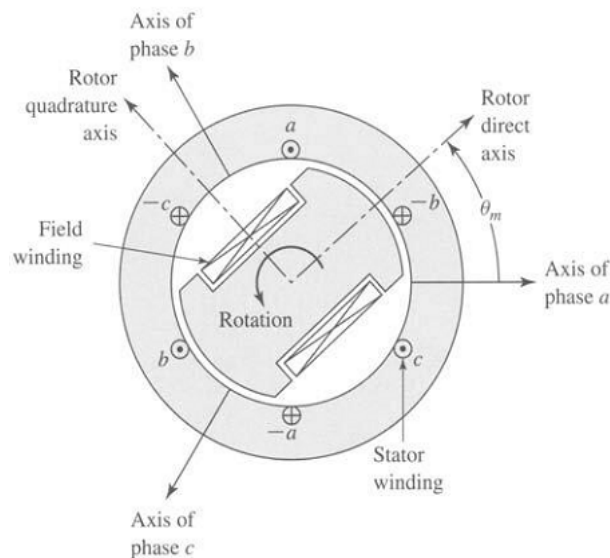


Figura 1.37: motore brushless, sezione trasversale.

Sullo statore sono disposti tre avvolgimenti distribuiti a, b, c, uno per fase indicati simbolicamente dai corrispondenti avvolgimenti concentrati i cui assi coincidono con gli assi magnetici delle rispettive fasi. Sul rotore è disposto l'avvolgimento d'eccitazione f (in Figura 1.19 è rappresentato un rotore a poli salienti). Il rotore ha due assi di simmetria, il polare o asse diretto d e l'interpolare o asse in quadratura q. Anche in macchine con rotore liscio vi sono differenze fra i due assi dovute principalmente alle cave rotoriche relativamente larghe in cui viene disposto l'avvolgimento di campo. Gli assi d e q ruotano solidali al rotore, mentre gli assi magnetici delle tre fasi di statore restano fissi. L'angolo θ_m in figura è l'angolo che, istante per istante, esiste tra l'asse magnetico della fase a e l'asse diretto d. Gli angoli tra gli assi magnetici delle fasi b e c e l'asse diretto sono rispettivamente $(\theta_m - 120^\circ)$ e $(\theta_m + 120^\circ)$. Poiché il rotore ruota, l'angolo θ_m varia nel tempo; se la velocità angolare è costante e pari a ω (velocità di sincronismo) si ha

$$\theta_m = \omega t \quad [1.25]$$

(supposto $\theta_m = 0$ per $t = 0$).

L'analisi è condotta su una macchina ideale priva di saturazione, isteresi e correnti indotte nei materiali. Si lavora quindi con circuiti lineari accoppiati del tipo concentrato e si può perciò applicare il principio di sovrapposizione degli effetti.

Tutti i circuiti a, b, c, f sono caratterizzati dalla loro resistenza, autoinduttanza e mutue induttanze rispetto a ciascuno degli altri circuiti. L'autoinduttanza e le mutue induttanze relative ai circuiti di statore dipendono dalla posizione del rotore e sono quindi variabili periodicamente con l'angolo θ_m .

Per ognuno degli avvolgimenti l'equazione elettrica in termini di tensione, corrente e flusso vale

$$v = ri + \frac{d\lambda}{dt} = ri + p\lambda \quad [1.26]$$

dove v è la tensione applicata, i la corrente in ingresso, r la resistenza dell'avvolgimento, λ il flusso concatenato con l'avvolgimento e p l'operatore differenziale d/dt .

Si possono esprimere i flussi concatenati con i quattro avvolgimenti in funzione delle correnti mediante le induttanze proprie e mutue \mathcal{L} :

$$\lambda_a = \mathcal{L}_{aa}i_a + \mathcal{L}_{ab}i_b + \mathcal{L}_{ac}i_c + \mathcal{L}_{af}i_f \quad [1.27]$$

$$\lambda_b = \mathcal{L}_{ba}i_a + \mathcal{L}_{bb}i_b + \mathcal{L}_{bc}i_c + \mathcal{L}_{bf}i_f \quad [1.28]$$

$$\lambda_c = \mathcal{L}_{ca}i_a + \mathcal{L}_{cb}i_b + \mathcal{L}_{cc}i_c + \mathcal{L}_{cf}i_f \quad [1.29]$$

$$\lambda_f = \mathcal{L}_{fa}i_a + \mathcal{L}_{fb}i_b + \mathcal{L}_{fc}i_c + \mathcal{L}_{ff}i_f \quad [1.30]$$

dove le induttanze a due pedici uguali indicano un'autoinduttanza, induttanze a due pedici diversi una mutua induttanza fra due avvolgimenti.

In forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{aa} & \mathcal{L}_{ab} & \mathcal{L}_{ac} & \mathcal{L}_{af} \\ \mathcal{L}_{ba} & \mathcal{L}_{bb} & \mathcal{L}_{bc} & \mathcal{L}_{bf} \\ \mathcal{L}_{ca} & \mathcal{L}_{cb} & \mathcal{L}_{cc} & \mathcal{L}_{cf} \\ \mathcal{L}_{fa} & \mathcal{L}_{fb} & \mathcal{L}_{fc} & \mathcal{L}_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad [1.31]$$

Tutte le induttanze, tranne \mathcal{L}_{ff} , dipendono da θ e sono quindi variabili nel tempo.

Attraverso la trasformazione dq0 si può analizzare l'interazione tra i flussi del rotore e statore con le onde f.m.m., indipendentemente dalla presenza o meno di poli salienti. Le quantità "statoriche" vengono trasformate nelle equivalenti "rotoriche" rotanti in sincronismo col rotore, così che, in condizioni stazionarie, ne risulta un'interazione tra f.m.m. costanti e onde di flusso separate da un angolo spaziale costante. Il tutto risulta quindi espresso dal punto di vista di un osservatore solidale al rotore.

In termini generali la trasformazione dq0 si può così esprimere:

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - 2/3\pi) & \cos(\theta_e + 2/3\pi) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - 2/3\pi) & -\sin(\theta_e + 2/3\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad [1.32]$$

dove S è la generica quantità da trasformare (corrente, tensione, flusso) e dove si è espresso tutto in funzione dell'angolo elettrico del rotore

$$\theta_e = \left(\frac{\text{poles}}{2}\right)\theta_m = \omega_e t \quad [1.33]$$

Le relazioni tra flussi e correnti divengono molto più semplici se espresse in termini delle nuove variabili dq0:

$$\lambda_f = L_{ff}i_f + \frac{3}{2}L_{af}i_d \quad [1.34]$$

$$\lambda_d = L_{af}i_f + L_d i_d \quad [1.35]$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad [1.36]$$

dove sono state introdotte le nuove induttanze:

$$L_d = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{g0} + L_{g2}) \quad [1.37]$$

$$L_q = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{g0} - L_{g2}) \quad [1.38]$$

$$L_0 = L_{al} \quad [1.39]$$

Rispettivamente L_d , L_q e L_0 sono dette induttanza sincrona di asse diretto, induttanza sincrona di asse in quadratura e induttanza di issequenza zero (o induttanza omopolare).

In termini di variabili dq0 le relazioni fra tensioni e correnti divengono:

$$v_f = r_f i_f + p\lambda_f \quad [1.40]$$

$$v_d = r_a i_d + p\lambda_d - \lambda_q \omega_e \quad [1.41]$$

$$v_q = r_a i_q + p\lambda_q + \lambda_d \omega_e \quad [1.42]$$

$$v_0 = r_a i_0 + p\lambda_0 \quad [1.43]$$

dove ω_e è la velocità angolare elettrica.

Si hanno ora le relazioni fondamentali per l'analisi della macchina sincrona ideale.

Si puntualizza che i termini $\lambda_q \omega$ e $\lambda_d \omega$ sono contributi di origine mozionale, mentre i termini $p\lambda_d$ e $p\lambda_q$ sono di origine trasformatorica. In molte applicazioni le tensioni trasformatoriche sono piccole nei confronti di quelle mozionali e quindi i termini $p\lambda_d$ e $p\lambda_q$ sono a ragione trascurabili. Si aggiunge anche che in questa trattazione le tensioni ai morsetti e le correnti che percorrono gli avvolgimenti sono positive nelle condizioni di funzionamento da motore.

Si esprimono infine le espressioni di potenza e coppia.

La potenza istantanea in ingresso alle tre fasi statoriche vale:

$$p_s = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) \quad [1.44]$$

La coppia elettromagnetica sviluppata la si ottiene dalla potenza in ingresso, corrispondente alle tensioni di origine mozionale, divisa per la velocità angolare della macchina:

$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{\text{poles}}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad [1.45]$$

La coppia fornita è positiva allorché motrice. Si vede come questo processo è conforme con il processo di produzione di coppia dall'interazione di campi magnetici. Nell'equazione si sovrappongono l'interazione del campo magnetico di asse diretto con la f.m.m. di asse in quadratura e quella del campo magnetico di asse in quadratura con la f.m.m. di asse diretto. Per entrambe le interazioni campo e f.m.m. sono tra loro ortogonali.

Considerando la macchina ruotante a velocità sincrona ed assumendo che per $t = 0$ l'asse d sia allineato con l'asse magnetico della fase a, l'angolo θ_m è dato da

$$\theta_m = \omega t \quad [1.46]$$

dove ω è la pulsazione delle grandezze statoriche. Si suppone che le tre correnti statoriche siano espresse da:

$$i_a = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \alpha) \quad [1.47]$$

$$i_b = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \alpha - 120^\circ) \quad [1.48]$$

$$i_c = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \alpha + 120^\circ) \quad [1.49]$$

dove α è l'angolo di fase di i_a rispetto all'origine dei tempi. Per le componenti dq0 delle correnti si ha:

$$i_d = \sqrt{2}I \cos \alpha \quad [1.50]$$

$$i_q = \sqrt{2}I \sin \alpha \quad [1.51]$$

$$i_0 = 0 \quad [1.52]$$

Le correnti i_d e i_q sono costanti; le tre correnti infatti producono un campo magnetico rotante al traferro, ad un osservatore solidale con il rotore tale campo appare stazionario. Applicando la trasformazione dq0 scomponiamo questo campo stazionario lungo i due assi del rotore. Le componenti stesse costituiscono quindi dei campi fissi rispetto al rotore, proprio come se fossero prodotte da avvolgimenti disposti sui due assi rotorici e percorsi da correnti continue.

Quando le correnti alternate statoriche costituiscono un sistema equilibrato, esse appaiono come componenti in corrente continua quando sono viste dagli assi d e q.

I flussi λ_d e λ_q sono pure costanti, quindi i termini di origine trasformatorica non compaiono nelle equazioni elettriche:

$$v_d = r_a i_d - \omega L_q i_q \quad [1.53]$$

$$v_q = r_a i_q + \omega L_{af} i_f + \omega L_d i_d \quad [1.54]$$

I termini ωL_d e ωL_q sono detti reattanza sincrona di asse diretto e di asse in quadratura rispettivamente, esse permettono di tener conto, separatamente per i due assi, degli effetti induttivi dovuti all'onda di f.m.m. d'armatura.

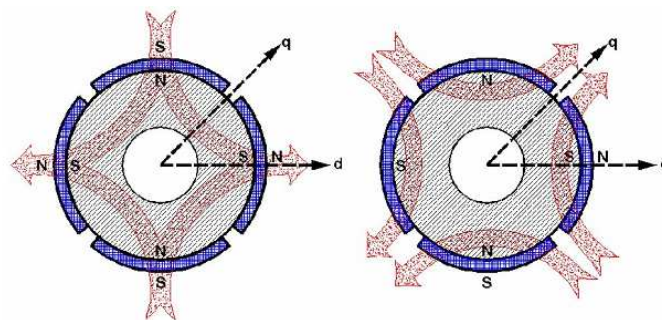
Poiché i flussi concatenati sono costanti, la tensione di campo è data da:

$$v_f = r_f i_f \quad [1.55]$$

1.3.1.6 Controllo dei motori brushless

In termini di progetto del sistema di controllo e stima dei parametri di macchina, risulta utile distinguere i motori brushless in motori a magneti superficiali (SPMSM) e motori a magneti annegati (detti anche a poli salienti, IPMSM).

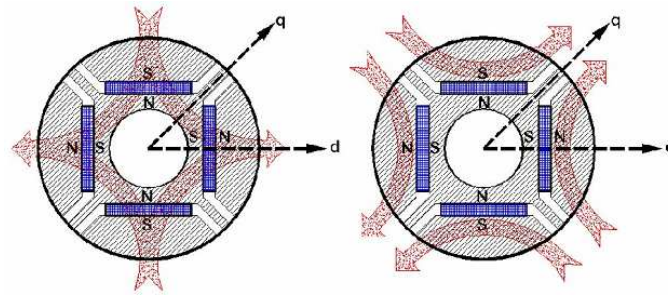
I motori SPMSM possono essere considerati, da un punto di vista magnetico, dei motori isotropi con un elevato spessore di traferro. Le induttanze secondo gli assi diretto e in quadratura di rotore sono quindi uguali.



$$L_d = L_q$$

Figura 1.38: motore brushless a magneti superficiali.

I motori IPMSM, invece, benché abbiano un rotore con una struttura geometrica isotropa, non possono essere considerati isotropi da un punto di vista del circuito magnetico. Ora, l'induttanza di magnetizzazione secondo l'asse in quadratura è maggiore rispetto a quella secondo l'asse diretto.



$$L_d < L_q$$

Figura 1.39: motore brushless a poli salienti.

La salienza magnetica degli assi diretto e in quadratura di rotore altera quindi sensibilmente il meccanismo di generazione della coppia elettromagnetica nella macchina; oltre alla coppia generata dall'interazione tra il flusso del magnete, orientato secondo l'asse d di rotore, e la componente in quadratura della corrente di statore (coppia magnetica o di allineamento di campo), esiste anche una componente di coppia di riluttanza, dovuta alla salienza rotorica, che risulta essere proporzionale alla differenza tra le induttanze di magnetizzazione secondo gli assi diretto ed in quadratura. Ciò è evidente nell'equazione della coppia in coordinate dq0:

$$T = \frac{3}{2} \left(\frac{poles}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = \frac{3}{2} p |\phi_e i_q + (L_d - L_q) i_q i_d| \quad [1.56]$$

1.3.1.7 Convertitore per motori trifase

Normalmente un motore brushless può venir comandato in coppia attraverso la proporzionalità con la corrente, o in velocità tramite retroazione.

Gli azionamenti per motori sinusoidali sono generalmente di tipo digitale e basati su microprocessore che contengono al loro interno anche un modulo di controllo della posizione attraverso semplice retroazione

I parametri dei regolatori e di configurazione possono venire assegnati per via digitale. Le modalità operative comprendono l'uso di tastierini e display numerici o alfanumerici, nonché collegamenti digitali con host computer. Sono diversi i protocolli utilizzati, dalle linee seriali ai bus di campo.

I segnali di riferimento in ingresso (coppia, velocità, posizione) possono venire forniti per via digitale specificando in tempo reale (a tempo campionato) il valore richiesto della grandezza da controllare o infine riempiendo delle tabelle con cicli standard che poi il convertitore farà eseguire al motore.

Nel caso di controllo di coppia o velocità talvolta è anche possibile inviare il segnale di riferimento per via analogica.

In Figura 1.40 è riportato lo schema funzionale di un convertitore per motori sincroni.

La tensione di rete è raddrizzata ottenendo un BUS a c.c. che alimenta l'inverter d'uscita. La sezione c.a./c.c. prevede talvolta il modulo di recupero di energia in rete. L'inverter di uscita funziona con tecnica PWM ed è comandato da appositi circuiti che elaborano le richieste di coppia, velocità o posizione. Le elaborazioni tengono conto delle misure di velocità e posizione ottenute attraverso appositi trasduttori. A livello base il convertitore pilota il motore in corrente (controllo di coppia) e le regolazioni di velocità si ottengono con opportuni anelli di retroazione.

La posizione angolare del motore viene misurata da un opportuno trasduttore, questo valore assieme al valore di coppia (corrente) richiesta al motore determina il valore di corrente con cui alimentare le tre fasi. Un regolatore confronta questi valori con quelli effettivi e decide come pilotare lo stadio di uscita c.c./c.a. affinché il motore venga alimentato per produrre la coppia richiesta.

Nel caso di motori a tecnica sinusoidale che richiedono elevata precisione nella misura della posizione angolare, il segnale di posizione, derivato e filtrato, permette anche una stima della velocità. I motori a tecnica trapezia richiedono invece un trasduttore opportuno (dinamo tachimetrica).

La taglia di ogni convertitore viene rappresentata da due valori di corrente (e quindi di coppia), quello continuativo e quello di picco. Il rapporto tra questi due valori è spesso un valore 2. Il primo valore può essere mantenuto per un tempo indeterminato, mentre il secondo solo per un tempo limitato (tipicamente tra 0.25 secondi e qualche secondo). Questi valori dipendono dalla costante termica dello stadio finale al quale si potrebbero applicare considerazioni analoghe a quelle per il comportamento termico del motore.

La scelta della taglia del convertitore è legata a quella del motore, infatti i limiti delle zone operative di un motore dipendono da entrambi.

Inoltre a parità di coppia (corrente) continuativa da erogare, secondo le applicazioni, possono essere richiesti valori diversi di coppia (corrente) di picco e quindi convertitori differenti.

In genere la scelta del convertitore segue quella del motore, che a sua volta è legata a quella del riduttore di velocità.

1.3.2. Tecniche controllo del moto

1.3.2.1. Controllo del moto

In base alla finezza della prestazione desiderata e alle specifiche sui moti scelte in fase progettuale, il controllo del moto nei sistemi automatici può avvenire in diversi modi. Solitamente, le grandezze da controllare sono la velocità di lavoro, la posizione dell'uscita o, più raramente, una coppia.

Variazione: è il caso cui un parametro è normalmente costante e si desidera variarne il valore in determinate occasioni senza notevole precisione né in termini di tempi di assestamento né di errore a regime. Si impone l'andamento temporale desiderato al sistema il quale risponderà con un suo tempo di risposta e si porterà a regime ad un valore dell'uscita che si discosta dal valore desiderato dell'errore a regime. La variazione dell'uscita è solitamente ottenuta attraverso un controllo in anello aperto del movimento, controllo molto semplice ed economico.

Regolazione: è il caso in cui si vuole imporre un valore desiderato alla grandezza d'uscita, mantenendo entro tolleranze definite in sede progettuale, sia il tempo di assestamento (la durata del transitorio), sia l'errore a regime. L'andamento dell'uscita risulta vicino all'andamento desiderato e lo si ottiene attraverso un sistema retroazionato.

Inseguimento: è il caso che si verifica quando un sistema automatico segue con precisione e prontezza un riferimento ad elevata dinamica, cioè rapidamente variabile. Siffatti sistemi vengono detti servosistemi. La grandezza in uscita seguita è generalmente la posizione (in alcuni casi la velocità o la coppia). Similmente al caso precedente, si dice errore di inseguimento lo scostamento tra il valore desiderato dell'uscita e il suo valore effettivo. Questi sono normalmente molto più piccoli rispetto ai tipici errori a regime in sistemi automatici in cui si implementa una regolazione dell'uscita. Applicazioni tipiche di inseguimento sono il controllo assi di macchine automatiche e robot o le camme elettroniche [4]. L'inseguimento può essere di controllo di un singolo asse, di controllo di assi multipli coordinati oppure di assi multipli sincronizzati (sistemi di tipo master-slave).

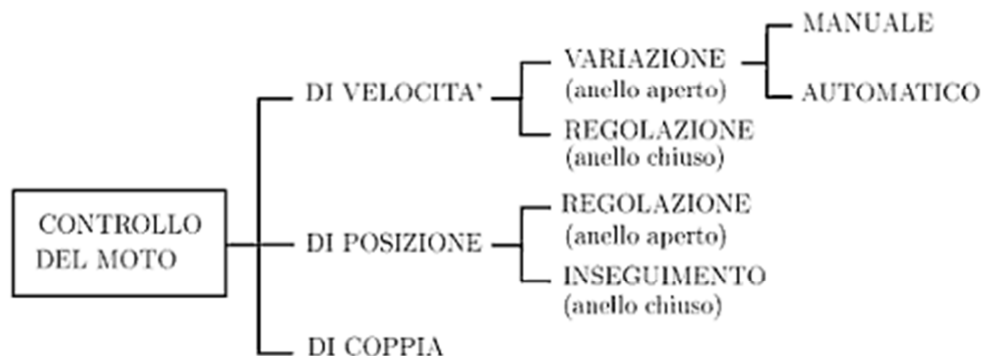


Figura 1.41: tipologie di controllo del moto in un azionamento elettrico.

Un sistema retroazionato presenta vantaggi come una maggiore precisione, una maggior reiezione ai disturbi, maggior prontezza di risposta ai comandi e maggior stabilità a fronte di costi più elevati.

Controllo di velocità

Nelle applicazioni in cui sia necessario poter variare la velocità del carico, si può agire con un sistema di natura interamente meccanica oppure elettronicamente.

La variazione meccanica della velocità è realizzata introducendo un variatore meccanico di velocità tra motore e carico.

I variatori meccanici, di solito, sono previsti con comando manuale e consentono lente variazioni di velocità. Servono, quindi, per aggiustare la velocità al valore di regime richiesto volta per volta dal carico mentre il motore funziona a velocità costante e spesso è connesso direttamente all'alimentazione elettrica. Tali dispositivi sono adatti per ottenere soluzioni di basso costo, in cui sono impiegate potenze non superiori ai 10kW, ma non sono indicati per azionamenti complessi. Con i variatori meccanici la regolazione di velocità è esclusivamente manuale, tramite organi di manovra meccanici. La regolazione elettronica prevede l'introduzione di un variatore elettronico di velocità tra rete e motore.

I benefici che si hanno da tale scelta sono: una maggiore flessibilità rispetto ai corrispondenti variatori meccanici; una regolazione di posizione, velocità e coppia motrice; possibilità di variazioni continue e rapide; campo di escursione della velocità più ampio; realizzazione più compatta; possibilità di realizzare cicli complessi anche coordinando tra loro più motori.

Variazione manuale

Il riferimento di velocità è regolabile normalmente dall'operatore tramite un potenziometro (variatori elettronici) o da un organo di manovra meccanico (variatori meccanici). Normalmente non è prevista retroazione di velocità (controllo ad anello aperto). Nel caso di regolazione meccanica sono usati spesso motori asincroni alimentati direttamente dalla rete elettrica. Nel caso di regolazione elettronica si possono usare ad esempio motori asincroni pilotati con inverter o motori a corrente continua pilotati in tensione. Queste tipologie di regolazione sono adatte ai casi che non richiedono elevata precisione di regolazione di velocità (qualche punto percentuale).

Variazione automatica

Il riferimento di velocità generato dalla parte di comando elettronica (ad esempio un PC o PLC) è spesso costituito da una tensione variabile da 0 a 10V per verso di velocità prefissato o $-10 \div 10V$ quando entrambi i versi di velocità sono ammissibili. Tensione nulla indica motore fermo, 10V indicano velocità massima, il segno indica il verso. In altri casi il segnale di velocità richiesta può essere un treno di impulsi o un segnale digitale. Il riferimento di velocità viene inviato al convertitore che alimenta opportunamente il motore. Questo tipo di comando è adatto alle applicazioni che non esigono una precisione in velocità superiore a qualche punto percentuale.

Un comando automatico in velocità è spesso usato come componente base per realizzare un controllo in posizione.

Regolazione

La regolazione di velocità può essere manuale, ma più spesso è automatica. Il controllore decide la velocità da assegnare al motore ed invia questo ordine al variatore elettronico. Il variatore elettronico e/o il controllore leggono la velocità effettiva del motore per determinare l'alimentazione ottimale del motore riducendo l'errore di velocità. Talvolta il convertitore è in grado di svolgere anche la funzione di controllore.

Controllo di posizione

Regolazione

Questo tipo di comando, di norma, viene realizzato esclusivamente con motori passo-passo, che garantiscono una prefissata precisione senza richiedere dispositivi di misura e retroazione di posizione. L'utilizzo di motori regolati in velocità con sistemi con temporizzatore (timer), che nei posizionatori più semplici potrebbero regolare l'avanzamento in base al tempo trascorso dall'istante di partenza, non consente di conseguire alte precisioni. Più in generale, porta ad errori inaccettabili l'impiego di un comando automatico di velocità (ad anello aperto o chiuso) con legge di velocità pari alla derivata rispetto al tempo della legge di spostamento desiderata. Infatti anche piccoli errori di velocità provocano sulla posizione errori che tendono ad accumularsi diventando prima o poi inaccettabili.

Inseguimento

Un controllore decide lo spostamento che il motore deve effettuare e sceglie la velocità da assegnare al motore. Un sistema retroazionato in velocità si preoccupa della regolazione del motore. La retroazione di velocità è normalmente presente per rendere il sistema più robusto, ma non è strettamente necessaria. L'effettiva posizione del motore viene misurata da un dispositivo opportuno ed inviata al controllore il quale può correggere la propria richiesta di velocità. Nei casi più semplici il trasduttore di posizione è un semplice sensore di prossimità (o microswitch) che indica la necessità di accendere e/o spegnere il motore, nei casi più sofisticati invece è un sensore che misura la posizione angolare del motore con una certa precisione (ad esempio un encoder o un resolver). La comunicazione tra controllore e convertitore può avvenire con un segnale analogico, come nei sistemi di controllo della velocità, o attraverso sistemi digitali (Bus di campo).

Il motore normalmente usato è il motore di corrente continua o più frequentemente il motore brushless, ma se ne possono usare altri, eventualmente anche il motore passo-passo. Esistono anche moderni convertitori digitali in grado di assolvere sia alla funzione di controllore che quella di variatore di velocità. Questo tipo di comando è quello usato nel caso di robot o macchine automatiche a controllo numerico.

Controllo di coppia

Questo tipo di regolazione è usato quasi esclusivamente all'interno di un anello di velocità e/o posizione. Il variatore elettronico riceve un segnale proporzionale alla coppia che il motore deve generare e pilota conseguentemente il motore. Il segnale di coppia desiderata può essere una tensione tra -10 e +10V o un segnale digitale.

1.4. Progettazione

La progettazione di macchine automatiche in generale e di azionamenti in particolare è resa complessa dalle molteplici interazioni esistenti tra i fattori che determinano le performance della macchina. Come è già stato sottolineato un servomeccanismo è solitamente composto da un azionamento elettrico ed un cinematismo meccanico.

Entrambe queste parti hanno peculiarità e problematiche particolari che è necessario tenere in considerazione al momento della progettazione.

1.4.1. Meccanica

In questo capitolo andremo ad analizzare le problematiche relative alla progettazione della parte meccanica di un azionamento.

Quando si va a dimensionare un azionamento i fattori principali di cui si deve tenere conto sono la rigidità e la massa, essi infatti possono influire pesantemente sulle capacità dell'azionamento di inseguire la legge di posizione desiderata.

In particolare tra le proprietà di massa da tenere in considerazione abbiamo l'inerzia. Essendo quasi tutti i cinematismi meccanici guidati da motori rotativi è molto importante conoscere l'inerzia ridotta al motore del nostro cinematismo, in modo da poter dimensionare correttamente l'azionamento elettrico.

Si deve tener conto che spesso i meccanismi collegati ai motori non sono composti da un unico componente, per cui non è possibile utilizzare la teoria della geometria delle masse per calcolare un valore unico per l'inerzia ridotta al motore. Nei casi più generali avremo un diverso valore di inerzia ridotta per ogni posizione dell'albero motore. Questo fattore è molto importante da sottolineare perché fa capire come, anche per eseguire una semplice legge di moto a velocità costante, il nostro drive dovrà regolare i valori di corrente e coppia per compensare la variazione di coppia inerziale resistente all'interno di un singolo ciclo.

Come noto l'inerzia ridotta al motore per un cinematismo qualsiasi è ricavabile attraverso un'analisi energetica.

Chiamata $J_r(\varphi)$ l'inerzia ridotta al motore in funzione della posizione angolare e con Ω la velocità angolare dl motore avremo:

$$\frac{1}{2}J_r\Omega^2 = \frac{1}{2}\Sigma(m_i v_i^2 + J_i \Omega_i^2) = E \quad [1.53]$$

Dove con $\frac{1}{2}\Sigma(m_i v_i^2 + J_i \Omega_i^2) = E$ andiamo ad indicare la somma delle energie cinetiche di traslazione e rotazione di tutti i membri del cinematismo.

Dalla precedente espressione si ottiene quindi facilmente

$$J_r(\varphi) = \frac{2E}{\Omega^2} = \sum [m_i (v_i/\Omega)^2 + J_i (\Omega_i/\Omega)^2] \quad [1.54]$$

Si può vedere come il momento d'inerzia ridotto dipenda solo dalla posizione dell'albero motore, infatti i rapporti v_i/Ω e Ω_i/Ω dipendono solo dalla posizione del cinematismo e non da Ω .

Come vedremo più avanti l'inerzia ridotta al motore può essere molto utile per migliorare il controllo del motore tramite azioni di Feed Forward.

L'altro ambito che è necessario analizzare è quello della rigidità dei cinematismi. Molto spesso nel tentativo di riuscire ad ottenere velocità elevate con azionamenti i più piccoli possibile si cerca di ridurre al minimo la massa del cinematismo, con il rischio di diminuirne la rigidità. Un cinematismo con una bassa rigidità è caratterizzato da frequenze di risonanza relativamente basse, che potrebbero essere innescate dalla dinamica della macchina, portando a vibrazioni indesiderate.

1.4.2. Controllo

Un problema comune negli azionamenti elettrici ad alte prestazioni è senz'altro il controllo. Utilizzando degli azionamenti meccanici, per esempio controllati mediante camme desmodromiche, si può imporre al proprio cedente una legge di moto con un elevato grado di precisione, garantita dal contatto tra parti metalliche che possono considerarsi praticamente indeformabili. Nel caso degli azionamenti elettrici invece la posizione è data dalla coppia erogata dal motore istante per istante. Questa è a sua volta erogata dal drive in base a un sistema di controllo che elabora segnali provenienti da più sensori.

Questo comporta che, nel caso non venga erogata la coppia desiderata in ogni momento all'interno del ciclo si avranno errori di inseguimento più o meno importanti. Molti fattori concorrono nell'ostacolare il giusto inseguimento del profilo di moto desiderato.

In primo luogo abbiamo la qualità dei sensori, come per esempio la loro risoluzione. Maggiore è l'approssimazione con cui un sensore fornisce i dati necessari al sistema di controllo per calcolare la giusta coppia da erogare, minore sarà la precisione del nostro azionamento.

Altro fattore fondamentale è la frequenza di campionamento del drive. Al giorno d'oggi tutti i sistemi di controllo sono digitali e quindi lavorano a tempo discreto. Se il tempo di campionamento e di calcolo del drive è troppo elevato per la dinamica che si tenta di eseguire può accadere che all'interno di un ciclo vengano effettuati un numero di campionamenti non sufficiente a monitorare con correttezza ciò che sta accadendo e quindi che il sistema di controllo diventi instabile o presenti errori d'inseguimento notevoli.

Esistono poi i delay dovuti per esempio a problemi tecnici di trasferimento dati. Il tempo di campionamento di un sensore potrebbe per esempio essere coerente con le specifiche della macchina, ma potrebbe comunicare i propri risultati al sistema di controllo con un ritardo di uno o più step di campionamento, andando ad inficiare la risposta del drive.

Un problema da non sottovalutare è la massima coppia erogabile da un azionamento. In molti casi moti ad alta dinamica portano ad avere coppie necessarie molto elevate, che il nostro motore o il nostro drive potrebbero non essere in grado di fornire, questo naturalmente porterebbe ad avere un errore di posizione sistematico rispetto al nostro riferimento.

Infine va segnalato come anche l'architettura stessa del sistema di controllo abbia una influenza predominante nell'ottenere con successo un inseguimento adeguato. Infatti molte delle problematiche viste pocanzi possono essere mitigate, se non corrette tramite l'inserimento all'interno del nostro sistema di controllo di particolari accorgimenti. Di questo argomento si parlerà più a fondo nei capitoli successivi.

1.4.3. Leggi di moto

Una cosa molto importante durante la progettazione di un azionamento è la scelta o progettazione della sua legge di moto [5]. Mediante la scelta della legge di moto si può infatti intervenire, ad esempio, sulla coppia massima richiesta all'azionamento o sulla frequenza delle forzanti che verranno introdotte nella macchina [6][7]. Solitamente si cerca un compromesso tra la continuità delle varie derivate della curva di posizione per evitare di innescare vibrazioni indesiderate e la ricerca di una coppia di picco non troppo elevata [8]. La scelta della legge di moto influisce in maniera drastica sulla performance ottenibili da una macchina automatica.

Per definizione con il termine traiettoria ci si riferisce al percorso nello spazio che deve essere eseguito da un meccanismo. Si possono distinguere le traiettorie in due famiglie principali, le monodimensionali e quelle multi-dimensionali.

Traiettoria mono-dimensionale: viene definita per meccanismi ad un grado di libertà, in cui il concetto di traiettoria coincide con quello di legge di moto. La legge di moto è una funzione che lega il valore del parametro di configurazione del meccanismo al tempo, si ottiene una relazione del tipo: $q = q(t)$. Questo deriva dal fatto che per un meccanismo ad un grado di libertà lo spazio di giunto e lo spazio operativo possono considerarsi coincidenti.

Traiettoria multi-dimensionale: è definita da due elementi, il percorso geometrico e la legge di moto. Per percorso geometrico si intende la funzione vettoriale che associa una posizione spaziale (eventualmente con orientamento) ad una ascissa curvilinea, del tipo $p = p(u)$ avendo identificato con u l'ascissa curvilinea. La legge di moto è la legge oraria che definisce la variazione dell'ascissa curvilinea in funzione del tempo, ci dice come la curva viene "percorsa temporalmente", in formule $u = u(t)$. Dalla composizione del percorso geometrico e della legge di moto si ottiene la traiettoria, definibile come $\tilde{p} = p(u(t))$. Mediante analisi cinematica inversa del meccanismo a più gradi di libertà è possibile risalire alle leggi di moto (nello spazio di giunto) da applicare ai singoli attuatori per garantire il corretto percorrimto della traiettoria \tilde{p} .

Riferendosi in particolare alle traiettorie mono-dimensionali si può enunciare un'altra importante distinzione:

Traiettorie PTP: sono funzioni che definiscono un moto assegnati il tempo iniziale t_0 , il tempo finale t_f e le condizioni vincolo (posizione, velocità ecc.) nei suddetti istanti. PTP indica *point to point*, sono traiettorie di collegamento tra un punto iniziale e uno finale.

Traiettorie multi-punto: sono funzioni che permettono l'interpolazione di un set di punti dati (t_k, q_k) , $k=0, \dots, n$. Possono definire un'interpolazione esatta dei punti dati o un'interpolazione per approssimazione.

Alla luce di queste definizioni si espongono, brevemente, le traiettorie monodimensionali più utilizzate:

Traiettorie Polinomiali (PTP)

Riferendosi al problema PTP:

$$q = q(t) \quad t \in [t_0, t_1] \quad [1.55]$$

Si possono soddisfare i vincoli di progetto utilizzando una funzione polinomiale. Imponendo vincoli sul punto iniziale e su quello finale in ugual numero si otterrà un numero pari di condizioni al contorno. Indicando tale numero con $n + 1$ sarà necessario utilizzare una funzione polinomiale con $n + 1$ coefficienti, ovvero di grado n (con n che risulta dispari), del tipo:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n \quad [1.56]$$

Gli $n + 1$ coefficienti saranno determinati risolvendo un sistema di $n + 1$ equazioni in $n + 1$ incognite, del tipo:

$$\mathbf{M}\mathbf{a} = \mathbf{b} \quad \mathbf{a} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{b} \quad [1.57]$$

In cui \mathbf{M} è una matrice $(n + 1, n + 1)$ nota sulla base delle condizioni al contorno, $\mathbf{a} = [a_0, a_1, \dots, a_n]^T$ è il vettore delle incognite (i coefficienti della polinomiale) e \mathbf{b} è il vettore dei termini noti derivante dall'imposizione delle $n + 1$ condizioni al contorno.

Le funzioni polinomiali sono molto utilizzate nei problemi PTP, solitamente si usano quelle di grado 3 (dette cubiche), 5 o 7, in relazione al grado di "dolcezza" e continuità, delle derivate rispetto al tempo, che si vuole imporre.

Traiettorie Trigonometriche (PTP)

Sono traiettorie PTP derivanti dall'utilizzo di funzioni trigonometriche. Il loro pregio è la continuità delle derivate, rispetto al tempo, di qualsiasi ordine.

Si descrivono le relazioni matematiche della traiettoria armonica e di quella cicloidale, la prima presenta una discontinuità di accelerazione in t_0 e t_1 , la seconda elimina questo problema.

Un'altra caratteristica di pregio di queste traiettorie è il bassissimo contenuto frequenziale delle curve di posizione, velocità e accelerazione, essendo costituite da un segnale ad un'unica frequenza.

L'aspetto frequenziale diventa molto importante nel caso in cui lo spettro del segnale di coppia (in prima approssimazione proporzionale a quello di accelerazione) contenga frequenze che vanno ad eccitare le pulsazioni naturali del sistema meccanico, innescando indesiderati fenomeni vibratorii.

Traiettoria armonica: la sua legge di moto può essere dedotta graficamente. Denotando con q la proiezione sul diametro del punto p , se il punto p si muove di moto circolare uniforme la legge di moto descritta da q si chiama armonica ed assume la formulazione presente nella formula sottostante:

$$s(\theta) = R(1 - \cos(\theta)) \quad [1.58]$$

Si è indicato con R il raggio del cerchio, si veda figura xx. La scrittura può essere generalizzata definendo $h = q_1 - q_0$ e $T = t_1 - t_0$

$$q(t) = \frac{h}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi(t - t_0)}{T} \right) + q_0 \quad [1.59]$$

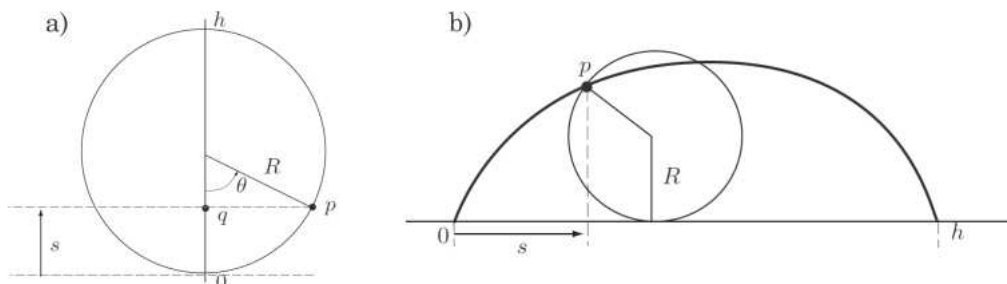


Figura 1.42: Interpretazioni grafiche a) traiettoria armonica b) traiettoria cicloidale

Traiettoria cicloidale: anche questa traiettoria ha un'interpretazione geometrica, ci si riferisce a figura xxx. Anche in questo caso la proiezione q del punto p si muove con legge di moto cicloidale, se p è un punto della circonferenza che rotola senza strisciare lungo una retta. Il vantaggio di questa legge di moto è l'assenza della discontinuità di accelerazione in t_0 e t_1 . In formule:

$$q(t) = h \left(\frac{t - t_0}{T} - \frac{1}{2} \sin \left(\frac{2\pi(t - t_0)}{T} \right) \right) + q_0 \quad [1.60]$$

Traiettorie per sviluppo in serie di Fourier (PTP)

Come accennato precedentemente oltre ai criteri di contenimento dei valori di accelerazione e la sua continuità può essere d'interesse mantenere un contenuto armonico ristretto. La peculiarità

della traiettoria cicloidale e dell'armonica è proprio uno spettro di ampiezza (per $q(t)$ e le sue derivate rispetto al tempo) contenente, in linea teorica, un'unica frequenza.

Le traiettorie per sviluppo in serie di Fourier sono state introdotte come compromesso fra le trigonometriche e le altre tipologie di leggi di moto. L'idea di base è calcolare lo sviluppo in serie di una legge di moto $q(t)$ fra quelle precedentemente illustrate (per esempio la polinomiale cubica), che possono facilmente essere ricondotte a funzioni periodiche, e considerare solamente i primi N termini della serie ottenendo una nuova traiettoria $q_f(t)$

Si otterranno traiettorie con contenuto armonico ridotto rispetto alla legge di partenza $q(t)$ ma superiore rispetto alle traiettorie trigonometriche. D'altro canto i valori massimi raggiunti dalle derivate di $q_f(t)$ si collocheranno a metà via tra la traiettoria di partenza $q(t)$ (presentante valori più bassi) e quelle trigonometriche. In seguito si elencano due fra le più note traiettorie per sviluppo in serie di Fourier:

Gutman 1-3: si ottiene considerando le prime due armoniche (1-3) dell'espansione in serie di Fourier del profilo parabolico (polinomiale di ordine 2). Con questa legge di moto si ottiene un valore di accelerazione massima del 28.75% più alto rispetto alla parabolica e del 18.05% più basso rispetto alla cicloidale. Il contenuto frequenziale sarà intermedio, come già specificato. In formule:

$$q(t) = q_0 + h \left(\frac{(t - t_0)}{T} - \frac{15}{32\pi} \sin \frac{2\pi(t - t_0)}{T} - \frac{1}{96\pi} \sin \frac{6\pi(t - t_0)}{T} \right) \quad [1.61]$$

Freudenstein 1-3: come nel caso precedente si ottiene considerando i primi due termini dell'espansione in serie di Fourier della legge di moto parabolica, ma la traiettoria risulta definita come segue:

$$q(t) = q_0 + \frac{h(t - t_0)}{T} - \frac{h}{2\pi} \left(\frac{27}{28} \sin \frac{2\pi(t - t_0)}{T} + \frac{1}{84} \sin \frac{6\pi(t - t_0)}{T} \right) \quad [1.62]$$

Traiettorie composte (PTP)

Spesso è possibile ottenere profili di moto molto utili combinando tra loro le funzioni elementari già descritte. L'intento è quello di ottenere profili con derivate continue fino ad un certo ordine cercando di contenere i valori massimi di tali derivate. Nelle applicazioni industriali sono molto utilizzate traiettorie composte, per esempio la trapezoidale in velocità e la doppia S.

La traiettoria trapezoidale in velocità si ottiene unendo tre funzioni elementari: due tratti parabolici con un tratto lineare intermedio. La traiettoria doppia S si ottiene invece componendo 7 segmenti differenti.

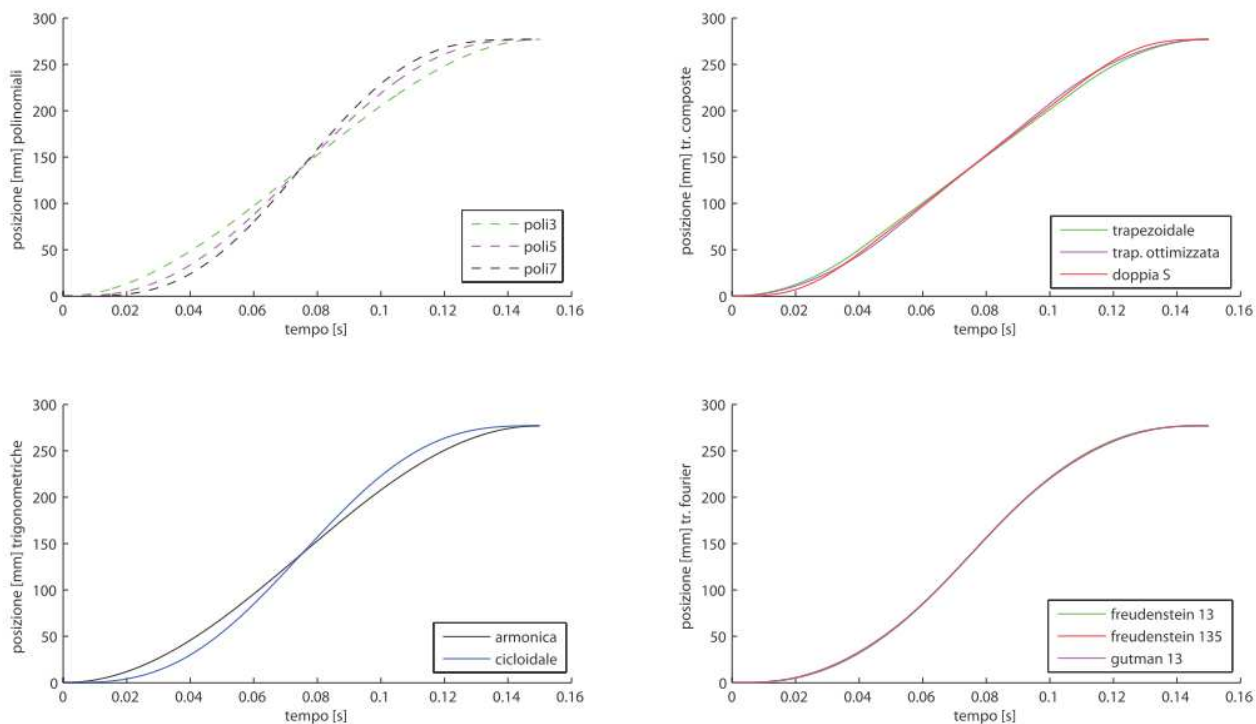


Figura 1.43: Comparazione fra leggi di moto PTP - posizione

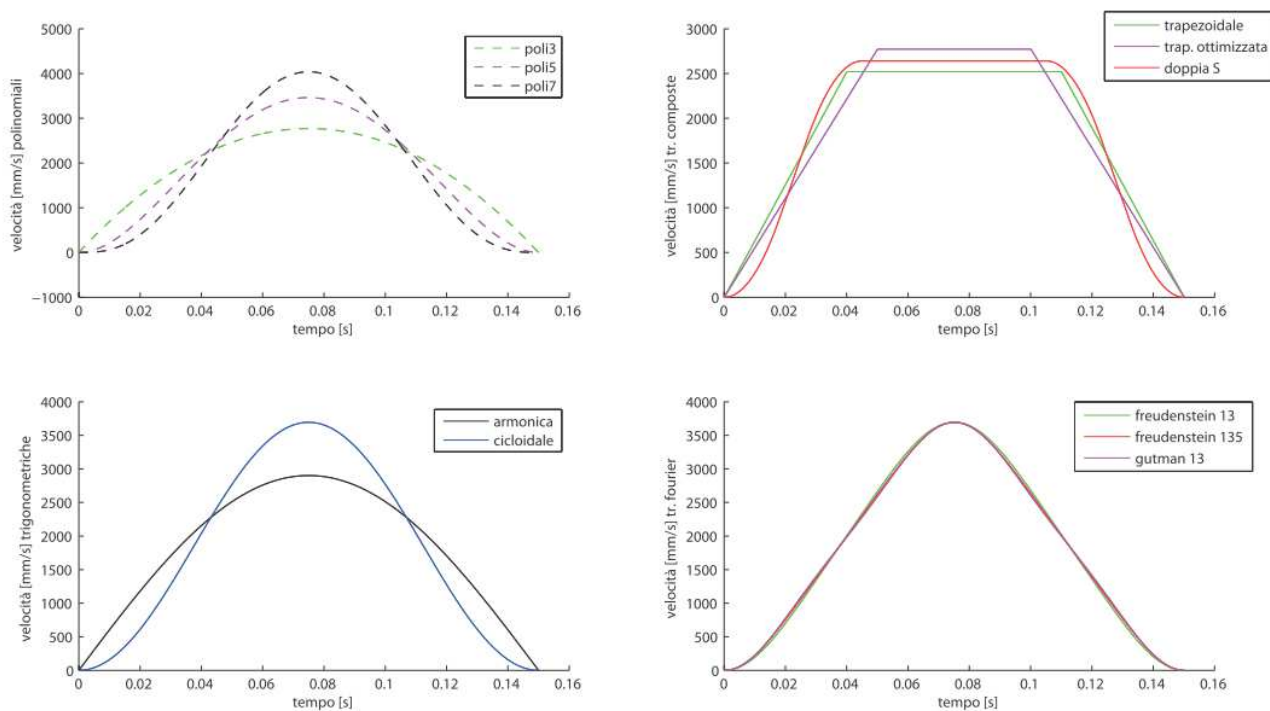


Figura 1.44: Comparazione fra leggi di moto PTP - velocità

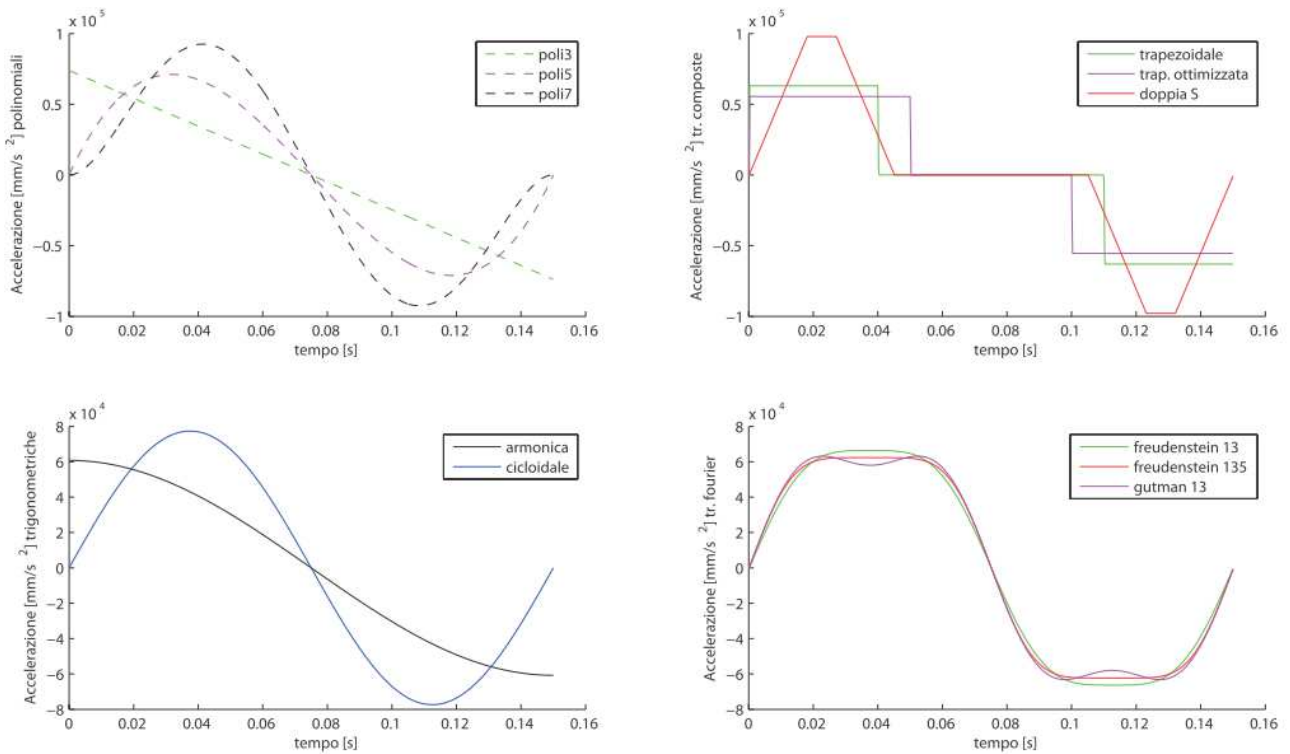


Figura 1.45: Comparazione fra leggi di moto PTP accelerazione

Spline (multi-punto)

Considerando la progettazione di una legge di moto passante per più punti si può pensare di interpolarli con un'unica funzione polinomiale. $n + 1$ punti possono essere interpolati con una legge polinomiale di grado n dovendosi ricavare, quindi, un basso numero di incognite per definire la curva e ottenendo un'unica soluzione. Il problema numerico relativo alla determinazione dei coefficienti, però, si dimostra mal posto già a partire da n poco superiore a 10

Un'alternativa è utilizzare funzioni spline. Il concetto alla base dell'interpolazione spline di $n + 1$ punti è unirli con un certo numero di tratti polinomiali. Solitamente vengono utilizzati n tratti, ma nulla vieta di utilizzarne di più. A titolo di esempio si riportano considerazioni relative le spline cubiche (tratti polinomiali del terzo ordine). Considerando l'equazione:

$$q(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_nt^n \quad [1.63]$$

se si fissa $n = 3$ si ottiene una legge polinomiale cubica. La funzione spline $s(t)$ interpolante gli $n + 1$ punti risulta definita come segue:

$$s(t) = \{q_k(t), t \in [t_k, t_{k+1}], k = 0, 1, \dots, n - 1 \quad [1.64]$$

$$q_k = a_{k_0} + a_{k_1}(t - t_k) + a_{k_2}(t - t_k)^2 + a_{k_3}(t - t_k)^3 \quad [1.65]$$

Così facendo è necessario ricavare 4 coefficienti per ogni tratto cubico q_k . Dovendo utilizzare n tratti di questo tipo è necessario determinare $4n$ valori incogniti. Per risolvere questo problema possono essere considerate le seguenti condizioni:

- $2n$ condizioni di interpolazione per i punti dati. Ogni tratto cubico deve attraversare i punti dati alle sue estremità.
- $n - 1$ condizioni per la continuità della velocità nei punti intermedi (escluso il punto iniziale e finale)
- $n - 1$ condizioni per la continuità dell'accelerazione nei punti intermedi (escluso il punto iniziale e finale)

Così facendo rimangono $4n - 2n - 2(n - 1) = 2$ residue condizioni imponibili. Questi due gradi di libertà possono essere utilizzati per imporre la velocità nel punto iniziale e in quello finale della funzione spline. Per i procedimenti di calcolo dei coefficienti si rimanda a testi specifici.

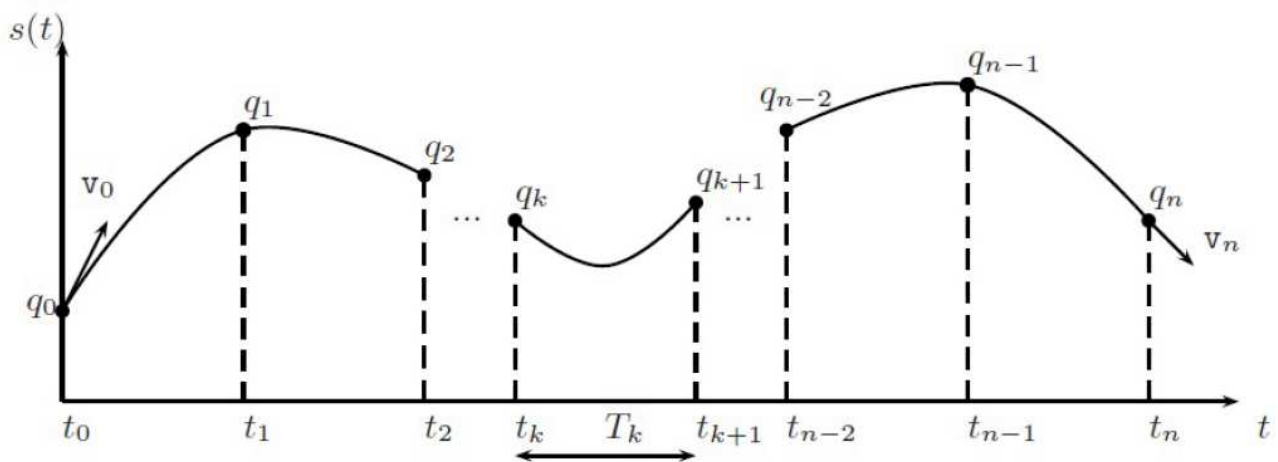


Figura 1.46: Traiettoria spline per $n+1$ punti

2. Soluzioni attuali

Nel capitolo seguente andremo a mostrare quali siano le attuali tecniche per affrontare i problemi citati precedentemente e quali siano i loro punti di forza e i loro limiti.

2.1. Metodi di progettazione sequenziali

Attualmente, in molte realtà industriali, la progettazione di macchine automatiche avviene in maniera sequenziale, partendo dall'ufficio tecnico meccanico, che si occupa di progettare i componenti, dimensionare i motori e scegliere in prima approssimazione quali debbano essere le leggi di moto degli azionamenti.

Una volta che il progetto è completato si provvede a costruire un prototipo reale della macchina, sul quale poi vanno ad intervenire direttamente i responsabili del controllo, che vanno a regolare i drive e a modificare le leggi di moto in modo che la macchina risponda alle specifiche richieste.

Questo procedimento solitamente non comporta problematiche se si sta lavorando su macchine caratterizzate da basse dinamiche, dove l'interazione tra le diverse scelte progettuali è meno forte, ma può portare a grandi perdite di tempo e denaro nel caso di macchine ad alte prestazioni.

Infatti, gli ingegneri del controllo del moto si trovano a lavorare su una macchina che è già stata completamente definita, sia dal punto di vista meccanico, sia dal punto di vista della scelta del drive e del motore. L'unico spazio di manovra a loro consentito è quello di andare a regolare i parametri di controllo all'interno del drive e di apportare piccole modifiche alle leggi di moto.

Essi inoltre si trovano costretti a lavorare direttamente su componenti fisici che hanno un valore commerciale anche elevato, devono quindi procedere con molta cura ed attenzione nel testare le possibili soluzioni disponibili, per non rischiare di danneggiare la macchina. Questo determina chiaramente un forte rallentamento dei lavori rispetto a quanto non si potrebbe ottenere lavorando a livello virtuale.

Non va inoltre dimenticato il fatto che, soprattutto quando si lavora su macchine ad alte dinamiche, c'è la possibilità che la combinazione tra cinematismo meccanico, drive e motore non permetta di ottenere in nessun modo la prestazione desiderata [9][10]. Occorre in questi casi riconsiderare le scelte progettuali fatte in precedenza, con una conseguente grave perdita di tempo e denaro.

2.2. Simulazione meccanica tramite software multibody a corpi rigidi

Per cercare di prevenire la situazione descritta in precedenza, ovvero il dover riconsiderare scelte progettuali una volta che la macchina è già stata prodotta, si sta cercando sempre più di affidarsi alla prototipazione virtuale, ovvero all'analisi del comportamento futuro della macchina tramite specifici software di calcolo.

Uno di questi metodi è la simulazione dei cinematismi meccanici tramite particolari strumenti CAE per l'analisi della dinamica multibody a corpi rigidi.

Questi sistemi permettono, una volta modellato il cinematismo di interesse partendo da un modello tridimensionale, di analizzare la dinamica dello stesso nel dettaglio, fornendo una gran quantità di dati, dalle coppie richieste per generare una determinata legge di moto di interesse, alle forze inerziali che si generano sui giunti.

Strumenti di questo tipo sono di grande utilità in quanto permettono una scelta molto più consapevole del dimensionamento del cinematismo e degli azionamenti [21]. Essi inoltre permettono di valutare almeno in prima approssimazione gli effetti di fenomeni altrimenti difficilmente calcolabili come le perdite per attrito, che in alcune applicazioni possono incidere fortemente sulla coppia richiesta al motore.

Un altro rimarchevole utilizzo di questi software è la possibilità di poter calcolare l'inerzia equivalente di cinematismi anche complessi, dato che, come vedremo più avanti, può risultare molto utile ai fini dell'ottenimento delle prestazioni desiderate.

L'utilizzo di questi software va però gestito con grande attenzione, essi infatti possono portare ad effettuare considerazioni errate, che possono condurre ad una progettazione fallimentare.

Innanzitutto i software multibody a corpi rigidi, per definizione, non considerano l'elasticità propria dei corpi. Questo limita il loro utilizzo alle sole situazioni in cui l'ipotesi di deformazioni nulle si possa considerare accettabile. Ciò vuol dire che se, come spesso accade nell'ambito dell'automazione ad alte prestazioni, si utilizzano componenti particolarmente snelli per ridurre le masse in moto, si potrebbero avere nelle applicazioni reali vibrazioni e deformazioni che non sono state previste in fase di progettazione e che potrebbero disturbare il corretto funzionamento della macchina.

Un'altra possibilità di errore durante il loro utilizzo potrebbe invece rivelarsi nel dimensionare gli azionamenti. Solitamente per ottenere dati utili alla scelta degli azionamenti, viene imposta al cinematismo in esame la legge di moto ideale che deve essere eseguita e successivamente si chiede al software di calcolare la coppia necessaria ad eseguire tali movimenti.

Nel caso di azionamenti ad alte prestazioni con elevate dinamiche in gioco, potrebbe avvenire che a causa di queste ultime l'architettura di controllo all'interno del drive non riesca a far eseguire all'azionamento elettrico con esattezza la legge di moto richiesta. Se l'errore diventa sensibile in una posizione in cui l'inerzia equivalente del cinematismo è alta, è possibile che per compensare l'errore sia richiesta nella pratica una coppia notevolmente superiore a quella calcolata ipotizzando invece un controllo perfetto. Nel caso l'azionamento scelto non riesca ad erogare la coppia necessaria il sistema andrebbe incontro a grandi problemi di stabilità.

I limiti di questi strumenti sono strettamente legati alla presenza di elevate dinamiche all'interno del cinematismo da analizzare, essi sono quindi più che soddisfacenti nei casi dove velocità e accelerazioni restino moderate.

2.3. Sistemi di controllo più utilizzati.

L'introduzione dei controlli digitali ha dato una grande spinta al settore dell'automazione. La possibilità di non dover realizzare fisicamente il controllore attraverso la manipolazione di grandezze fisiche ha permesso una flessibilità notevole e la possibilità di progettare controllori anche molto complessi.

Molti dei sistemi di controllo più performanti si basano sul principio di poter implementare all'interno del controllore una funzione di trasferimento che rappresenti il modello inverso del sistema che si intende andare a controllare. In questo modo, dato un certo input, si potrà già conoscere quale sarà l'output ottenuto dal sistema, e si potrà agire in anticipo sul segnale per evitare errori di inseguimento.

Questa strada però è limitata dall'attuale potenza di calcolo dei drive, che non riuscirebbero a risolvere sistemi così complessi all'interno di un intervallo di calcolo. Va inoltre considerato che la definizione di tale funzione di trasferimento è spesso molto complicata, in quanto difficilmente i nostri sistemi possono essere definiti con funzioni di trasferimento LTI (Lineari Tempo Invarianti). Per questo, implementare sistemi di controllo di questo tipo necessiterebbe di competenze di altissimo livello, che non sono presenti nella stragrande maggioranza delle aziende.

Per questo i fornitori di drive e sistemi di controllo hanno concentrato la loro attenzione su tipologie di controllo che, pur essendo più facili da gestire, riescono a fornire le prestazioni necessarie a controllare la maggior parte degli azionamenti elettrici.

2.3.1. P.I.D.

Il *PID* è uno tra i controllori più utilizzati per il controllo di un processo industriale.

Si tratta di un sistema in *retroazione negativa*, composto da tre azioni di controllo ben distinte: un'azione *proporzionale*, un'azione *integrale* e un'azione *derivativa*:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad [2.1]$$

Dove $u(t)$ è il segnale che il controllore fornisce al motore (o in generale al processo da controllare) ed $e(t)$ è il segnale di errore.

Il controllore acquisisce in ingresso l'output del processo da controllare e lo confronta con il valore di riferimento. La differenza tra i due valori determina il segnale di errore, valore che viene utilizzato dal controllore stesso per determinare il nuovo segnale in ingresso al processo.

La logica segue quindi un'azione correttiva che, determinato l'errore rispetto al valore di riferimento, corregge il segnale in ingresso al processo cercando di annullare l'errore in uscita.

A seconda del problema di controllo, l'azione di modifica può determinare risultati molto differenti nel caso di utilizzo della sola azione rispetto alla combinazione di due o più azioni simultaneamente.

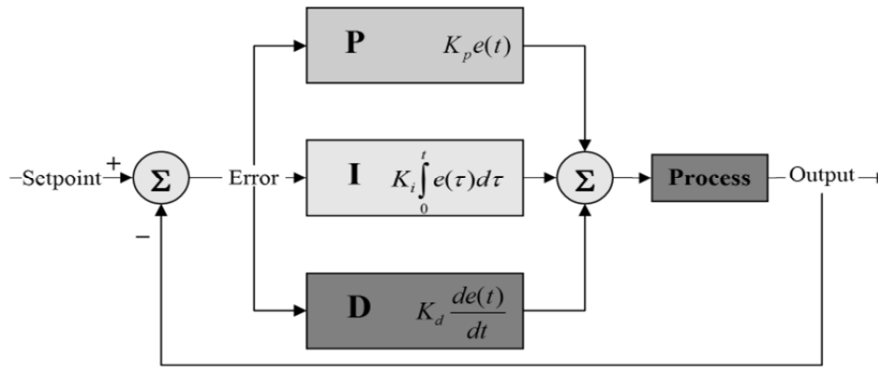


Figura 2.1 – Schema semplificato di implementazione di un controllore PID.

Azione proporzionale

L'azione *proporzionale* si basa su di un coefficiente di proporzionalità k_p che viene moltiplicato per l'errore $e(t)$. Questa prima azione di controllo cerca di ridurre l'errore istantaneo del sistema e funziona secondo la seguente formula:

$$u_p(t) = k_p e(t) \quad [2.2]$$

Come è facilmente comprensibile, se il segnale in uscita y subisce delle variazioni molto significative, l'azione di controllo proporzionale può rendere il sistema piuttosto instabile, o quantomeno sottoporlo a continue variazioni.

Con l'utilizzo della sola azione proporzionale è possibile controllare anche processi instabili, ma non è garantita la convergenza a zero dell'errore, in quanto al diminuire dell'errore diminuisce anche l'efficacia correttiva dell'azione proporzionale. L'introduzione dell'azione proporzionale porta a questi effetti:

- diminuisce il tempo di salita della risposta al gradino
- riduce l'errore a regime
- aumenta la sovra elongazione

Azione integrale

L'azione *integrale* permette di annullare completamente l'errore a regime, in quanto la sua azione è proporzionale alla somma degli errori agli istanti precedenti.

$$u_i(t) = k_i \int_0^t e(t) d\tau \quad [2.3]$$

Proprio per questa sua caratteristica l'azione integrale ha il vantaggio, rispetto a quella proporzionale, di continuare ad agire in maniera sensibile anche quando l'errore assume valori piccoli, permettendo il raggiungimento della configurazione richiesta.

L'introduzione dell'azione integrale porta a questi effetti:

- porta a zero l'errore a regime
- aumenta il tempo di salita
- aumenta il tempo di assestamento

Azione derivativa

L'azione derivativa consente di compensare rapidamente le variazioni del segnale di errore: la sua azione è paragonabile a quella di uno smorzatore. In alcuni casi, in presenza di un determinato segnale di errore sensibilmente elevato, a causa della componente proporzionale si possono avere azioni di correzione troppo decise, che potrebbero causare sovraelongazioni e portare il sistema all'instabilità. L'azione derivativa limita la variazione dell'intensità dell'azione correttiva nel tempo, aumentando la stabilità del sistema.

Si basa sulla seguente formula:

$$u_d(t) = k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad [2.4]$$

L'introduzione dell'azione derivativa porta a questi effetti:

- diminuisce il tempo di assestamento
- riduce la sovraelongazione

Regolatore completo PID

L'utilizzo completo delle funzioni del PID è semplicemente ottenuto come somma dei singoli contributi delle tre azioni, e quindi esplicitabile dalla seguente formula:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad [2.5]$$

L'azione complessiva è decisamente influenzata dalla scelta delle costanti, scelta che determina il comportamento e la stabilità del sistema controllato.

Il problema principale nella scelta dei guadagni di un sistema PID è che le tre azioni sono fortemente interdipendenti una dall'altra [12]. È quindi impossibile trovare l'ottimo andando ad agire su un singolo guadagno singolarmente, ma bisogna operare contemporaneamente su tutte le azioni.

Esistono però dei metodi empirici, noti come *Metodi di Ziegler-Nichols*, che aiutano in questa scelta.

2.3.2. Controlli in cascata

I principali costruttori di sistemi di controllo, al fine di migliorare le prestazioni del sistema, non forniscono prodotti caratterizzati da un singolo controllore PID, ma utilizzano più PID annidati uno all'interno dell'altro.

Solitamente I PID presenti nei sistemi di controllo commerciali sono tre: uno per il controllo dell'anello di posizione, uno per il controllo dell'anello di velocità e infine uno per il controllo dell'anello di corrente (a volte chiamato anello di controllo della coppia). La sinergia tra questi tre controllori permette di ottenere prestazioni molto elevate.

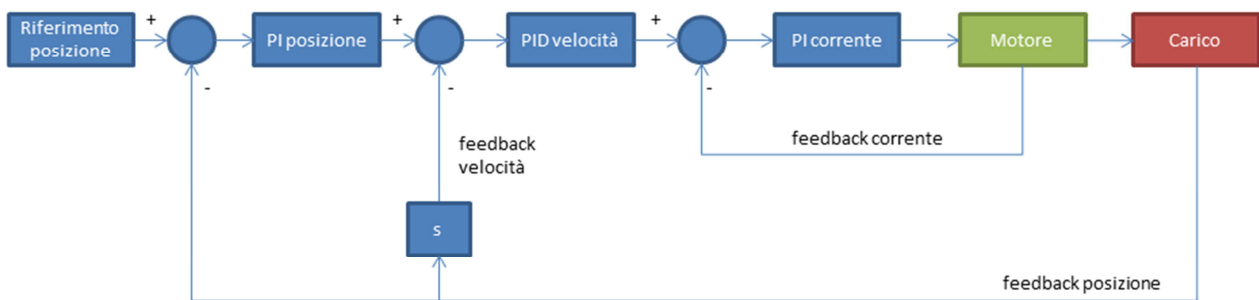


Figura 2.2: Schema generale di un PID industriale con loop annidati

L'immagine 2.2 rappresenta uno schema semplificato di controllo in cascata. Come si può vedere a suo interno sono presenti tre controllori PID.

Il segnale di riferimento di posizione viene confrontato con il feedback di posizione all'istante precedente in modo da calcolare l'errore di posizione. L'errore di posizione viene poi processato dal controllore PI di posizione che genera un riferimento di velocità. Il feedback di posizione (generato da un sensore) viene derivato numericamente per ottenere un feedback di velocità, che viene a sua volta confrontato con il riferimento di velocità per ottenere un errore di velocità. Questo errore viene a sua volta processato dal PID di velocità per ottenere un segnale di riferimento di corrente da inviare all'elettronica di potenza del motore. Il segnale di riferimento di corrente viene confrontato con un segnale di feedback proveniente dall'elettronica di potenza per generare un segnale di errore di corrente, che viene inviato al PI di corrente, che a sua volta comanda l'elettronica di potenza. Infine l'elettronica di potenza alimenta il motore che genera una coppia che a sua volta andrà ad agire sul carico, determinandone il movimento.

Mentre il PI di posizione e il PID di velocità controllano la dinamica della macchina, il PI di corrente si occupa di controllare la dinamica elettrica del motore. Infatti per motivi legati all'induzione magnetica potrebbe essere possibile che negli avvolgimenti del motore non scorra l'intensità di corrente desiderata, con la conseguente erogazione di una coppia diversa da quella desiderata.

La mancanza della componente derivativa nei sistemi di controllo degli anelli di posizione e corrente è dovuta alle possibili instabilità che questa componente può causare nel caso si trovi a processare segnali caratterizzati da oscillazioni ad alta frequenza o rumore.

Infatti la componente derivativa, essendo proporzionale alla derivata del segnale, di fronte a segnali caratterizzati da discontinuità elevate potrebbe portare il sistema a reagire con impulsi che ne determinerebbero l'instabilità. Si aggiunga a questo che i nuovi sistemi di controllo lavorano a tempo discreto, acuendo ancora di più questa problematica.

È quindi chiaro come la componente derivativa di un PID sia di difficile gestione quando si lavora con sistemi ad alta dinamica, mentre sia di grande aiuto quando si ha a che fare con sistemi dalle dinamiche molto ridotte (come potrebbe essere il controllo del livello di un liquido in una grossa cisterna).

2.3.3. Feed Forward

La tecnica del Feed Forward (d'ora in poi abbreviato in FF) è una tecnica molto utilizzata allo stato dell'arte nel campo del controllo. Il termine è utilizzato per descrivere due azioni molto diverse tra loro, anche se accumulate dalla stessa logica.

Un tipo di FF elabora il segnale di ingresso del sistema e si propone come una azione di controllo in catena aperta. Quest'azione presuppone la disponibilità di un modello seppur semplificato del sistema e ha come scopo quello di cercare di minimizzare l'errore che dovrà poi essere gestito dai sistemi di controllo retroazionati visti in precedenza.

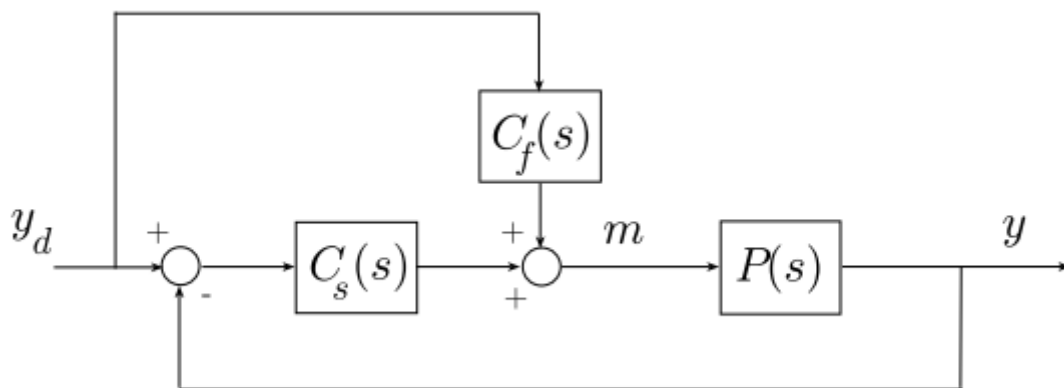


Figura 2.3: Esempio di Feed Forward del primo tipo (catena aperta)

Un secondo tipo di FF, partendo sempre dall'utilizzo di un modello del sistema, si prefigge di modificare il segnale di ingresso per compensare gli errori dovuti a disturbi esterni misurati, come vibrazioni, variazioni di temperatura, ecc..

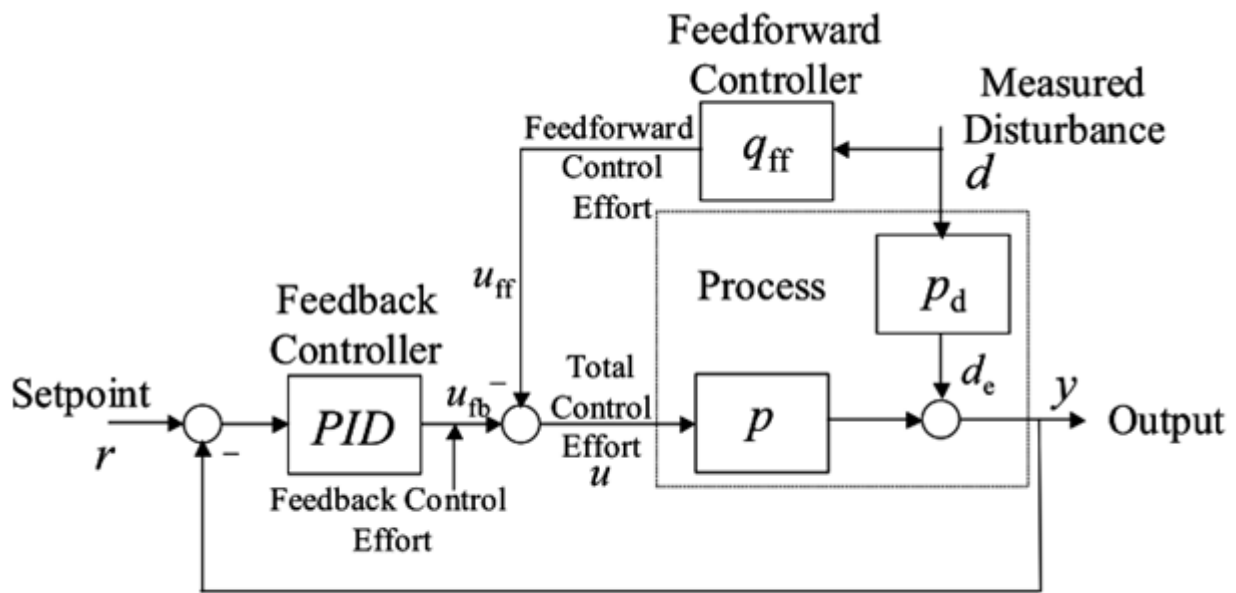


Figura 2.4: Esempio di Feed Forward del secondo tipo (reiezione dei disturbi)

I due sistemi di FF non si autoescludono, e possono essere combinati tra loro all'interno di uno stesso sistema, come si può vedere nella figura 2.5.

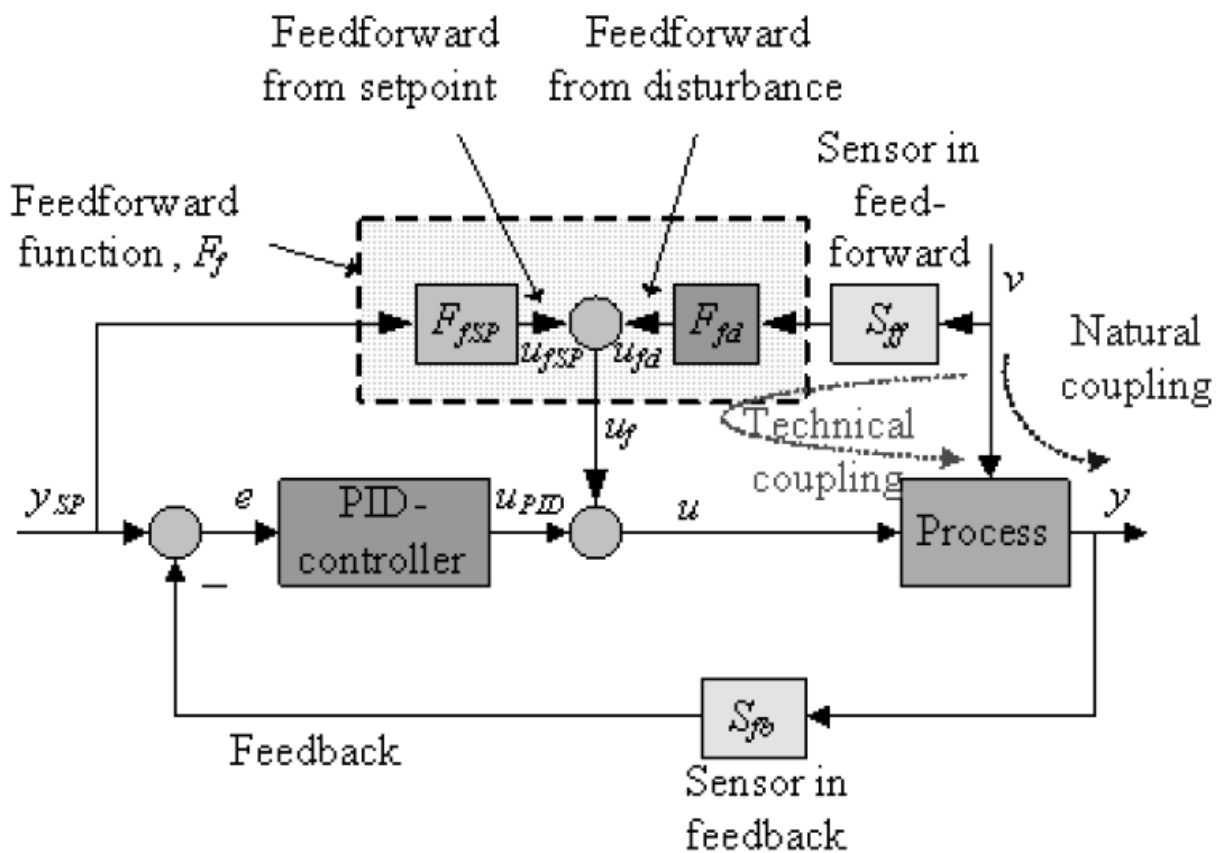


Figura 2.5: Feed Forward combinati in un unico controllo

Nel campo dell'automazione industriale, quando si parla di FF ci si riferisce solitamente al primo tipo.

Nei sistemi ad alta dinamica i sistemi di controllo in retroazione sono sfruttati al loro limite. Per permettere un inseguimento preciso delle traiettorie mantenendo un alto numero di cicli al minuto i guadagni che si devono impostare all'interno dei controllori sono solitamente molto alti. Questo comporta che, in presenza di un segnale di errore di una certa ampiezza, ci siano alte possibilità che il sistema diventi instabile a causa di un'azione troppo forte da parte del controllore (ricordiamo che l'azione di controllo è proporzionale al segnale di errore per il guadagno.). Per cercare di contenere l'errore si inseriscono azioni di FF in catena aperta. La filosofia di questo approccio è di cercare di predire il più correttamente possibile quale sarà la reazione del sistema ad un determinato segnale in ingresso ed andarla a sommare al segnale in uscita calcolato dal controllore. In questo modo se un PID generasse una risposta anomala (per esempio a causa del tempo di campionamento non sufficientemente elevato) che potrebbe causare segnali di errore troppo elevati allo step successivo, questa risposta sarebbe parzialmente corretta dall'azione di FF, che calcola la risposta teorica in base alla nostra conoscenza del sistema.

L'approccio FF può essere utilizzato sia per andare a correggere l'uscita del PI di posizione che del PID di velocità. Allo stato dell'arte però il secondo raramente viene implementato nei sistemi di controllo industriale. Lo schema di controllo andrebbe quindi ad assumere schematicamente la seguente configurazione.

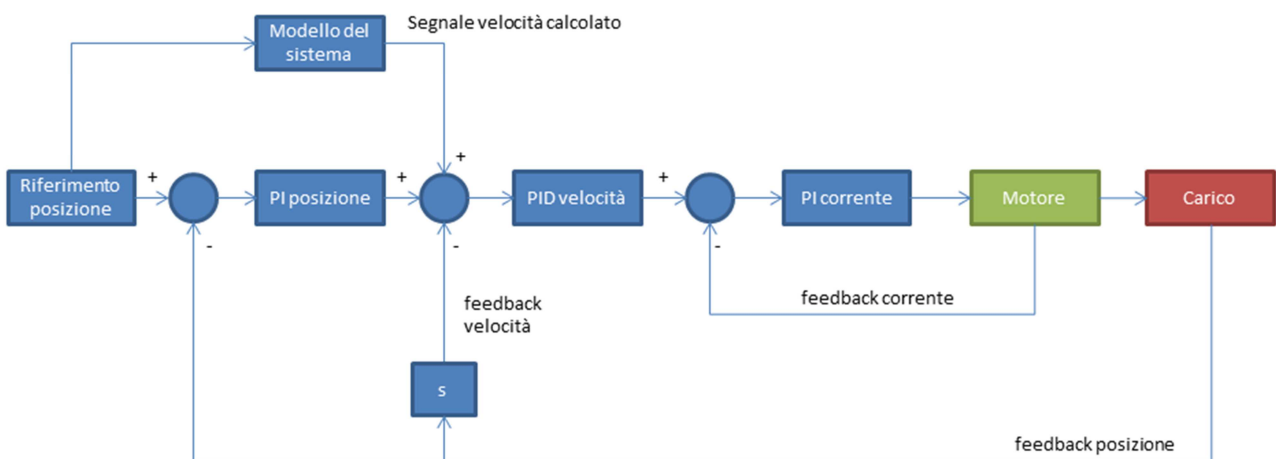


Figura 2.6: Schema generale PID con FF integrato

Data la difficoltà il più delle volte di ottenere un modello del sistema da utilizzare per la tecnica del FF è diventato comune sostituire la funzione di trasferimento rappresentate il sistema con un derivatore e un guadagno. In questo modo la velocità viene calcolata semplicemente andando a derivare il segnale di riferimento di posizione e il guadagno aumenta o diminuisce in base al suo valore l'influenza del FF.

Questa prassi migliora quindi la facilità di utilizzo a scapito delle performance, permettendo anche a chi non ha competenze particolari di potersi avvantaggiare di questo sistema mediante regolazioni try and error.

È evidente come se questa semplificazione sia accettabile per quanto riguarda il FF di velocità (il segnale di velocità ottenuto derivando la posizione approssima solitamente abbastanza bene il valore che si otterrebbe con sistemi più articolati), non lo potrebbe essere nel caso si volesse implementare un FF che vada a fornire un segnale di corrente.

Nonostante nella maggior parte dei casi si utilizzino motori che forniscono coppie proporzionali alla corrente introdotta secondo una costante, e quindi si possa facilmente calcolare il segnale di corrente calcolando la coppia necessaria a movimentare il sistema, la relazione tra l'accelerazione del sistema calcolabile derivando il segnale di riferimento di posizione e la coppia dipende dall'inerzia equivalente, che a priori non è nota. È chiaro quindi che non è possibile implementare un FF che partendo dal segnale di posizione vada a generare un input di corrente servendosi solamente di due derivatori e un guadagno. Questo è il motivo per cui allo stato dell'arte il FF viene utilizzato solamente per ottenere un riferimento di velocità.

2.3.4. Gain Scheduling

Come già accennato in precedenza nel mondo dell'automazione si ha a che fare solitamente con sistemi LTV (Lineari Tempo Varianti), mentre le tecniche di controllo comunemente utilizzate si basano sulla teoria dei sistemi LTI (Lineari Tempo Invarianti).

Questo implica che un determinato sistema di controllo secondo le teorie LTI potrà essere ottimizzato per controllare una macchina in un solo determinato istante del suo funzionamento, mentre non lo potrà essere per i restanti. Per cercare di risolvere questo problema senza essere costretti ad abbandonare la teoria dei sistemi LTI familiare a molti operatori dagli anni '90 si è introdotta la metodologia del Gain Scheduling [13][14][15].

La teoria del Gain Scheduling prevede la variazione dei guadagni del sistema di controllo nel tempo in base a tabelle precedentemente fornite al sistema di controllo. In base al valore di input di un segnale specifico vengono modificati i guadagni da applicare all'interno del sistema di controllo.

Questa tecnica richiede l'impiego di risorse abbastanza elevato e quindi solitamente non è applicabile alle macchine automatiche ad alte prestazioni a causa dei limiti tecnologici relativi alla capacità di calcolo dei processori. In alcuni sistemi di controllo di ultima generazione viene però utilizzata per implementare il valore di inerzia equivalente all'interno di un FF di coppia, andando quindi a semplificare la gestione di tale tecnica sostituendo ad una complicata funzione di trasferimento una tabella che lega ad ogni valore di posizione angolare un valore di inerzia equivalente.

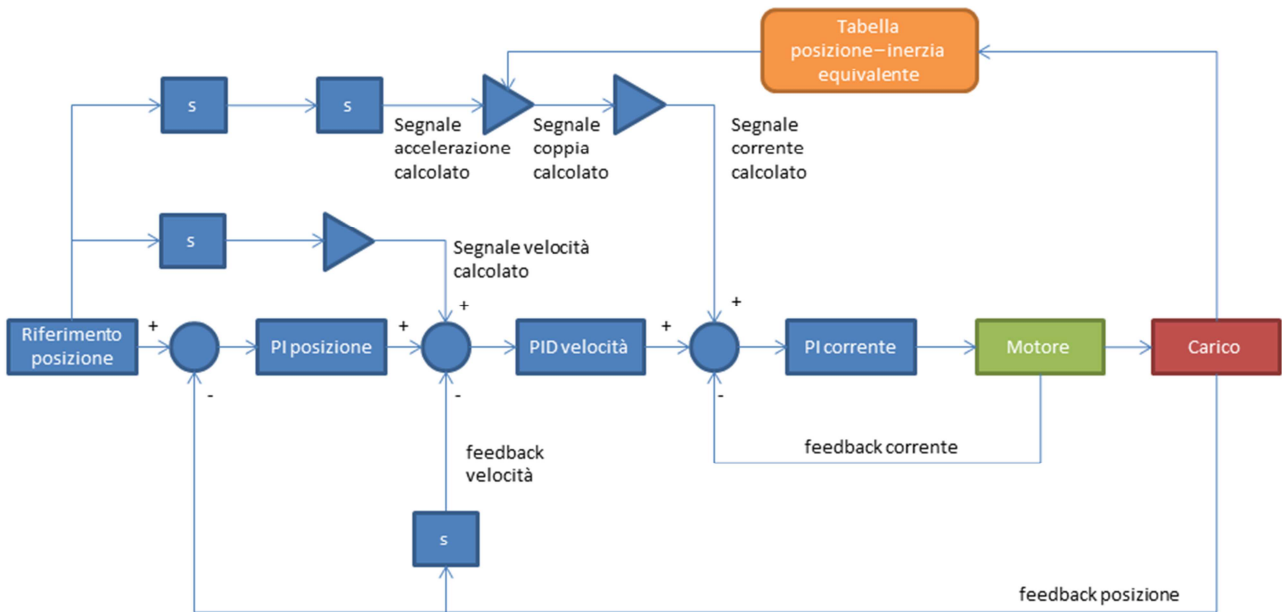


Figura 2.7: Esempio di FF di coppia con l'uso delle tabelle di inerzia equivalente

2.4. Metodi di simulazione a parametri concentrati.

I metodi di simulazione a parametri concentrati (come simulink) prevedono la descrizione dei sistemi mediante l'espressione delle equazioni differenziali che descrivono il problema attraverso un linguaggio di programmazione a blocchi. Rispetto ai software multibody a corpi rigidi presentano una serie di vantaggi e svantaggi che andremo ora ad analizzare.

Il grande vantaggio di questi strumenti è la possibilità di descrivere, attraverso il linguaggio a blocchi tipico di questi software, non solo i sistemi meccanici, ma qualsiasi tipo di sistema [16]. Con questi strumenti è quindi possibile creare modelli sia dei sistemi di controllo contenuti nei drive, sia dei motori elettrici collegati alla macchina che si vuole progettare.

A fronte di questo vantaggio si presentano però svariati svantaggi. Il primo è dato dal fatto che la modellazione di sistemi tutto sommato semplici possa diventare molto complessa. I progettisti che si avvalgono di questi strumenti non utilizzano geometrie matematiche 3D, ma descrivono il movimento reciproco delle parti considerando solamente la posizione dei vincoli e dei centri di massa nello spazio. Nel caso sia necessario modellare un contatto tra 2 corpi questi strumenti costringono il progettista ad una grande mole di lavoro con risultati non sempre soddisfacenti, al contrario dei software multibody che, basandosi sulle matematiche delle geometrie permettono di descrivere una situazione del genere in pochi passaggi.

Altro problema sempre legato alla mancanza di collegamento con geometrie matematiche è la mancanza della possibilità per l'operatore di avere una simulazione visiva di ciò che sta accadendo. Questo comporta che non sia ad esempio possibile accorgersi durante la simulazione se due componenti compenetrano tra loro. Questo naturalmente può portare a seri problemi in fase di allestimento del prototipo. Per questi motivi solitamente questi sistemi non vengono utilizzati in ambito meccanico, in quanto la loro flessibilità non controbilancia la loro complessità d'uso.

3. Obiettivi della tesi

L'obiettivo della tesi è trovare un metodo che permetta di migliorare l'efficienza del processo di progettazione di macchine automatiche in modo da permettere all'industrie di automazione di diminuire il loro time to market, aumentare le prestazioni delle loro macchine ed evitare spese dovute alla costruzioni di prototipi affetti da errori. Per perseguire questo obiettivo generale ci concentreremo su due obiettivi specifici.

Il primo è riuscire a migliorare l'integrazione tra la progettazione meccanica e la progettazione dei sistemi di controllo, in modo da offrire agli ingegneri nuovi spazi di manovra per migliorare le prestazioni delle proprie macchine.

Il secondo è trovare un metodo di progettazione che permette di conoscere il più possibile a priori il reale comportamento della macchina e che aiuti i progettisti dei vari campi a lavorare in parallelo, in modo da diminuire i tempi di progettazione ed i possibili errori che possono derivare da una progettazione in serie.

3.1. Integrazione tra meccanica e sistemi di controllo.

Allo stato dell'arte, in fase progettuale, l'integrazione tra il processo di progettazione meccanica e la progettazione (o la scelta e regolazione) dei sistemi di controllo è praticamente nulla. Gli effetti delle scelte progettuali fatte dall'ufficio tecnico meccanico si ripercuotono sui progettisti dei controlli senza che ci sia nessun feedback da questi ultimi. Questo fa sì che spesso molte potenzialità fornite dagli azionamenti elettrici non vengano prese in considerazione, mentre al tempo stesso non vengano evitate le criticità.

Più raro, ma sempre inefficiente, è il comportamento inverso, dove i responsabili della scelta dei controlli impongono ai progettisti meccanici limiti molto stringenti sulle proprietà meccaniche del sistema per essere sicuri di non incappare in qualche criticità durante il tuning degli azionamenti.

Entrambi gli scenari limitano fortemente quelle che potrebbero essere le reali prestazioni della macchina.

Nostra intenzione è fornire uno strumento che permetta di analizzare il sistema nel suo insieme, permettendo alle due funzioni di trovare soluzioni di comune accordo al fine di poter estrarre dalla macchina tutto il suo potenziale.

3.2. Metodo di progettazione.

A nostro avviso lo strumento che può permettere di raggiungere gli obiettivi descritti precedentemente è un metodo di progettazione integrato che permetta, oltre alla già citata collaborazione tra gli enti responsabili del design della macchina, una verifica dei risultati attraverso l'utilizzo di prototipi virtuali. In questo modo oltre ad evitare le spese dovute alla costruzione di costosi prototipi reali, si otterrebbe una parallelizzazione dei processi di progettazione, in quanto i responsabili del controllo potrebbero intervenire su parti di macchina che sono state realizzate solo a livello concettuale, accorciando incredibilmente i tempi totali e prevenendo possibili problemi.

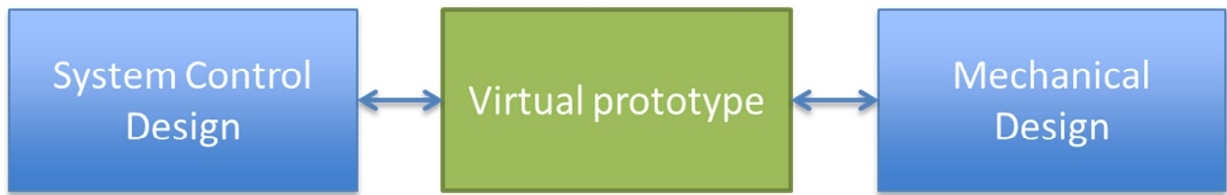


Figura 3: Campi ingegneristici afferenti al prototipo virtuale

4. Metodo utilizzato

Come già anticipato il metodo che andremo a sviluppare si baserà sull'utilizzo di prototipi virtuali, creati mediante l'utilizzo di software CAE specializzati. Mediante l'utilizzo di questa tecnica sarà possibile raggiungere la maggior parte dei risultati che ci siamo prefissati.

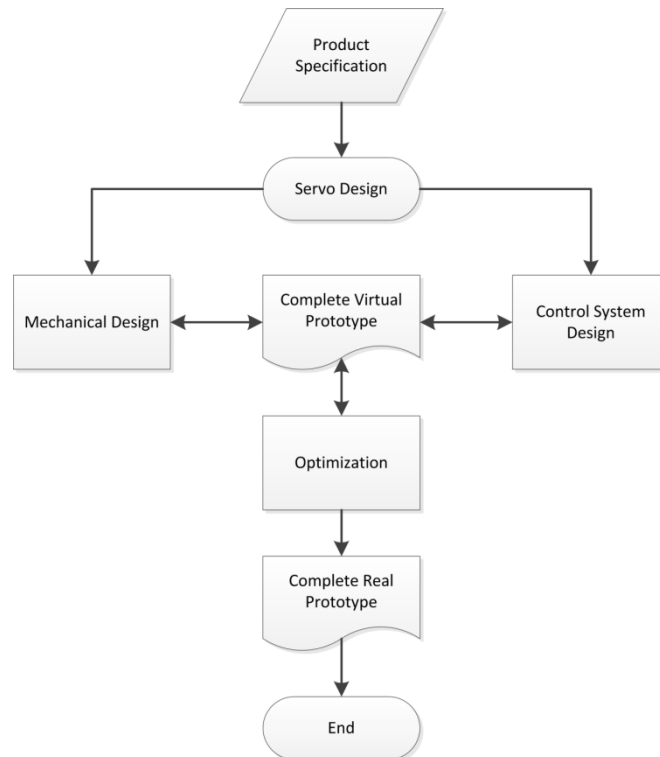


Figura 4.1: Flusso progettuale schematizzato relativo al metodo

Lo schema in figura mostra il nostro modo di procedere alla progettazione di una macchina automatica. Partendo dalle specifiche di prodotto si passa alla progettazione dei servomeccanismi. I responsabili della parte meccanica e della definizione del controllo lavorano contemporaneamente alla definizione di un prototipo virtuale, in grado di fornire una previsione accurata delle performance dell'azionamento. Una volta definiti i principali parametri della macchina (tipo di catena cinematica, tipologia di controllo scelto) si potranno andare a variare i parametri di progetto al fine di ottimizzare le prestazioni.

I parametri di progetto in un azionamento meccanico sono molteplici. Dal punto di vista meccanico si possono trattare come parametri tutte le dimensioni dei membri dei cinematismi e le loro proprietà di massa, oltre che alle loro caratteristiche strutturali. Dal punto di vista del controllo potranno essere variati tutti i guadagni del sistema di controllo, ma anche le caratteristiche del motore elettrico, in modo da poter individuare con esattezza la taglia di motore strettamente necessaria a movimentare un determinato azionamento. Non va inoltre dimenticata la possibilità di trattare come parametro di ingresso anche la legge di moto di riferimento. Andando a variare i punti di passaggio e il grado o il tipo di legge, si possono ottenere significative variazioni dal punto di vista delle coppie necessarie e della regolarità del moto.

La fase di ottimizzazione potrà essere gestita tramite modalità try and error o attraverso il ricorso a software specifici per l'implementazione di algoritmi di ottimizzazione.

4.1. Strumenti utilizzati

Per la creazione del nostro prototipo virtuale si è deciso di utilizzare due software tra loro diversi in cosimulazione tra loro.

Per quanto riguarda la simulazione della parte meccanica si è deciso di utilizzare un software MFBD (Multy Flexible Body Dynamics), ovvero un software per l'analisi dinamica di meccanismi multicorpo flessibili. Questa scelta è stata fatta in quanto un software del genere permette di generare modelli predittivi dei cinematismi meccanici partendo dai modelli CAD 3D. Questo approccio, rispetto a quello utilizzato dai software a parametri concentrati, risulta molto più pratico ed intuitivo per chi lavora negli uffici di progettazione, oltre ad avere i vantaggi già spiegati in precedenza. Essendo la nostra una ricerca mirata a trovare un metodo di progettazione applicabile nell'industria questa scelta è stata reputata la più appropriata. Inoltre, a differenza dei semplici software MBD descritti in precedenza, un software MFBD permette di valutare le deformazioni dei corpi e i loro stato tensionale durante il funzionamento, permettendo di tenere sotto controllo eventuali criticità dovute a carichi troppo elevati o a vibrazioni indesiderate causate da fenomeni impulsivi o di risonanza [17].

La simulazione della parte "elettronica" è invece affidata ad un software di simulazione a parametri concentrati. Questa scelta è stata guidata principalmente da due fattori. Il primo è la dimestichezza con questo tipo di software da parte degli ingegneri del controllo in ambito industriale, il secondo è dato dal fatto che una simulazione di questo tipo permette con relativa facilità di ottenere risultati più che soddisfacenti. Con questo strumento verranno infatti modellati il sistema di controllo e la dinamica interna del motore elettrico di cui, essendo componenti commerciali, non conosciamo nel dettaglio la struttura. Non è quindi opportuno ne conveniente spingersi troppo in dettaglio nella modellazione di questi sistemi.

4.1.1. Software MFBD.

Per la creazione del prototipo virtuale della macchina in esame si è utilizzato RecurDyn, un software di dinamica multi-body molto avanzato che offre una soluzione completa per l'analisi cinematica e dinamica in ambito multi-fisico, oltre che la ricerca dell'equilibrio statico del sistema. Esso presenta al suo interno un motore Multi-Flexible Body Dynamics (MFBD), tecnologia che permette la simulazione dinamica integrata con il fem non-lineare e il controllo all'interno di un solo integratore numerico. Questo software offre una serie di strumenti completi ed affidabili per la simulazione in campo cinematico e dinamico. La soluzione consente di investigare diversi scenari ipotetici su meccanismi semplici e complessi e permette una rapida valutazione e ottimizzazione delle alternative, che si traduce in una riduzione dei tempi di sviluppo prodotto. Inoltre permette all'utente di visualizzare velocemente le prestazioni del prodotto attraverso l'analisi e la comparazione animata e grafica, che riproducono forze di reazioni, posizioni, velocità ed accelerazioni. La necessità di esportare il modello CAD in un applicativo specifico per la simulazione cineto-dinamica è risolta dalla completa integrazione dei due ambienti e dall'associatività del modello geometrico con il modello di simulazione.

Il sistema non impone limitazioni nell'organizzazione geometrica dei dati. Funzionalità body-to-body simulano il contatto e l'interazione tra componenti, all'interno del processo di analisi. La simulazione fornisce il comportamento di un prodotto in tempo reale, sotto forma di grafici e filmati, e l'utente ha la possibilità di guidare la simulazione tramite fogli di calcolo, o in modo diretto, tramite un'interfaccia specifica. Il software supporta tutti i modelli geometrici, dal semplice schema filiforme agli assiemi complessi, con metodologie top-down e bottom-up. L'utilizzo spazia dalla semplice analisi cinematica alla simulazione di meccanismi che sono influenzati dalla flessibilità dei loro componenti e dall'integrazione con i sistemi di controllo.

4.1.2. Software a parametri concentrati

Per la creazione del modello del sistema di controllo e della dinamica del motore si è scelto Matlab – Simulink. Simulink è un ambiente programmabile con diagrammi a blocchi per simulazioni multidominio e la progettazione basata su modelli. Simulink fornisce un editor grafico, una libreria di blocchi personalizzabile a solutori per modellare e simulare sistemi dinamici.

Simulink è lo stato dell'arte per quanto riguarda le simulazioni dinamiche basate su modelli a parametri concentrati. La sua libreria di blocchi configurabile è molto estesa e il linguaggio è noto a chiunque lavori nel settore. È inoltre compatibile con RecurDyn per la creazione di cosimulazioni.

4.1.3. Cosimulazione.

La cosimulazione permette di mettere in comunicazione tra loro due software diversi durante una simulazione, permettendo lo scambio di dati. Per prima cosa è necessario stabilire quali sono i dati scambiati. Nel nostro caso avremo solitamente il valore di coppia erogata da motore che viene passato da Simulink, per cui tale valore è un output, a RecurDyn, per cui tale valore è un input. RecurDyn utilizzerà il valore di coppia ricevuto per calcolare lo spostamento del manovellismo nello step di calcolo e fornirà la posizione calcolata a Simulink come output. Simulink a sua volta prenderà in input il valore di posizione, lo utilizzerà per calcolare l'errore di posizione e quindi la nuova coppia da erogare al motore e così via.

Durante una cosimulazione gli output tra Simulink, usato per simulare il sistema di controllo, e RecurDyn, utilizzato per modellare la parte fisica, vengono scambiati ad una frequenza fissa corrispondente alla frequenza di calcolo. Si suppone quindi che i valori scambiati tra i due sistemi rimangano invariati per la durata di un intero periodo tra uno step di calcolo e il successivo.

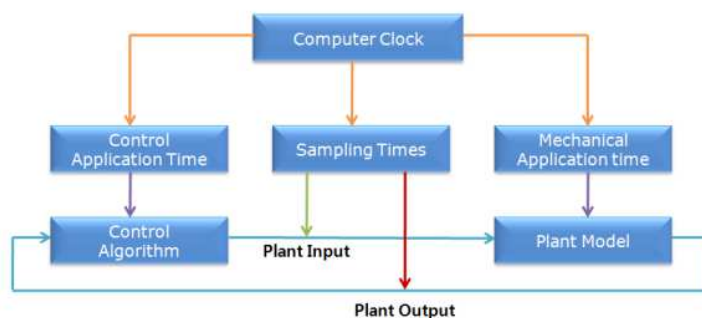


Figura 4.2: Gestione del tempo di simulazione durante una cosimulazione

Andando nel dettaglio:

1. Nella prima fase Simulink crea un memoria condivisa e richiama il modello RecurDyn.
2. Il solutore di RecurDyn lancia il primo segnale di output e si mette in attesa
3. Simulink riceve il segnale del sensore (plant output) dalla memoria condivisa
4. Simulink manda il segnale ottenuto mediante l'applicazione della logica di controllo
5. RecurDyn riceve il segnale (plant input = control output) dalla memoria condivisa



Figura 4.3: Gestione del passaggio dati tra software durante una cosimulazione

I vantaggi che si hanno con la cosimulazione sono soprattutto dovuti all'utilizzo di software altamente specifici nel loro campo di applicazione.

L'unico svantaggio nell'utilizzare la cosimulazione tra software non integrati è che entrambi i solutori devono lavorare a passo fisso, con il risultato di essere meno efficienti dal punto di vista del tempo di calcolo.

4.2. Confronto con altri metodi

Andremo ora nel seguito ad evidenziare brevemente quali sono i vantaggi che il nostro metodo presenta rispetto allo stato dell'arte.

4.2.1. Analisi usando solamente ambienti programmabili con diagrammi a blocchi.

Il nostro metodo presenta alcuni vantaggi e svantaggi rispetto ad una soluzione interamente realizzata attraverso ambienti programmabili con diagrammi a blocchi.

Gli svantaggi comprendono la necessità di utilizzare un passo fisso per la soluzione, il che fa sì che i tempi di simulazione si allunghino, seppur non eccessivamente, e la complicazione di dover conoscere e gestire due software tra loro molto diversi.

D'altra parte tra i vantaggi, che a nostro avviso sono molto più numerosi, possiamo annoverare una molto più facile e affidabile gestione dei contatti, una più facile modellazione e parametrizzazione dei cinematismi meccanici, una più intuitiva interfaccia grafica e la possibilità di gestire componenti considerando la loro elasticità.

Queste motivazioni ci hanno portato ad escludere una simulazione interamente realizzata in programmi come Simulink come possibile soluzione ai nostri problemi.

4.2.2. Analisi utilizzando sistemi MBD.

I sistemi MBD, come già espresso in precedenza, sono per così dire un sottoinsieme dei sistemi MFBD da noi utilizzati, in quanto mancano della possibilità di analizzare sistemi non rigidi, non offrendo in cambio nessuna feature aggiuntiva. A questo si vada ad aggiungere che molti di questi sistemi mancano della possibilità di funzionare in cosimulazione con altri software.

I vantaggi della nostra scelta sono quindi evidenti e non ci soffermeremo oltre su questo argomento.

5. Case Study

Per verificare la validità del nostro modello abbiamo cercato un case study a cui applicarlo. Come partner industriale fornitore del caso di studio è stata scelta Borghi S.p.A., un'azienda modenese che lavora nel campo delle macchine ad late prestazioni.

5.1. La macchina Borghi

Borghi S.p.A. è una ditta leader nella produzione di macchine automatiche per la produzione di scope e spazzole. Specializzata nella progettazione di macchine punzonatrici automatiche basate su camme desmodromiche. Tali azionamenti meccanici, seppure capaci di notevoli prestazioni, presentano però forti limitazioni soprattutto in termini di flessibilità e sensibilità alle condizioni di montaggio.

5.1.1. Componenti e loro funzioni.

Andiamo ora ad analizzare come la macchina procedere all'inserimento delle setole all'interno delle basi di plastica. La base di plastica viene precedentemente forata in corrispondenza dei punti in cui vorranno applicare le setole e va ad alimentare la macchina.

La macchina Borghi è divisa in 2 parti. La parte inferiore, garantisce il moto alla base plastica, posizionandola in posizione corretta per ricevere le setole che vengono piantate dalla parte superiore, oggetto del nostro studio. La parte superiore è composta da sette assi che concorrono tutti al piantaggio della setola nell'apposito foro. Le setole vengono piantate nei fori insieme ad una graffetta, che funziona da organo di ritegno, per impedire alle setole di fuoriuscire dagli alloggiamenti. La macchina ha il compito di preparare sia le setole che le graffette e di piantarle all'interno della base plastica.

Per meglio chiarire si descrivono sinteticamente i singoli gruppi funzionali.

- **Arco:** il **gruppo arco** trasferisce le setole dal serbatoio preposto al punzone.

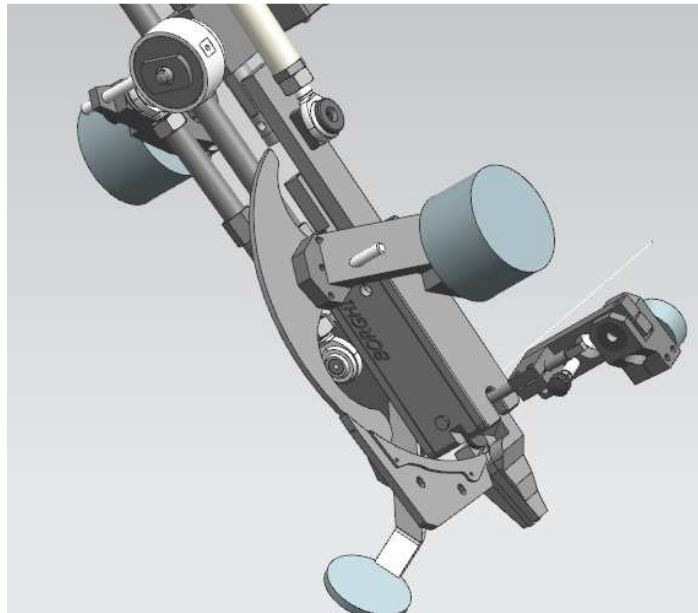


Figura 5.1: Gruppo Arco

- **Filo:** il **gruppo filo** alimenta il filo metallico che verrà successivamente tagliato dal gruppo tranciante per creare la graffetta di fissaggio delle singole setole.
- **Tranciante:** Il **gruppo tranciante** taglia il filo metallico per la creazione della graffetta, cooperando con il gruppo “quadro” che forma la graffetta stessa.

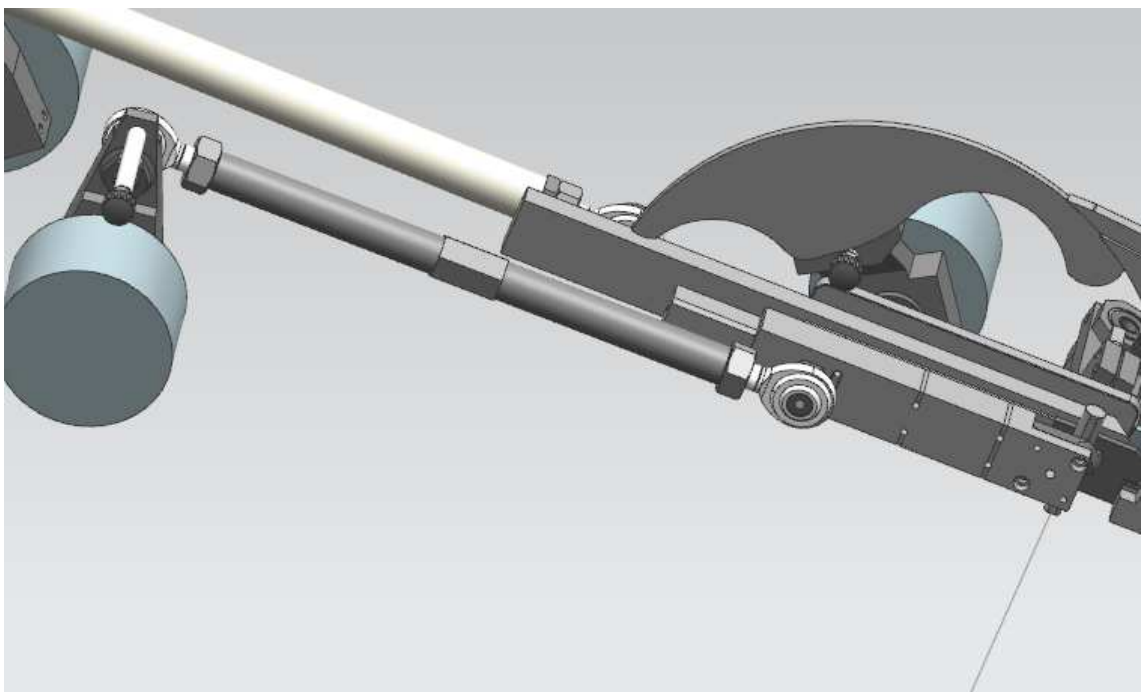


Figura 5.2: Gruppo Tranciante

Quadro: il **gruppo quadro** forma la graffetta. È di fatto costituito dal corpo contro il quale il gruppo tranciante taglia e modella la graffetta di chiusura.

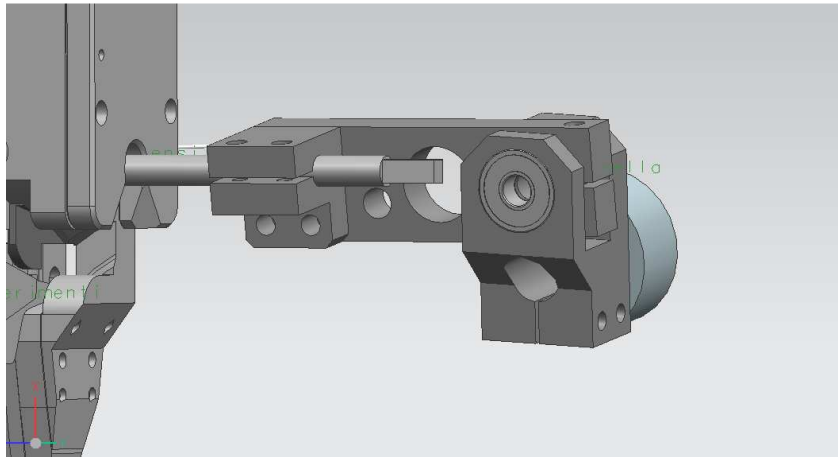


Figura 5.3: Gruppo Quadro

- **Punzone:** il **gruppo punzone** preleva le setole provenienti dal gruppo arco e le posiziona in prossimità della tavoletta a cui verranno ancorate. Il gruppo punzone svolge inoltre la funzione di chiudere la graffetta che andrà poi ad impedire la fuoriuscita delle setole durante l'utilizzo.

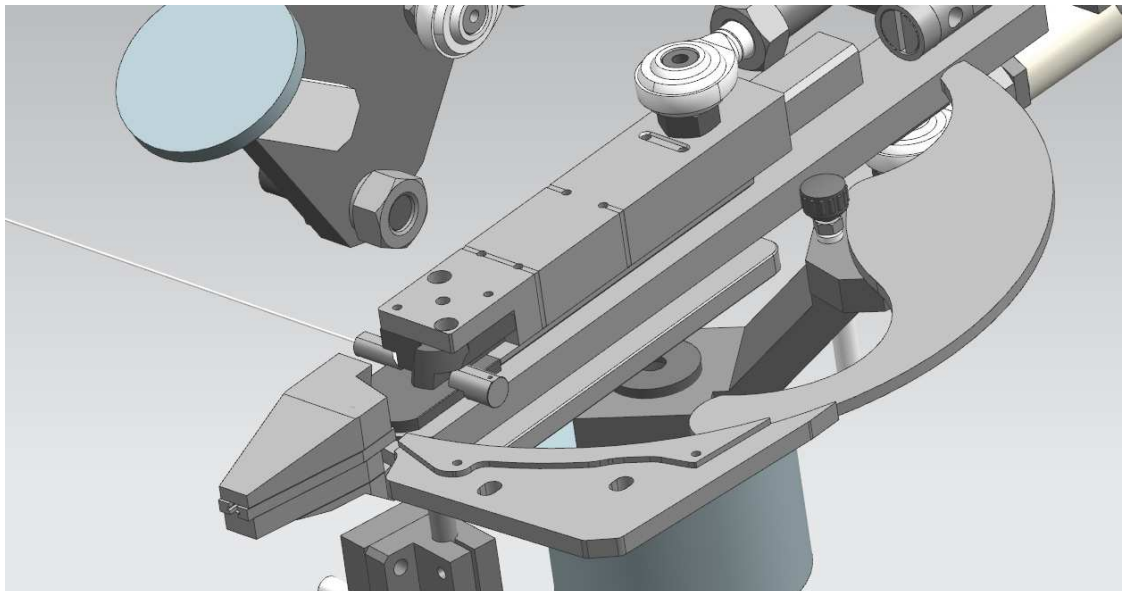


Figura 5.4: Gruppo Punzone

- **Linguetta:** il **gruppo linguetta** inserisce nella tavoletta le setole e la graffetta precedentemente elaborate dal gruppo punzone

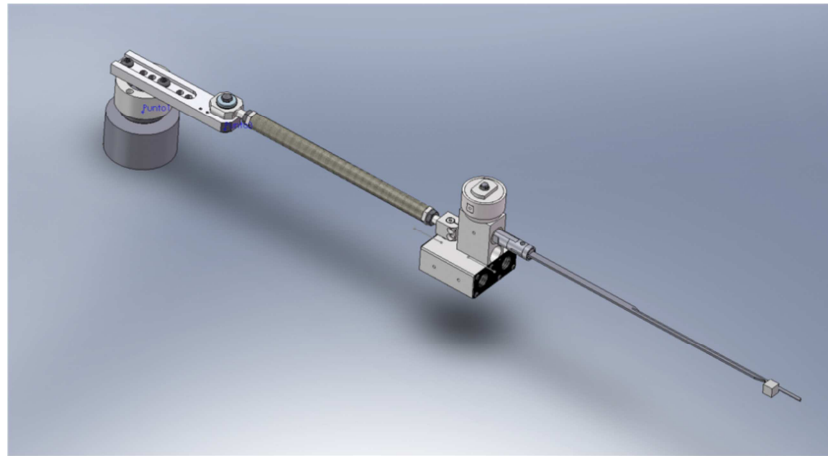


Figura 5.5: Gruppo Linguetta

- **Spartisetola:** il **gruppo spartisetola** separa le setole già piantate dalla zona di piantaggio delle nuove setole.

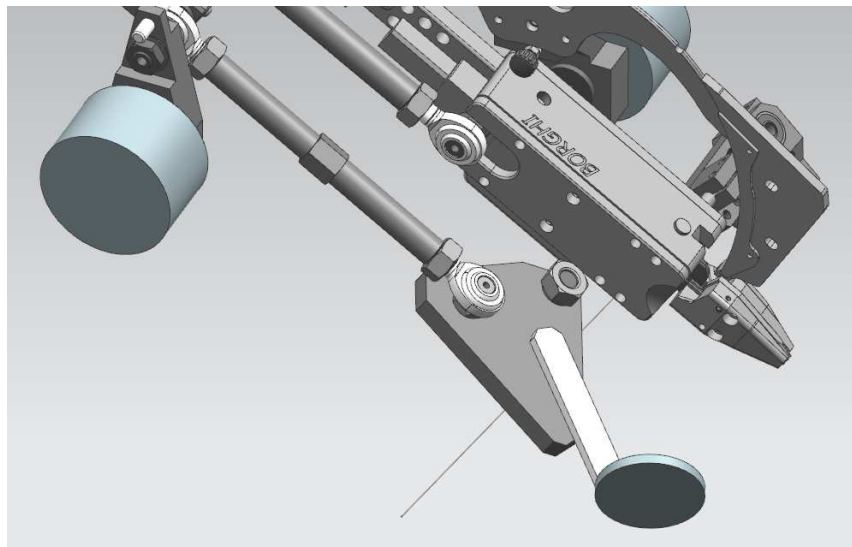


Figura 5.6: Gruppo Spartisetole

Tale macchina dovrà lavorare in differenti configurazioni idonee a elaborare setole di lunghezze diverse.. Al variare delle configurazioni verranno modificate le leggi di moto di alcuni gruppi ed eventualmente sostituiti o spostati alcuni componenti.

5.1.2. Cambio formato

Allo stato attuale, per cambiare formato di setole da piantare è necessario sostituire la biella del gruppo Linguetta con una di dimensioni longitudinali diverse, spostare la posizione del gruppo spartisetola e cambiare le leggi di moto degli altri cinematismi. Per fare ciò è necessario sostituire le camme che guidano i gruppi, con una conseguente onerosa operazione di cambio formato.

È importante sottolineare che i gruppi Filo, Tranciante, Quadro ed Arco non variano la loro legge di moto al variare della configurazione, mentre i gruppi Linguetta, Punzone, Spartisetola presentano una legge di moto differente per ogni corsa.

5.1.3. Azionamenti desmodromici e cambio formato.

Come è possibile immaginare, gli azionamenti desmodromici finora utilizzati per ottenere elevate prestazioni in termini di battute al minuto (700) non permettono un agile cambio formato e incidono negativamente sulla flessibilità della macchina.

Un altro punto negativo è dovuto alla difficoltà di montaggio. Le due piste delle camme devono essere precisamente sincronizzate tra loro, per evitare di applicare sollecitazioni troppo alte sulle rotelle. Se il montaggio delle camme non avviene in maniera precisa allora è molto probabile avere cedimenti strutturali con conseguenze dannose per tutte le altre parti della macchina.

Infine va notato come le camme desmodromiche siano affette da usura. Con l'avanzare dell'usura il gioco tra le piste e la rotella aumenta, con l'instaurarsi di una forte rumorosità e la necessità di diminuire la velocità del gruppo, con una conseguente perdita di produttività.

5.1.4. Nuovo design della macchina.

Per superare i limiti imposti dalle camme desmodromiche si è quindi scelto di sostituire gli azionamenti meccanici con motori elettrici. Per evitare problemi di instabilità che potrebbero derivare da backlash e cedevolezze interne, nonché per diminuire il numero di parti meccaniche soggette a manutenzione si è deciso di utilizzare un approccio direct drive, cioè di accoppiare gli azionamenti elettrici direttamente ai cinematismi, senza interposizione di riduttori.

5.2. Applicazione del metodo

Dopo aver abbozzato il nuovo design della macchina Borghi si è dotata di un primo prototipo per poter testare la soluzione ideata. Dopo essere incorsa in diversi problemi legati alle prestazioni raggiungibili in termini di velocità e precisione, si è deciso di applicare il metodo da noi proposto per andare a trovare e risolvere le criticità presenti.

5.2.1. Creazione del modello multibody.

L'attività di ricerca è quindi iniziata con l'importazione all'interno del simulatore delle geometrie dei gruppi linguetta e punzone fornite da Borghi S.p.A. Per ogni componente si sono inseriti i dati relativi al peso specifico del materiale e successivamente, attraverso prove specifiche su ogni parte del modello, si sono verificate le reazioni dei vari componenti confrontandole con quelle previste dalle relazioni teoriche note. Infatti un errore del software nell'importazione delle proprietà di geometria delle masse dall'ambiente di assieme CAD al simulatore cinetodinamico potrebbe pregiudicare i risultati delle simulazioni.

Inoltre un simile errore è solitamente difficilmente individuabile. Occorre quindi verificare accuratamente che il comportamento inerziale dei cinematismi sia aderente alla realtà.

Successivamente si sono inseriti all'interno del modello i vincoli cinematici (giunti) tra le parti che presentavano moto reciproco tra loro. Questa fase di sviluppo del prototipo virtuale è molto delicata in quanto cinematismi non correttamente vincolati pregiudicano i calcoli. In particolare, in caso di vincoli ridondanti i solutori non sono infatti in grado di risolvere il problema, e ricorrono all'eliminazione di alcuni vincoli secondo logiche non facilmente prevedibili e spesso causa di errori. Come detto in precedenza inoltre è importante posizionare i giunti nello spazio nelle corrette posizioni di lavoro. Infatti le forze e soprattutto le coppie scambiate tra i corpi dipendono sensibilmente dal punto di applicazione delle stesse. Inserire i giunti nelle posizioni scorrette può quindi dare origine ad errori non trascurabili.

Linguetta:

Tra il "carter" (non rappresentato) e la manovella (a cui era stata aggiunta l'inerzia del motore) si è imposto un giunto di tipo *revolute* (o cerniera).

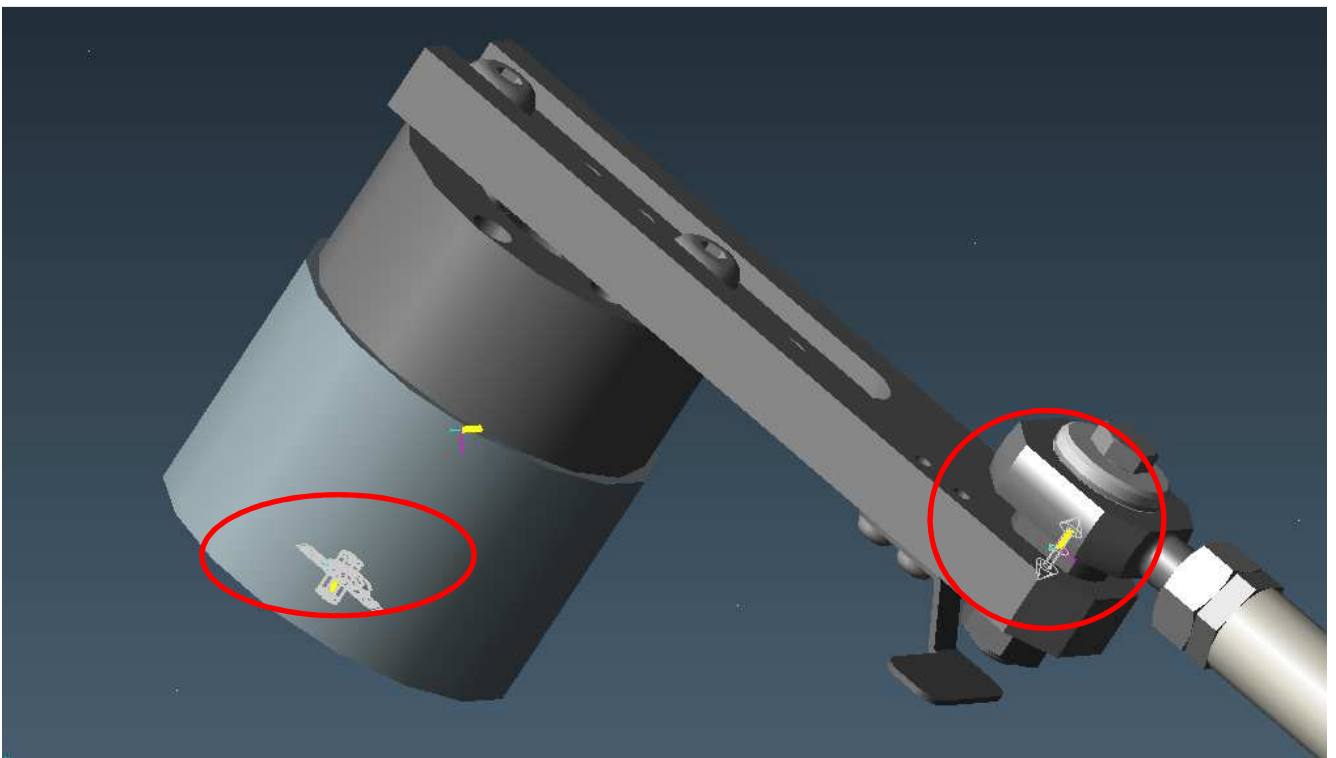


Figura 5.7: Vincoli cinematici

Tra la manovella e la biella si è imposto un giunto di tipo *Cylindrical* (che consente la traslazione ed la rotazione rispetto ad un medesimo asse).

Tra la biella e il cedente che supporta la linguetta si è applicato un giunto *Spherical*.

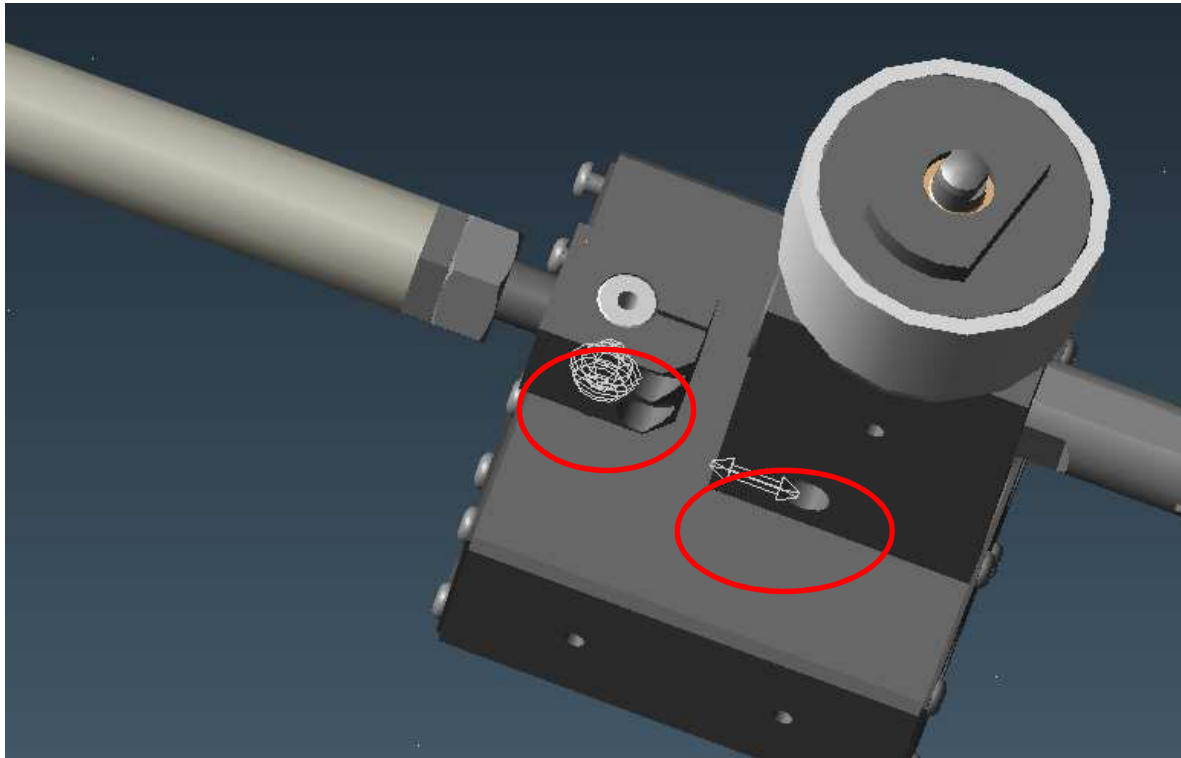


Figura 5.8: Vincoli cinematici

Tra cedente e carter (le barre di guida della linguetta) si è imposto un giunto prismatico ovvero di tipo *Translational*.

In questo modo il cinematismo della linguetta risulta adeguatamente vincolato e il simulatore può dunque risolvere i calcoli in maniera trasparente senza ad andare a modificare i vincoli imposti. Se infatti si analizzano i gradi di libertà del cinematismo si vede come a fronte di 18 gradi di libertà si siano imposti 17 gradi di vincolo. Al gruppo linguetta rimane dunque un solo grado di libertà, ovvero la rotazione della manovella attorno all'asse motore.

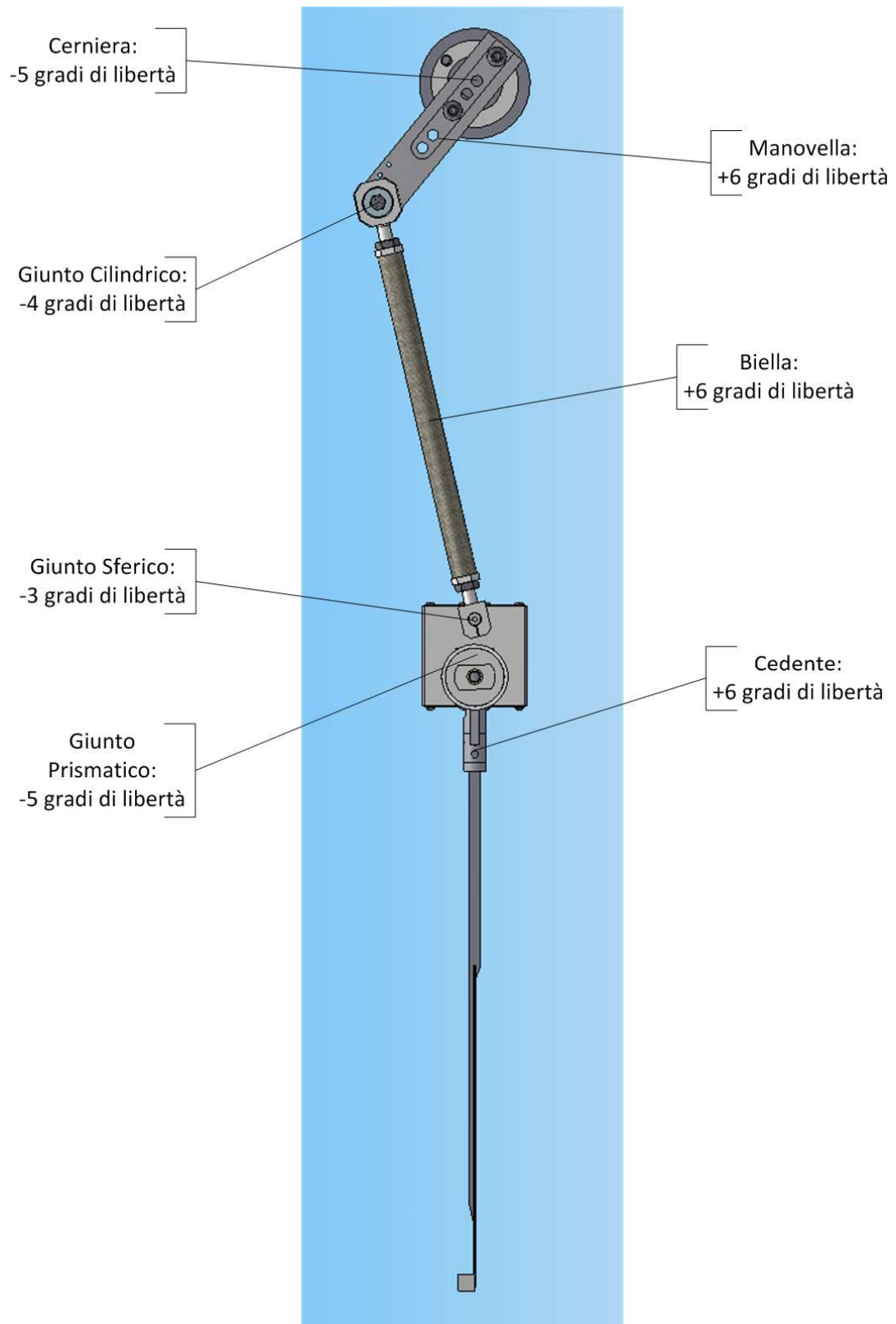


Figura 5.9: Analisi dei gdl del gruppo Linguetta

Punzone:

Per quanto riguarda il punzone si sono riscontrate alcune problematiche dovute al posizionamento dei vari membri del cinematismo. In particolare in figura si nota che le estremità della biella giacciono sempre su due piani differenti e paralleli tra loro: uno coincidente con quello definito dal moto della manovella, l'altro definito dalla traslazione del cedente.

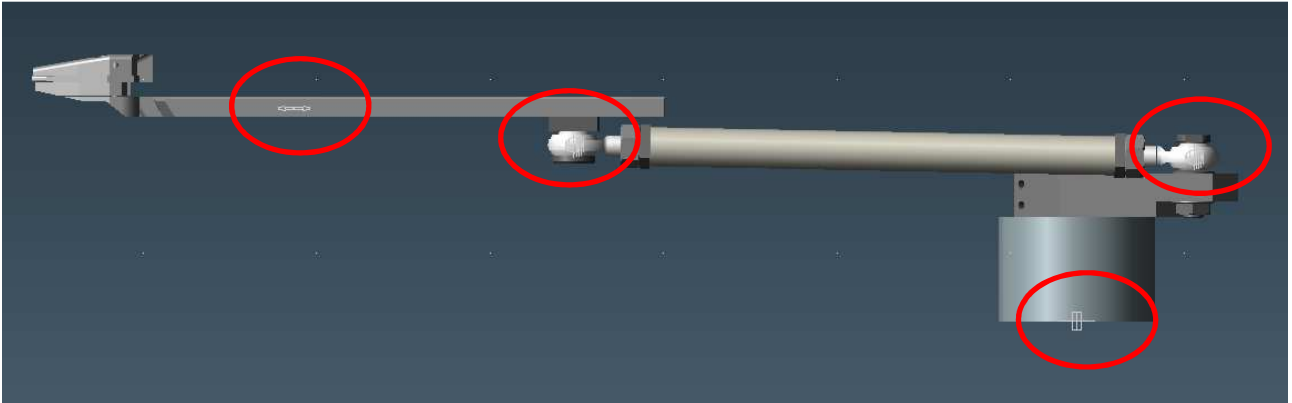


Figura 5.10: Vincoli cinematici

In questo caso, posto come in precedenza un giunto di tipo *Revolute* tra il carter e la manovella e uno di tipo *Translational* tra carter e cedente, si sono assegnati 2 giunti sferici per definire i vincoli relativi alla biella. Analizzando i gradi di libertà del meccanismo si nota che al gruppo rimangono due gradi di libertà: non viene vincolata infatti la rotazione della biella intorno al suo stesso asse. Tale semplificazione computazionale non ha però conseguenze sulla validità del modello in quanto non influenza in alcun modo i risultati delle simulazioni.

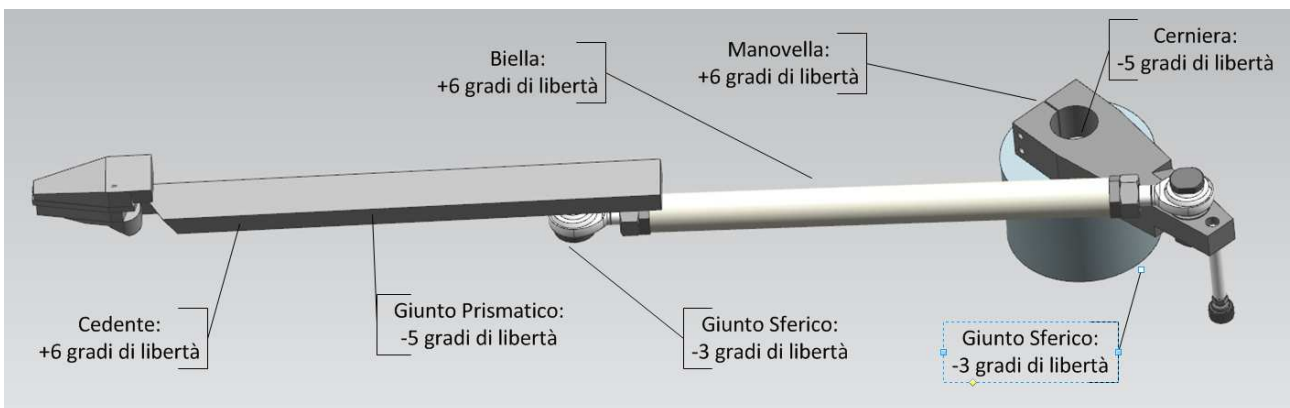


Figura 5.11: Analisi dei gdl del gruppo Punzone

Tranciante:

Per quanto riguarda il gruppo tranciante i vincoli assegnati per garantirne il corretto funzionamento sono del tutto identici a quelli applicati al punzone, in quanto i due cinematismi funzionano nello stesso modo. Si sono quindi applicati una cerniera (o *revolute joint*) al motore, due giunti sferici alle estremità della biella e un giunto prismatico per fissare il cedente. In questo modo a fronte di 18 gradi di libertà avremo 16 gradi di vincolo. Rimarranno quindi libere le rotazioni della manovella attorno all'asse motore e quelle della biella intorno al proprio asse.

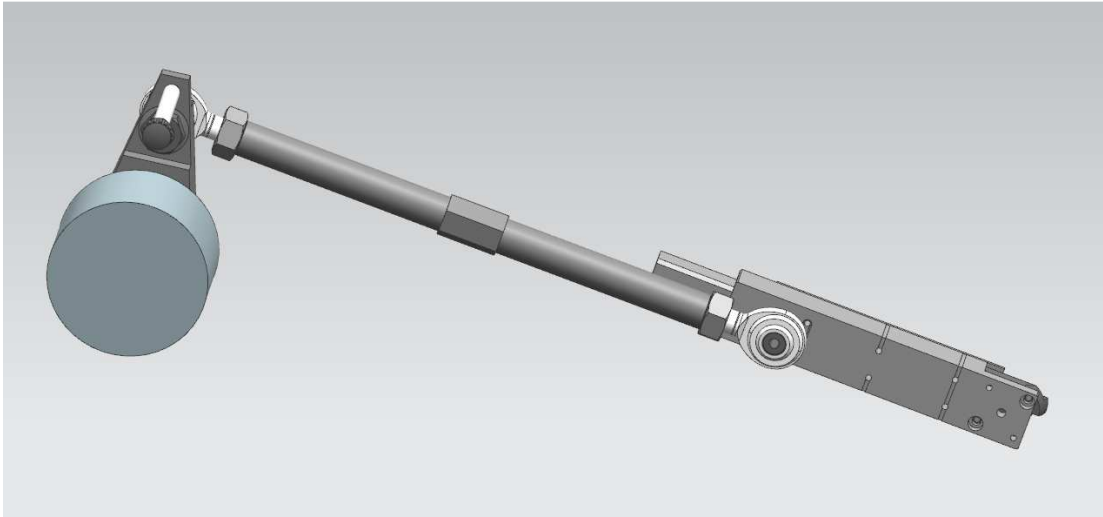


Figura 5.12: Gruppo Tranciante

Quadro:

Il gruppo quadro è caratterizzato da un elemento cilindrico, di forma prismatica all'estremità che serve per formare la "graffetta". Questo elemento, come si può vedere in figura, non compie una perfetta traslazione, ma oscilla leggermente sfruttando i giochi presenti nell'accoppiamento con la guida, in quanto guidato da una manovella.

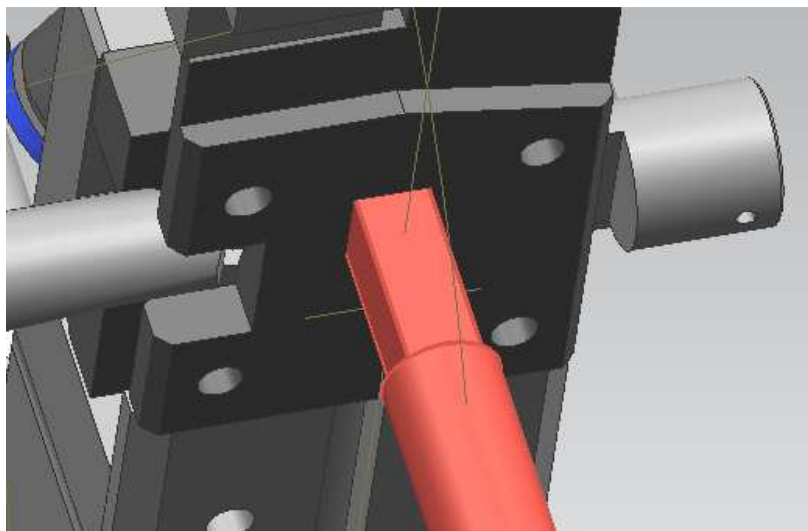


Figura 5.13: Particolare del gruppo quadro

Per simulare il suo movimento si è usato un giunto PTCV (punto curva), piazzando il punto sul baricentro della faccia quadrata estrema dell'utensile. In questo modo si è riusciti a simulare un cinematismo che altrimenti sarebbe apparso come iperstatico. Per quanto riguarda gli altri giunti si è utilizzato una cerniera in corrispondenza del motore ed un cilindrico tra la manovella e il gruppo cedente.

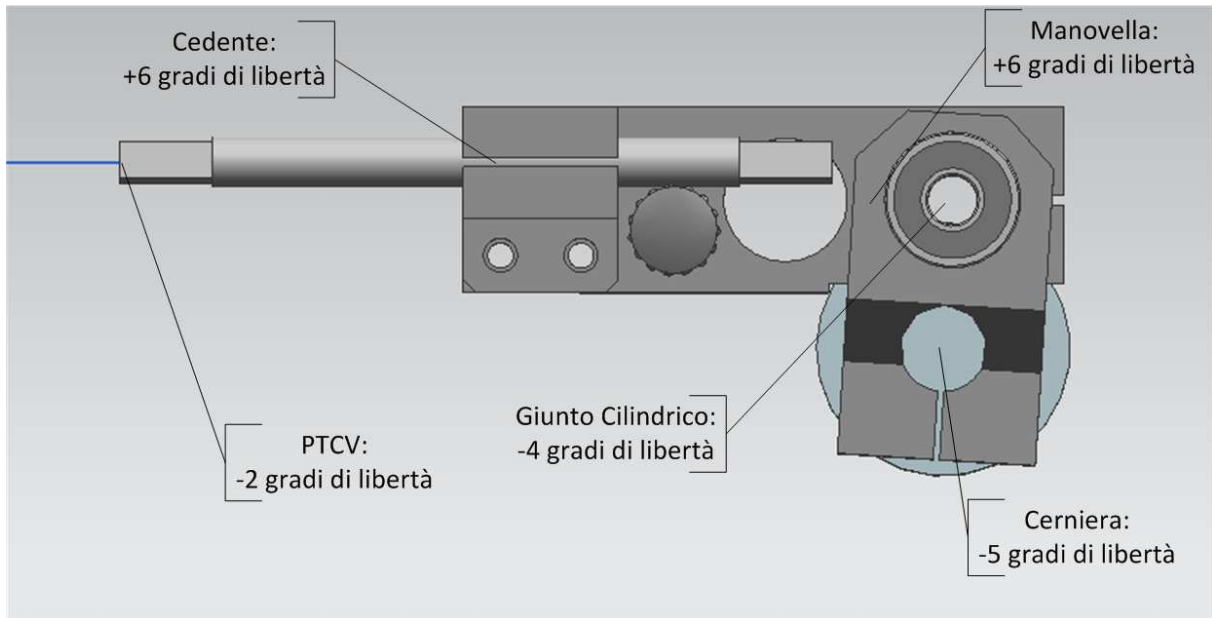


Figura 5.14: Analisi dei gdl del gruppo Quadro

In questo modo come si può vedere dall'illustrazione precedente di 12 gradi di libertà se ne vincolano 11. È così garantita la rotazione della manovella attorno all'asse motore.

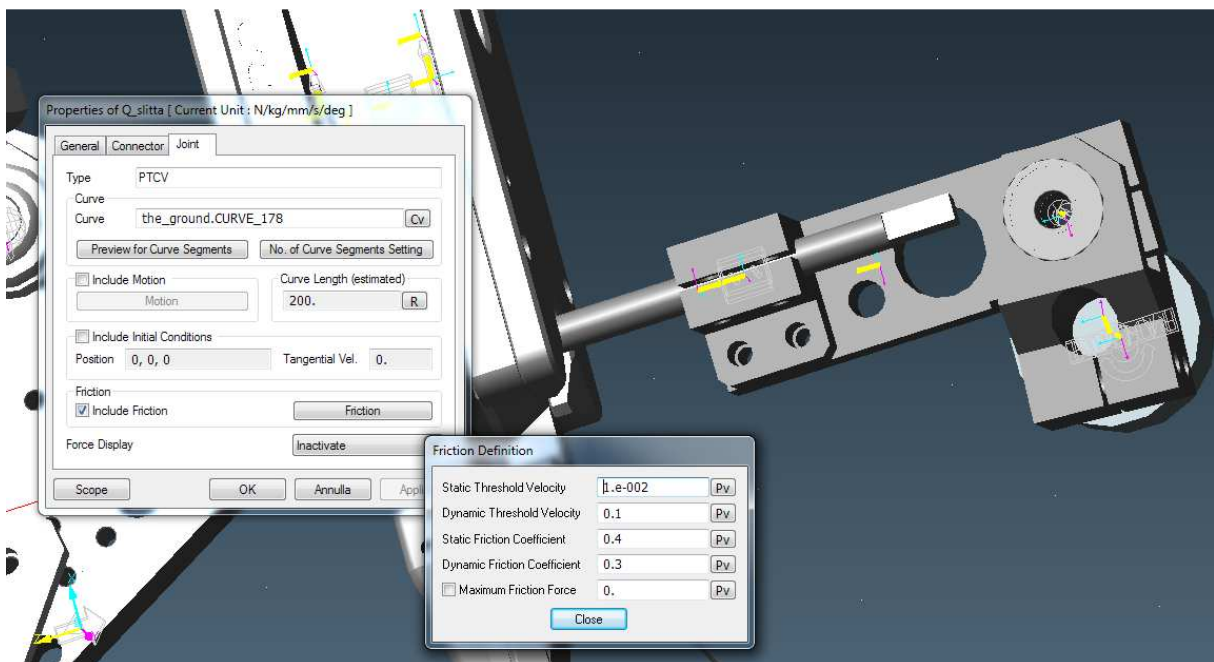


Figura 5.15: Implementazione vincolo PTCV

Arco:

In questo caso, oltre alla assegnazione dei materiali si è imposto un unico vincolo di tipo *revolute* in concomitanza dell'asse motore, cui l'arco ruota rigidamente intorno.

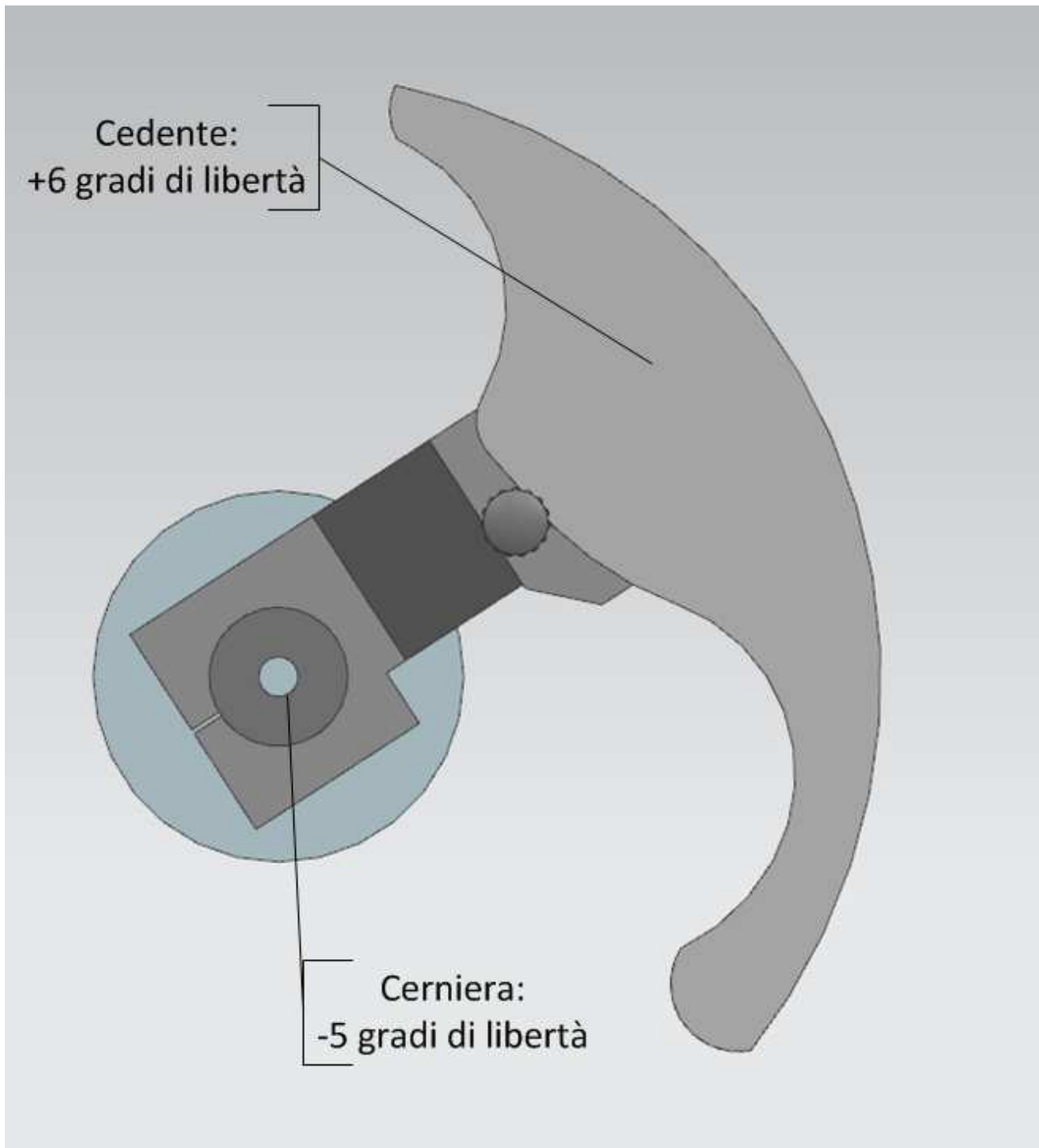


Figura 5.16: Analisi dei gdl del gruppo Arco

Spartisetola:

Il gruppo spartisetola ha una geometria particolare in cui il cedente ruota intorno ad un asse invece che traslare.

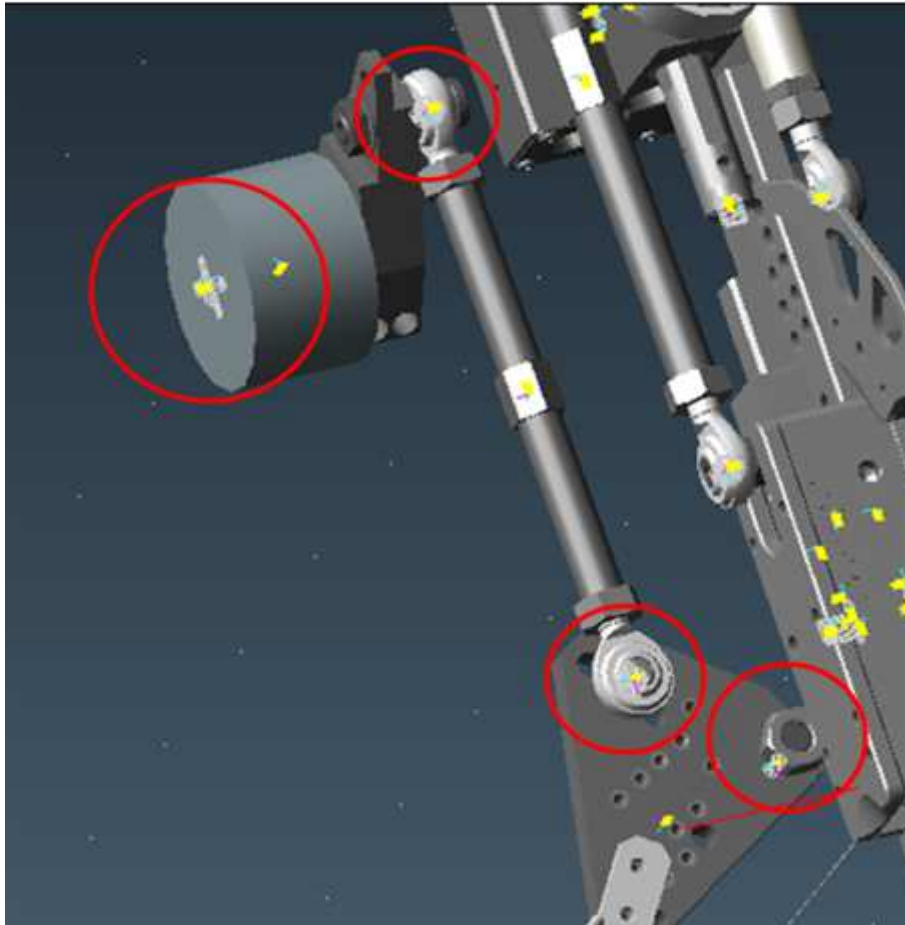


Figura 5.17: Vincoli cinematici

Per quanto riguarda i giunti sono stati applicati una cerniera in corrispondenza del motore e due giunti sferici alle estremità della biella. Si è infine imposta una ulteriore cerniera in corrispondenza dell'asse di rotazione del cedente.

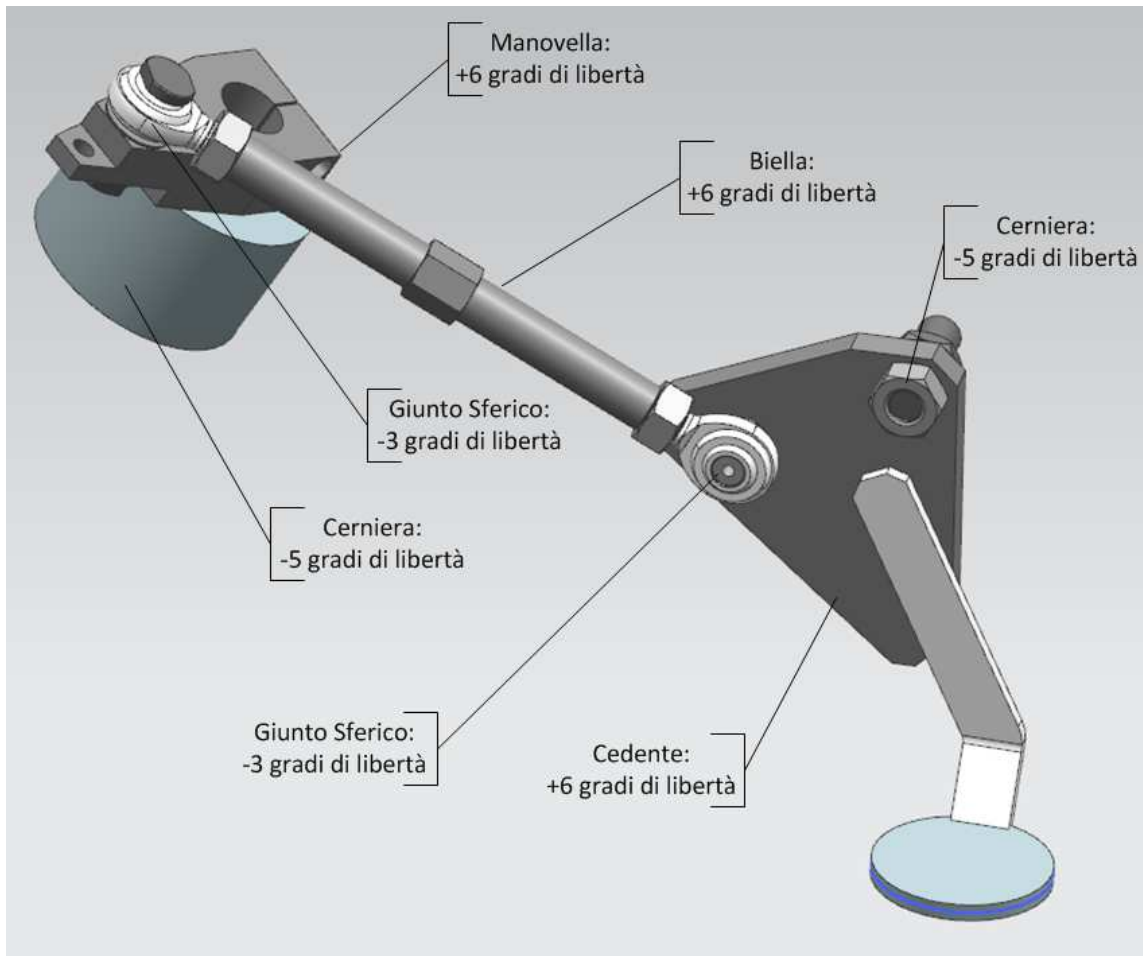


Figura 5.18: Analisi dei gdl del gruppo Spartisetole

Analizzando i gradi di libertà del gruppo si può vedere come si siano imposti soltanto 16 gradi di vincolo a fronte di 18 gradi di libertà. In questo modo, similmente a quanto accade per i gruppi Punzone e Tranciante si accetta oltre alla rotazione della manovella attorno all'asse motore, anche la rotazione delle biella attorno al proprio asse

5.2.2. Cinematica inversa.

Dovendo sviluppare un metodo per ricavare la legge di moto del motore mediante cinematica inversa e quindi partendo dal profilo di moto del cedente, uno dei problemi maggiori consiste nella gestione dei punti di singolarità.

In particolare, il gruppo linguetta, essendo un manovellismo di spinta, presenta 2 punti di singolarità ai punti morti inferiore e superiore. Quando la manovella, guidata dal cedente, arriva in un punto di singolarità, il solutore non riesce più a risolvere le equazioni del moto e quindi la simulazione fallisce. Per ovviare alla problematica si sono adottati opportuni artifici in grado di risolvere i problemi numerici.

Innanzitutto si è inserita artificialmente una cedevolezza all'interno della manovella, in modo da facilitare le soluzioni plausibili alle equazioni del moto in uno dei punti di singolarità .

Infatti nel caso di manovella completamente rigida posizionata in un punto di singolarità, qualsiasi movimento del cedente sarebbe virtualmente impedito dalla catena cinematica.

È stato quindi necessario introdurre una cedevolezza controllata tramite l'utilizzo di un giunto *bushing* (un particolare giunto fisso di cui si possono però impostare le rigidità rispetto alle tre direzioni di traslazione e rotazione) tra manovella e biella. Impostando alti parametri di rigidità per tutte le traslazioni e 2 rotazioni, possiamo ottenere una cerniera “cedevole” che permette di considerare eventuali giochi e cedevolezza realmente presenti nei prototipi fisici.

Tale modifica migliorativa permette al simulatore di risolvere le equazioni del moto a meno del verso di rotazione: infatti se da un punto morto si impone un moto al cedente le possibilità che la manovella ruoti in un senso piuttosto che nell'altro sono le stesse. Per ovviare a tale limitazione si è aggiunta una coppia virtuale al giunto cerniera (revolute) collegato alla manovella, in modo che questa sia forzata a ruotare nella direzione voluta.

È importante sottolineare come l'applicazione di una coppia di questo tipo sia accettabile solo se si è interessati alla sola cinematica del meccanismo mentre pregiudicherebbe eventuali analisi dinamiche o strutturali.

5.2.3. Creazione di un prototipo reale

Al fine di validare il modello che andremo a creare si è deciso di creare all'interno del laboratorio LaPIS un prototipo reale degli assi linguetta e punzone, visti da Borghi come quelli di più difficile realizzazione. Il laboratorio si è quindi dotato di un sistema di controllo comprensivo di drive e di motori Beckhoff e di un banco prova su cui testare la validità delle simulazioni eseguite.



Figura 5.19: Drive BeckHoff presenti nel laboratorio LaPIS



Figura 5.20: Setup sperimentale allestito nel laboratorio LaPIS

5.2.4. Differenza tra modello e dati sperimentali

Data la presenza di un primo prototipo reale relativo alla linguetta, si è deciso di utilizzare questa opportunità per fare un primo confronto tra i dati ottenuti dal modello costruito finora e le rilevazioni sperimentali.

Ad una primissima analisi si è visto che un confronto diretto dei dati di posizione e coppia non era possibile, in quanto il prototipo sperimentale mostrava una legge di moto profondamente diversa da quella di riferimento desiderata ed impostata sul modello MBFD.

Si è quindi capita la necessità di provvedere alla simulazione del sistema di controllo per far poter applicare al modello dinamico la reale legge di moto partendo dalla legge di riferimento desiderata. Il nostro proposito infatti è quello di predire completamente a priori quale sarà il comportamento finale del nostro sistema.

5.2.5. Integrazione del sistema di controllo

Come si è evidenziato precedentemente, per ottenere un prototipo virtuale realmente predittivo il modello multibody meccanico precedentemente sviluppato non basta. Vista l'importanza del contributo del sistema di controllo, senza esso non è possibile prevedere quale sarà la reale legge di moto erogata dal motore e quindi prevedere quale sarà il comportamento della macchina partendo dalla legge ideale progettata ed assegnata all'azionamento.

Si è quindi descritto e modellato il gruppo composto da driver e motore, e si è quindi considerata l'architettura del sistema di controllo. Grazie all'utilizzo dei manuali degli azionamenti impiegati si è andati a configurare un sistema di controllo composto da tre loop. Il primo relativo al controllo della posizione, il secondo dedicato al controllo della velocità, il terzo dedicato al controllo della corrente.

Durante la modellazione sono stati valutati diversi parametri come, ad esempio, le frequenze di campionamento di ogni loop, eventuali ritardi causati da blocchi operazionali o da caratteristiche intrinseche degli strumenti di misura e problemi legati alla natura digitale del controllo.

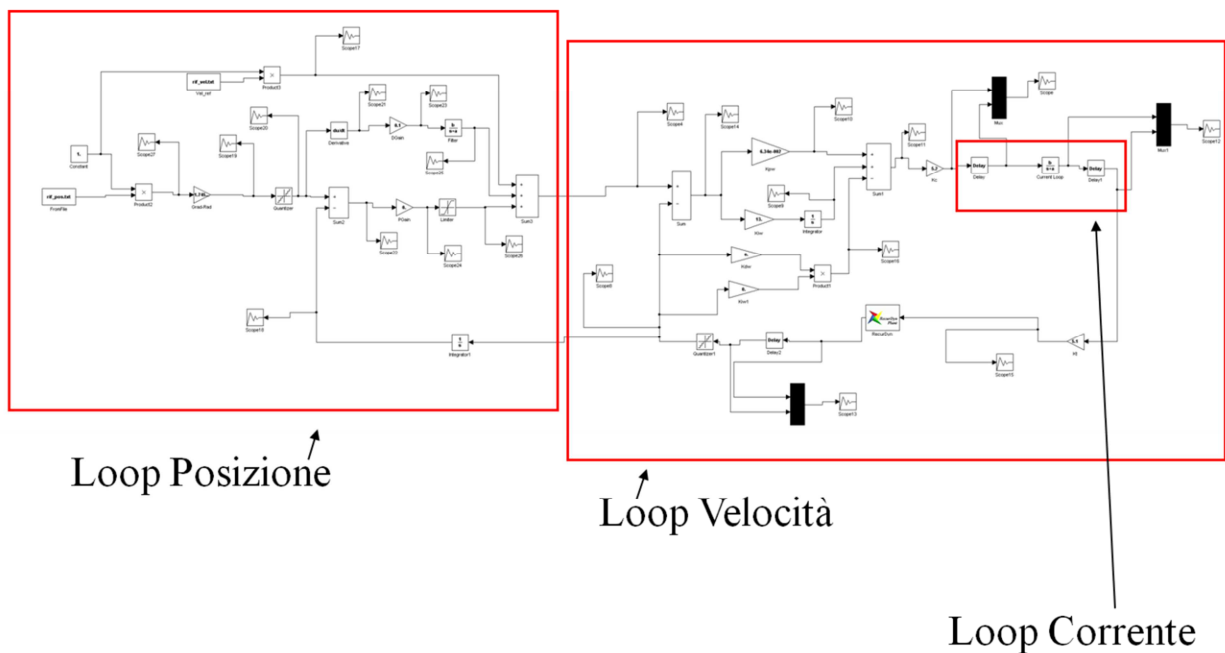


Figura 5.21: Schema del sistema di controllo implementato in Simulink

Per quanto riguarda il loop di corrente purtroppo i dati e i modelli disponibili non sono stati sufficienti per una caratterizzazione adeguatamente precisa, e si è quindi deciso di approssimarlo in prima battuta con un sistema del primo ordine. Questa approssimazione limita sensibilmente il modello virtuale del sistema di controllo in termini di assegnazione dei guadagni di corrente proporzionale e integrale ed è probabilmente la più pesante semplificazione presente nel modello.

Si analizza ora nel dettaglio la struttura del modello virtuale del sistema di controllo.

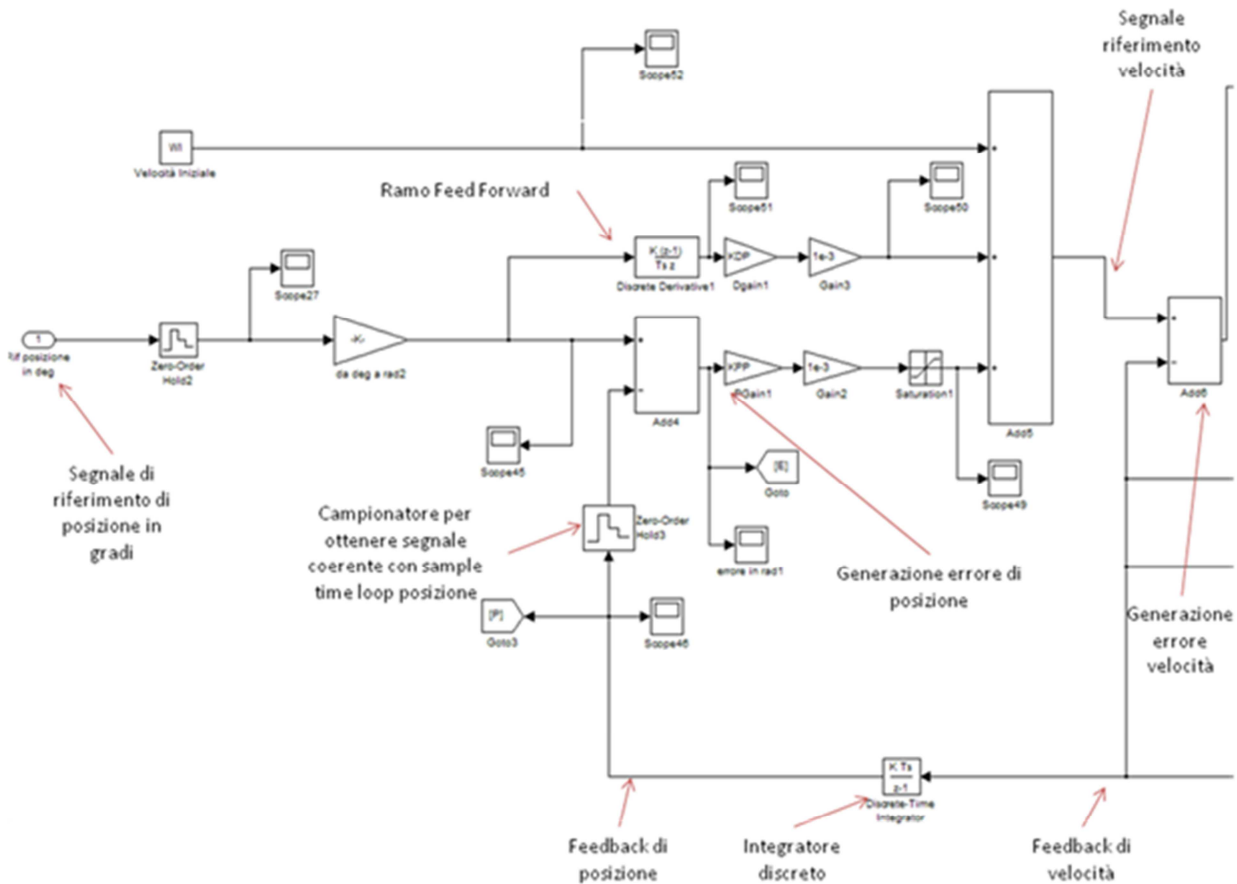


Figura 5.22: Dettaglio del loop di posizione

Per quanto riguarda il loop di posizione si ha come input il riferimento di posizione del motore in gradi. Il segnale viene campionato e trasformato da gradi in radianti. Successivamente il segnale di ingresso viene diviso su due rami, uno va a contribuire alla generazione dell'errore di posizione insieme al segnale di feedback di posizione che è stato precedentemente ottenuto integrando il feedback di velocità, l'altro genera il segnale di feed forward dopo essere stato derivato. Il segnale di errore di posizione e il segnale di feed forward vengono moltiplicati per i rispettivi guadagni e vengono sommati insieme ad un terzo segnale per generare il segnali di riferimento di velocità. Il terzo segnale è un input di velocità iniziale, nel caso si tenti di controllare un sistema che è già in moto, ma nel caso trattato questa opzione non viene mai utilizzata.

Il segnale di riferimento e quello di feedback di velocità vengono poi sottratti per ricavare l'errore di velocità. Il segnale di errore viene poi diviso su due rami, su uno viene applicato il guadagno proporzionale, sull'altro, dopo una integrazione, viene applicato il guadagno integrale.

Questi due segnali vanno poi a sommarsi ad un segnale composto dal prodotto del segnale di feedback moltiplicato per i guadagni derivativo ed integrale. Per scelta di Borghi il guadagno derivativo è stato posto uguale a zero, in quanto in presenza di segnali affetti da rumori può favorire l'instabilità del sistema, per cui questa terza componente può essere trascurata.

Dalla somma dei segnali prima descritti si ottiene così il riferimento di corrente che viene successivamente moltiplicato da una costante di corrente K_c , da un sistema del primo ordine che approssima il loop di corrente e da una costante di coppia K_t . Infine il segnale di coppia viene inviato al modello solutore fisico di RecurDyn dopo essere stato processato da un limitatore.

Il loop di posizione e quelli di velocità e corrente lavorano con tempi di campionamento diversi. Il loop di posizione lavora con un sample time di 500 microsecondi mentre i loop di velocità e corrente lavorano con sample time di 250 microsecondi.

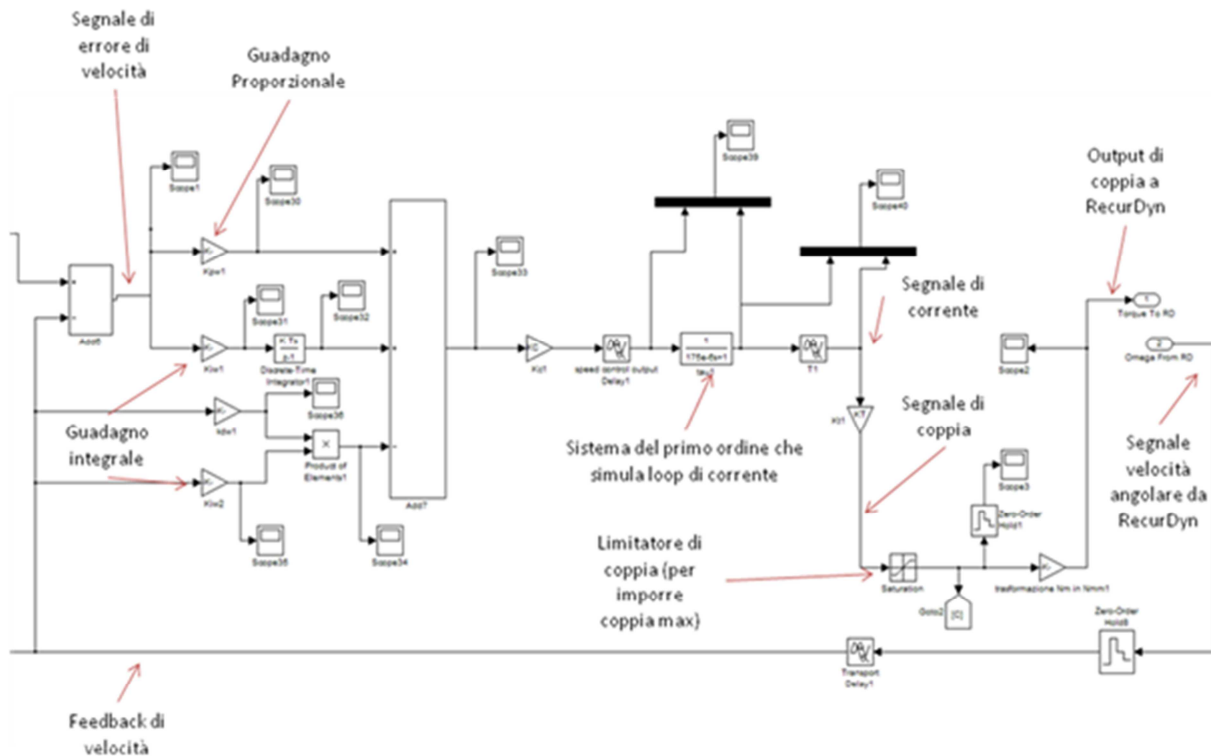


Figura 5.23: Dettaglio dei loop di velocità e corrente

Una volta creato il modello del sistema di controllo si è sviluppato un blocco parametrico (Subsystem) con cui variare facilmente i dati e i parametri della simulazione come, ad esempio, guadagni, coppie massime ammissibili dal motore, costanti di coppia e corrente, leggi di moto in ingresso e fase di partenza del motore rispetto al punto morto superiore.

Il blocco è composto da una maschera in cui è possibile inserire dei valori numerici relativi a: guadagno proporzionale del loop di posizione, guadagno di *feed forward*, guadagni proporzionali, integrali e derivativi del loop di velocità, la costante di corrente dipendente dal driver, la costante di coppia e la coppia massima erogabile dipendenti dal motore.

Oltre alla maschera appena citata è presente una struttura logica utile a cambiare velocemente le leggi di moto e il regime di velocità.

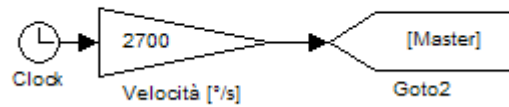


Figura 5.24: Parametrizzazione della velocità della macchina

Per utilizzare leggi moto indipendenti dalla velocità di regime si estraggono i gradi motore moltiplicando il tempo per la velocità di rotazione del master in gradi al secondo. In questo modo è sufficiente variare il valore all'interno del blocco della velocità per cambiare la velocità di regime della macchina.

Il valore di posizione del master viene poi sommato al valore dell'angolo di anticipo del gruppo sulla linguetta, inserito all'interno di un blocco parametrico. Il segnale risultante viene elaborato da un blocco contenente la funzione $u - (\text{floor}(u/360) * 360)$ dove u è il segnale di ingresso e floor è una funzione che, dato un valore numerico, restituisce il numero arrotondato all'intero più piccolo. Grazie a questa funzione la posizione del master viene descritta da un angolo sempre compreso tra 0 e 360. Successivamente il segnale entra in una tabella che descrive la legge di moto da cui quindi esce la posizione angolare desiderata del cinematismo. Come descriveremo successivamente il solutore non ammette posizioni iniziali che si scostino molto dallo zero e la configurazione iniziale dei meccanismi deve essere impostata prima del lancio della simulazione. Questo vuol dire che lo zero dei vari gruppi non coinciderà più con il loro punto morto superiore, ma con la posizione assegnata nella configurazione iniziale. Per questo è necessario modificare la legge di moto iniziale traslandola lungo l'asse delle ordinate in modo da avere valore iniziale nullo. Questa operazione viene fatta sottraendo al segnale della legge di moto il valore ottenuto inserendo all'interno della tabella lo sfasamento angolare iniziale.

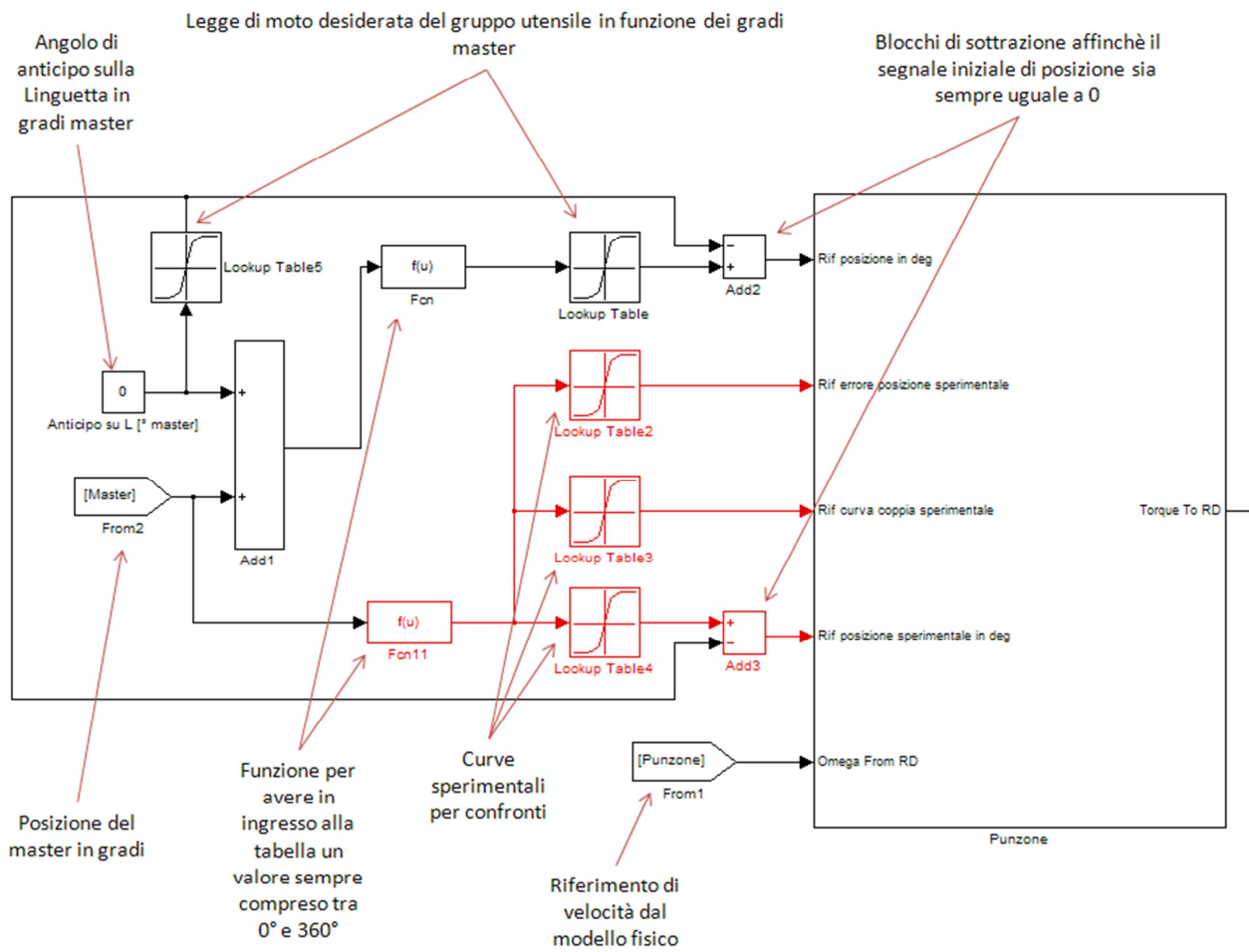


Figura 5.25: Schema della parametrizzazione delle leggi di moto

Sono inoltre presenti delle tabelle aggiuntive (in rosso) in cui è possibile inserire i dati provenienti da verifiche sperimentali o altre simulazioni al fine di avere un raffronto immediato tra le curve ottenute dalla simulazione e quelle di riferimento.

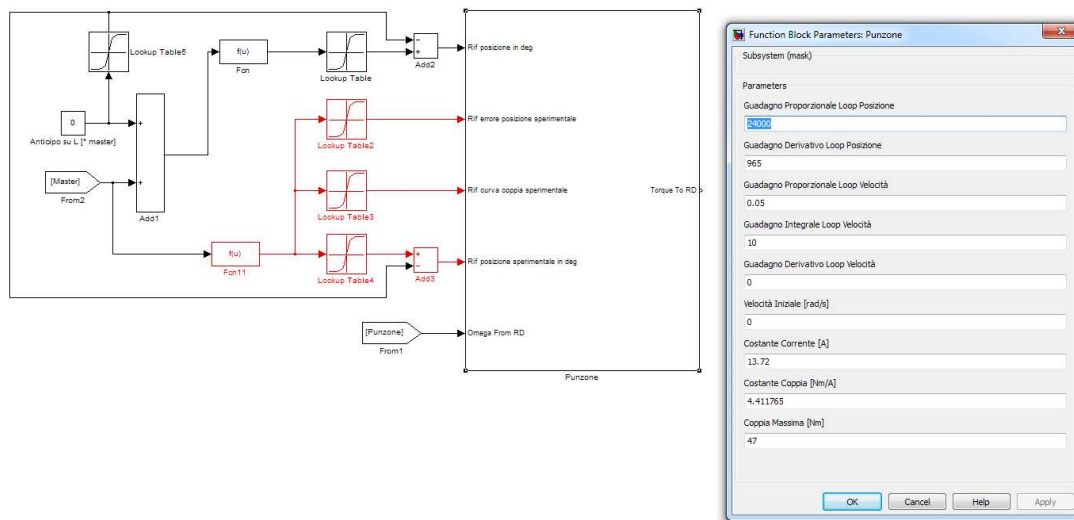


Figura 5.26: Risultato finale: creazione di un blocco simulink del sistema di controllo

Creato il blocco relativo al controllore in Simulink si sono quindi assegnati i guadagni utilizzati durante le prove sperimentali all'interno del modello.

Impostata la cosimulazione si sono inserite all'interno del modello Simulink le leggi ideali fornite da Borghi. Per la linguetta si sono potuti vedere i seguenti risultati per quanto riguarda la coppia motrice.

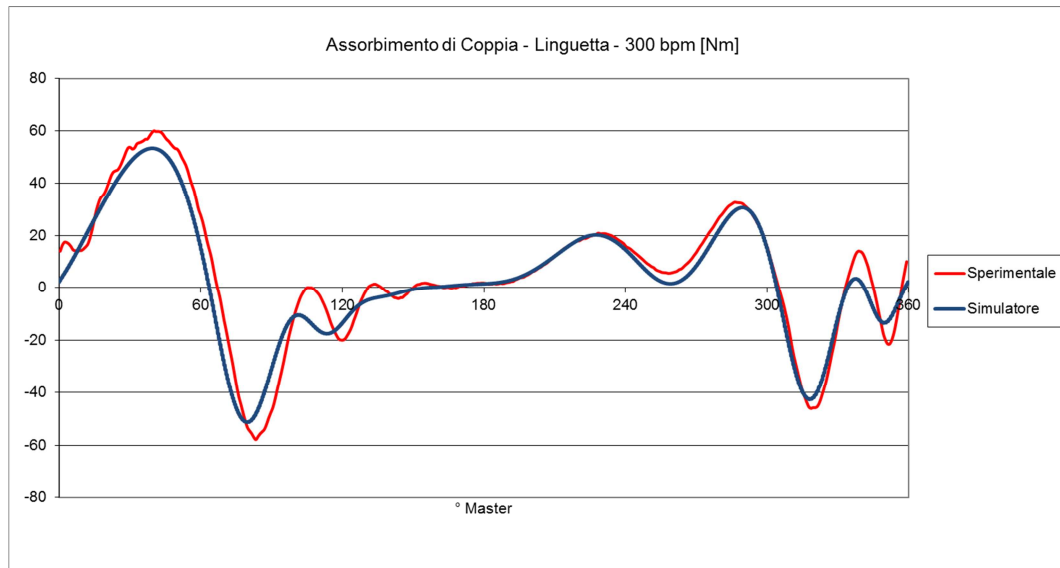


Figura 5.27: Confronto tra l'assorbimento di coppia sperimentale e simulato

Quindi la realizzazione di un modello comportamentale del sistema di controllo è stata essenziale per disporre di un prototipo virtuale in grado di emulare fedelmente il prototipo fisico.

I risultati mostrano come il modello del sistema di controllo sia necessario al fine di predire in maniera accettabile la dinamica del sistema partendo da un curva ideale in ingresso. Questa è inoltre l'unica strada percorribile per rendere il prototipo virtuale indipendente da quello reale, condizione necessaria affinché la prototipazione virtuale possa essere realmente efficace nell'aiutare i progettisti a sondare varie scelte progettuali. Infatti diviene quindi possibile effettuare simulazioni ed esperimenti virtuali affidabili e tali da anticipare e evitare esperimenti reali sul prototipo fisico.

5.2.6. Implementazione attriti

Parte indispensabile della modellazione meccanica della nostra macchine è quella relativa all'implementazione degli attriti. Essi giocano un ruolo fondamentale nella corretta simulazione di una macchina automatica ad alte prestazioni. In particolare gli effetti degli attriti viscosi, a causa delle forti velocità reciproche che si possono avere tra i vari membri possono influenzare in maniera molto sensibile gli assorbimenti di coppia del motore, e quindi la determinazione della posizione finale del nostro meccanismo.

Presentiamo come esempio l'attività fatta sul gruppo punzone, che ben evidenzia l'importanza di una corretta modellazione di questi parametri.

Dopo aver calcolato tenendo conto della geometria dei giunti e delle proprietà dei lubrificanti tramite le classiche formule della tribologia un coefficiente d'attrito viscoso, si va a modificare il modello in modo da tener conto di questo effetto fisico.

A tale scopo è stato inserito un elemento smorzatore, impostato come una molla ad elasticità nulla, in corrispondenza del giunto prismatico che vincola il cedente, posizionato in modo tale che la molla "lavori" solamente a trazione. Si sono poi specificati i parametri della molla (vedi figura seguente), facendo attenzione a porre uguale a zero il coefficiente elastico della stessa, in modo da considerare il solo effetto smorzante.

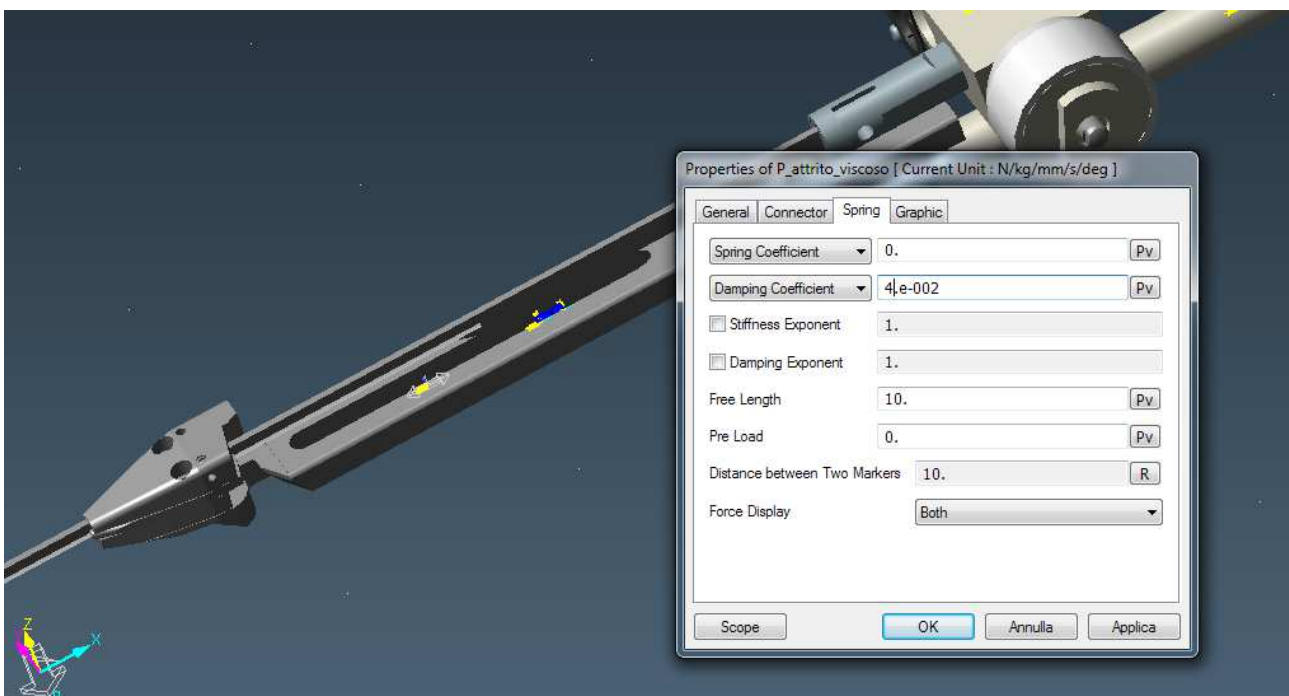


Figura 5.28: Implementazione dell'attrito viscoso per il gruppo Linguetta

Come si può vedere dal grafico seguente, l'introduzione di un coefficiente d'attrito viscoso permette di approssimare con una fedeltà molto maggiore la coppia assorbita dal motore che guida il gruppo punzone. In questo modo sarà quindi possibile dimensionare il motore con maggior precisione.

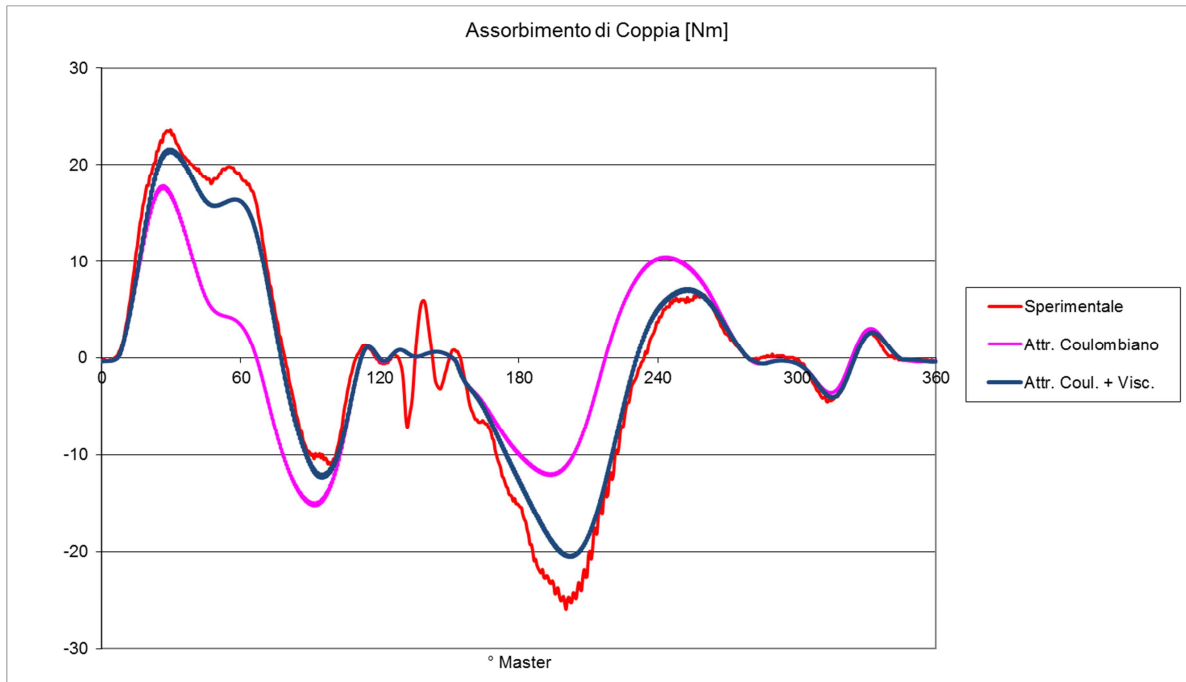


Figura 5.29: Confronto tra curve di coppia motore relative al punzone a 200 rpm

5.2.7. Integrazione della dinamica del motore.

Arrivati a questo grado di ottimizzazione del modello, ci siamo accorti che, mentre il simulatore forniva risultati decisamente attendibili per alcuni gruppi, questo non accadeva per altri. In particolare i gruppi per cui il modello non era del tutto soddisfacente erano quelli caratterizzati da una minore inerzia equivalente media. Dopo alcune analisi si è capito che il problema era dovuto alla nostra semplificazione iniziale del sistema di controllo, in cui si era approssimato il loop di corrente e la dinamica elettrica del motore con un sistema del primo ordine con una banda passante sufficientemente alta.

Se questa approssimazione non sortisce effetti su sistemi meccanici che presentano alte inerzie, ovvero sistemi in cui la parte meccanica si comporta come un filtro passa basso a frequenze relativamente basse, lo stesso non accade per quei sistemi dove l'effetto filtrante dovuto alle inerzie non è preponderante.

Per questo si è ritenuto necessario completare la modellazione del sistema di controllo andando ad inserire lo schema del loop di corrente e del motore elettrico.



Figura 5.30: Loop di corrente e dinamica del motore all'interno di una schema semplificato

La dinamica del motore deve considerare le forze contro elettromotrici che si vengono a creare all'interno delle spire di un motore a magneti permanenti durante il suo funzionamento. Lo scopo del loop di corrente è di mantenere l'intensità di corrente desiderata all'interno delle spire tenendo conto delle forze contro elettromotrici [18][19][20].

La dinamica del motore appare piuttosto complessa se espressa in funzione delle correnti statoriche presenti nei 3 assi che alimentano il motore. Per questo si è deciso di passare ad un sistema di riferimento solidale con il rotore, utilizzando la nota trasformazione dq0 o trasformazione di Park [21].

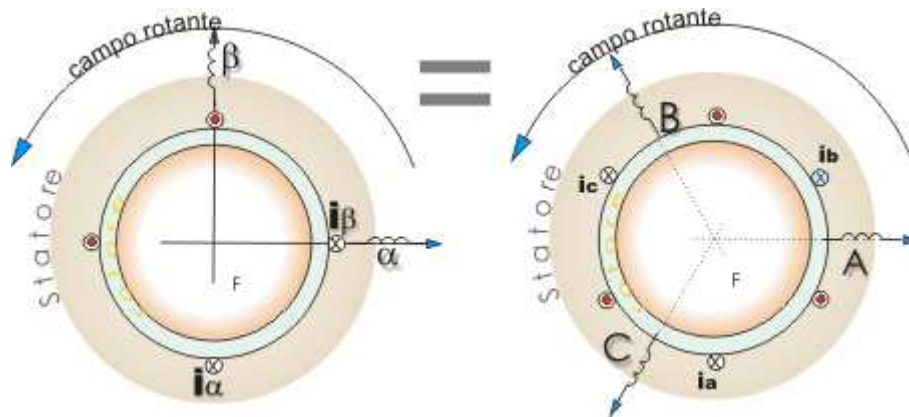


Figura 5.31: Trasformazione da un sistema a tre assi a uno a due assi perpendicolari tra loro

In questo modo si viene ad avere un sistema di riferimento in cui i due assi diretto e in quadratura, ruotano solidalmente con il rotore. L'asse diretto sarà allineato con il campo magnetico prodotto dal magnete permanente del motore, quello in quadratura perpendicolare ad esso. Le equazioni ottenute saranno:

$$\xi_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \quad [5.1]$$

$$\xi_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \phi_e \quad [5.2]$$

Per controllare la coppia erogata dal motore sarà sufficiente controllare la corrente passante sull'asse in quadratura, mantenendo nulla quella dell'asse diretto.

$$C = \frac{3}{2} p \phi_e i_q \quad [5.3]$$

Dove p è il numero di poli, ϕ_e il campo magnetico generato dal magnete permanente e i_q la corrente passante per l'asse in quadratura.

Alla luce di queste equazioni è possibile creare un modello che integri dinamica del motore e loop di controllo della corrente:

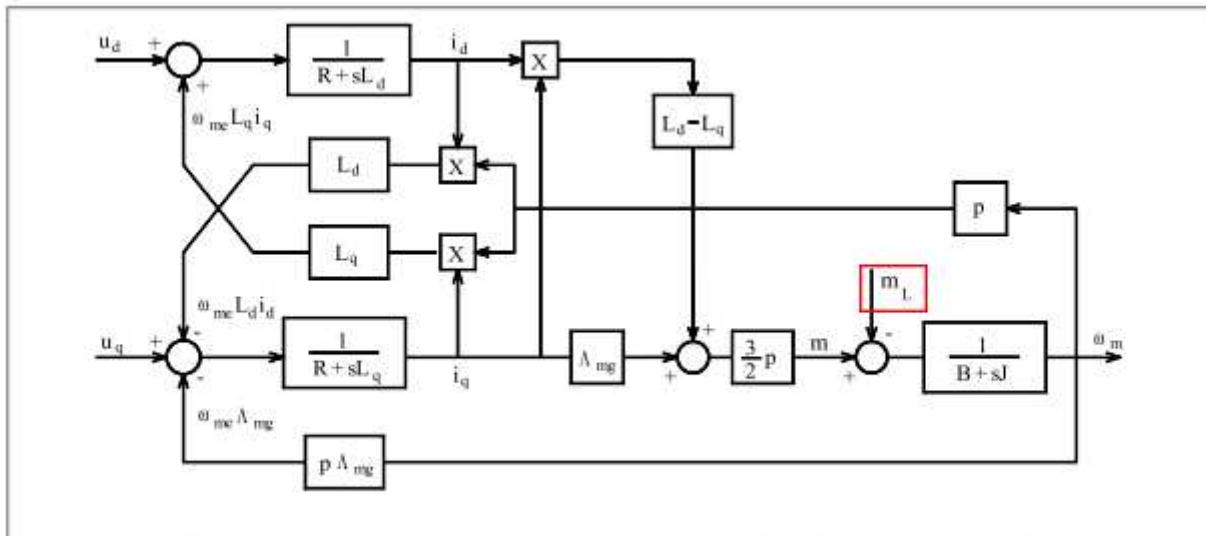


Figura 5.32: Schema a blocchi del motore a magneti permanenti

Di cui sotto vediamo la nostra rappresentazione in Simulink

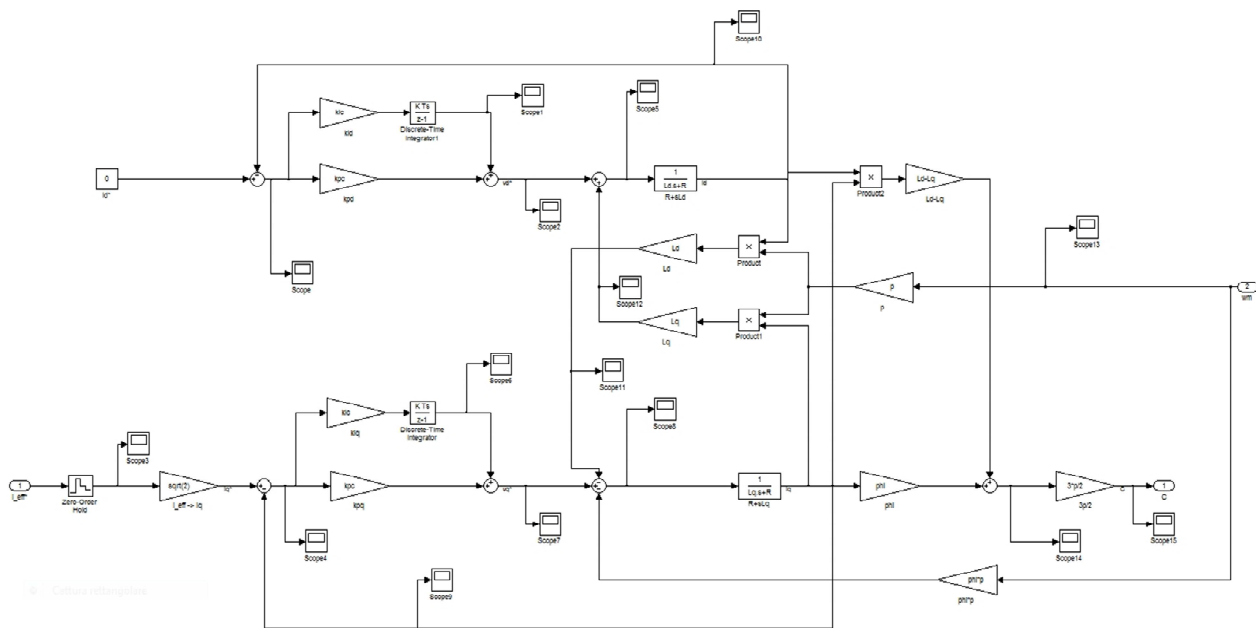


Figura 5.33: Implementazione in Simulink dello schema a blocchi

Questo ha permesso di migliorare ulteriormente la precisione del nostro modello, come è possibile vedere da questo grafico relativo al gruppo Arco dove vengono confrontati i risultati del prototipo virtuale senza (linea blu) e con (linea verde) l'implementazione della dinamica del motore, rispetto ai dati sperimentali (linea rossa):

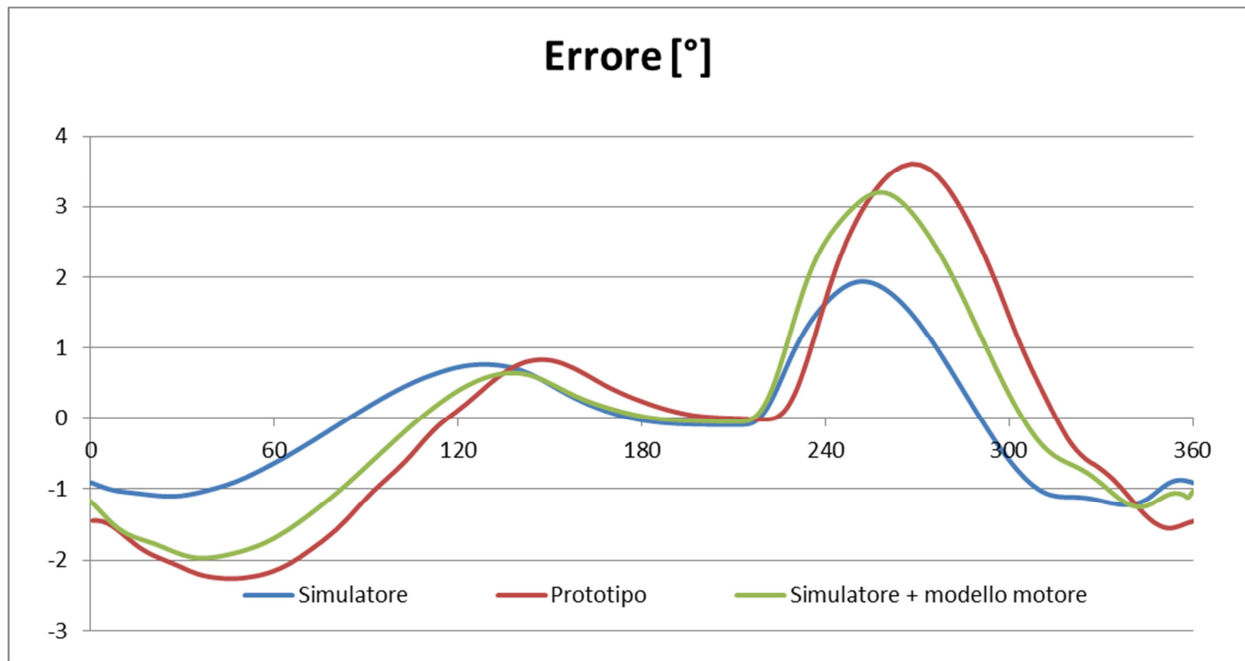


Figura 5.34: Confronto tra gli errori di posizione sperimentali e con e senza modello del motore e loop di controllo della corrente

Non è possibile invece notare differenze significative nei gruppi caratterizzati da inerzie più alte come linguetta e punzone.

5.2.8. Analisi MFBD

Dopo aver implementato la dinamica del motore si è ritenuto che il modello fosse sufficientemente affidabile per poterlo iniziare ad utilizzare per scopi progettuali. La prima verifica che si è voluta fare è stata relativa alle deformazioni elastiche che potevano interessare la biella del gruppo linguetta.

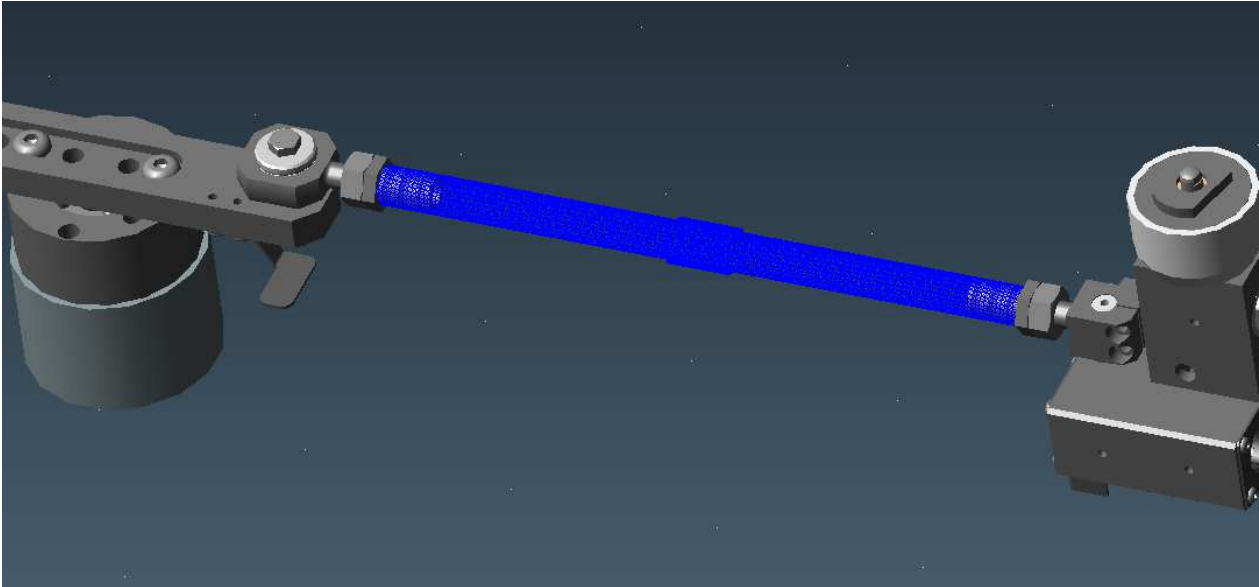


Figura 5.35: Biella del gruppo linguetta modellata attraverso una mesh tetraedrica parabolica.

Infatti l'ufficio tecnico Borghi riteneva fosse necessario utilizzare una biella in fibra di carbonio al posto della loro biella standard in alluminio, al fine di ridurre i pesi e aumentare la rigidità, in modo da avere frequenze proprie molto alte ed evitare effetti di risonanza. Si è quindi analizzato in dettaglio se questa implementazione fosse realmente necessaria. Si è quindi modellata la biella in alluminio e la si è introdotta all'interno del prototipo virtuale come corpo flessibile.

In questo modo si è quindi potuto notare come gli effetti dinamici presenti nel gruppo linguetta non fossero sufficienti a far deformare la biella in alluminio in maniera sensibile. Inoltre ai regimi di funzionamento previsti per la macchina si è potuto verificare che non è presente nessun effetto di risonanza.

L'utilizzo di una biella in fibra di carbonio non era quindi giustificato.

5.2.9. Parametrizzazione della cinematica del modello

Un secondo aspetto che si è desiderato analizzare è stato quello relativo alla parametrizzazione del modello meccanico. Per poter testare agevolmente diverse configurazioni del cinematismo si è deciso di rendere parametriche alcune caratteristiche cinematiche del modello come la lunghezza di manovelle e bielle e la posizione di degli assi di rotazione dei motori. In questo modo è stato possibile cercare tra le possibili combinazioni che permettessero di ottenere le corse volute quelle che permettevano di ottenere un determinato effetto, come una diminuzione della coppia erogata o un minore errore di posizione del cedente.

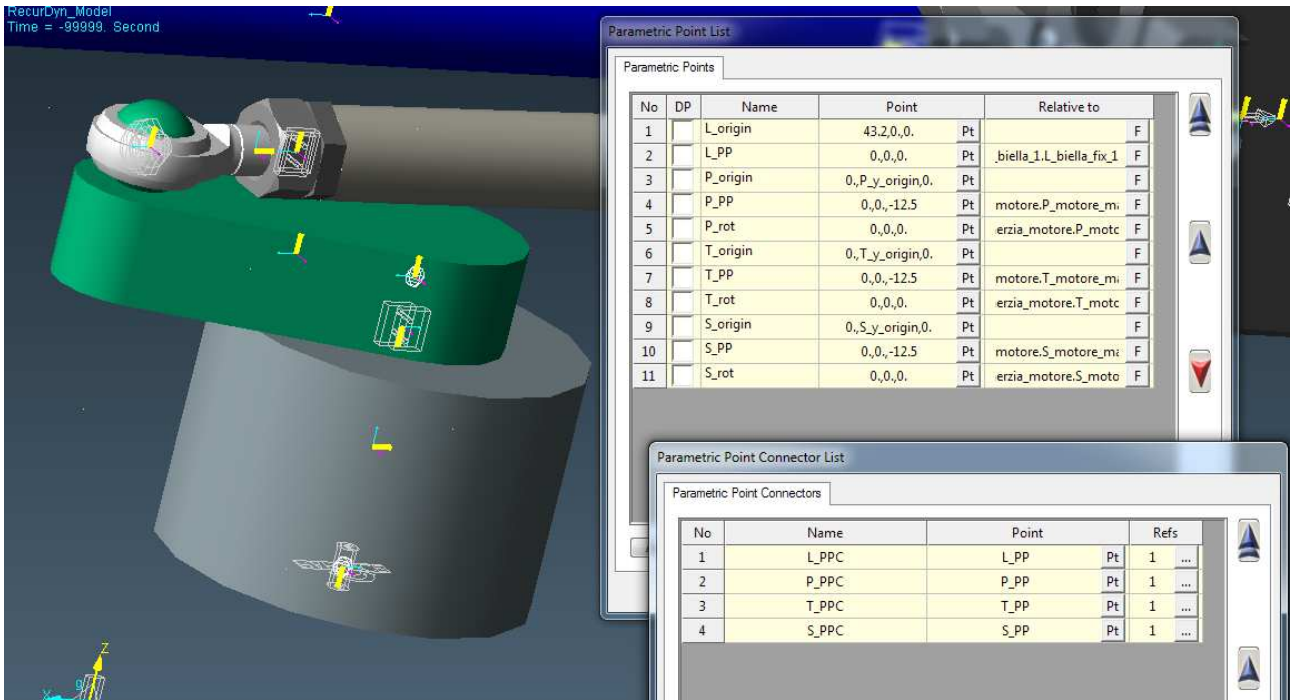


Figura 5.36: Impostazione del modello parametrico.

5.3. Risultati ottenuti

Andiamo qui di seguito ad illustrare per i vari cinematismi i risultati ottenuti:

Gruppo Filo

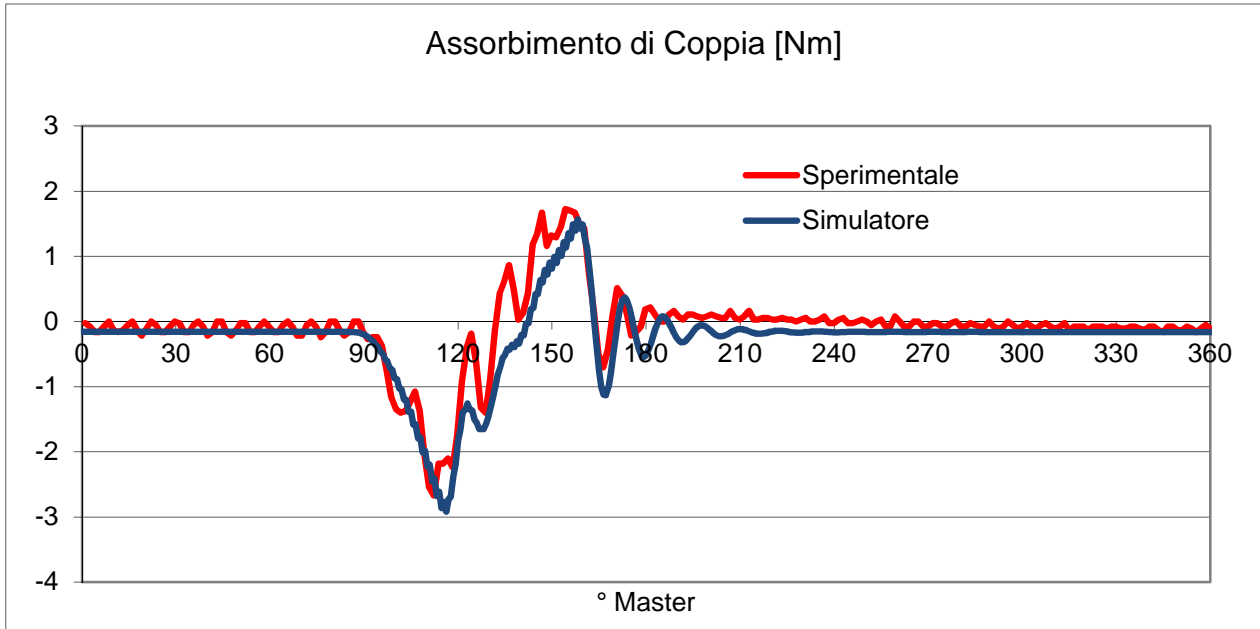


Figura 5.36: Confronto tra gli assorbimenti di coppia sperimentali e simulati

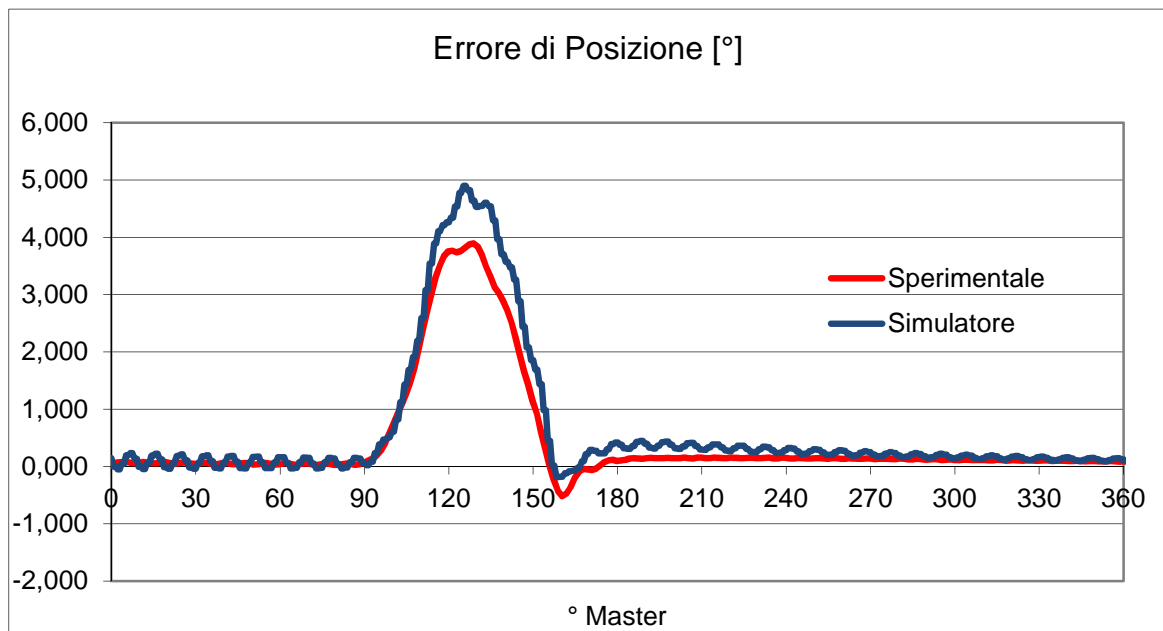


Figura 5.37: Confronto tra gli errori di posizione rilevati sperimentalmente e tramite la simulazione

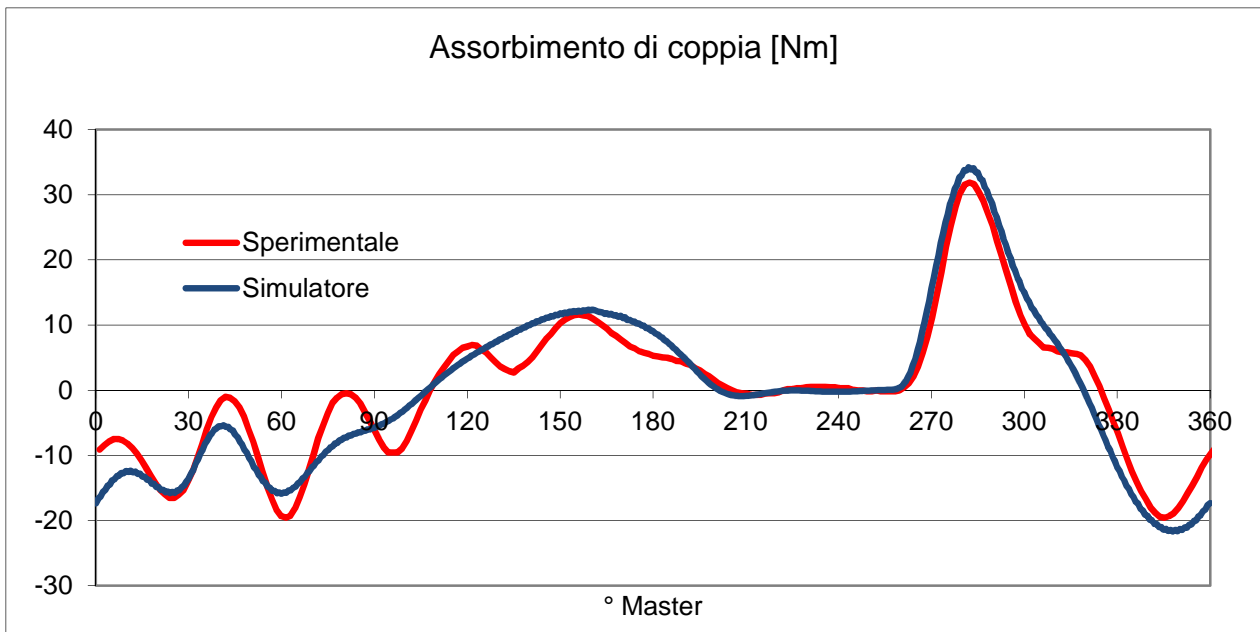


Figura 5.38: Confronto tra gli assorbimenti di coppia sperimentali e simulati

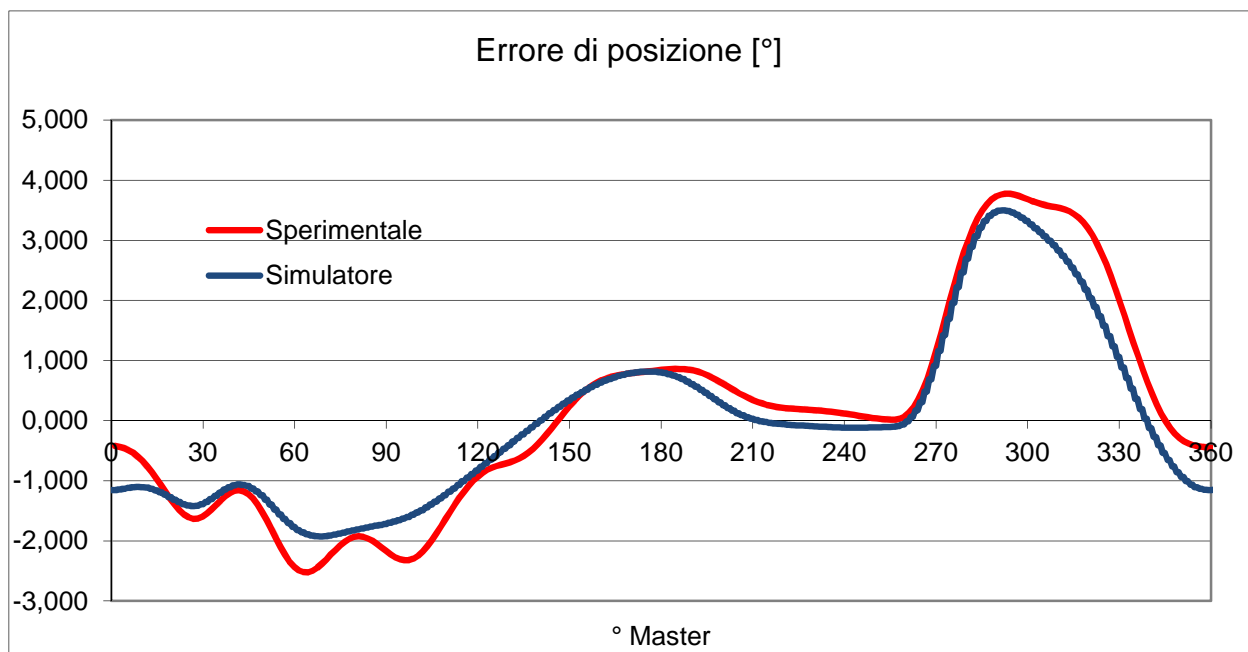


Figura 5.39: Confronto tra gli errori di posizione rilevati sperimentalmente e tramite la simulazione

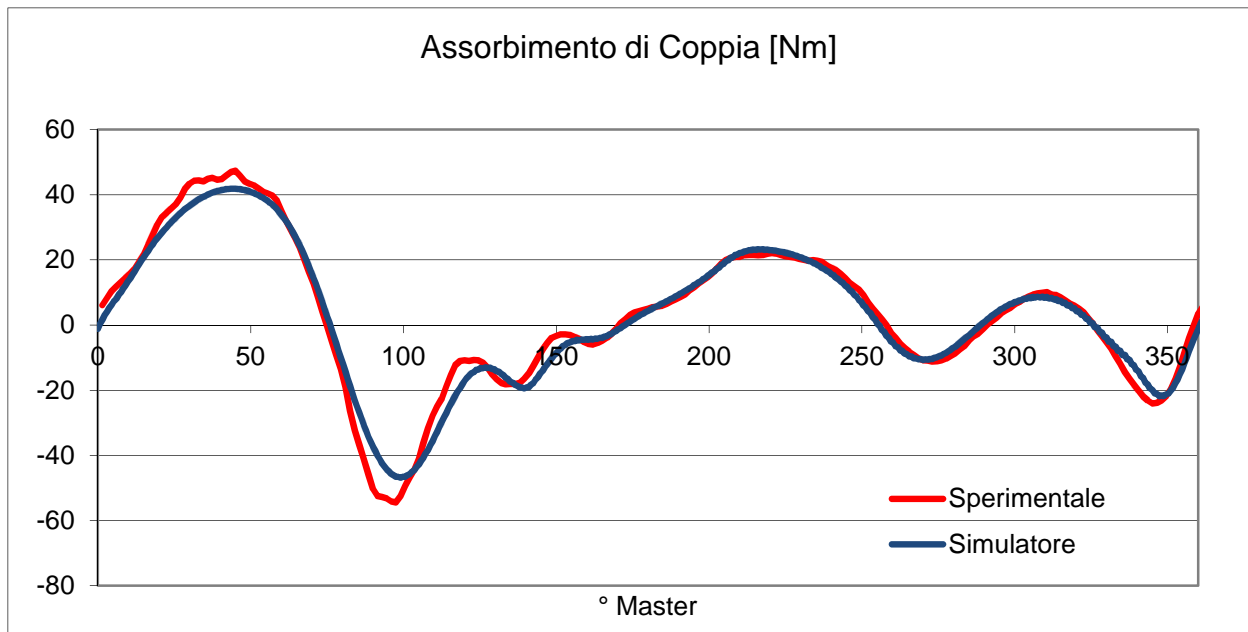


Figura 5.40: Confronto tra gli assorbimenti di coppia sperimentali e simulati

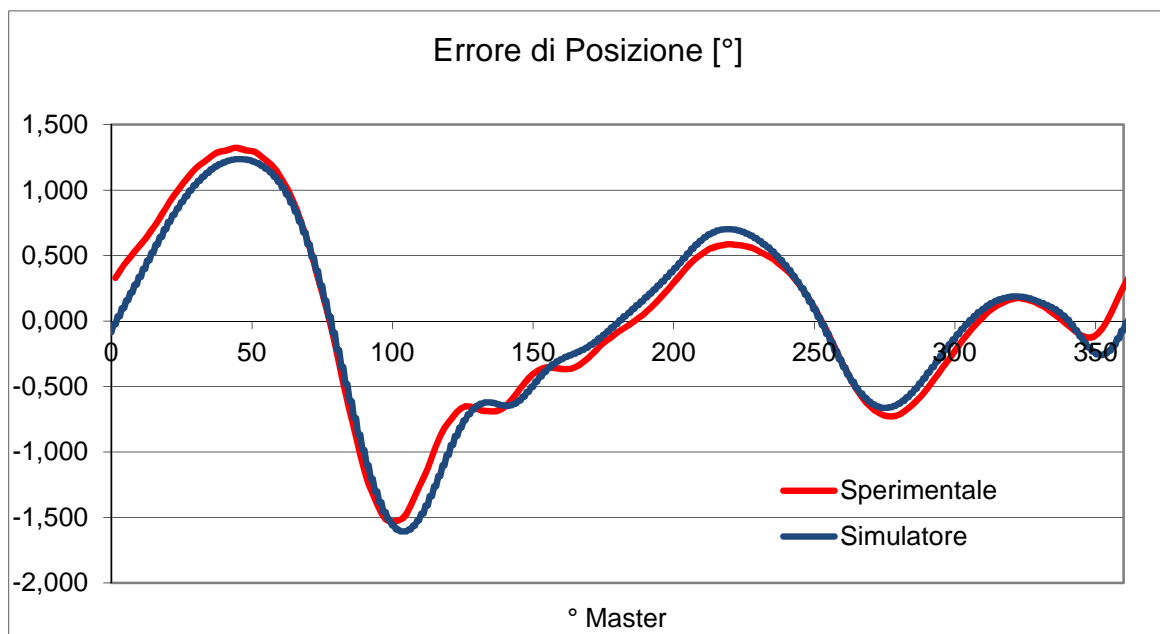


Figura 5.41: Confronto tra gli errori di posizione rilevati sperimentalmente e tramite la simulazione

Gruppo Punzone

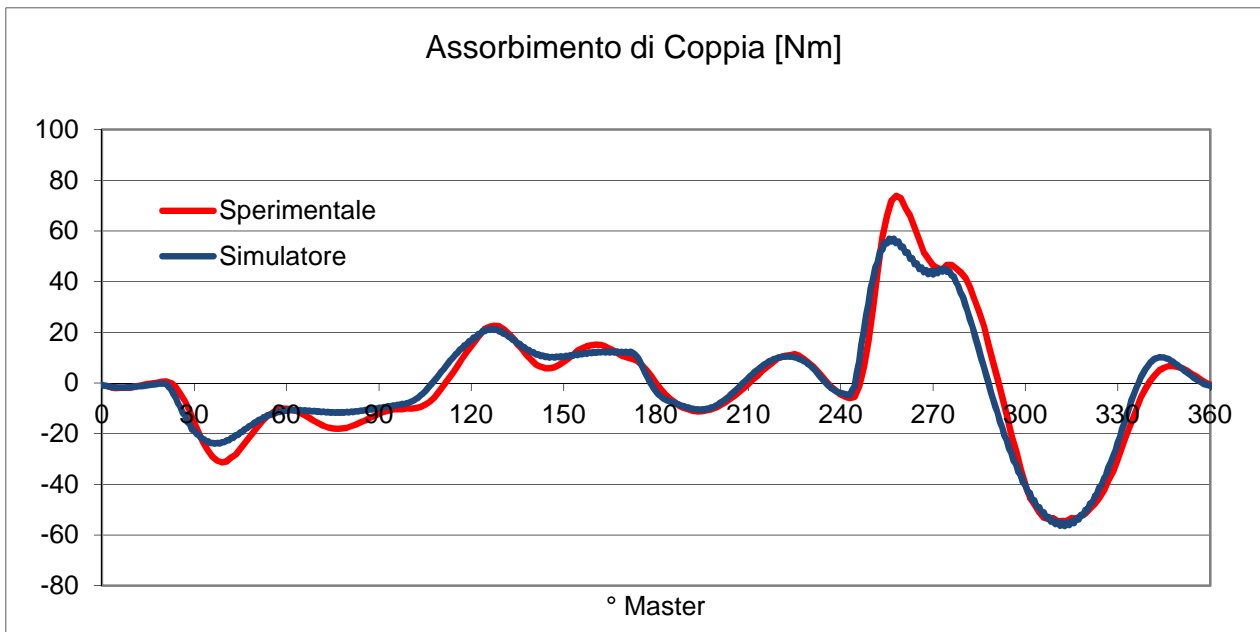


Figura 5.42: Confronto tra gli assorbimenti di coppia sperimentali e simulati

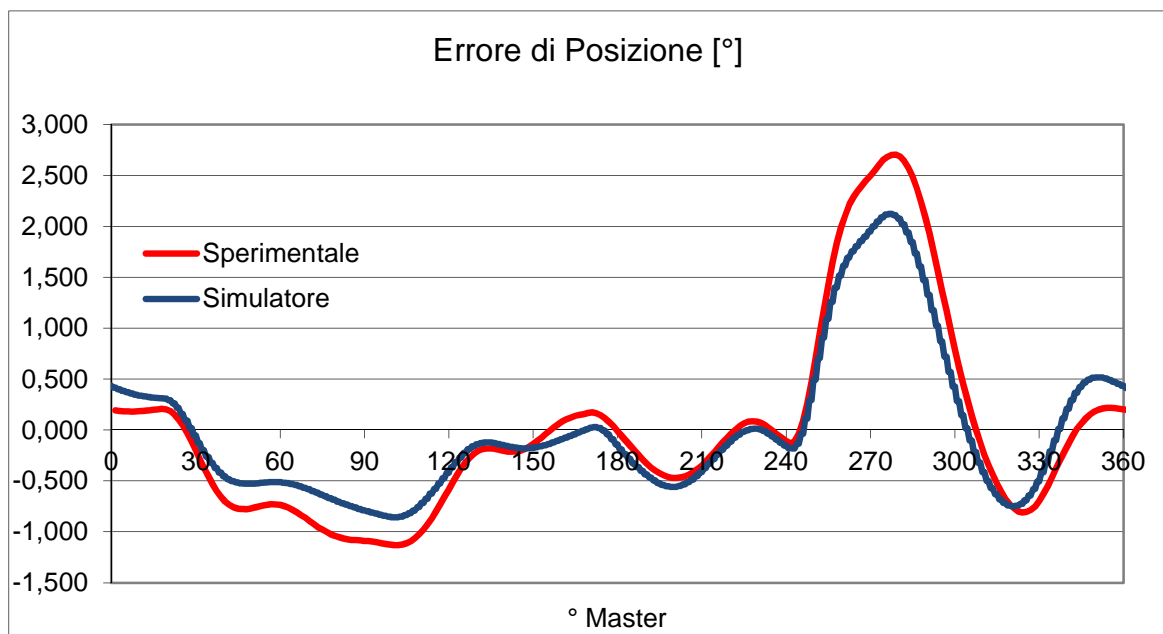


Figura 5.43: Confronto tra gli errori di posizione rilevati sperimentalmente e tramite la simulazione

Gruppo Quadro

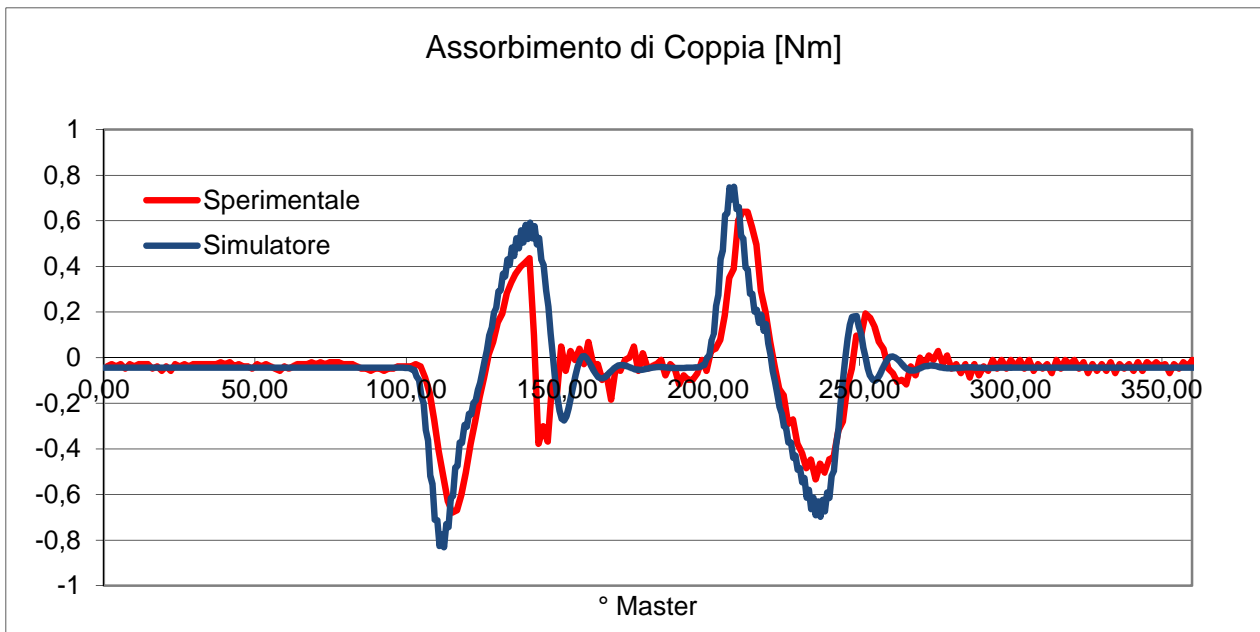


Figura 5.44: Confronto tra gli assorbimenti di coppia sperimentali e simulati

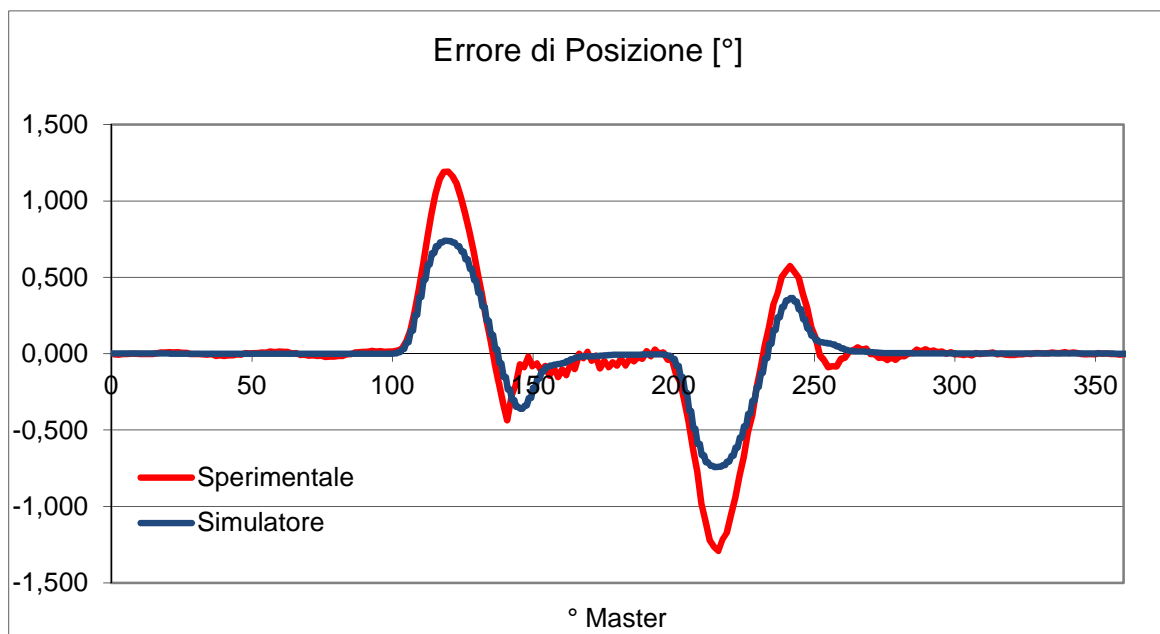


Figura 5.45: Confronto tra gli errori di posizione rilevati sperimentalmente e tramite la simulazione

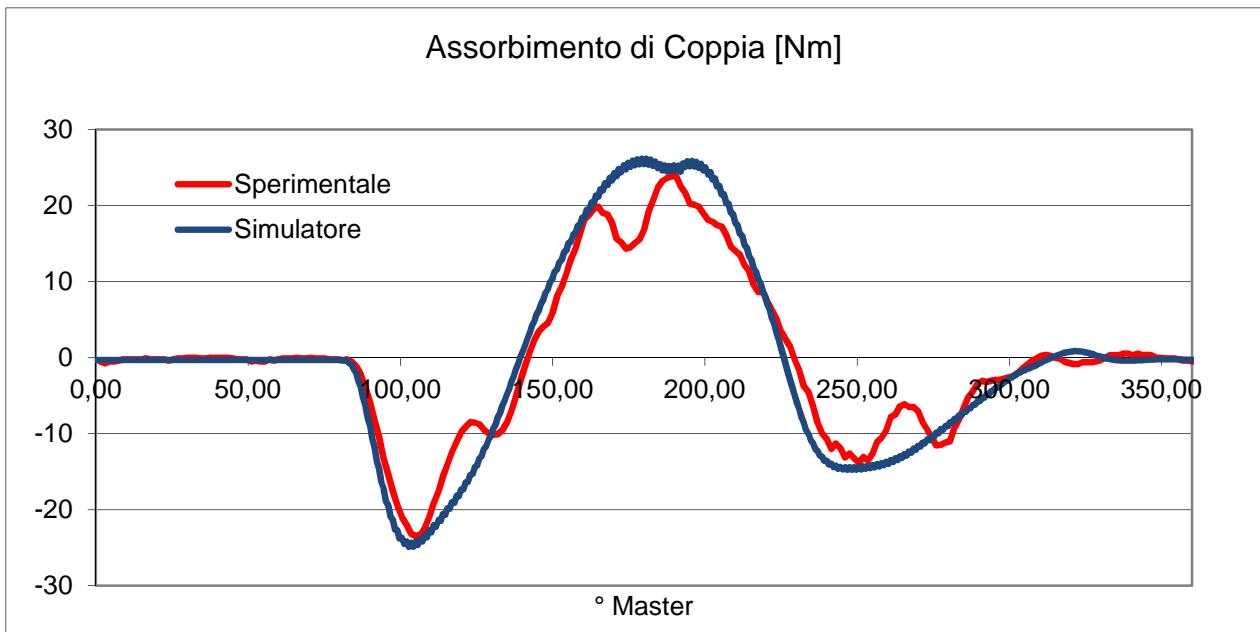


Figura 5.46: Confronto tra gli assorbimenti di coppia sperimentali e simulati

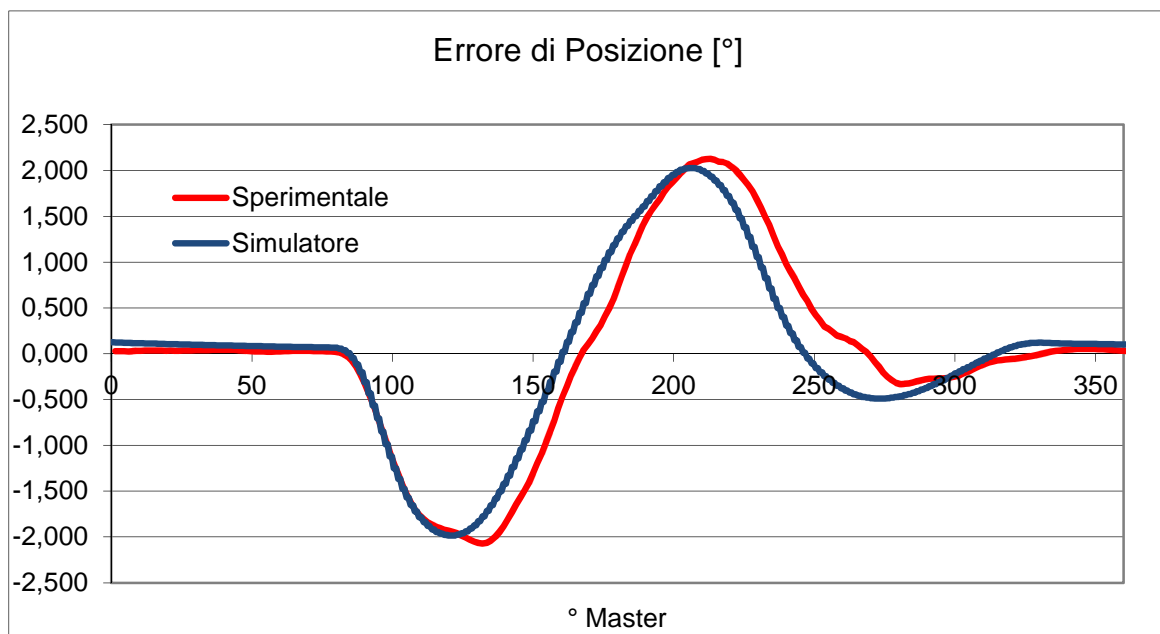


Figura 5.47: Confronto tra gli errori di posizione rilevati sperimentalmente e tramite la simulazione

Gruppo Tranciante

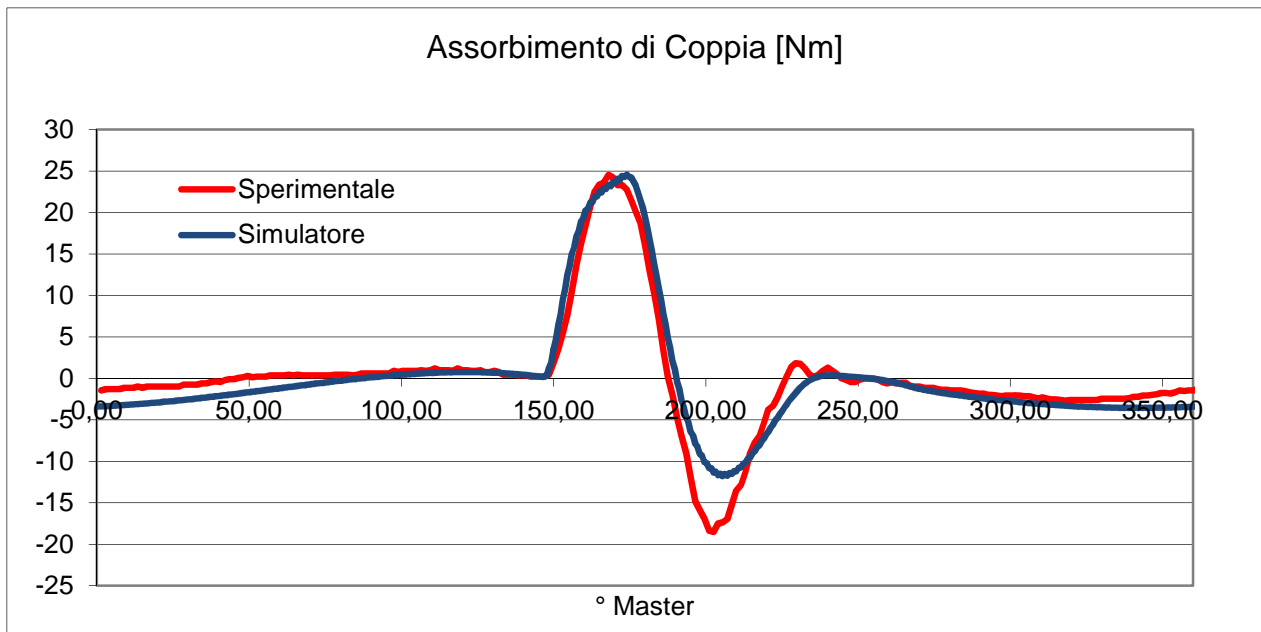


Figura 5.48: Confronto tra gli assorbimenti di coppia sperimentali e simulati

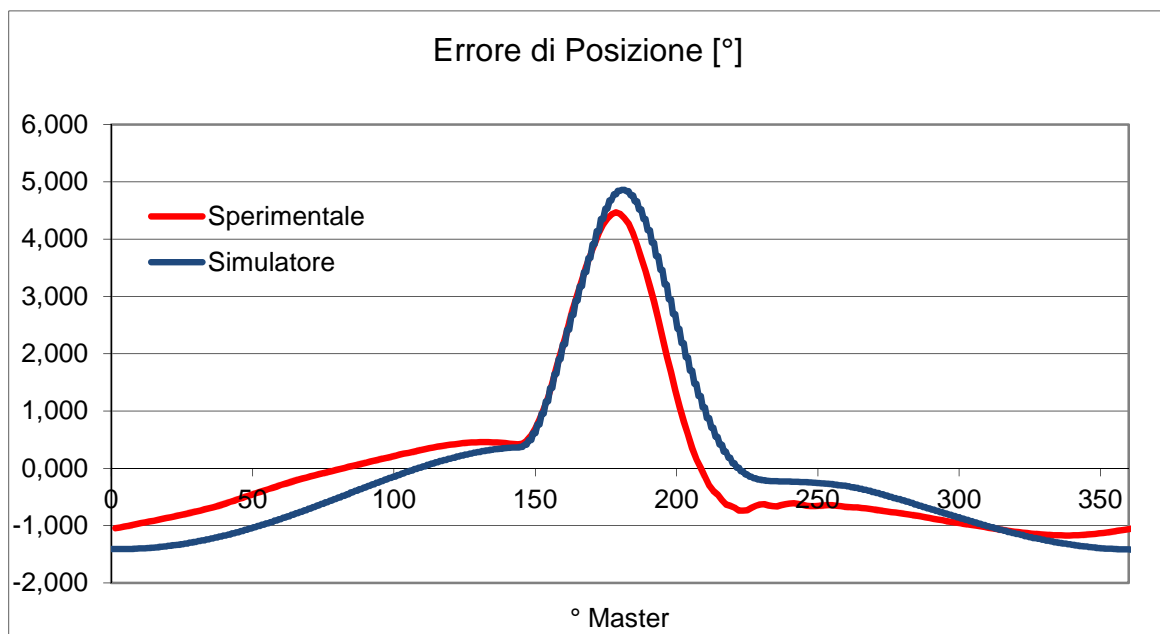


Figura 5.49: Confronto tra gli errori di posizione rilevati sperimentalmente e tramite la simulazione

6. Conclusioni.

Durante l'attività di dottorato si è elaborato un metodo integrato per la progettazione di macchine automatiche ad alta dinamica.

Il metodo è stato dapprima elaborato a livello teorico basandosi sui difetti dell'attuale stato dell'arte e sui bisogni dell'industria delle macchine automatiche. I principali punti che hanno guidato il nostro lavoro sono stati la ricerca dell'ottimizzazione delle performance della macchina e la riduzione dei tempi di progettazione.

Per ottenere questi risultati si è ritenuto necessario puntare su una precoce integrazione degli ambienti di sviluppo meccanico e di controllo e sull'utilizzo di prototipi virtuali che permettessero a priori di verificare le soluzioni adottate.

Si è quindi deciso di creare un ambiente virtuale mediante l'utilizzo di software commerciali di ultima generazione che permettessero l'integrazione tra analisi MFBD e simulazioni di sistemi dinamici a parametri concentrati.

Dopo un'analisi di mercato si è scelto di affidarsi ai software commerciali RecurDyn e Simulink, per la loro flessibilità e facilità d'uso.

Si è quindi proceduto ad applicare il metodo ad un case study, partendo da un livello di modellazione fortemente semplificato per procedere poi via via ad aumentare il livello di dettaglio. Si è inoltre creato in laboratorio un prototipo reale per permetterci di verificare i risultati ottenuti.

Il nostro sistema ha mostrato di essere fortemente affidabile e di riproporre i comportamenti del sistema con un margine di errore inferiore al 10%.

Si è quindi deciso di poter passare ad alcuni test di ottimizzazione, partendo dalle soluzioni indicate dal nostro ambiente di progettazione ed integrandole poi sul prototipo reale, ottenendo risultati soddisfacenti.

Alla fine delle attività possiamo dichiarare di aver ottenuto un ambiente di progettazione integrato che permette di ottimizzare le performance delle macchine in esame e di ridurre i tempi di progettazione e i costi relativi ai test di laboratorio.

Come sviluppi futuri resta da implementare un metodo di ottimizzazione sistematico all'interno dell'ambiente, in modo da permettere di ottimizzare ancora di più l'efficienza dello stesso e ottenere risultati ancora migliori riducendo ulteriormente i tempi.

7. Bibliografia

1. P. Poignet, M. Gautier, W. Khalil, "Modeling, Control and Simulation of High Speed Machine Tool Axes", *IEEE/ASME Int. Conf. On Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 617 - 622, 1999
2. A. Huges, "Electric motors and Drives", Elsevier 2006.
3. K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives", IEEE press, 1993
4. J. Angeles, "Fundamental of robotic mechanical systems," Springer-Verlag, 2003
5. L. Biagiotti, C. Melchiorri, "Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots" Springer 2008.
6. Kaan Erkorkmaz, Yusuf Altintas, "High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, n° 9, pp. 1323–1345, 2001
7. Ayse Tekes, Ümit Sönmez, Bilin Aksun Güvenç, "Trajectory Control of Compliant Parallel-Arm Mechanisms", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 132, n° 1, 2009
8. Chung-Shu Liao, Shyr-Long Jeng, Wei-Hua Chieng, "Electronic cam motion generation with special reference to constrained velocity, acceleration, and jerk" , *ISA Transactions*, Vol. 43, n° 3, pp. 427 - 443, 2004
9. Fredrik Roos, Hans Johansson, Jan Wikander, "Optimal selection of motor and gearhead in mechatronic applications", *Mechatronics*, Vol. 16, n° 2, pp. 63–72, 2006
10. Herman J. Van de Straete, Pascal Degezelle, Joris De Schutter, Ronnie J. M. Belmans, "Servo Motor Selection Criterion for Mechatronic Applications", *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, Vol. 3, n° 1, pp. 43-50, 1998
11. Giancarlo Cusimano, "A Procedure For A Suitable Selection Of Laws Of Motion And Electric Drive Systems Under Inertial Loads", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 38, n° 6, pp. 519 - 533, 2003
12. Chih-Cheng Kao, Chin-Wen Chuang, Rong-Fong Fung, "The self-tuning PID control in a slider–crank mechanism system by applying particle swarm optimization approach", *Mechatronics*, Vol. 16, n° 8, pp. 513 - 522, 2006
13. Wilson J. Rugh, Jeff S. Shamma, "Research on gain scheduling", *Automatica*, Vol. 36, n° 10, pp. 1401 - 1425, 2000
14. Jinho Jang, Anuradha M. Annaswamy, Eugene Lavretsky, "Adaptive control of time-varying systems with gain-scheduling", American Control Conference, pp. 3416 - 3421, Seattle, 2008

15. Chirl Hwa Lee, Myoung Ho Shin, Myung Jin Chung, "A design of gain-scheduled control for a linear parameter varying system: an application to flight control", *Control Engineering Practice*, Vol. 9, n° 1, pp. 11 - 21, 2001
16. József Kövecses, Saeed Ebrahimi, "Parameter Analysis and Normalization for the Dynamics and Design of Multibody Systems", *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 4, n° 3, 2009
17. Imed Khemili, Lotfi Romdhane, "Dynamic analysis of a flexible slider–crank mechanism with clearance", *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 27, n° 5, pp. 882–898, 2008
18. Wang Song, Shi Shuang-shuang, Chen Chao, "Simulation of PMSM Vector Control System based on Non-linear PID and Its Easy DSP Realization", *Control and Decision Conference*, pp. 949 - 953, 2009
19. LIU Ting-ting, TAN Yu, WU Gang, WANG Shu-mao, "Simulation of PMSM Vector Control System Based on Matlab/Simulink", *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Vol. 2, pp. 343 - 346, 2009
20. L. Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu, and K. W. Lim, "Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 12, n° 3, pp. 528 - 536, 1997
21. Ravindra Kumar Sharma, Vivek Sanadhya, Laxmidhar Behera, S. Bhattacharya, "Vector Control Of A Permanent Magnet Synchronous Motor", *Annual IEEE India Conference*, Vol. 1, pp. 81 - 86 , 2008

Ringraziamenti

Un sentito grazie va al Prof. Andrisano, all'Ing. Pellicciari e all'Ing. Leali, per la disponibilità con cui mi hanno seguito durante lo svolgimento delle attività di dottorato e per le opportunità di crescita professionale che mi hanno dato.

Devo inoltre ringraziare i miei colleghi del La.P.I.S. Matteo, Enrico, Fabio, Alberto, Cristina, Francesco, Mirko, Luca ed Antonio (in ordine casuale) per gli anni bellissimi passati insieme, vorrei augurare a tutti un grande in bocca al lupo per il loro futuro.

Nota di merito va poi conferita all'Ing. Berselli, che mi ha offerto la sua guida e sostegno durante le ultime fasi di redazione della tesi, su(o)pportandomi con grande pazienza.

Non posso poi esimermi dal ringraziare i membri del Barbalab: l'Ing. Faretra, che con i suoi consigli mi ha più volte permesso di trovare soluzioni a problemi che inizialmente sembravano irrisolvibili, e il Prof. Barbanti.

Impossibile infine dimenticare i miei famigliari, che mi hanno sempre sostenuto nelle mie scelte, ed in particolar modo l'Ing. Fioroni, il miglior socio che si potesse trovare nell'attraversare le peripezie della vita.