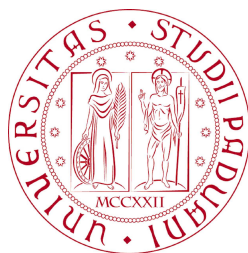


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



Finito di scrivere il giorno 22 novembre 2012 utilizzando L^AT_EX 2_ε

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—
DIPARTIMENTO DI INNOVAZIONE MECCANICA E GESTIONALE
—

LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE

TAVOLE ROTANTI
NELL'AUTOMAZIONE

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: FABIO SCODRO

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

ai miei genitori...

Indice

Sommario	IX
Introduzione	XI
1 Caratteristiche e utilizzo negli impianti industriali	1
1.1 Struttura e inserimento in linea	1
1.2 Schema di controllo	2
1.3 Parametri di una tavola rotante	4
2 Tipologie di tavole rotanti	7
2.1 Tavole con attuatore elettrico	7
2.1.1 Moto intermittente	8
2.1.2 Dentatura Hirth	11
2.1.3 Vite senza fine	13
2.1.4 Accoppiamento diretto	14
2.2 Tavole con attuatore pneumatico	17
2.3 Tavole con attuatore idraulico	21
2.4 Sistemi touchdex	22
2.5 Movimentazione manuale	22
2.6 Confronto tra le diverse categorie	25
2.7 Movimentazioni particolari	25
3 Dimensionamento per un caso applicativo	29
Conclusioni	39

A	Glossario	41
A.1	Glossario di riferimento	41
A.2	Chiavi di ricerca	42
B	Caratteristiche dei motori coppia e modello matematico	43
C	Parametri e informazioni aggiuntive	47
C.1	Dati tipici dei motori coppia	47
C.2	Differenze tra le trasmissioni di potenza	47
D	Ricerca di mercato	51
	Bibliografia	55

Sommario

L'utilizzo delle tavole rotanti nasce dalla necessità di portare in rotazione e posizionamento dei carichi in spazi limitati. È un apparato adatto alla generazione di un moto rotatorio, movimento che poi sarà disponibile in un disco di diametro e struttura variabili. Diventa quindi una vera e propria base d'appoggio girevole per molte attività industriali, utilizzata anche come banco di montaggio, come tavola di carico e nell'azionamento di nastri intermittenti.

Date le loro capacità costruttive, molti produttori di tavole rotanti riescono ad ottenere prestazioni elevate in fatto di tempistiche, resistenze alle sollecitazioni esterne e nella precisione del posizionamento angolare. In questo ultimo caso si parla di centesimi di grado, ma se la lavorazione richiede precisioni spinte, come per la calibrazione con laser e misure metrologiche, si arriva a qualche millesimo di grado. Si trovano anche come supporto a macchine con asportazione di trucioli, nelle sbavatrici e nelle levigatrici, nelle macchine per la stampa al setaccio e al tampone.

Infine se gli standard di protezione e realizzazione sono elevati, le tavole si possono inserire in ambienti puliti che richiedano l'assenza totale di polveri e di inquinamento.

Introduzione

In questa trattazione si analizzano le tematiche inerenti alle strutture, alle tipologie e al dimensionamento delle tavole rotanti. Tutto è articolato in tre fasi principali, che corrispondono ai tre capitoli successivi. Più precisamente nel capitolo 1 si descrive l'inserimento della tavola rotante in un impianto industriale. Sono esposte le loro specifiche, descrivendone i parametri caratteristici. È proposto anche uno schema di controllo del moto, evidenziando le funzioni che realizzano l'automazione.

Il passo successivo è stato quello di identificare l'ampia gamma di modelli in commercio, suddividendo le tavole in base ad alcune caratteristiche comuni. Il capitolo 2, delinea quindi le tipologie e le tecnologie utilizzate, considerando anche il contesto applicativo e le dimensioni in gioco.

Il capitolo 3 è dedicato al dimensionamento di un caso reale, con un significativo esempio numerico.

Capitolo 1

Caratteristiche e utilizzo negli impianti industriali

1.1 Struttura e inserimento in linea

La tavola rotante è formata da due parti. La prima è il corpo centrale che contiene la meccanica per il trasferimento del moto e l'elettronica per il suo controllo. La seconda è un disco, solitamente di acciaio temprato, che può essere forato o scanalato per assicurare il carico. Entrambe sono visibili in Figura 1.1. In base al tipo di lavorazione, ai pesi, alle inerzie da ruotare e ai tempi da rispettare, la tavola avrà un dimensionamento e rigidità adatte. Si possono trovare piccole tavole per posizionamenti di precisione, fino a quelle per carichi notevolmente ingombranti e pesanti (vedi Capitolo 2).

Le applicazioni che ne richiedono l'utilizzo sono molte, ma si possono raggruppare nelle seguenti categorie:

- movimentazione di materiali (caricamento, ribaltamento, posizionamento);
- in supporto a macchine CNC come base per il manufatto.

Nel primo caso siamo di fronte a macchinari che realizzano impianti di trasferta e di assemblaggio automatico (vedi [1]). Sono quindi parte della movimentazione dei materiali in una linea di lavorazione. Nel processo o ciclo di fabbricazione la tavola può essere il collegamento tra le diverse attività da svolgere, per la creazione del prodotto finito. Il loro inserimento è vantaggioso perché apportano una riduzione

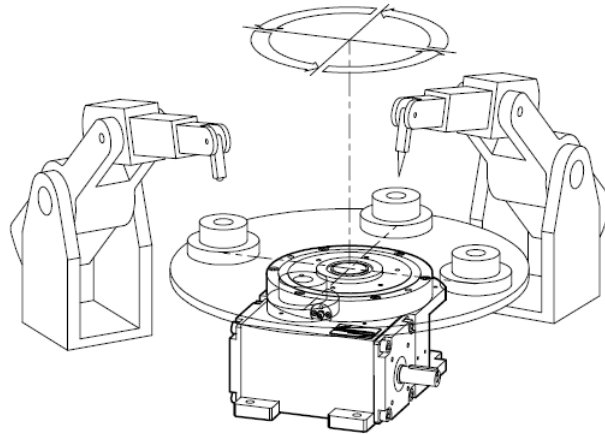


Figura 1.1: Lavorazione con tavola rotante [3].

delle distanze tra le varie trasformazioni. Quindi più operazioni possono svolgersi nelle vicinanze della tavola (come in Figura 1.1, in cui diverse lavorazioni vengono applicate al prodotto). Le tavole, di conseguenza, non influenzano il tempo delle singole lavorazioni, ma il tempo d'attesa tra di esse e il tempo totale di percorrenza sulla linea di lavorazione. In definitiva otteniamo un miglioramento del processo produttivo, aumentandone il flusso dei materiali e quindi i valori di produzione (*pezzi/ora*), come evidenziato in [2].

Il secondo gruppo di tavole sono inglobate all'interno delle macchine CNC e utilizzate per garantire la rotazione del manufatto, oltre alle movimentazioni già presenti verso gli assi x , y e/o z .

1.2 Schema di controllo

La configurazione di inserimento della tavola in una logica di controllo è visibile in Figura 1.2. Per realizzarla i costruttori di tavole rotanti mettono a disposizione delle tecnologie per il servo-posizionamento del disco. Principalmente esse sono:

- trasduttori di posizione (encoder ottico, sensori di fine corsa o della posizione iniziale);
- gruppo di azionamento ed eventuale scheda di controllo;
- software per l'interfacciamento con la tavola;

- freno;

Gli encoder sono dispositivi elettromeccanici per la traduzione dell'informazione angolare in un segnale elettrico. Nelle tavole troviamo encoder incrementali (il segnale elettrico è un treno di impulsi) o assoluti (l'uscita è una parola binaria). La loro risoluzione dipende dalla precisione che si vuole adottare nel controllo e dalla precisione di posizionamento della tavola. Se la tavola può fare solo uno movimento limitato on-off, come nelle tavole pneumatiche, si utilizzano dei sensori di fine corsa. Essi sono magnetici, cioè sensibili alla vicinanza di un magnete permanente posto in una parte mobile della trasmissione, oppure induttivi. Questi ultimi commutano quando si ha una variazione della riluttanza dell'elettromagnete a causa della prossimità di un materiale ferromagnetico. Le tavole che compiono rotazioni continue possono montare sensori della posizione iniziale, che funzionano esattamente come quelli di fine corsa. Generano un'informazione che può essere utile per conoscere il numero di rotazioni su una data applicazione.

Con il termine azionamento si intende l'elettronica di potenza per alimentare la tavola. Caratteristica necessaria solo alle tavole con un attuatore¹ elettrico. Il suo dimensionamento viene fatto a partire dalla corrente di picco che la tavola richiede, stimata in fase di progettazione. Esso normalmente viene pilotato dal sistema di controllo (PLC o controllore numerico). Alcuni modelli sono in grado di memorizzare riferimenti digitali in modo da realizzare semplici cicli di posizionamento senza ulteriore elettronica esterna.

La scheda di controllo elabora i segnali digitali provenienti dalla tavola (sensori) e ne comanda l'azionamento. In alcuni casi è accompagnata da software per l'interfacciamento su PC, in modo da gestire la movimentazione e i suoi parametri anche a livello grafico. I costruttori di tavole elettriche che rendono disponibili i loro prodotti senza scheda di controllo, adottano come interfacciamento per il PLC del cliente Profibus, I/O digitale e CANopen.

Se l'applicazione lo richiede e se i modelli lo permettono, un freno può aiutare l'arresto del carico. Per inerzie elevate si adottano modelli idraulici o pneumatici.

¹Con il termine *attuatore* si indica un qualsiasi dispositivo che converte energia da una forma all'altra. Nel nostro caso sarà da energia manuale, elettrica, pneumatica o idraulica in energia meccanica per la rotazione della tavola.

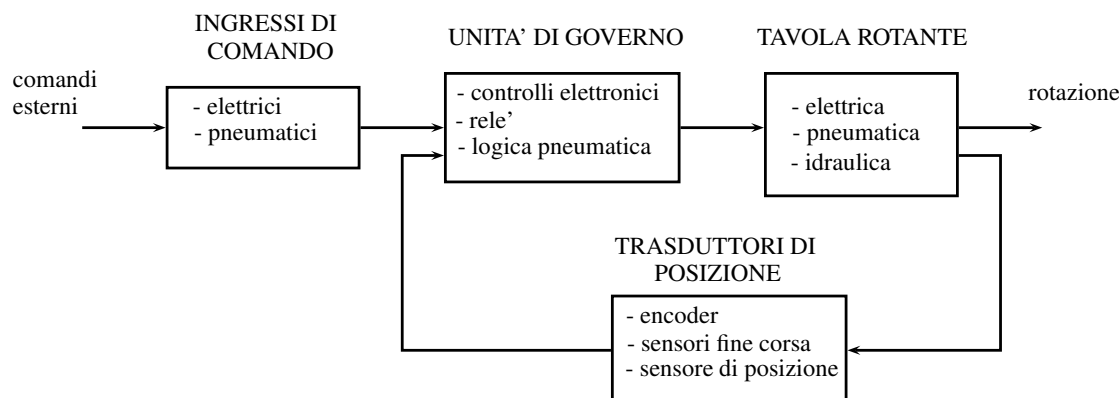


Figura 1.2: Tavola rotante in un sistema di controllo.

In alcuni casi è consigliato l'uso di un motore autofrenante, come nel paragrafo 2.1.1.

1.3 Parametri di una tavola rotante

I costruttori mettono a disposizione del cliente dei dati che delineano le caratteristiche meccaniche ed elettriche delle tavole rotanti. Nel caso di tavola con accoppiamento diretto (paragrafo 2.1.4) si aggiungono dei dati sul motore, visibili in tabella C.1 a pagina 48.

- **Carico massimo di trasporto** [kg]: è il massimo valore di massa che la tavola riesce a gestire, senza danneggiare il sistema d'appoggio su cui scorre il disco (cuscinetti a sfere, cuscinetti a rulli incrociati, cuscinetti pneumostatici).
- **Inerzia della tavola** [kgm^2]: inerzia che la tavola deve vincere per portare in rotazione il suo disco.
- **Momento d'inerzia massimo** [kgm^2]: inerzia massima del carico.
- **Momento torcente massimo** [Nm]: massimo valore della forza applicata perpendicolarmente all'asse di rotazione e all'estremità della tavola (in arresto). I valori diventano elevati per i modelli con serraggio del disco. È visibile in Figura 1.3.
- **Momento ribaltante massimo** [Nm]: massima forza applica perpendicolarmente all'asse di rotazione (intersecandolo) e ad una certa altezza.

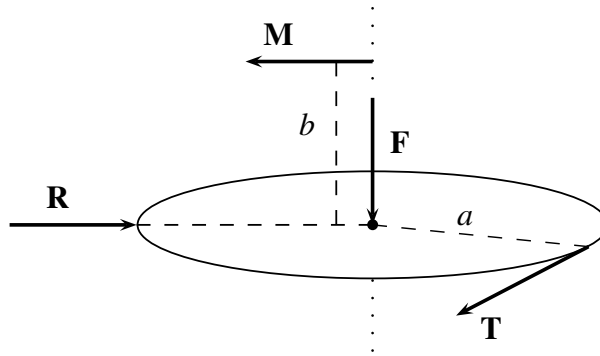


Figura 1.3: Momenti e forze agenti sulla tavola: forza assiale (\mathbf{F}), forza radiale (\mathbf{R}), momento torcente ($\mathbf{T} \cdot a$), momento ribaltante ($\mathbf{M} \cdot b$).

- **Forza assiale massima** [N]: Massima forza applicata parallelamente al senso di rotazione e al centro della tavola.
- **Forza radiale massima** [N]: Massima forza applicata perpendicolarmente al senso di rotazione e a lato del disco.
- **Coppia massima disponibile** [Nm]: Massima coppia che il motore garantisce senza danneggiarsi. Nei modelli elettrici è indicata anche la sua durata massima. I modelli pneumatici hanno il vantaggio di poter essere sovraccaricati fino all'arresto, senza creare danni (vedi paragrafo 2.2).
- **Coppia nominale continua** [Nm]: Coppia disponibile in modo continuo senza riportare temperature di lavoro elevate.
- **Precisione nel posizionamento** [$^\circ$]: valore misurato anche in secondi d'arco ($1/3600$ di grado), rappresenta l'accuratezza con cui la tavola va in posizione.
- **Ripetibilità** [$^\circ$]: differenza tra gli angoli raggiunti in più movimentazioni, in cui la posizione finale sia sempre la stessa.
- **Velocità massima** [rpm]: massima velocità di rotazione della tavola.
- **Foro centrale** [mm]: diametro del foro presente nella parte centrale del disco. Utile per il passaggio dei fili elettrici o tubi dell'aria compressa per alimentare il carico in rotazione.
- **Limite della corsa**: limite nella corsa disponibile (se la tavola lo prevede). Vale anche per il caso di tavole con moto intermittente, in cui vengono specificate il numero di fermate (come nel paragrafo 2.1.1).
- **Senso di rotazione**: orario e/o antiorario

- **Posizione di montaggio:** indica le configurazioni possibili per l'installazione della tavola.
- **Elettronica per il controllo:** tecnologie disponibili per interfacciare la tavola con un sistema di controllo. Un elenco preciso è nella sezione 1.2.
- **Materiale di costruzione:** si trovano basamenti in ghisa o acciaio temprato per tavole di grandi dimensioni, ma anche in alluminio anodizzato se le dimensioni sono ridotte. Il disco normalmente è in acciaio.
- **Eventuali accessori:** come piastre di adattamento con dimensioni e forature secondo le esigenze del cliente, kit di fissaggio, distributori rotanti per l'aria compressa.
- **Dimensioni di ingombro** [*mm*]
- **Massa** [*kg*]

Capitolo 2

Tipologie di tavole rotanti

In questo capitolo verranno descritte le tipologie di tavole rotanti attualmente in commercio. Esse possono essere suddivise in base ad alcune caratteristiche comuni:

- tipo di attuatore che provoca la rotazione;
- scelta tra un posizionamento arbitrario o fisso;
- tipo di trasmissione del moto;
- senso di rotazione;
- posizione di montaggio;
- foro centrale per il passaggio di cavi elettrici o di aria compressa;
- ambiente lavorativo.

Per quanto riguarda una suddivisione in base al tipo di carico e al dimensionamento della tavola rotante, vedere il Capitolo 3.

2.1 Tavole con attuatore elettrico

Le tavole azionate con un motore elettrico sono le più diffuse in commercio. Hanno svariati ambiti applicativi e possono movimentare carichi di tutte le dimensioni, a seconda della rigidità costruttiva.

Le prime due sezioni 2.1.2 e 2.1.1 si occupano di tavole con posizionamenti fissi, in cui l'angolazione di arresto della tavola è ben precisa e non modificabile dall'utente. I successivi paragrafi 2.1.3 e 2.1.4 raccolgono informazioni su tavole con posizionamenti programmabili dall'utente.

2.1.1 Moto intermittente

Le tavole dotate di meccanismi per moto intermittente permettono di trasformare il moto rotatorio uniforme dell'albero in entrata (movente), in rotatorio intermittente e unidirezionale del disco rotante (cedente). Si ottengono delle precise leggi di moto, stabilite in fase di costruzione del meccanismo intermittente¹. Il profilo più utilizzato è composto da un polinomio di quinto grado, con velocità e accelerazione iniziale e finale nulle e di durata t_a (vedi [3]). A questo si somma un periodo t_s di arresto della movimentazione. Il tempo totale risulta essere $T = t_s + t_a$. Normalmente il costruttore mette a disposizione modelli con una movimentazione da una decina di gradi fino a $\Delta\theta = 180^\circ$. Inoltre l'utente può modificare il valore di t_s grazie ad un interruttore che segnala l'arresto della posizione. La regolazione di t_a si ha variando la velocità angolare del motore.

Si può indicare con q , \dot{q} , \ddot{q} rispettivamente la posizione, velocità e accelerazione del movente. Come specificato in [5] l'equazione dinamica del moto è non lineare di primo grado, essendo questo il caso di una macchina ad un grado di libertà:

$$J(q)\ddot{q} + \frac{1}{2} \frac{dJ(q)}{dq} \dot{q}^2 = Q \quad (2.1)$$

in cui $J(q)$ è il momento d'inerzia di tutti i corpi rotanti della tavola, che risulta essere funzione della posizione, e Q il momento ridotto contenente tutte le coppie esterne (motrici e resistenti).

Il motore elettrico gioca quindi un ruolo importante, perché deve garantire un moto uniforme del movente e una coppia trasmessa maggiore rispetto alla massima richiesta dal dispositivo. Per farlo, trasmissione e motore devono essere accuratamente dimensionate per non farsi influenzare dalla dinamica della tavola e dalle componenti inerziali del carico (che variano in modulo e segno la coppia da erogare).

I motori utilizzati sono generalmente asincroni trifase, con rotore a gabbia di scoiattolo. La curva caratteristica coppia/velocità, visibile in Figura 2.1, fa notare

¹Uno studio attento della legge di moto da parte del costruttore, consente di ottenere un andamento temporale della coppia motrice che presenta valori massimi e minimi uguali in modulo. Ottimizza quindi l'erogazione di coppia sul ciclo, come spiegato in [4]

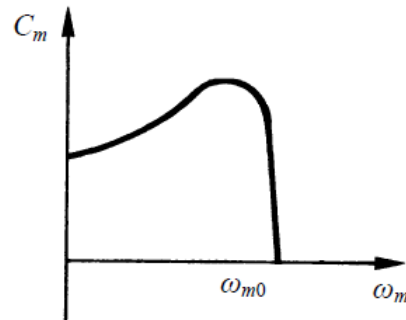


Figura 2.1: Curva coppia-velocità di un motore asincrono con rotore a gabbia di scoiattolo [6]

la capacità di erogare valori di coppia differenti, mantenendo una velocità vicina a quella di sincronismo $\omega_{m,0}$.

I meccanismi per moto intermittente utilizzati nelle tavole rotanti sono:

- albero a camma cilindrica (intermittore a tamburo);
- albero con camma globoidale (intermittore globoidale);
- intermittore piano;
- meccanismo a croce di malta.

Sono modelli con basamento in ghisa e disco in acciaio come quello di Figura 2.2a. Il piatto intermittente appoggia su cuscinetti a rulli incrociati (distinguibili in Figura 2.2b), in modo da sostenere elevati carichi assiali e ribaltanti, mantenendo alti livelli di precisione e di rigidità. Alcuni modelli presentano fori centrali di grande diametro, in maniera da ospitare braccia robotizzate al loro interno. Vengono sempre posizionate orizzontalmente e assicurano una rotazione oraria e antioraria. Sono resistenti agli spruzzi di saldatura, a lavorazioni con asportazioni di truciolo e sono inoltre impermeabili. Si possono trovare anche negli impianti di trasferta e movimentazione.

La trasmissione consigliata è il calettamento diretto sull'albero d'entrata di un riduttore con gioco minimo possibile della trasmissione, per evitare effetti oscillatori dovuti all'uso di cinghie. Questa soluzione consente di stabilizzare la velocità di rotazione poiché il riduttore agisce, nel tratto di decelerazione del ciclo, come un freno, dissipando per attrito l'energia cinetica che il sistema a moto intermittente restituisce all'albero d'entrata del meccanismo. Inoltre il motore asincrono

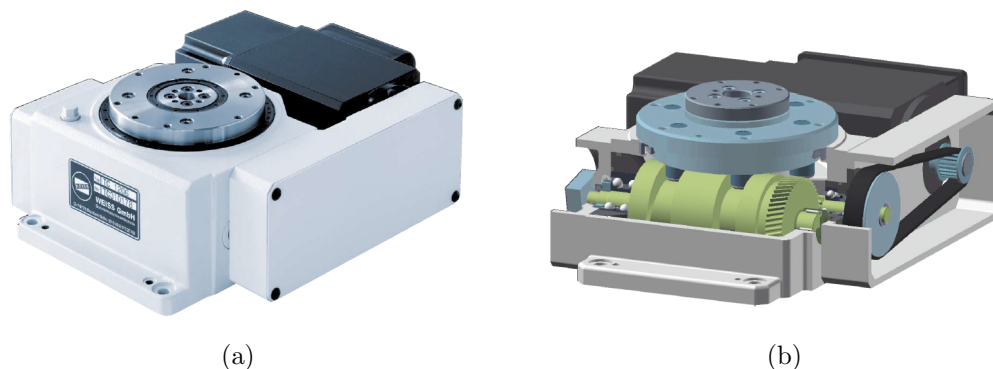


Figura 2.2: Tavola Weiss [7], modello TC120G (a) e una sua sezione con camma cilindrica in vista (b).

è autofrenante. Dispone cioè di un freno montato nella parte posteriore che agisce in mancanza di alimentazione, grazie alla pressione esercitata da molle sull'albero motore, come osservato in [8]. In questo modo si diminuiscono ulteriormente i tempi di arresto.

La camma cilindrica (Figura 2.3a) o globoidale (Figura 2.3b) calettata sull'albero di trasmissione del moto, impegna due o più rulli di trascinamento posizionati nella parte inferiore della tavola. Questo assicura anche il serraggio della tavola stessa durante il periodo di arresto.

Nel caso di una trasmissione del moto con intermittente piano, le camme si innestano nel piatto a rulli e il loro numero determina i posizionamenti, come in Figura 2.3c.

Il meccanismo a croce di malta, visibile in Figura 2.3d, è presente solo in alcuni modelli datati e non più in commercio.

In tutti i casi l'arresto della motorizzazione deve avvenire nel periodo di pausa (t_s). Grazie ad una piccola camma calettata direttamente nell'albero di ingresso del moto e ad un micro-interruttore, possiamo conoscere il momento di sosta e comandare lo spegnimento del motore. L'inconveniente nasce per l'interruzione della tavola nel periodo di spostamento. Questo perché durante il normale funzionamento possono verificarsi delle emergenze, provocate dall'operatore di macchina o da una unità centrale di controllo. Possono dipendere anche da cadute di tensione in rete o da bloccaggi accidentali. Qualunque ne sia la causa, la conseguenza è

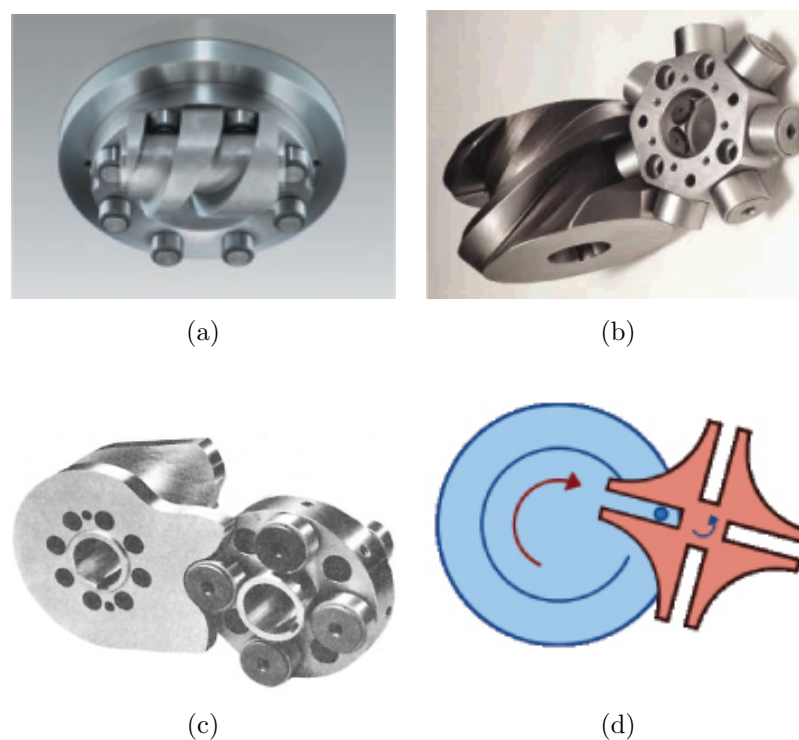


Figura 2.3: Meccanismi intermittenti utilizzati nelle tavole rotanti: (a) camma cilindrica [9], (b) camma globoidale [10], (c) camma piana [10] e (d) croce di malta [11]

comunque sempre quella di provocare un arresto istantaneo della motorizzazione. In questi momenti, le masse in rotazione scaricano quasi istantaneamente la loro energia cinetica, a causa di una decelerazione quasi istantanea, provocando danni alla trasmissione. Il problema si può arginare con l'utilizzo di un giunto limitatore di coppia a frizione nella catena cinematica della motorizzazione.

Il programma del ciclo di movimentazione può essere gestito elettronicamente da PLC, con interfacciamento tramite Profibus DP, I/O digitali o CANopen. Alcune case costruttrici mettono a disposizione del software di gestione del moto da installare su PC, con interfacciamento RS232 o Ethernet.

2.1.2 Dentatura Hirth

Alcuni modelli di tavole rotanti equipaggiano una speciale coppia di corone dentate, chiamate *Hirth*. Sono due corone con dentatura frontale, come in Figura 2.4,

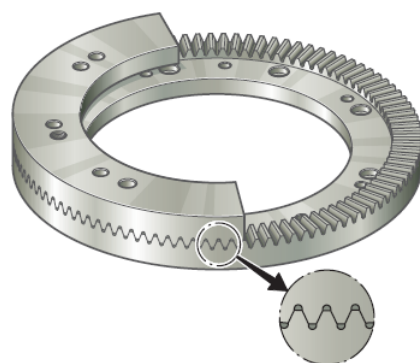


Figura 2.4: Esempio di corone a dentatura frontale [12], in posizione di blocco.

che assicurano un serraggio completo della tavola durante la fase di arresto. In questi modelli la tavola compie due movimenti:

- alzata della tavola (di qualche millimetro) per consentire lo sblocco dalla dentatura. Ciò viene garantito da un pistone idraulico, che in un tempo breve (entro ai 0,4 s) alza la tavola e il suo carico, e permette una rotazione sicura.
- Una volta raggiunta la posizione desiderata la tavola cala e si adagia sulla dentatura sottostante.

Il posizionamento non è arbitrario perché dipende dal numero dei denti. Più è alto e più saranno le angolazioni ammissibili. Numeri standard sono 72, 96, 144 o 360. Dentature con diametro maggiore possono ospitare anche 1400 denti.

Grazie alla sua geometria, la dentatura offre una certa forza di fissaggio, garantita anche dal peso del carico sovrastante e misurata applicando una forza radiale alla tavola bloccata.

Le tavole che equipaggiano dentatura Hirth, sono normalmente applicate su carichi molto pesanti in cui sia necessaria una elevata resistenza a momenti torcenti o forze esterne agenti sul carico durante la lavorazione, a tavola ferma. Di solito viene inserito un ulteriore blocco pneumatico o idraulico, posizionato all'interno della tavola. Queste tavole si possono trovare prevalentemente come base per il posizionamento di manufatti su grandi macchine a CNC.

Per le lavorazioni che non ammettono una variazione in altezza, lo sbocco dalla dentatura si ha dall'abbassamento della corona sul basamento. In questa fase la tavola appoggia su cuscinetti incrociati sufficientemente dimensionati.

Il trasferimento del moto avviene tramite sistema vite senza fine e corona dentata oppure pignone e corona circolare.

2.1.3 Vite senza fine

I sistemi con trasmissione a vite senza fine permettono un posizionamento arbitrario della tavola rotante. La vite può impegnare direttamente i rulli di trascinamento, posizionati sotto la tavola rotante². Tutto per avere una trazione maggiore ed un contatto più sicuro e continuativo. Oppure portare in rotazione una corona circolare, presente nell'albero di rotazione della tavola. Le due tipologie sono visibili in Figura 2.5. Il senso di rotazione può essere orario o antiorario a seconda delle esigenze e il posizionamento anche verticale. Normalmente montano servomotori sincroni con eccitazione a magneti permanenti, di dimensioni compatte.

Si adattano a qualsiasi lavorazione, viste le dimensioni e i pesi dei modelli disponibili sul mercato. Si va da ingombri ridotti fino a classi abbondantemente dimensionate. Sono anche associate a macchine a controllo numerico. Le tavole per lavorazioni che necessitano tempi di arresto brevi del carico, sono equipaggiate con un freno elettrico, posto sul basamento della tavola. Inoltre sono disponibili modelli con ampio foro centrale, per l'interazione con braccia meccaniche.

La maggior parte delle volte la trasmissione, tra motore e riduttore dell'albero in entrata, è a cinghia. Se le velocità angolari sono elevate, diventa cruciale la procedura di pianificazione del moto in maniera tale da eliminare o ridurre la vibrazione residua, come descritto in [13]. Questo senza aumentare il tempo di movimentazione (solitamente richiesto da esigenze di produzione), e senza introdurre ore di lavoro straordinario.

²In questo caso i rulli ciechi della tavola sono più numerosi rispetto ai modelli visti in 2.1.1



Figura 2.5: Viti che impegnano rispettivamente i rulli della tavola (a) [9] e (b) una corona circolare [14].

2.1.4 Accoppiamento diretto

Caratteristica fondamentale delle tavole ad accoppiamento diretto è quella di trasferire la loro potenza direttamente al componente da trascinare senza l'utilizzo di un gruppo di trasmissione. In questo modo si ha la completa assenza di giochi e di vibrazioni.

Il motore coppia, visibile in Figura 2.6, riesce bene a realizzare tale soluzione. È un motore sincro a magneti permanenti, trifase o monofase (a seconda della potenza), associato ad un convertitore di frequenza per variare ampiezza e frequenza della tensione di alimentazione. I magneti sono fissati sulla superficie interna di un tamburo che è la parte da trascinare. Lo statore consiste in una serie di bobine magnetiche integrate in una matrice di ferro. Queste bobine sono collegate a stella ed alimentate da una corrente trifase. La coppia resa disponibile dal motore è unidirezionale e di valore elevato, anche a bassa velocità di rotazione (grazie all'elevato numero di poli). Hanno maggiore durata di vita e assenza di manutenzione, perché i componenti sono soggetti ad usura quasi nulla. A differenza dei modelli con spazzole per il collegamento rotore-statore, non provocano scintille nei momenti di commutazione degli avvolgimenti induttivi. Possono quindi operare in ambienti che richiedono assenza di inquinamento e vibrazione o in presenza di polveri e gas potenzialmente esplosivi.

Il modello matematico del motore coppia, insieme ad altre caratteristiche

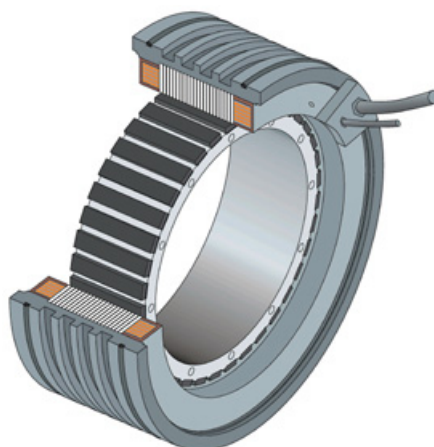


Figura 2.6: Sezione del motore coppia, con magneti rotorici visibili [15].

elettriche sono disponibili in appendice B.

I modelli di tavole con *torque motor* sono costruiti in maniera tale da essere utilizzati in tutte le applicazioni industriali. La carcassa della tavola è sigillata affinché nessun truciolo o materiale magnetico possa entrare nel motore. Inoltre possono essere veramente compatte con ingombri assiali e radiali ridotti, come in Figura 2.7a, adatte per spostamenti di precisione. Oppure, se sufficientemente dimensionate, portano in rotazione carichi inerziali più elevati (Figura 2.7b). Per questo ultimo caso l'assenza di trasmissioni assicura anche la mancanza di rotture dovute a collisioni tangenziali o arresto in emergenza della tavola. Prevedono, se necessario, anche un sistema idraulico di bloccaggio. Il montaggio della tavola può avvenire in qualunque posizione.

Se il campo d'applicazione richiede precisioni elevate, come misure metrologiche e controllo qualità, misure nel campo elettronico e ottica laser, allora le tavole più adatte montano un motore coppia e cuscinetti pneumostatici. Essi utilizzano come lubrificante un gas, normalmente aria. L'aria³ viene immessa in pressione (da 4 a 6 bar) all'interno del componente e, mediante appositi diffusori più o meno complessi (ugelli e micro-ragnature), viene distribuita fra le superfici interagenti. Si crea di conseguenza uno strato sottile di aria, dello spessore di qualche μm , che funge da lubrificante.

³È richiesto un potere di filtrazione delle particelle di 1 μm . L'aria deve essere non lubrificata e deumidificata.



Figura 2.7: (a) tavola Hiwin [16], mod. TMS14 e (b) Lcm [17], mod. TDE-TV270.

Le aree in contatto sono molto limitate, evitando così la formazione di polvere e riducendo l'usura e la manutenzione. In questo caso il coefficiente di attrito radente cresce di poco all'aumentare della velocità e rimane su valori molto bassi, circa $10^{-4} \rightarrow 10^{-5}$ ⁴. Sono resistenti a forze assiali, radiali e momenti tangenti impegnativi e nonostante lo spessore d'aria non fanno oscillare il carico in rotazione. Due esempi sono riportati in Figura 2.8

Garantiscono assenza di inquinamento e sono utilizzate nel settore chimico, biologico, medico ed alimentare. Ma anche nella movimentazione e imballaggio per cartiere e industrie grafiche.

Anche le tavole con motori passo-passo rientrano nella categoria degli azionamenti diretti. L'albero motore infatti è direttamente collegato alla corona dentata del disco rotante tramite pignone, come in Figura 2.9b, generando un certo rapporto di riduzione. Solitamente sono modelli di piccole dimensioni, con peso e ingombro radiale e assiale limitato, utili per posizionamenti veloci e precisi. Possono essere montate in qualunque posizione e il senso di rotazione è sia orario che antiorario.

Solitamente sono venduti con driver di azionamento, come in Figura 2.9a.

⁴Come confronto si noti che il coefficiente di attrito radente dinamico tra acciaio e ghiaccio è $14 \cdot 10^{-3}$



Figura 2.8: Tavole con motore coppia e cuscinetti pneumostatici: Mager [18], mod. TGH180 (a) e Aerotech [19] mod. ABRS-300 (b).

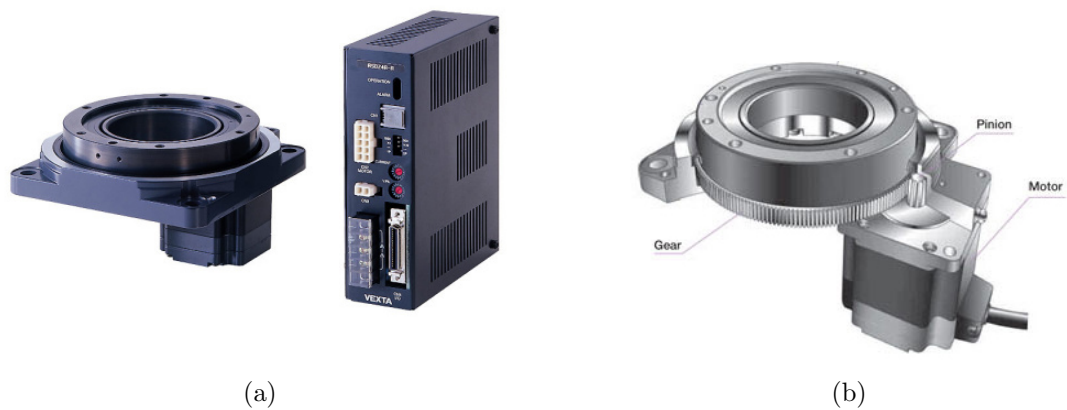


Figura 2.9: Tavola con motore passo-passo Oriental Motor [20], mod. DG-200 (a) e dettaglio del collegamento motore/disco (b).

2.2 Tavole con attuatore pneumatico

Gli impianti pneumatici fanno uso di un fluido comprimibile come l'aria, disponibile in quantità illimitata, che una volta utilizzata può essere restituita nell'atmosfera. Questo comporta una serie di differenze in termini impiantistici non indifferenti (vedere [21]):

- l'impianto è a ciclo aperto: l'aria dopo aver svolto il suo lavoro espandendosi viene rilasciata nell'ambiente. Non sono necessarie quindi tubazioni di ritorno al gruppo di generazione (cosa che peraltro risulterebbe problematica vista la grande variazione di volume associata all'espansione del fluido).

- Eventuali perdite di fluido non sono particolarmente pericolose poiché l'aria è ininfiammabile e non tossica. La nebbia d'olio che viene dispersa nell'aria compressa (attraverso i lubrificatori) per la lubrificazione dei componenti, non crea pericoli se l'ambiente è vasto e areato.
- L'aria compressa si trasporta facilmente in tubazioni, anche flessibili e di piccolo diametro.
- Insensibile alle influenze esterne come basse temperature, impurità, vibrazioni meccaniche, umidità e campi elettrici.
- Possibilità di sovraccarico degli organi motori fino all'arresto.

Le tavole rotanti con attuatore pneumatico permettono di eseguire cicli di lavoro ripetitivi con facilità. Le rotazioni rispettano una precisa angolazione, che dipende da parametri costruttivi stessi dell'attuatore. Una volta arrivata in posizione, la tavola torna a riposo. Le angolazioni più diffuse superano i 120° e alcuni modelli permettono una certa gamma di regolazione. Inoltre il loro utilizzo è giustificato dal fatto che mediamente hanno un prezzo inferiore rispetto alle versioni motorizzate. Inoltre il loro funzionamento è garantito con i comuni sistemi di distribuzione dell'aria compressa (pressione di alimentazione $2 \rightarrow 8 \text{ bar}$).

La distinzione tra i vari modelli va fatta in base al tipo di attuatore pneumatico che provoca la rotazione. I più diffusi sono:

- attuatore rotante a singola o doppia cremagliera;
- attuatore rotante a paletta;
- attuatore cilindrico;
- veri e propri motori rotativi in grado di compiere rotazioni continue.

Le tavole che montano un attuatore a singola o doppia cremagliera sono le più diffuse. Trovano uso nell'automazione di assemblaggio, in cui l'applicazione richiesta sia ripetitiva, senza elevate coppie di spinta, come il modello in Figura 2.11a. Normalmente sono di piccole dimensioni e devono evitare il contatto con sostanze corrosive, spruzzi di saldatura, polveri abrasive e trucioli di lavorazione. Possono essere montati in qualunque posizione. Equipaggiano sensori di fine corsa, per segnalare l'arrivo in posizione iniziale o finale. Infatti il maggior limite è costituito dalla comprimibilità dell'aria che rende impossibile controlli di posizione.

Lo stesso campo di applicazione vale per i modelli con attuatore a paletta, visibile in Figura 2.11b. Essi sono costituiti da un rotore che può muoversi di un angolo prefissato in una sede cilindrica. Il fluido in pressione genera il moto rotante oscillante agendo alternativamente sulla paletta solidale all'albero.

L'attuatore a doppia cremagliera può essere a singolo o doppio effetto. Nel primo caso immettendo pressione all'interno della camera, si provoca lo spostamento dei pistoni verso l'esterno, con compressione delle molle di ritorno. Di seguito, facendo fuoriuscire la pressione dalla stessa porta, si ottiene il rientro dei pistoni grazie al lavoro svolto dalle molle. Per capire il doppio effetto basta fare riferimento alla Figura 2.10, in cui la porta A è comunicante con la camera interna, mentre la B con le due camere esterne. Dando rispettivamente pressione da una parte o dall'altra otteniamo la rotazione oraria o antioraria. In tutti e due i casi la cremagliera fa girare una ruota dentata a cui è fissato l'albero rotante. Inoltre il momento esercitato dall'albero risulta essere:

$$M = F \cdot \frac{d_p}{2} \quad (2.2)$$

in cui F è la forza della pressione esercitata sul cilindro rotante e d_p il diametro della ruota dentata.

Tramite delle viti si può regolare la corsa dei pistoni, variando l'angolatura della tavola. Inoltre il contatto vite-cilindro è sempre smorzato da una molla o da un piccolo ammortizzatore idraulico.

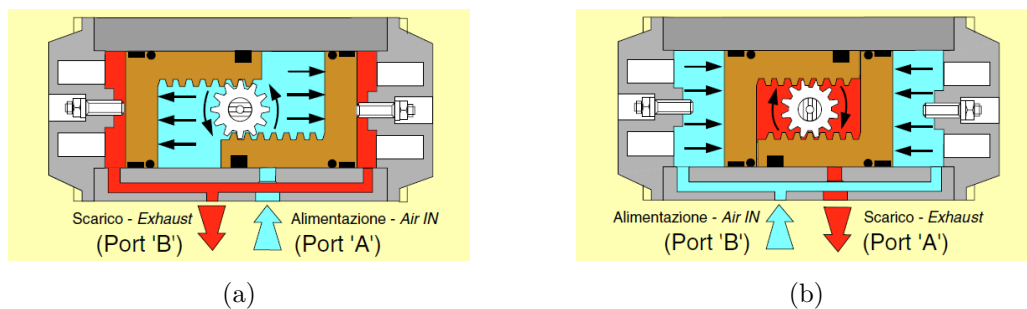


Figura 2.10: Schema del movimento di apertura (a) e chiusura (b) dei pistoni di un attuatore a doppio effetto [22].

Sempre con attuatore a cremagliera si possono trovare modelli con rigidità costruttiva elevata per gestire carichi di centinaia di chili. Alcuni modelli dispongono di una coppia di corone a dentatura frontale, visibili in Figura 2.4, per garantire alta resistenza a forze radiali e a momenti torcenti elevati.

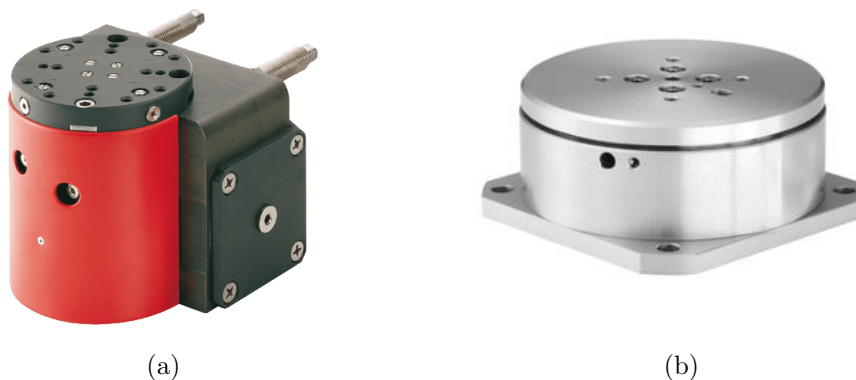


Figura 2.11: Attuatore pneumatico a singola cremagliera Gimatic [23], mod. R20 (a) e modello a paletta Bosh Rexroth [24], mod. RWT45(b).

Alcune tavole sono equipaggiate con un cilindro pneumatico, che costituisce il più semplice ed il più naturale tra gli attuatori pneumatici. Esso è costituito da un cilindro cavo (mantello o camicia), in cui scorre un elemento mobile (pistone), messo in movimento dall'azione del gas compresso. Il pistone porta in rotazione un sistema formato da cremagliera e leva di trascinamento. Più precisamente fa avanzare una cremagliera che si adagia sui denti di una corona dentata calettata sull'asse di rotazione della tavola. Al momento del ritorno del pistone la cremagliera si separa dal gioco dei denti, lasciando ferma la tavola. L'avanzamento risulta essere quindi unidirezionale. Per approfondimenti [25]. Sono tavole come quella di Figura 2.12 adatte a settori industriali che richiedono piccoli trasferimenti rotanti, come foratrici, filettatrici o altre lavorazioni che necessitano di alimentazione automatica di manufatti.

Invece i motori pneumatici a lamelle permettono una movimentazione circolare continua e grazie ad una trasmissione a pignone e corona circolare, il moto viene propagato alla tavola. Questi motori riescono a generare potenze fino a 5 kW . Le tavole che montano motori pneumatici possono essere associate a macchine

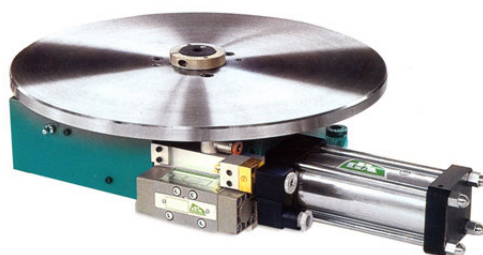


Figura 2.12: Tavola rotante GPA [26], mod. TAR 270, con attuatore pneumatico cilindrico.

CNC, per lavorazioni leggere ad asportazione di truciolo, nelle sbavatrici e nelle levigatrici.

2.3 Tavole con attuatore idraulico

Gli attuatori idraulici che si utilizzano sono fisicamente simili a quelli pneumatici. La differenza sta nel diverso fluido in circolo, che in questo caso risulta essere incomprimibile⁵ e nella pressione di esercizio, fissata intorno ai 30 *bar*. Ciò provoca un aumento dei pesi e dei costi rispetto alle versioni pneumatiche.

Le tavole con attuatore idraulico sono utilizzate a basse velocità angolari, con la capacità di trasmettere in maniera semplice forze rilevanti, in assenza di molti vincoli tipici di altri tipi di trasmissioni meccaniche e con ingombri spesso contenuti. Inoltre la non dipendenza da motori elettrici e la carcassa a tenuta stagna garantiscono l'utilizzo in ambienti umidi. Hanno applicazione nella rotazione di carichi elevati, come il modello di Figura 2.13, come anche in macchine CNC di elevate dimensioni.

Un ulteriore vantaggio è dato dalla facilità con cui risulta possibile regolare il pilotaggio degli attuatori intervenendo su pressione e portata del fluido motore con valvole idrauliche. Il controllo della grandezza da pilotare sarà ora ad anello chiuso, grazie a valvole proporzionali dirette o pilotate. Esse permettono il

⁵La sua densità risulta indipendente dalla pressione a cui è sottoposto.

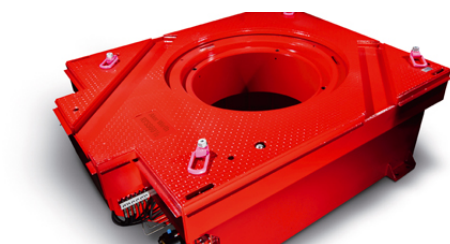


Figura 2.13: Tavola rotante Wirth [27], mod RTSS-75, con attuatore idraulico rotante.

controllo direzionale e di portata di un flusso di olio grazie ad un magnete proporzionale che agisce direttamente sul cassetto della valvola. Lo schema di controllo è in Figura 1.2.

2.4 Sistemi touchdex

La rotazione è dovuta alla pressione di un perno (o barra di avanzamento), che spinge una ghiera dentata, collegata all'albero di rotazione della tavola (Figura 2.14b). I posizionamenti sono dunque fissi e il numero di stazioni viene scelto dal cliente. Il modello di Figura 2.14a ha un angolo minimo di indexaggio di 5° e una massima movimentazione a corsa completa della barra di 45° . È presente una seconda ghiera che assicura l'arresto della tavola mediante un perno.

La loro installazione va fatta sulla tavola porta-pezzo di centri di lavoro multipallet sia orizzontali che verticali. Infatti la pressione della barra è esercitata dall'utensile della macchina CNC.

Hanno il vantaggio di avere un ingombro inferiore rispetto alle versioni motorizzate o idrauliche. La loro struttura è in ghisa, con disco in acciaio temprato. Le versioni con due perni permettono una rotazione sia oraria che antioraria della tavola.

2.5 Movimentazione manuale

Sono tavole utilizzate per il posizionamento di manufatti prevalentemente in lavorazioni manuali. Normalmente il disco rotante è graduato, per una facile lettura

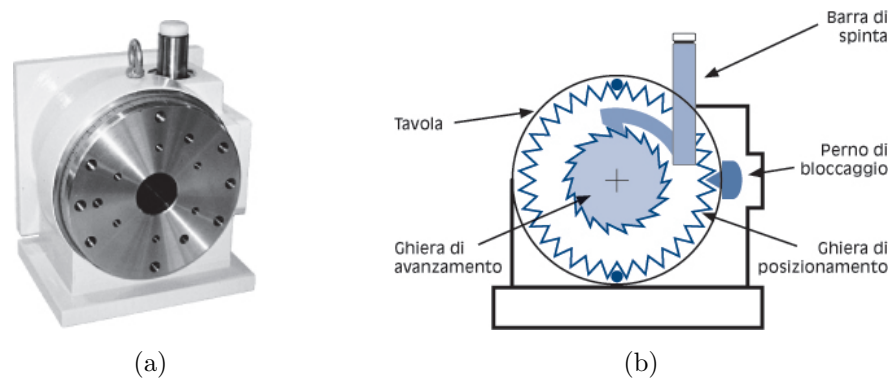


Figura 2.14: Tavola OML Touchdex [28], mod. FDM-150 (a) e rispettivo schema per la trasmissione del moto (b).

dell'angolazione desiderata. La movimentazione e il serraggio vengono eseguiti da un operatore umano. Più precisamente la rotazione è data da una vite senza fine, solidale alla manopola di regolazione, che porta in rotazione una corona dentata, fissata sul disco rotante. Il senso di rotazione può essere sia orario che antiorario.

Alcune di esse sono utilizzate in fresatrici o come base per il manufatto in macchine CNC. Hanno quindi una struttura rigida con basamento in ghisa e disco in acciaio temprato, adatte a carichi assiali elevati e scanalatura per il convogliamento del liquido refrigerante (vedi Figura 2.15). Il loro posizionamento in ambiente lavorativo è per lo più orizzontale. Alcuni modelli possono portare in rotazione carichi fino a 1600 kg.

Altre tavole di dimensioni inferiori e realizzate in acciaio, permettono regolazioni angolari di alta precisione (Figura 2.16). Possono essere montate in qualsiasi posizione e sono inoltre integrabili con slitte lineari, per una movimentazione più accurata. Questi modelli prevedono anche un indicatore di posizione digitale, composto da un sensore induttivo per la misurazione dello spostamento (con precisione fino a $0,1^\circ$) e un display.

Modelli particolari prevedono l'ausilio di cuscinetti pneumostatici (visti nel paragrafo 2.1.4), in modo da ridurre il più possibile l'attrito in fase di rotazione, come Figura 2.17. La pressione è regolata da un gruppo di regolazione che garantisce alla tavola un'alta rigidità.



Figura 2.15: Tavola OMO [29], mod. TG per applicazioni in CNC

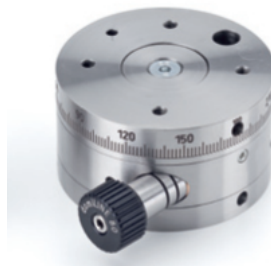


Figura 2.16: Tavola Ief Werner [30], mod. MDV55 per posizionamenti precisi e carichi leggeri.



Figura 2.17: Tavola rotante Microplan [31], TR0475 con sistema di centratura e mandrino autocentrante

2.6 Confronto tra le diverse categorie

Tavole differenti tra loro per tecnologie e dimensioni possono essere confrontate in base ad alcuni parametri, come la precisione nel posizionamento, la capacità di carico e il costo. In questa sezione sono rapportate famiglie di tavole con attuazione elettrica, pneumatica o idraulica.

La precisione migliore è raggiunta sulle tavole con attuatore elettrico, con adeguate risoluzione dell'encoder ottico (decimi di secondo d'arco per i modelli con cuscinetti pneumostatici e accoppiamento diretto). I prezzi di conseguenza raggiungono valori anche elevati (vedere appendice D). Le loro capacità sono trasversali, cioè da alcuni *kg* fino a qualche tonnellata per modelli con moto intermittente.

Gli attuatori pneumatici sono imbattibili per posizionamenti on-off e per costi. Non garantiscono precisioni elevate, ma nei casi estremi arrivano a $5'' \rightarrow 10''$. Configurazioni abbondantemente dimensionate gestiscono fino a qualche quintale.

Le tipologie con movimentazione idraulica sono costose, perché generalmente impiegate per carichi di lavoro gravosi e molto ingombranti. Modelli piccoli però permettono precisioni elevate, anche di $1,5''$.

Le tabella in appendice C.2 mostra le differenze sostanziali tra le diverse energie utilizzabili con i relativi punti di forza e svantaggi.

2.7 Movimentazioni particolari

Il trasferimento rotatorio della tavola può essere affiancato ad altri tipi di movimento, come quello rettilineo o basculante. Questo nasce dalle esigenze di lavorazioni particolari, in cui non sia richiesta solo la rotazione del carico, ma anche una sua ulteriore dinamica. Le principali movimentazioni sono:

- roto-ribaltanti;
- roto-traslanti;
- roto-basculanti.

Le prime sono tavole montate su un basamento o piattaforma ribaltante. Se la lavorazione non è particolarmente pesante può essere anche regolata mano,

come nelle stazioni di saldatura manuali. In questo caso le angolazioni vanno fino a 90° . Servono per mantenere il manufatto in fresature, forature, sagomature e fissare l'angolatura per il taglio circolare, come nell'esempio di Figura 2.18b. In alternativa un comando elettrico o idraulico si fa necessario se le forze sono notevoli (vedi esempio di Figura 2.18a, con portata fino a $120 t$ e angolazione fino ai 40° , 45°). Possono movimentare grandi manufatti di macchine CNC, per operazioni di fresatura e tornitura o nel trattamento dei mozzi del rotore di turbine eoliche.



(a)



(b)

Figura 2.18: Tavola Innse Berardi [32], mod. PTIFC (a) con ribaltamento idraulico e Homge [33], mod. HUT (b) con inclinazione manuale.

I movimenti roto-traslanti assicurano lo spostamento di carichi pesanti e ingombrati nelle operazioni di divisione e di fresatura circolare, tornitura e alesatura su macchine CNC. Esempio in Figura 2.19. Sono molto costose, e vengono usate anche per lavorazioni su pezzi di grandissime dimensioni, come turbine, eliche navali e scocche per motori.

Infine i modelli roto-basculanti sono applicati per lo più in macchine CNC a 4 o 5 assi, realizzando l'inclinazione e la rotazione, oltre ai già presenti movimenti sui tre assi x, y e/o z . Possono realizzare praticamente qualsiasi tipo di sagoma purché la forma delle concavità non vada in interferenza con il mandrino. Possono equipaggiare dei bloccaggi idraulici, resistenti ad elevati momenti torcenti, e motori coppia per un accoppiamento diretto motore-carico. Il posizionamento è continuo e il montaggio è per lo più orizzontale. La Figura 2.20 ne mostra la struttura.



Figura 2.19: Tavola roto-traslante Fibromax [34], mod. NC



Figura 2.20: Tavola roto-basculante Peiseler [35], mod. ZAS

Capitolo 3

Dimensionamento per un caso applicativo

Il caso applicativo considerato in questo capitolo è quello di movimentare un componente di forma particolare in quattro posizioni fondamentali tramite tre step, verificando la compatibilità e la convenienza dell'impiego di una tavola rotante.

I parametri da rispettare sono i seguenti:

- rotazione di un carico di massa $M = 5 \text{ kg}$, posto ad una distanza dall'asse di rotazione di $b = 100 \text{ mm}$. Il suo momento d'inerzia risulta essere $I_l = 0,011215 \text{ kgm}^2$.
- il carico ha una lunghezza di 400 mm ;
- si considera lo step più gravoso relativo alla rotazione, da un angolo di $\theta_i = 135^\circ$ fino a $\theta_f = 270^\circ$, come in Figura 3.1;
- il tempo di movimentazione è di 1 s .
- la tavola deve avere ingombro assiale e radiale più ridotto possibile.
- si suppone un sistema di bloccaggio del componente posto al massimo ad una distanza dall'asse di rotazione di $80 - 100 \text{ mm}$

Il primo dato significativo è la richiesta di un ingombro limitato. Ciò fa escludere tutte le tavole con attuatore idraulico e quelle elettriche a moto intermittente, a causa delle loro dimensioni e dei pesi elevati. Inoltre la necessità di rispettare una ben precisa angolazione elimina le tavole con posizionamenti fissi. A questa categoria appartengono anche quelle con attuatore pneumatico, perché una volta

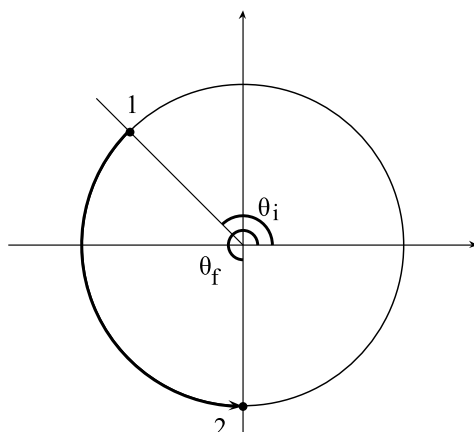


Figura 3.1: Movimento del carico.

compiuta la rotazione richiesta sono obbligate (per ragioni strutturali visibili nel paragrafo 2.2) a tornare in posizione iniziale. Condizione che risulta essere limitata per il nostro processo. Inoltre si prendono in considerazione tavole che abbiano un diametro vicino ai 200 mm.

L'attenzione ricade su queste due categorie:

- tavola elettrica ad accoppiamento diretto con motore coppia;
- tavola elettrica ad accoppiamento diretto con motore passo-passo.

Il profilo del moto è ad accelerazione costante tagliata (Figura 3.2). Il tempo di accelerazione t_a e di decelerazione t_b coincidono e valgono $1/3$ s. Essendo il tempo totale di movimentazione pari ad $T = 1$ s si ricava la velocità e l'accelerazione massima del carico:

$$\omega_{l,max} = \frac{\Delta\theta}{T - \frac{T_a + T_d}{2}} = 3,534 \text{ rad/s} = 33,75 \text{ rpm} \quad \dot{\omega}_{l,max} = \frac{\omega_{l,max}}{T_a} = 10,603 \text{ rad/s}^2 \quad (3.1)$$

Durante la frenata l'accelerazione risulta negativa: $\dot{\omega}_{l,min} = -\dot{\omega}_{l,max}$. Diventa importante il calcolo della coppia resistente dovuta all'azione della forza di gravità, considerando la sua componente positiva in senso orario (visibile in Figura 3.4).

$$C_{rl} = Mg \cos \theta \cdot b \quad (3.2)$$

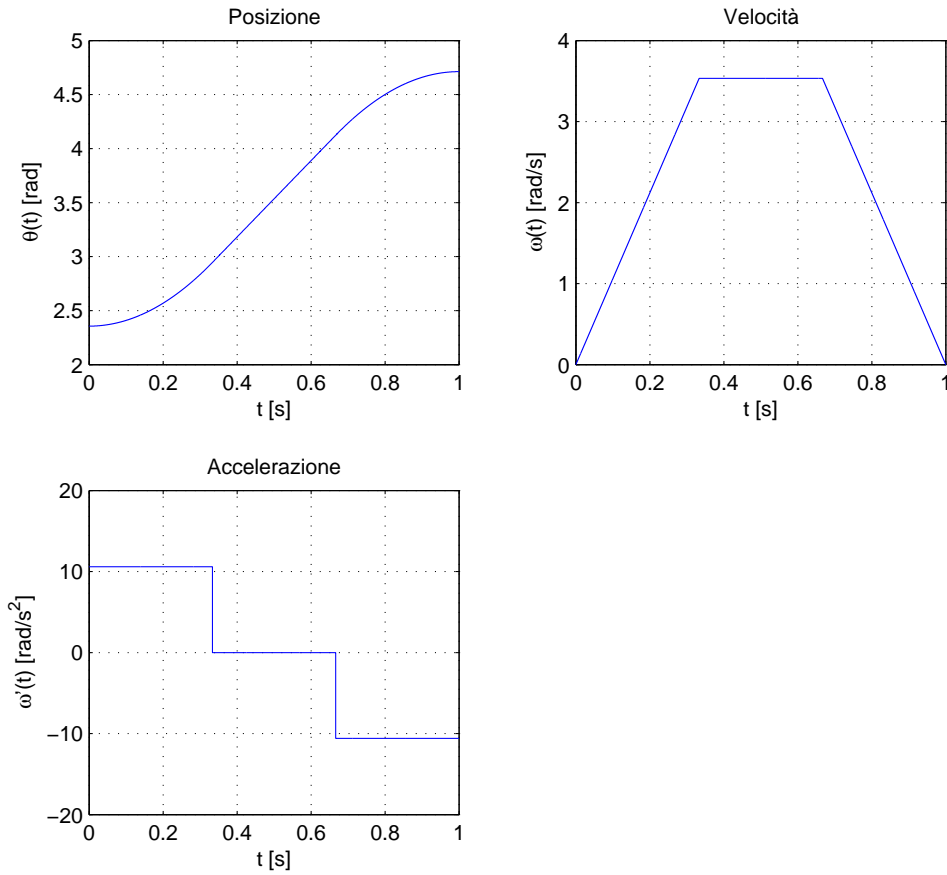


Figura 3.2: Traiettoria del moto a velocità trapezoidale.

Il suo andamento è simile a quello della funzione coseno limitata tra 135° e 270° , come si può vedere in Figura 3.3. Il valore massimo è $C_{rl,max} = |-4,905| Nm$.

L'equazione dinamica del sistema, supponendolo movimentato da un motore in corrente continua è:

$$C_m - \frac{n_r C_{rl}}{\eta} - \left(F_m + \frac{n_r^2 F_l}{\eta} \right) \omega = \left(I_m + \frac{n_r^2 (I_l + I_t)}{\eta} + I_r \right) \dot{\omega} \quad (3.3)$$

I_r , I_m e I_t sono rispettivamente l'inerzia del riduttore, del motore e del disco rotante. La 3.3 è corretta per i motori passo-passo, ma anche per i motori coppia, in seguito ai ragionamenti fatti nel paragrafo B, notando che la coppia erogata dal motore sincrono a magneti permanenti ha la forma B.5, del tutto simile a quella che governa i motori in DC.

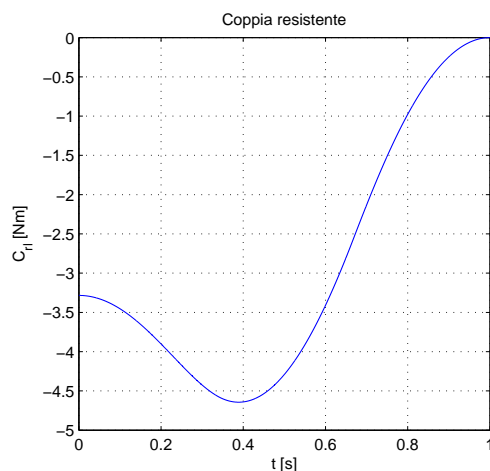


Figura 3.3: Andamento della coppia resistente dovuta al contributo della gravità.

Non considerando i contributi viscosi, si ottiene

$$C_m = \left(I_m + I_r + \frac{n_r^2(I_l + I_t)}{\eta} \right) \dot{\omega} + \frac{n_r C_{rl}}{\eta} \quad (3.4)$$

$\dot{\omega}$ e ω non sono note a priori. Si conosce però l'andamento del carico e che $\dot{\omega} = k\dot{\omega}_l$, in cui $k = 1/n_r$. Sostituendo in 3.4 si ricava la coppia richiesta al motore dalla tavola:

$$C_m = k(I_m + I_r)\dot{\omega}_l + \underbrace{\frac{(I_l + I_t)}{k\eta}}_{C_{l,tot}} \dot{\omega}_l + \frac{C_{rl}}{k\eta} \quad (3.5)$$

Per semplicità $I_{l,tot} = I_l + I_t$.

I modelli su cui si pone l'attenzione sono:

- **Aerotech Alar-150-SP**

- tavola con motore coppia;
- motore Aerotech S-240-43-A, con costante di coppia $k_t = 2,45 \text{ Nm}/A_{rms}$ e $I_m = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ kgm}^2$;
- diametro del disco rotante: 207 mm ;
- ingombro: tavola quadrata di lato 300 mm , con profondità 110 mm ;
- velocità massima: 250 rpm ; accelerazione massima 1330 rad/s^2 ;
- forza assiale massima: 1950 N ; forza radiale massima: 1925 N ;
- accuratezza $\pm 9,7 \mu\text{rad}$ e ripetibilità $\pm 2,4 \mu\text{rad}$;
- coppia continua: $10,7 \text{ Nm}$; coppia massima $42,9 \text{ Nm}$;
- corrente continua $4,4 \text{ A}_{rms}$ e corrente di picco $24,8 \text{ A}_{pk}$;

- massa: 18,55 kg;
- inerzia tavola: $I_t = 0,04 \text{ kgm}^2$;
- foro interno per il passaggio dei cavi;
- il modello non ha freno;
- encoder assoluto con risoluzione $0.18'' \rightarrow 18''$;
- azionamento HP10, con corrente di picco di 10 A (€2000) ;
- prezzo €17950;

- **Hiwin TMS32**

- tavola con motore coppia;
- il motore ha costante di coppia $k_t = 3,5 \text{ Nm}/A_{rms}$ e $I_m = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ kgm}^2$;
- diametro del disco rotante: 170,5 mm;
- ingombro: tavola cilindrica di raggio 200 mm e altezza 155 mm
- velocità massima: 1500 rpm per 1 s; velocità nominale 700 rpm;
- forza assiale massima: 15000 N; forza radiale massima: 12000 N;
- accuratezza $\pm 50''$ e ripetibilità $\pm 2''$;
- coppia continua: 10 Nm; coppia massima per 1 s 25 Nm;
- corrente continua $3 A_{rms}$ e corrente di picco $7,5 A_{rms}$;
- massa: 15 kg;
- inerzia tavola: $I_t = 0,014 \text{ kgm}^2$;
- foro interno per il passaggio dei cavi;
- freno pneumatico installato nella base;
- encoder incrementale a 3600 divisioni, oppure assoluto 2048 suddivisioni;
- classe di protezione: IP40, opzionalmente IP65.

- **Oriental Motor DG200-ASMC**

- tavola con motore passo-passo;
- rapporto di riduzione 1 : 18;
- diametro del disco rotante: 170 mm;
- dimensioni della sola tavola: 200x200x64 mm. Con il motore la profondità è maggiore: 64 \rightarrow 225 mm;
- limite della coppia continua 20 Nm; coppia massima permessa 50 Nm;
- velocità massima: 110 rpm;
- massima forza di carico 4000 N e massimo momento di carico 100 Nm;
- massa: 9,9 kg;
- inerzia tavola: $I_t = 0,113344 \text{ kgm}^2$;
- foro interno per il passaggio dei cavi;
- freno elettromeccanico nella parte posteriore del motore;
- encoder con risoluzione da $0.04^\circ \rightarrow 0,002^\circ$;
- azionamento incluso;
- classe di protezione: IP40;
- prezzo di listino: €2912.

Ora bisogna valutare i due casi seguenti:

- **Motori coppia:** Come già ribadito precedentemente se la tavola ha motore coppia, il carico è collegato direttamente al rotore e si considera $n_r = k = 1$, $\eta = 1$ e I_r nulla. La condizione di lavoro più gravosa si ha nel punto in cui C_{rl} è massima, in corrispondenza $\theta_m = 180^\circ$ (Figura 3.4). Inoltre in quel punto l'accelerazione è nulla (si annullano i contributi inerziali del motore e del carico). La Figura 3.5a confronta la coppia $C_{l,tot}$ delle due tavole, facendo notare come il loro andamento sia identico se l'accelerazione è nulla. Dall'equazione 3.5 si ricava che $C_{m,max1} = C_{rl,max} = 4,905 Nm$. L'andamento di Figura 3.5b è C_m della tavola Aerotech e Hiwin.
- **Motori passo-passo:** introduce $k = 18$. Possiamo stimare un rendimento della trasmissione alto, perché l'accoppiamento avviene tramite dentatura, ma diretto sulla tavola ($\eta = 0,95$) e I_r nulla. Inoltre si trascura I_m in prima approssimazione, visto l'elevato valore d'inerzia della tavola. Grazie al riduttore il motore *sente* molto di meno la dinamica del carico e del disco rotante. Questo perché i loro contributi sono divisi per k (Figura 3.5c). Il momento critico risulta lo stesso del caso precedente, quindi $C_{m,max2} = C_{rl,max}/(k\eta) = 0.287 Nm$ (Figura 3.5d).

La potenza motrice e quella massima al motore sono:

$$P_{mot} = \frac{C_m \omega_l}{n_r} \quad P_{m,max} = \max(|P_{mot}|) \quad (3.6)$$

Con le prime due tavole $P_{m,max} = 17,34 W$, con potenza motrice in Figura 3.6a. Oriental motor ha $P_{m,max} = 18,26 W$ e potenza motrice di Figura 3.6b.

Un altro dato importante è la corrente richiesta dalla tavola. Grazie ad esso si risale alla coppia di picco, utile anche a scegliere il giusto modello di azionamento, come in [36].

$$I = \frac{C_m}{k_t} \quad (3.7)$$

È possibile calcolarla solo per le due tavole con *torque motor*, perché nei documenti della DG200-ASMC non è disponibile la costante di coppia del motore passo. L'andamento della corrente richiesta è visibile in Figura 3.7. I valori di picco sono calcolati con $C_{m,max}$. Risultano essere $I_{max1} = 2 A$ per Aerotech e

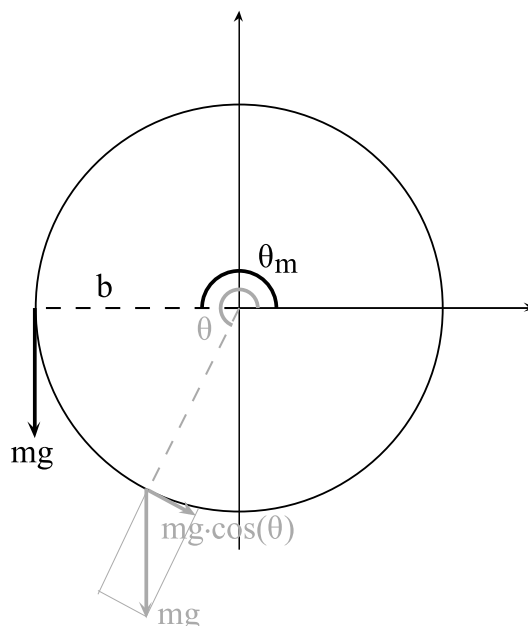


Figura 3.4: Componente della forza di gravità che agisce sul carico ($mg \cdot \cos(\theta)$, in grigio) e caso con la sua maggiore influenza ($\theta = \theta_m$).

$I_{max2} = 1,4 A$ per Hiwin. In tutti e due i casi si è usato il valore del coefficiente di coppia in Nm/A_{rms} .

In conclusione tutti i modelli rispettano la coppia necessaria richiesta dall'applicazione. Tuttavia la tavola Oriental Motor (Figura 2.9a) è la soluzione che presenta i maggiori vantaggi:

- caratteristiche di ingombro e peso ridotte;
- coppia massima di tenuta abbondante per l'applicazione ($50 Nm$);
- prezzo di listino inferiore;
- minore peso.

L'andamento della curva coppia/velocità della tavola Oriental Motor DG200-ASMC in Figura 3.8, ci permette di verificare se il luogo dei carichi è all'interno della zona di funzionamento garantita. Bisogna notare però che il limite superiore di coppia ammissibile si riferisce al limite meccanico dell'apparato di riduzione ad ingranaggi. Nel nostro caso la velocità massima raggiunta è di $33,75 rpm$ e la coppia da considerare è il massimo contributo della forza di gravità che agisce sul carico, quindi $C_{rl,max} = 4,905 Nm$. La zona evidenziata in rosso rappresenta i con-

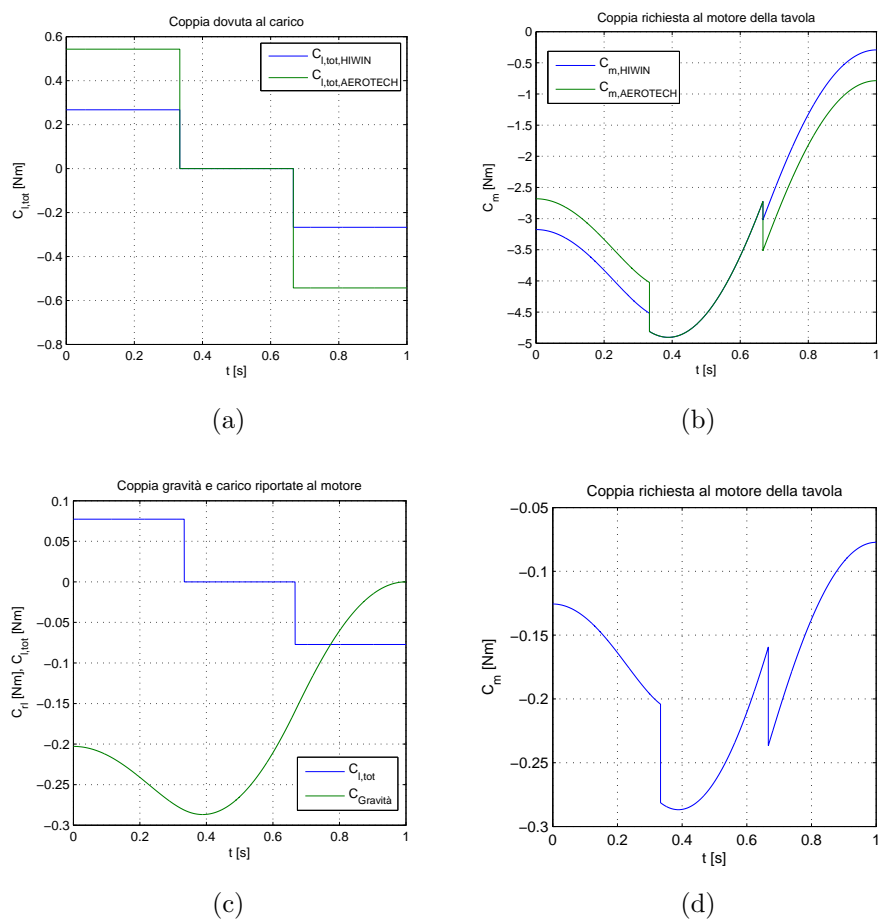


Figura 3.5: (a) è il paragone tra le coppie del carico percepite dalle tavole Aerotech e Hiwin, mentre (b) è il confronto tra le loro C_m ; (c) è la coppia resistente e quella dovuta alla gravità percepite dal motore della tavola Oriental Motor e infine (d) è la sua C_m .

fini raggiunti dall'applicazione studiata precedentemente ed è abbondantemente entro i limiti.

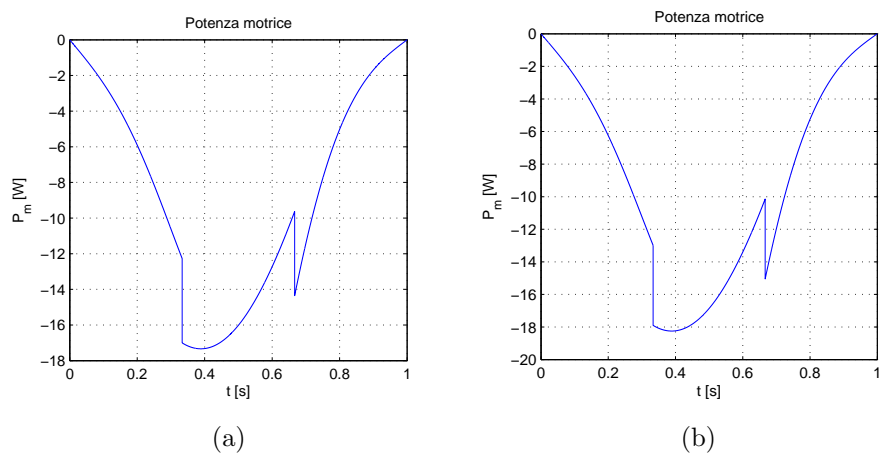


Figura 3.6: Potenze motrici per le prime due tavole (a) e per il modello Oriental Motor (b).

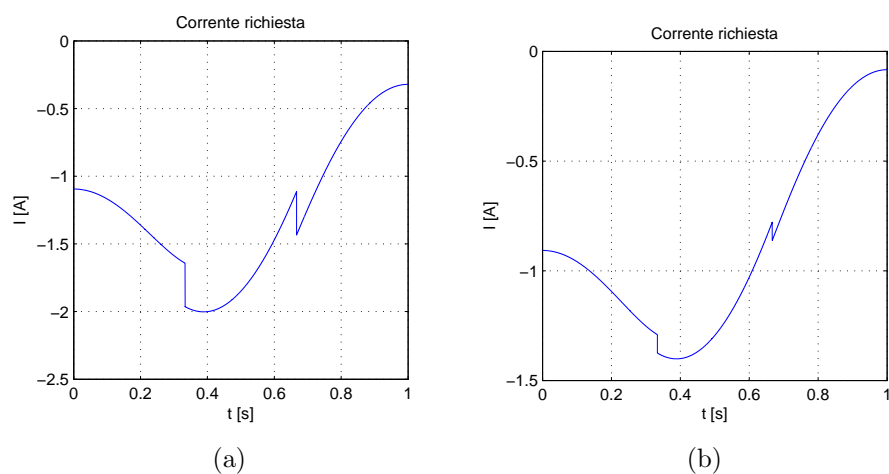


Figura 3.7: Corrente richiesta per Aerotech Alar-150-SP (a) e per Hiwin TMS32 (b).

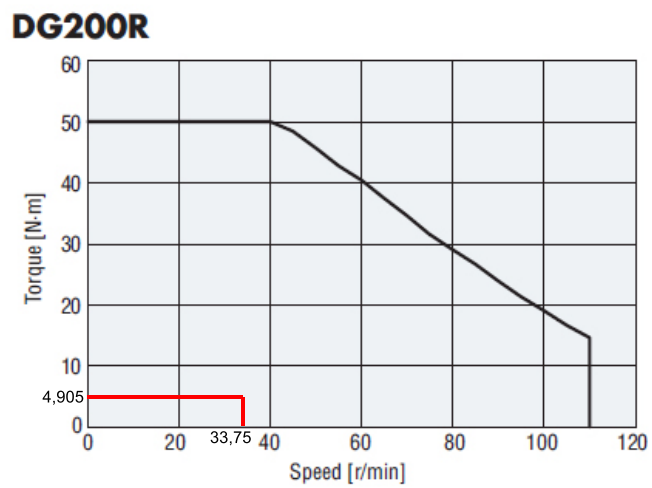


Figura 3.8: Curva coppia/velocità della tavola Oriental Motor DG200-ASMC [20].

Conclusioni

Questo elaborato mette in luce alcuni vantaggi dovuti all'utilizzo di una tavola rotante. Si è notato come esse trovino applicazione in qualsiasi progettazione e ambiente lavorativo industriale. Sono adatte ad inerzie e ingombri elevati, fino a posizionamenti con notevoli precisioni. Però l'uso è giustificato se il processo richiede un punto d'appoggio stabile durante la rotazione, che a volte solo il disco della tavola rotante può garantire. Il costo aumenta per modelli con rigidità strutturale o con coppia nominale elevata. Per cui si rende necessario valutare attentamente la gamma disponibile con un dimensionamento sul carico, considerando anche il contesto applicativo e l'ambiente circostante alla tavola. Questo vuol dire ponderare i disturbi, le forze esterne e i residui di lavorazione che possono danneggiare la macchina.

Appendice A

Glossario

In questa sezione sono presenti il glossario dei termini usati e un elenco di chiavi di ricerca (*keyword*), con relativa traduzione italiana, utili per il reperimento degli argomenti sui motori di ricerca internazionali.

A.1 Glossario di riferimento

- **CNC** - *computer numerical control*
Macchine per la lavorazione di manufatti meccanici, il cui movimento durante la lavorazione è comandato da un computer integrato nella macchina stessa.
- **PLC** - *Programmable Logic Controller*
Comanda l'impianto generando segnali in risposta alle informazioni ricevute dai sensori. Le funzioni da automatizzare sono realizzate da un programma.
- **Profibus** - *Process Field Bus*
Bus di campo per la comunicazione tra apparecchiature nell'automazione industriale e di processo.
- **CANopen**
È un protocollo di comunicazione per sistemi integrati.

A.2 Chiavi di ricerca

Inglese	Italiano
rotary table	tavola rotante
rotary index table	tavola rotante indicizzata
rotary actuator	attuatore rotante
direct drive	accoppiamento diretto
rotary stage	fase rotante
handling materials	spostamento di materiali
assembly automation	automazione per l'assemblaggio
flexible manufacturing system	sistema di produzione flessibile

Appendice B

Caratteristiche dei motori coppia e modello matematico

Oltre alle informazioni sui motori coppia viste nel paragrafo 2.1.4 è corretto introdurre anche altri concetti.

- Il tipo di motore trifase (sincrono, magneti permanenti) preso in esame ha un collegamento a stella tra le fasi. La forza contro-elettromotrice in ogni fase ha un andamento sinusoidale. Questo è dovuto al fatto che gli avvolgimenti trifase sullo statore sono disposti in maniera circolare tra le cave del rotore. Le fasi risultano sfasate di $\frac{2\pi}{3}$ e sono alimentate contemporaneamente.
- La coppia è proporzionale alla risultante delle correnti sinusoidali delle 3 fasi. Per fare in modo che essa sia costante nel tempo è necessario conoscere la posizione del rotore in ogni istante e utilizzare questa informazione per comandare l'inverter. Affinché la coppia sviluppata sia massima, il campo magnetico risultante delle correnti dovrà formare un angolo prossimo a 90° con il campo magnetico rotorico (che è quello di eccitazione, dovuto ai magneti permanenti). Questo sfasamento si mantiene costante e i motori prendono il nome di *sincroni*.
- Hanno un andamento coppia/velocità simile a quello dei motori in corrente continua.
- Permettono una facile dispersione del calore, essendo gli avvolgimenti posizionati sullo statore. Comunque bisogna lavorare in una zona di continuità

per il motore, evitando così eccessivi riscaldamenti. Uno dei pericoli della temperatura e della corrente elevate è quello della smagnetizzazione dei magneti permanenti (come si può notare da [37]).

Si parte da un modello di motore con rotore isotropo (magnet permanenti non superficiali ma immersi nel rotore). Come specificato in [38], le equazioni generali di bilancio delle tensioni di fase u_a, u_b e u_c statoriche sono:

$$u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad u_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad u_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (\text{B.1})$$

In cui e_i rappresenta la forza contro-elettromotrice della fase i -esima, R ed L rispettivamente la resistenza e induttanza del motore. Siccome tutte le grandezze in gioco sono sinusoidali, si utilizza il calcolo fasoriale¹:

$$\mathbf{u}^s = R\mathbf{i}^s + L \frac{d\mathbf{i}^s}{dt} + \mathbf{e}^s = R\mathbf{i}^s + L \frac{d\mathbf{i}^s}{dt} + j\omega_{me}\lambda_{mg}^s = R\mathbf{i}^s + L \frac{d\mathbf{i}^s}{dt} + \Lambda_{mg}e^{j\theta_{me}} \quad (\text{B.2})$$

Λ_{mg} è il massimo flusso concatenato causato dal magnete in ciascuna fase. ω_{me} rappresenta la velocità elettro-meccanica, derivata da θ_{me} , che è lo sfasamento rispetto al sistema di riferimento stazionario, che si basa sull'angolatura tra l'asse della fase e il campo magnetico. Questo sistema di riferimento è sincrono al rotore e ci permette di calcolare agevolmente le equazioni del motore. Da B.2 si ricava la componente reale ed immaginaria:

$$u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_{me}Li_q \quad u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_{me}Li_d + \omega_{me}\Lambda_{mg} \quad (\text{B.3})$$

Applicando alle B.3 il bilancio di potenza si ottiene:

$$(u_d i_d + u_q i_q) dt = (Ri_d^2 + Ri_q) + \underbrace{\omega_{me}\Lambda_{mg}i_q}_{P} dt \quad (\text{B.4})$$

Il terzo fattore è quello che ci interessa di più perché rappresenta la potenza elettrica che viene convertita in potenza meccanica, dalla quale otteniamo:

$$C = P \cdot \omega_{me} = \frac{3}{2}p\Lambda_{mg}i_q = k_t i_q \quad (\text{B.5})$$

¹Permette di associare alle variabile sinusoidale isofrequenziale $a(t) = A_M \sin(\omega t + \alpha)$ un numero complesso $\mathbf{a} = (A_M/\sqrt{2})e^{j\alpha}$. Per approfondimenti [39]

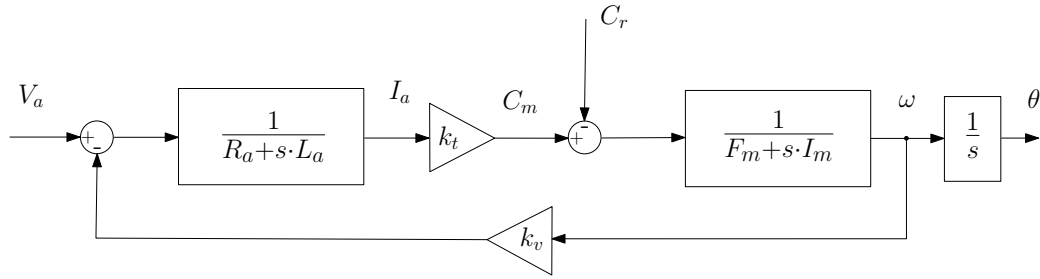


Figura B.1: Schema a blocchi del motore in cc.

dove p è il numero di coppie polari presenti sullo statore e k_t la costante di coppia, presente nei manuali dei motori coppia (paragrafo C.1). Risulta che la coppia dipende solo dalla componente i_q della corrente, cioè quella in quadratura con il flusso concatenato dovuto ai magneti permanenti.

Se inoltre si aggiunge alla B.5 l'equazione meccanica ottengo la stessa dinamica diretta che governa i motori in DC:

$$C_t = I_m \dot{\omega}_m(t) + F_m \omega_m(t) + C_r(t) \quad (\text{B.6})$$

con C_r coppia resistente e F_m coefficiente di attrito viscoso.

Da B.3 si ottiene i_q facendo la trasformata di Laplace:

$$U_q(s) = I_q(s)(R + sL) + \Omega_{me}(s)(LI_d + \Lambda_{mg}) \quad (\text{B.7})$$

La forza contro-elettromotrice dipende sempre dalla velocità di rotazione. Supponendo il contributo $LI_d + \Lambda_{mg}$ costante nel tempo, si può approssimare il modello del motore sincrono a magneti permanenti con quello delle macchine in corrente continua (Figura B.1)

Appendice C

Parametri e informazioni aggiuntive

C.1 Dati tipici dei motori coppia

I costruttori di tavole con un accoppiamento diretto, realizzato tramite motore coppia, mettono a disposizione dei dati tecnici riguardanti il motore (oltre a quelli visti nel paragrafo 1.3). Essi sono riportati in tabella C.1.

C.2 Differenze tra le trasmissioni di potenza

Le energie con cui sono alimentate le tavole rotanti possono essere confrontate tra loro. La tabella C.2 relaziona i diversi tipi di attuatori, dando un giudizio qualitativo su alcune caratteristiche di trasmissione, moto e movimentazione.

Per una ricerca ulteriore fare riferimento a [40].

Tabella C.1: Dati significativi dei motori sincroni a magneti permanenti

Simbolo	Unità di misura	Significato
C_p	Nm	coppia di picco
C_n	Nm	coppia nominale continuativa
I_n	A_{rms}	corrente nominale
I_{pk}	A_{rms}	corrente di picco
C_s	Nm	coppia di stallo, disponibile in partenza
k_v	$V_{rms} \cdot s$	costante di forza contro elettromotrice
k_t	Nm/A_{rms}	costante di coppia
R	Ω	resistenza elettrica
L	H	induttanza del motore
ω_{max}	rad/s	velocità massima
R_{th}	$^{\circ}C/W$	resistenza termica
n_p		numero dei poli magnetici
J_m	$kg \cdot m^2$	momento d'inerzia del rotore
m	kg	massa motore
T	$^{\circ}C$	temperatura di prova

Tabella C.2: Rapporto fra diverse trasmissioni di potenza.

	Oleodinamica	Elettrica	Pneumatica
Trasmissione	limitata e molto lenta	veloce e su lunghe dist.	limitata e lenta
Distanza economica	fino a 100 m ca	senza limiti	fino a 1000 m ca
Velocità di trasmissione	2 – 6 m/s ca	300.000 km/s ca	10 – 50 m/s ca
Capacità di accumulazione	limitata	difficile	semplice
Costi di energia	medi	bassi	elevati
Movimenti rettilinei	molto semplice	possibile ma costoso	molto semplice
Velocità di lavoro	1 m/s ca	10 m/s ca	4 m/s ca
Concentrazione di potenza	molto elevata	bassa	bassa
Forze ottenibili	molto elevate	elevate	limitate (20000 N ca)
Corse raggiungibili	elevate (oltre 10 m)	elevate	limitate (2 m max)
Variazione delle forze	semplice e precisa	semplice e precisa	semplice
Variazione di velocità	semplice e precisa	semplice e precisa	semplice
Movimenti rotatori	semplice	semplice	semplice
Velocità angolare	limitata	elevata	elevata
Coppia ottenibile	molto elevata	elevata	bassa
Variazione regimi di giri	semplice e precisa	semplice e precisa	molto semplice
Variazione della coppia	semplice e precisa	semplice e precisa	semplice
Collegamenti	onerosi	semplici	molto semplice
Sicurezza contro sovraccarico	completa e intrinseca	completa	completa e intrinseca

Azionamento

Appendice D

Ricerca di mercato

I modelli che ho preso in considerazione ed elencati nella seguente tabella sono di solito i primi di una certa famiglia di tavole rotanti. Hanno quindi dimensioni di ingombro, pesi, rigidità e costi inferiori rispetto alle sorelle maggiori. La tabella D.1 mostra la legenda per leggere correttamente alcune informazioni. Per esempio la trasmissione *Vite, Corona + Hirth* indica una *Vite* senza fine che porta in rotazione una *Corona* dentata fissata sull'asse di rotazione della tavola, con l'aggiunta di corone con dentatura frontale (*Hirth*) per il serraggio.

Tabella D.1: Legenda

Colonna	Simbolo	Significato
Trasmissione	Vite	vite senza fine
	Vite su rulli	vite senza fine che impegna i rulli ciechi della tavola
	Corona	corona dentata
	Crem	cremagliera
	2Crem	doppia cremagliera
	Pignone	pignone
	Camma cilind	camma cilindrica (intermittore a tamburo)
	Camma gobl	camma globoidale (intermittore globoidale)
	Camma piana	camma piana (intermittore piano)
	Hirth	dentatura frontale piana
	Cusc pneu	cuscinetti pneumostatici
	Barra	barra di spinta
	Ghiera	ghiera dentata
	Mot coppia	accoppiamento diretto con motore coppia
	Mot passo	accoppiamento diretto con motore passo-passo
	Att pneu rot	attuatore pneumatico rotante
	Att pneu cil	attuatore pneumatico cilindrico
	Att pneu pal	attuatore pneumatico rotante a paletta
	Mot pneu	motore pneumatico
	Att idro rot	attuatore idraulico rotante
Att idro cil	attuatore cil cilindrico	
Mot idro	motore idraulico	
Rotazione	O	senso orario
	A	senso antiorario, se tra parentesi è solo su richiesta
Montaggio	O	orizzontale
	V	verticale

Movimento	Attuatore	Posizionamenti	Trasmissione	Rotazione	Montaggio	Foro centrale	Costruttore	Sito internet	Prezzo	
Rotante	Manuale	Qualsiasi	Vite, Corona	O & A	O & V	No	Ief Werner, MDV-55	http://www.ief-werner.de		
			Corona, Pignone	O & A	O	Si	Omo, TG-200	http://www.omograssi.it/	€1040	
			Barra, Ghiera	O	O & V	No	Microplan, TR-0475	http://www.microplan-group.com	€2840	
	Touchdex	Fissi	Camma cilind	O & A	O o V	Si	Si	Oml, FDM-150	http://www.omlspa.it/	€4733
								Weiss, TC-120G	http://www.schlu.com	
								Colombo Filippetti, IR-201	http://www.cofil.it	€3000
								Weiss, TR-750 & 2200	http://www.schlu.com	
								Colombo Filippetti, RIGIDIAL-9	http://www.cofil.it	€3500
								Mcpi, T35	http://www.mcpi.fr	€3800
				Vite, Corona + Hirth	O & A	O o V	Si	Fibro, Fibrotakt 11.16.3	http://www.fibro.de	
								Euroma, T.HH.700	http://www.euromacchine.com	
								Weiss, CR-2000C	http://www.schlu.com	
								Fibro, Fibrotor EM.NC.10	http://www.fibro.de	
								Weiss, NC150T-A	http://www.schlu.com	
								Dorian Tool, TGV160-i	http://www.doriantool.com	
Fibro, Fibroplan NC1.02								http://www.fibro.de		
Omr, TGOPT1416								http://www.omrvera.it	€70000	
Velmex, B4800TS, B5990TS								http://www.velmex.com		
Elettrico	Qualsiasi	Mot coppia	O & A	O & V	Si	Si	Hiwin, TMS03 & TMS7CL	http://www.hiwin.com		
							Danaher Motion, MicroTheta-5	http://www.microtech.co.uk		
							Weiss, ST075-1	http://www.schlu.com		
							Weiss, TO150C	http://www.schlu.com		
							Fibro, Fibrodyn DA1.02	http://www.fibro.de		
							Lcm, TDE-1V270	http://www.lcmitalia.it	€18500	
							Omr, TGOTS800DD	http://www.omrvera.it	€35000	
							Mager Air Bearing, TGH-180-036	http://www.mager-ab.com		
							Aerotech, ABR5-150MP	http://www.aerotech.com		
							ABTech, AT-100	http://www.abtechmfg.com		
							Oriental motor, DG-200-ASAC	http://www.orientalmotor.it	€2912	
							Ief Werner, DT 140	http://www.ief-werner.de		
Microplan, TM0479	http://www.microplan-group.com	€10200								

Movimento	Attuatore	Posizionamenti	Trasmissione	Rotazione	Montaggio	Foro centrale	Costruttore	Sito internet	Prezzo												
Rotante	Pneumat.	Fissi	Att pneu rot, 2Crem, Pignone + Hirth	O	O & V	No	Gimatic, R-20	http://www.gimatic.com	€580, 9												
						No	Schunck,, SRU-60-W	http://www.it.schunck.com	€2206, 44												
						Si	Festo, DHTG-65	http://www.festo.com	€857, 76												
						No	Rexroth Bosh Group, RWT-45	http://www.boschrexroth.com													
						No	Eurooma, T.R.222	http://www.euromannacchine.com													
						Si	Eurooma, T.H.350	http://www.euromannacchine.com													
						Si	Eurooma, T.H.S.350	http://www.euromannacchine.com													
						No	Schunck, SFL 25	http://www.it.schunck.com	€347, 27												
						No	Gpa, TAR-160	http://www.gpa-automation.com	€989												
						O	Maape, TRP 160	http://www.maape-fp.it	€1013												
						O (A)	Fibro, Fibrotor EM.NC.10	http://www.fibro.de													
						O & A	Fibro, Fibrotor EM.NC.10	http://www.fibro.de													
						O & A	Eurooma, T.RI.320	http://www.euromannacchine.com													
						O (A)	Exact, CT-200	http://www.exactmachinery.com													
						Idraulico	Manuale	Fissi	Att idro rot, 2Crem, Pignone + Hirth	O & A	O	No	Eurooma, T.HI.350	http://www.euromannacchine.com							
Si	Exact, CT-200	http://www.exactmachinery.com																			
No	Fibro, Fibrotakt size 2	http://www.fibro.de																			
Si	Fibro, Fibrotor EM.NC.10	http://www.fibro.de																			
Si	Wirth, RTSS 75	http://www.wirth-erkelanz.de																			
O & A	Fibro, Fibrotor EM.NC.10 & 20	http://www.fibro.de																			
O & A	Homge, HUT-300	http://www.homge.com																			
O & A	Nikken, NST500	http://www.nikken-world.com																			
O & A	Automa 2000, SPS 30	http://www.automa2000.com	€1080																		
O & A	Mecome, TRK35	http://www.mecome.it																			
O & A	Demmeler, DRAT-2500	http://www.demmeler.com																			
O & A	Bost, BMGL RT-25	http://www.bost.es																			
O & A	Flis-Sistemi, MRD	http://www.flisistemi.it																			
Rotante	Elettrico	Qualsiasi	Pignone, Corona + Trasl: Vite	O & A	O							Si & No	Demmeler, DRLTN 1200	http://www.demmeler.com							
												Si	Bost, BMGL RT-25	http://www.bost.es							
						Si & No	Flis-Sistemi, MRD	http://www.flisistemi.it													
						Si	Demmeler, DDRCLT 500	http://www.demmeler.com													
						O	Peiseler, ZAS-125	http://www.peiseler.de	€20000												
						O & A	Dorlan Tool, T5X160	http://www.dorlanool.com													
						O & A	Peiseler, ZASD-100	http://www.peiseler.de	€128000												
						O & A	Nikken 5AX-DD200AF	http://www.nikken-world.com													
						Rotante	Elettrico	Qualsiasi	Mot coppia + Trasl: Vite	O & A	O	Si & No	Demmeler, DRLTN 1200	http://www.demmeler.com							
												Si	Peiseler, ZAS-125	http://www.peiseler.de	€20000						
												Si	Dorlan Tool, T5X160	http://www.dorlanool.com							
												Si	Peiseler, ZASD-100	http://www.peiseler.de	€128000						
												O & A	Nikken 5AX-DD200AF	http://www.nikken-world.com							
												Rotante	Elettrico	Qualsiasi	Mot coppia + Trasl: Vite	O & A	O	Si & No	Demmeler, DRLTN 1200	http://www.demmeler.com	
																		Si	Peiseler, ZAS-125	http://www.peiseler.de	€20000
Si	Dorlan Tool, T5X160	http://www.dorlanool.com																			
Si	Peiseler, ZASD-100	http://www.peiseler.de	€128000																		
O & A	Nikken 5AX-DD200AF	http://www.nikken-world.com																			

Bibliografia

- [1] A. Pareschi, *Impianti industriali*. Bologna: Progetto Leonardo, 2007.
- [2] D. Falcone and F. D. Felice, *Progettazione e gestione degli impianti industriali*. Milano: Hoepli, 2008.
- [3] *Catalogo Tavole IR*, Colombo Filippetti, <http://www.cofil.it>.
- [4] R. Faglia and G. Incerti, “Dinamica di tavole rotanti a moto intermittente: un approccio di studio innovativo,” *Brescia ricerche*, vol. 20, pp. 8–12, 1997.
- [5] V. Cossalter, *Meccanica applicata alle macchine*. Padova: Ed. Progetto, 2004.
- [6] M. Carricato, *Appunti di meccanica delgi azionamenti*. Università degli studi di Bologna, 2009.
- [7] http://www.schlu.com/prodotti/dettaglio/tavole_rotanti/divisioni_fisse/tc.
- [8] *Brochure Motori Autofrenanti*, Elprom, <http://www.emespa.it/website2012/home.php>.
- [9] *Fibrotor, Electro-mechanical Indexing Table*, Fibro, 2007, <http://www.fibro.de/it/home-it.html>.
- [10] R. Bussola and A. Menegolo, *Componenti elettronici e meccanici nell'autosmazione industriale*. Università degli studi di Brescia.
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Geneva_drive.
- [12] *Fibrotakt, Rotary Indexing Table with Face Gear*, Fibro, 2007, <http://www.fibro.de/it/home-it.html>.

- [13] G. Incerti, "Pseudo-polynomial motion commands for vibration suppression of belt-driven rotary platforms," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, pp. 61–67, 2010.
- [14] *Rotary Tables & Visers catalog*, Dorian Tool,
<http://www.doriantool.com/doriantool/index.php>.
- [15] <http://machinedesign.com/article/torque-motors-do-the-trick-0403>.
- [16] <http://hiwin.com/html/linear%20motors/tms.html>.
- [17] *Catalogo Lcm*, Lcm, http://www.lcmitalia.it/_contatti/index.asp?menu=1.
- [18] http://www.mager-ab.com/ita/20-20_tavoleTGH.asp.
- [19] <http://www.aerotech.com/product-catalog/stages/rotary-stages/abrs.aspx>.
- [20] *Hollow Rotary Actuators, DG Series catalog*, Oriental Motor,
<http://www.orientalmotor.it/Home/>.
- [21] A. Pareschi, *Impianti meccanici per l'industria*. Bologna: Progetto Leonardo, 2009.
- [22] *Pneumatic rotary actuators AP-APM Series*, Sirca International,
<http://www.sircainternational.com/index.php>.
- [23] <http://www.gimatic.com/>.
- [24] http://www.boschrexroth.it/country_units/europe/italy/it/index.jsp.
- [25] http://www.mape-fp.it/prodotti/tavole/it_tav_frame.html.
- [26] <http://www.gpa-automation.com/automazione/tavolerotanti/?lang=it&cl=r>.
- [27] http://www.wirth-erkelenz.de/fileadmin/resources/pdf/Oil_and_Gas/RTSS75.pdf.
- [28] http://www.omlspa.it/cataloghi/IT/15_1_01_touchdex.pdf.
- [29] http://www.omograssi.it/pdf/depliant_tg.pdf.
- [30] http://www.ief-werner.de/downloads/P_domiLINE_DE_EN.pdf.

-
- [31] <http://www.microplan-group.com/mpg/IT/TR.html>.
- [32] *Catalogo Aries Zenith*, Innse Berardi,
<http://www.camozzimachinery.com/en/camozzigroup/machine-tools/home>.
- [33] <http://www.homge.com.tw/dividing.html>.
- [34] <http://www.fibro.de/it/tavole-rotanti/gruppi-di-prodotti.html>.
- [35] <http://www.peiseler.de/index.php?id=34&L=2>.
- [36] G. Legnani, M. Tiboni, R. Adamini, and D. Tosi, *Meccanica degli Azionamenti Vol. 1*. Bologna: Ed. Esculapio Bologna, 2008.
- [37] <http://www.torquetec.de/italienisch/index.htm>.
- [38] S. Bolognani, *Dispense di azionamenti elettrici 1*. Università degli studi di Padova, 2008.
- [39] M. Guarnieri, *Elementi di elettrotecnica circuitale*. Padova: Ed. Progetto, 2012.
- [40] http://www.boschrexroth.it/country_units/europe/italy/it/index.jsp.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il prof. Giulio Rosati per la disponibilità e l'ing. Fabio Oscari per i suggerimenti sempre tempestivi. Un grazie di cuore va alla mia famiglia, per avermi sostenuto con pazienza in questi anni di studio.