

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



PIANIFICAZIONE, PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UN ROBOT DI AVVITATURA STAND-ALONE, CONTROLLATO IN POSIZIONE, VELOCITA' E COPPIA NEL MOTION CONTROL

Relatore: Prof. Francesco CASTELLI DEZZA

Correlatori: Ing. Roberto SICCARDI

Ing. Marco FAENZA

Tesi di Laurea Magistrale di:

Vito Nicola NESCA

Matricola 801544

Anno Accademico 2013/2014

*Ad Anna Claudia,
questi anni non sarebbero stati gli stessi
se non ci fossi stata tu.*

*Un ringraziamento particolare
va alla mia famiglia e ai sacrifici fatti affinché
il Nostro sogno potesse diventare realtà.*



Indice

Elenco delle Figure	6
Elenco delle Tabelle	10
Introduzione	11
Abstract	16
Abstract	17
CAPITOLO 1	18
MOTION CONTROL PER L’AUTOMAZIONE INDUSTRIALE	18
1.1 Funzionalità e set di comandi	18
1.2 Carico computazionale del Motion Control	19
1.3 Inseguimento di traiettorie e gestione dei sincronismi	21
1.4 Benchmarking di motion control	23
CAPITOLO 2	24
MODELLIZZAZIONE DEI MOTORI	24
AC-BRUSHLESS	24
2.1 Generalità motore AC-Brushless	24
2.2 Comportamento della Reazione d’indotto	27
2.3 Modello matematico della macchina sincrona	29
2.4 Limiti operativi e velocità caratteristiche di un AC-Brushless	35
2.5 Monitoraggio parametrico in ambiente Matlab-Simulink	42
CAPITOLO 3	47
AZIONAMENTO ELETTRICO AC-BRUSHLESS	47
3.1 Caratteristiche dell’azionamento	47



3.2	Architettura di controllo	49
3.3	Richiamo generale sull'inverter trifase	51
3.4	Modulazione PWM (Pulse With Modulation)	54
3.5	Modulazione SVM (Space Vector Modulation)	56
3.6	Ottimizzazione tra rete elettrica e apparecchiature con il CMMP-AS	57
CAPITOLO 4		64
AZIONAMENTO PNEUMATICO		64
4.1	Caratteristiche della pneumatica	64
4.2	Panoramica sui dispositivi pneumatici	65
4.5	Pinze pneumatiche e calcolo della forza di presa	66
4.6	Caratteristiche generali Elettrovalvole	71
4.7	Comando elettrico della valvola con servopilota	74
4.8	Tecnica proporzionale e architettura di controllo	75
CAPITOLO 5		78
PROTOCOLLI DI COMUNICAZIONE		78
5.1	Caratteristiche generali dei protocolli	78
5.2	Bus di comunicazione digitale, tecniche di codifica e rilevamento errori	80
5.3	Protocollo di comunicazione CANopen e procedure di accesso	84
5.3.1	Accesso Service Data Object SDO e descrizione dei messaggi	91
5.3.2	Messaggio Process Data Object PDO	92
5.3.3	Messaggio di sincronizzazione SYNC	93
5.3.4	Messaggio di Emergenza EMCY	94
5.3.5	Gestione della rete servizio NMT Network Management	95
5.3.6	Heartbeat Error Control Protocol e possibili regolazioni	95
5.3.7	Comunicazione CANopen tra Master e Slave	97
5.4	Caratteristiche generali Industrial Ethernet	99
5.4.1	Struttura del frame Ethernet	102
5.4.2	Cablaggio dei dispositivi nella sottorete	103



CAPITOLO 6	107
PIANIFICAZIONE, PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE STEP-by-STEP	107
6.1 Work Breakdown Structure WBS	107
6.2 Caratteristiche generali assi elettrici	110
6.2.1 Procedura analitica per la scelta di assi e motori elettrici	111
6.2.2 Assi Elettrici a cinghia dentata - Stato dell'arte	115
6.2.3 Motori Brushless – Stato dell'arte	121
6.2.4 Cenno sull'Encoder Assoluto Multi-turn	124
6.3 Simulatore PositioningDrives	124
6.3.1 Report PositioningDrives Asse Z	125
6.3.2 Report PositioningDrives Asse Y	129
6.3.3 Report PositioningDrives Modulo Rotativo	134
6.4 Simulatore Pinza pneumatica a tre griffe	138
6.5 Progettazione mediante il modellatore 3D	139
6.6 Parametrizzazione in FCT (Festo Configuration Tool)	144
6.7 Controllo di Visione mediante Smart Camera	151
6.8 Programmazione HMI (Human Machine Interface)	158
CAPITOLO 7	164
PROGRAMMAZIONE DEL PLC IN AMBIENTE CoDeSys	164
7.1 Definizioni e richiami della norma IEC61131-3	164
7.2 Linguaggi di programmazione	165
7.3 Ambiente CoDeSys: Struttura e programmazione	166
7.3.1 Linguaggio di programmazione CFC	168
7.3.2 CFC movimentazione assi	169
7.3.3 CFC Camma elettrica	172
7.4 Editor visualizzatore grafico	177
7.5 Scrittura del Codice in CoDeSys per il Motion	179
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	192
BIBLIOGRAFIA	195

Elenco delle Figure

Figura 1. 1: Comportamento dei sistemi di automazione all'aumentare del numero di assi	20
Figura 1. 2: Andamenti coppia-velocità al variare della velocità	22
Figura 2. 1: Motore sincrono isotropo a magneti permanenti	25
Figura 2. 2: Reazione d'indotto	28
Figura 2. 3: F.m.m di reazione	29
Figura 2. 4: Riferimenti di statore e di rotore	30
Figura 2. 5: Trasformazione da sistema statorico a rotorico	33
Figura 2. 6: Circuito equivalente e diagramma vettoriale	35
Figura 2. 7: Diagramma vettoriale del motore brushless a regime	36
Figura 2. 8: Diagramma vettoriale del motore brushless in presenza di corrente isd negativa	37
Figura 2. 9: Diagramma vettoriale con i_{sd} e $\omega < \omega_{base}$	37
Figura 2. 10: Diagramma vettoriale con i_{sd} e $\omega = \omega_{base}$	38
Figura 2. 11: Diagramma vettoriale con $\omega > \omega_{base}$	38
Figura 2. 12: Diagramma vettoriale con $\omega_{base} < \omega < \omega^*$	39
Figura 2. 13: Diagramma vettoriale con $\omega \geq \omega^*$	39
Figura 2. 14: Campo di operatività di un AC-Brushless	40
Figura 2. 15: Andamenti della i_{sd} e i_{sq}	40
Figura 2. 16: Limiti di Tensione e Corrente	41
Figura 2. 17: Velocità maggiore della velocità base	41
Figura 2. 18: Andamento della i_s	42
Figura 2. 19: Andamento sperimentale di L_d al variare di i_d e i_q	46
Figura 2. 20: Andamento sperimentale di L_q al variare di i_d e i_q	46
Figura 2. 21: Andamento sperimentale di Φ_r al variare di i_d e i_q	46
Figura 3. 1: Schema di un azionamento AC-brushless	48
Figura 3. 2: Schema di azionamento convenzionale con ingresso in AC	49
Figura 3. 3: Schema complessivo del controllo con alimentatore di corrente	50
Figura 3. 4: Schema complessivo del controllo con alimentatore di tensione	50
Figura 3. 5: Schema di controllo per motore brushless	51
Figura 3. 6: Schematizzazione inverter trifase	53
Figura 3. 7: Campo di operatività dell'inverter	53
Figura 3. 8: Forme d'onda di un PWM trifase con terna di triangoli omopolari	55
Figura 3. 9: v^* fasore spaziale nel piano di Park	56
Figura 3. 10: Space Vector Modulation	57
Figura 3. 11: Azionamento elettrico CMMP-AS-3A-C5-MO	59
Figura 3. 12: Architettura semplificata CMMP-AS	60



Figura 3. 13: Vista frontale CMMP-AS-C5-M3	61
Figura 3. 14: A sx Vista dall'ALTO, a dx Vista dal BASSO	61
Figura 4. 1: HGDT-25-A Pinza pneumatica	67
Figura 4. 2: DHPS-25-A Pinza pneumatica parallela	68
Figura 4. 3: Gestione delle forze pinza-tappo moto verticale	69
Figura 4. 4: Equilibrio delle forze pinza-tappo moto orizzontale vista dall'alto	69
Figura 4. 5: Traiettorie utili per effettuare avvitatura	71
Figura 4. 6: Elettrovalvola MHE2-MS1H-5/2-QS-4	72
Figura 4. 7: Accessori e Collegamento Elettrovalvola-Pinza	73
Figura 4. 8: Percorso della corrente nella bobina e nella linea di alimentazione	75
Figura 4. 9: Architettura dell'anello di retroazione	76
Figura 5. 1: Tecnologia di controllo piramidale	79
Figura 5. 2: Codice a quattro livelli	82
Figura 5. 3: Codifica NRZ	83
Figura 5. 4: Codifica Manchester	83
Figura 5. 5: Struttura del Frame CAN	84
Figura 5. 6: Schema di cablaggio cavo CANopen e collegamento sui dispositivi	88
Figura 5. 7: Parametrizzazione CANopen in FCT	89
Figura 5. 8: Struttura messaggio CANopen	90
Figura 5. 9: Procedura di accesso e scambio di dati	91
Figura 5. 10 A sinistra istruzioni di lettura, a destra iscrizioni di scrittura	92
Figura 5. 11 Messaggio di errore SDO	92
Figura 5. 12: Messaggio PDO	93
Figura 5. 13: Messaggio SYNC	94
Figura 5. 14: Messaggio di Emergenza EMCY	95
Figura 5. 15: Messaggio Network Management NMT	95
Figura 5. 16: Struttura messaggio Heartbeat	96
Figura 5. 17: Modulo elettronico CPX-CEC-M1 funzionante da PLC Master	97
Figura 5. 18: Collegamento CANopen	99
Figura 5. 19: Struttura standard del protocollo Ethernet	100
Figura 5. 20: Struttura del Frame Ethernet	102
Figura 5. 21: Assegnazione degli indirizzi IP in FFT	104
Figura 5. 22: Assegnazione indirizzo IP in SBO-DeviceManager	105
Figura 5. 23: Collegamenti Ethernet e CANopen tra i vari dispositivi	106
Figura 6. 1: Work Breakdown Structure	109
Figura 6. 2: Classificazione assi elettrici a cinghia	110
Figura 6. 3: Trasmissione del moto per mezzo della cinghia dentata	111
Figura 6. 4: Elementi della trasmissione del moto	111



Figura 6. 5: Profilo di movimentazione	112
Figura 6. 6: Profilo di velocità trapezoidale	113
Figura 6. 7: Grafico da catalogo per EMMS-AS-40-M	114
Figura 6. 8: Asse elettrico a sbalzo DGEA-18-400-ZR-WB-KV	117
Figura 6. 9: Connessioni meccaniche	117
Figura 6. 10: Riduttore epicicloidale EMGA	118
Figura 6. 11: Asse elettrico a portale DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK	118
Figura 6. 12: Connessioni meccaniche	119
Figura 6. 13: Albero di collegamento KSK-25-200	119
Figura 6. 14: Asse elettrico rotativo ERMB-20	120
Figura 6. 15: Connessioni meccaniche	120
Figura 6. 16: EMMS-AS-70-S-LS-RMB	122
Figura 6. 17: EMMS-AS-55-M-LS-TMB	123
Figura 6. 18: Diagramma Motion Profile Asse Z	126
Figura 6. 19: Diagramma Motion Profile Asse Y	130
Figura 6. 20: Diagramma Motion Profile Andata	131
Figura 6. 21: Diagramma Motion Profile N.2	131
Figura 6. 22: Diagramma Motion Profile Modulo Rotativo	135
Figura 6. 23: Dati del pezzo e dell'utensile	138
Figura 6. 24: Ulteriori impostazioni Pinza	138
Figura 6. 25: Verifica della corretta scelta della Pinza	139
Figura 6. 26: Prototipo della stazione di avvitatura in PRO/E	141
Figura 6. 27: Messa in tavola prototipo	142
Figura 6. 28: Zoom vista frontale e laterale	143
Figura 6. 29: Screenshot Configuration FCT	145
Figura 6. 30: Screenshot Application Data FCT	145
Figura 6. 31: Screenshot Motor FCT	146
Figura 6. 32: Screenshot Axis FCT	146
Figura 6. 33: Screenshot Homing FCT	146
Figura 6. 34: Screenshot Measure FCT	147
Figura 6. 35: Screenshot Controller FCT	147
Figura 6. 36: Screenshot Closed Loop FCT	147
Figura 6. 37: Screenshots I/O Configuration FCT	148
Figura 6. 38: Screenshot Fieldbus FCT	148
Figura 6. 39: Screenshot Safe Torque Off FCT	148
Figura 6. 40: Screenshot Direct Mode FCT	149
Figura 6. 41: Screenshot Jog Mode FCT	149
Figura 6. 42: Screenshot Position Set Table FCT	149
Figura 6. 43: Screenshot Messages FCT	150
Figura 6. 44: Screenshot Trace Configuration FCT	150
Figura 6. 45: Smart camera SBOI-Q-R1B	151
Figura 6. 46: Parti della smart camera	153



Figura 6. 47: Connettore M12	154
Figura 6. 48: Screenshot CheckOpti	156
Figura 6. 49: Pezzo GOOD	157
Figura 6. 50: Pezzo BAD	157
Figura 6. 51: Flow Chart acquisizione immagine	158
Figura 6. 52: FED 501	159
Figura 6. 53: Assegnazione indirizzo IP FED	160
Figura 6. 54: Prima schermata FED	161
Figura 6. 55: Seconda schermata FED	162
Figura 6. 56: Terza schermata FED	162
Figura 6. 57: Pulsante di Start retroilluminato	163
Figura 7. 1: POU	167
Figura 7. 2: Task Configuration	168
Figura 7. 3: CEC in CoDeSys	169
Figura 7. 4: MC_Power	169
Figura 7. 5: MC_Home	170
Figura 7. 6: MC_MoveAbsolute	171
Figura 7. 7: Camma elettrica in CFC	172
Figura 7. 8: MC_CamTableSelect	173
Figura 7. 9: MC_CamIn	174
Figura 7. 10: MC_CamOut	175
Figura 7. 11: CAM Properties	175
Figura 7. 12: Profilo di Camma CAM1	176
Figura 7. 13: Assegnazione Visualizations all'MC_Power	177
Figura 7. 14: Schermata completa Visu	178
Figura 7. 15: Visualizations Camma Elettrica	179
Figura 7. 16: Ciclo di Avvitatura e Svitatura	180
Figura 7. 17: presa_pezzo PLC Configuration	180
Figura 7. 18: Schema di collegamento completo	190
Figura 7. 19: Diagramma teorico Motion Profile Asse Z	191
Figura 7. 20: Diagramma Motion Profile in Real-Time Asse Z	191

Elenco delle Tabelle

Tabella 1: Dati tecnici EMMS-AS-70-S-LS-RMB	43
Tabella 2: Significato sigle EMMS-AS-70-S-LS-RMB	43
Tabella 3: Armoniche tipiche di una corrente monofase senza filtro di rete	58
Tabella 4: Confronto Controllori	62
Tabella 5: Dati tecnici generali	62
Tabella 6: Funzioni per la programmazione del PLC	62
Tabella 7: Dati tecnici-Interfaccia Fieldbus	63
Tabella 8: Dati Elettrici	63
Tabella 9: Dati tecnici HGDT-25-A	67
Tabella 10: Dati tecnici DHPS-25-A	68
Tabella 11: Dati tecnici MHE2-MS1H-5/2-QS-4	73
Tabella 12: Modello ISO/OSI	86
Tabella 13: Occupazione connettori interfaccia CANopen	87
Tabella 14: Occupazione pin dell'interfaccia Ethernet	104
Tabella 15: Elenco Assi utilizzati	116
Tabella 16: Dati tecnici DGEA-18-400-ZR-WB-KV e significato sigle	117
Tabella 17: Dati tecnici DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK e significato sigle	119
Tabella 18: Dati tecnici ERMB-20	120
Tabella 19: Motori utilizzati	122
Tabella 20: Dati tecnici EMMS-AS-70-S-LS-RMB e significato sigle	123
Tabella 21: Dati tecnici EMMS-AS-55-M-LS-TMB e significato sigle	123
Tabella 22: Motion Profiles PositioningDrives	125
Tabella 23: Part List Axis Z	126
Tabella 24: Motion Profiles PositioningDrives Asse Y	129
Tabella 25: Part List Axis Y	130
Tabella 26: Motion Profiles PositioningDrives Modulo Rotativo	134
Tabella 27: Part List Axis Modulo Rotativo	135
Tabella 28: Distinta materiali meccanici	140
Tabella 29: Dati tecnici SBOI-Q-R1B	152
Tabella 30: LED di stato smart camera	153
Tabella 31: Alimentazione e I/O Digitali	154
Tabella 32: Dati tecnici FED 501	159

Introduzione

Negli ultimi tempi si sta facendo sempre più stringente la necessità di automatizzare i processi produttivi, questo per ridurre non solo la necessità dell'intervento umano ma soprattutto per realizzare operazioni ripetitive e complesse, ove si richieda sicurezza e certezza dell'azione. Il maggior sviluppo nel campo dell'automazione è avvenuto con l'avvento della mecatronica, la quale studia il modo di far interagire tre discipline: la meccanica, l'elettronica, e l'informatica al fine di automatizzare i sistemi di produzione semplificando il lavoro umano.

Il seguente elaborato s'intitola: pianificazione, progettazione e realizzazione di un robot di avvitatura stand-alone, controllato in posizione, velocità e coppia nel motion control. Per fase di pianificazione s'intende andare ad analizzare step by step tutte le fasi operative che serviranno per raggiungere l'obiettivo desiderato. Inoltre è prevista una fase di progettazione della componentistica, legata allo studio cineto-dinamico del sistema e una fase volta alla realizzazione concreta del robot di avvitatura.

La scelta di progettare tale sistema è scaturita dal fatto che nel settore industriale food&beverage, i macchinari installati per il capping sono nel 90% delle aziende, di marca AROL, la quale è leader nel settore. Il sistema di capping di tale azienda è prettamente meccanico, bensì in linea di massima, è munito di un albero motore centrale posto in posizione verticale, a esso sono calettati dei bracci che si muovono in sincronia con l'albero motore. A tali bracci sono agganciate delle pinze, le quali permettono l'avvitatura del tappo mediante un movimento, roto-traslatorio.

Tale sistema ha suscitato in me particolare interesse e da indagini svolte, non è stata riscontrata alcuna presenza di macchine di avvitatura puramente elettriche. Pertanto si è cercato di approfondire l'argomento e una delle risposte possibili è stata quella che, tali macchine essendo datate ma perfettamente funzionanti, sono riuscite nel corso del tempo a saturare il mercato, motivo per il quale i clienti non hanno visto l'utilità di passare a una nuova tecnologia che gli impegnava sia a livello economico per quanto riguarda la vera e propria sostituzione del macchinario sia per la formazione del personale. Altre motivazioni possono essere ricercate nella facilità di funzionamento e nelle alte affidabilità che queste macchine, con meccanismo meccanico presentano. Analizzando nel dettaglio il sistema si sono riscontrate delle falde, tra cui: manutenzione frequente, sostituzione dell'intero macchinario qual ora la macchina presentasse un guasto interno e eccessivi ingombri.

Da qui l'idea di progettare e realizzare un robot di avvitatura che potesse sopperire alle lacune della macchina succitata, andando a ideare un robot che potesse essere il più possibile affidabile, robusto, con una scarsa frequenza manutentiva, con ingombri ridotti, prestazioni cineto-dinamiche elevate e con un'elevata modularità in previsioni di modifiche impiantistiche future. Per rispettare tutto questo è stato realizzato un robot puramente elettrico attraverso l'utilizzo di sistemi volti all'automazione industriale bensì al motion control.



Nel primo capitolo del presente lavoro, è stata fatta una panoramica generica sul motion control, il quale è l'insieme delle tecnologie e dei dispositivi che permettono di governare gli organi meccanici in movimento della macchina. La precisione nel controllo del movimento rappresenta un fattore chiave che influisce fortemente sulle prestazioni della stessa. Oggigiorno ci troviamo di fronte a un mercato ricco di soluzioni commerciali per il motion control, per tal motivo diventa difficile per l'utilizzatore finale scegliere la piattaforma che meglio si adatta alla propria applicazione.

L'obiettivo principale di un'attività di benchmarking di piattaforme commerciali per l'automazione è quello di analizzare le performance del motion control attraverso la definizione e l'esecuzione di un insieme di test, che permettono di confrontare e valutare le soluzioni disponibili sul mercato, e individuare quelle più adatte a risolvere un determinato tipo di problema, rispondendo adeguatamente ai requisiti e alle specifiche dell'applicazione. Quando parliamo di motion control, ci sono tre aspetti fondamentali da considerare:

1. I modi di funzionare e il set di comandi messi a disposizione dall'utente;
2. Il carico computazionale che l'inserimento di assi aggiunge al sistema complessivo;
3. Le performance dinamiche legate all'inseguimento di traiettorie e alla gestione dei sincronismi.

In seguito nel secondo capitolo è stata fatta una panoramica sugli aspetti costruttivi e di funzionamento del motore brushless, presentandone il modello matematico e le strategie di controllo convenzionali. Tutto ciò rappresenterà la base di partenza per le disquisizioni tecniche e gli aspetti specifici presi in esame nei prossimi capitoli.

Il motore sincrono a magneti permanenti (PMSM Permanent Magnet Synchronous Motor), come si evince dal nome stesso, presenta caratteristiche costruttive e di funzionamento del tutto simile ai classici motori sincroni con avvolgimento di eccitazione. La sostituzione di tale avvolgimento con i magneti permanenti, però, conferisce alla macchina in esame alcune importanti caratteristiche che ne fanno un motore sempre più impiegato, soprattutto per quelle applicazioni in cui le specifiche di progetto divengono particolarmente stringenti.

Per quanto riguarda la tecnica moderna degli azionamenti, essa è caratterizzata da un rapporto sinergico crescente fra elementi elettrici e meccanici costituenti il sistema di comando. E' possibile realizzare dispositivi di azionamento con caratteristiche nuove e migliorate utilizzando un'elettronica di potenza compatta, motori di concezione innovativa, meccaniche ottimizzate, materiali nuovi e con una tecnologia di comunicazione efficiente.

Per comprendere meglio questi dispositivi di azionamento, nel terzo capitolo si descriveranno le caratteristiche e i principi di funzionamento dell'azionamento usato per l'applicazione in questione; poiché ogni azionamento elettrico è costituito, oltre che dal motore elettrico, anche da molti altri componenti, si parlerà anche di sistemi di misurazione, elettronica di potenza, trasmissioni, comando e componenti che trasmettono forze.

L'ampia gamma degli azionamenti Festo va dal semplice asse di posizione senza la regolazione dell'azionamento, fino al servocomando con circuiti di regolazione intelligenti in grado di controllare le variabili di processo desiderate. L'elettronica di potenza necessaria per



realizzare queste funzioni e la relativa elaborazione dei segnali dimostra, che oggi gli azionamenti elettrici rappresentano un campo della scienza interdisciplinare che richiede un notevole Know-how. Come già accennato gli azionamenti AC-Brushless, utilizzano dei motori sincroni a magneti permanenti in cui il campo magnetico di eccitazione è fornito da questi ultimi; il campo di applicazione di questi azionamenti è limitato alle medie-basse potenze, poiché potenze elevate richiederebbero l'utilizzo di motori di grossa taglia.

Inoltre nel quarto capitolo è stata fatta una panoramica generale sulle tecnologie pneumatiche, dove la Festo SpA si colloca tra le prime aziende a livello mondiale a vantare i migliori prodotti sia pneumatici sia elettrici. Tale tecnologia studia le tecniche per l'impiego dell'aria compressa e trova ampia applicazione in moltissimi settori nella produzione industriale, oltre al suo utilizzo per la costruzione di macchine e di linee produttive.

La moderna componentistica e i sistemi di pneumatica avanzata stanno evolvendo verso un'integrazione sempre più spinta con unità di tipo elettronico, tanto da poter parlare di sistemi pneumotronici. Negli ultimi anni si stanno affermando logiche di progettazione completamente nuove, che determinano un sostanziale incremento delle caratteristiche cinematiche e dinamiche dei singoli componenti e dei sistemi composti; sono cambiati i parametri di vita media dei componenti, gli ingombri e i tempi di risposta. Saranno descritte in linee generali le caratteristiche della pneumatica, prestando un'attenzione particolare agli unici dispositivi pneumatici presenti nella stazione di avvitatura. Uno di questi è HGDT, che sarebbe la pinza pneumatica a tre griffe, usata per compiere la presa del pezzo. Il secondo elemento pneumatico utilizzato per comandare la pinza è elettrovalvola, in grado, mediante un impulso elettrico di aprire e chiudere le griffe, consentendo o escludendo il passaggio dell'aria compressa. L'impulso elettrico eccita una bobina presente all'interno dell'elettrovalvola, tale impulso elettrico è fornito in base alle nostre esigenze, attraverso un programma scritto in ambiente CoDeSys e caricato all'interno del PLC. Sarà discussa la scelta della pinza, mediante un confronto tra il dimensionamento teorico delle forze agenti sulle griffe e un software di simulazione.

Nel quinto capitolo sono argomentate le tecniche di comunicazione digitali maggiormente utilizzate all'interno del robot, dove con il termine *comunicazioni* s'intende l'insieme delle discipline scientifiche e tecniche che si occupa dello studio, della progettazione, della costruzione e dell'utilizzo di sistemi per la trasmissione a distanza d'informazioni rappresentate sotto forma di segnali elettrici. La funzione di trasmissione è la caratteristica essenziale di qualsiasi sistema di comunicazione, il cui scopo specifico è il trasferimento di dati tra parti diverse.

Nel presente capitolo saranno discusse quelle che sono le caratteristiche generali dei protocolli CANopen ed Ethernet e come i dispositivi sono stati mappati per far sì che ci potesse essere comunicazione e trasferimento dati. Si descriverà dettagliatamente la struttura dei frame inviati in trasmissione e ricezione e quali sono stati i cablaggi effettuati al fine di realizzare la stazione di avvitatura stand-alone.



Nel sesto capitolo sono state discusse più nel dettaglio le fasi di pianificazione, di progettazione e di processo che sono state adottate per la realizzazione della stazione di avvitatura stand-alone. Con la dicitura anglosassone “stand-alone” si è voluto intendere che un oggetto o un software è in grado di funzionare da solo in maniera indipendente da altri oggetti o software, infatti, l’handling è stato progettato e programmato in modo che possa funzionare con la sola prerogativa che sia alimentato a 220 V AC per il circuito di potenza e 24V DC per il circuito ausiliario e che sia munito di un proprio PLC che permetta la gestione indipendente dell’intero sistema. Saranno discussi numerosi software di programmazione che, grazie al loro utilizzo, hanno permesso la corretta scelta della componentistica hardware al fine di progettare e realizzare un sistema altamente preciso e veloce, concorde con quelle che sono le richieste di mercato nell’ambito dell’automazione industriale.

Sarà fatto un confronto tra gli assi determinati teoricamente e gli assi ottenuti utilizzando PositioningDrives.

Si parlerà inoltre, della Smart Camera o telecamera intelligente, la quale è un sistema di visione compatto che integra entro un unico contenitore una telecamera ed un sistema di digitalizzazione ed elaborazione delle immagini, oltre ai dispositivi accessori per l’interfacciamento col mondo esterno come: porte di comunicazione e I/O digitali. Il design compatto rende la videocamera uno strumento ideale per il controllo di qualità. La camera ha un’intelligenza integrata è quindi munita di microprocessori dedicati con sistemi operativi relativamente semplici, ha spesso il vantaggio di una maggiore affidabilità in ambienti industriali e consente l’avviamento del sistema in frazioni di secondo. La presenza di un processore in ogni telecamera semplifica applicazioni, in cui numerose unità debbano operare indipendentemente e contemporaneamente. Grazie all’intelligenza a bordo è possibile eseguire la parametrizzazione della camera attraverso un software e poi caricare tale programma nel dispositivo. Nel robot di avvitatura è stata installata al fine di verificare la corretta avvitatura del tappo sulla bottiglia, tale controllo è reso possibile grazie all’utilizzo di un software chiamato CheckOpti.

Inoltre, è stato installato un touch panel della Festo che permette l’interfaccia uomo-macchina o nel gergo anglosassone Human Machine Interface, esso fa riferimento allo strato che separa un essere umano che sta utilizzando una macchina dalla macchina stessa. Le interfacce uomo-macchina, permettono la semplice gestione di funzioni di automazione a livello di campo e si distinguono per le caratteristiche di funzionalità e integrazione. È stato utilizzato, infatti, per avviare e stoppare la movimentazione quando si desidera, inoltre grazie alla segnalazione luminosa dei pulsanti touch, è in grado di informare l’operatore dell’effettivo stato del sistema. Sarà evidenziato il vantaggio ricavato dalla costruzione di una Work Breakdown Structure (WBS), detta anche Struttura di Scomposizione del Lavoro, all’interno della quale si sono elencate tutte le attività che compongono il progetto, attraverso un albero gerarchico composto di materiali, software, servizi e obiettivi.

Infine, nel settimo e ultimo capitolo si andrà a spiegare in linea generale le modalità con la quale è stato possibile configurare il PLC Festo, come si è ragionato per poter stilare il



programma in CoDeSys a hoc per la movimentazione degli assi della stazione di avvitatura e come è stato possibile realizzare la camma elettrica che ha permesso di effettuare l'avvitatura e la svitatura del tappo in questione. Inoltre passo dopo passo si andranno a spiegare le procedure utilizzate per raggiungere l'obiettivo desiderato, cioè stilare un programma che possa rispettare i posizionamenti, velocità e accelerazioni desiderate.

L'ambiente di sviluppo Codesys (Controlled Development System) permette di implementare automi per il controllo logico, utilizzando uno dei linguaggi definiti dalla normativa IEC 61131-3.

Il tool di sviluppo è utilizzato per due tipologie di applicazioni:

- Per programmare ed eseguire su PC, controllori per macchine automatiche. Per queste applicazioni Codesys funziona come compilatore di programmi a norma IEC 61131-3, generando un programma eseguibile per l'ambiente di esecuzione real time CoDeSys SP RTE.
- Per programmare sistemi di controllo industriali (come i PLC), per queste applicazioni il costruttore di PLC acquista il programma Codesys con integrato il compilatore e un'interfaccia personalizzata per quello specifico PLC.

Una volta generato il codice di controllo, Codesys integra nel suo ambiente una modalità di funzionamento chiamata Simulation mode, che permette di eseguire il programma sviluppato senza avere né l'ambiente real time, né un vero e proprio PLC. E' possibile creare una propria interfaccia grafica per interagire con il codice di controllo dove è possibile monitorare in real time il comportamento dell'impianto.

Il presente elaborato è stato ideato e realizzato al fine di fornire i mezzi necessari per la comprensione e la realizzazione di un sistema inedito di avvitatura elettrica che potrebbe rivoluzionare il mercato esistente dell'industrial capping.

Abstract

Questo elaborato nasce da uno stage svolto in Festo SpA, azienda leader nel settore dell'automazione industriale, dove è stato possibile sviluppare un robot di avvitatura stand-alone, controllato in posizione, velocità e coppia nel motion control.

La scelta di progettare un robot puramente elettrico è scaturita dal fatto che nel settore industriale food&beverage, i macchinari, che sono installati per il capping sono prettamente meccanici, allora si è cercato di progettare un qualcosa che potesse essere innovativo e di facile installazione.

Nel seguente elaborato, sono riportati i procedimenti inerenti alla pianificazione mediante una WBS e alla progettazione hardware e software. Diversi sono stati i programmi utilizzati: dalla progettazione 3D mediante il PRO/E, al dimensionamento delle apparecchiature e alla determinazione teorica dei profili motion mediante PositioningDrives, al settaggio parametrico degli azionamenti attraverso FCT, alla programmazione della smart-camera del sistema vision mediante CheckOpti, alla programmazione del touch panel mediante il FED designer e infine alla scrittura del programma in ambiente CoDeSys.

Per il dimensionamento dei componenti sono stati utilizzati due tipi di approcci: uno teorico ed uno pratico. Quello teorico si è basato sul calcolo delle coppie e delle forze inerziali sviluppate dal sistema e su tali basi, si sono scelti i componenti adeguati; quello pratico si è basato sull'utilizzo di software, i quali hanno permesso una verifica incrociata sulla corretta scelta fatta mediante la procedura teorica.

I protocolli di comunicazione utilizzati sono il CANopen e l'Ethernet; il primo è stato utilizzato per il trasferimento dati tra il master (PLC) e lo slave (azionamenti) e il secondo per il trasferimento dati tra PLC e: azionamenti, PC, touch panel e smart-camera.

La smart camera, componente principe del sistema di visione, è stata installata al fine di controllare la qualità dell'avvitatura mediante lo scatto di una fotografia al momento opportuno. L'immagine processata è inviata per via Ethernet al PC, fornisce un messaggio di GOOD o BAD del pezzo in esame.

Il touch panel ha la funzione, di avviare e stoppare la movimentazione del robot senza che si vada a intervenire sul programma stilato in CoDeSys.

In conclusione si è progettato e realizzato un sistema di avvitatura prettamente elettrico, con ingombri ridotti, precisione elevata, velocità e accelerazioni sostenute e alta modularità, tutto questo ha permesso di raggiungere l'obiettivo prefissato. Infine, sono state fatte osservazioni autocritiche per eventuali sviluppi futuri.

Abstract

This script comes from a stage done in Festo SpA, a leading company in industrial automation, where it was possible to develop a standalone screwing station controlled in torque, speed and position.

The choice to design a purely electric robot is triggered by the fact that in the industrial food&beverage, the machines that are installed for the capping are purely mechanical, and then we tried to design something that would be innovative and easy to install.

In the following script are reported the steps that have allowed us to achieve the goal, from planning to design to implementation.

Several programs were used: from 3D design using the PRO / E, the dimensioning of the equipment and the theoretical determination of the motion profiles by means PositioningDrives, the parametric settings of the electric drives through FCT, the programming of the smart camera with CheckOpti, the programming of the touch panel by means the FEDdesigner and finally to write the program in environment CoDeSys. Many of these programs have been developed by Festo.

For the dimensioning of the components two types of approaches have been used: one theoretical and one practical. The first was based on the theoretical calculation of torque and inertial forces developed by the system and on that basis have been chosen the appropriate components, the second approach is based on the use of software, which allowed for a cross-check on the correct choice made by means the theoretical procedure.

The communication protocols used are the CANopen and the Ethernet; the first was used for data transfer between the master (PLC) and slave (electric drives) and the second for data transfer between PLC and: electric drives, laptop, touch panels and smart-camera.

The smart camera was installed to check the quality of the screw driving. After the operation a picture of the cap is taken and judge GOOD or BAD by the camera; this information is sent to the PLC via Ethernet, to proceed for the following steps in a complete production line.

The touch panel has the function to start and stop the movement of the robot without work on the program drawn up in CoDeSys.

In conclusion, a system of screwing purely electric is designed and implemented, with compact size, high accuracy, speed and high acceleration and high modularity; this has allowed us to achieve the goal. Finally, self-critical observations were made for future developments.

Capitolo 1

MOTION CONTROL PER L'AUTOMAZIONE INDUSTRIALE

Il motion control è l'insieme delle tecnologie e dei dispositivi che permettono di governare gli organi meccanici in movimento della macchina. La precisione nel controllo del movimento rappresenta un fattore chiave che influisce fortemente sulle prestazioni della stessa. Oggigiorno ci troviamo di fronte a un mercato ricco di soluzioni commerciali per il motion control, per tal motivo diventa difficile per l'utilizzatore finale scegliere la piattaforma che meglio si adatta alla propria applicazione.

L'obiettivo principale di un'attività di benchmarking di piattaforme commerciali per l'automazione è quello di analizzare le performance del motion control attraverso la definizione e l'esecuzione di un insieme di test, confrontabili e valutabili sul mercato, in modo da individuare quelle più adatte a risolvere un determinato tipo di problema, rispondendo adeguatamente ai requisiti e alle specifiche dell'applicazione.

Quando parliamo di motion control, ci sono tre aspetti fondamentali da considerare:

4. I modi di funzionare e il set di comandi messi a disposizione dall'utente;
5. Il carico computazionale che l'inserimento di assi aggiunge al sistema complessivo;
6. Le performance dinamiche legate all'inseguimento di traiettorie e alla gestione dei sincronismi.

1.1 Funzionalità e set di comandi

Tutte le piattaforme commerciali per l'automazione integrano nativamente il motion control. Ciò significa che l'utente, acquistando il pacchetto completo di un solo fornitore, è in grado di movimentare gli assi elettrici direttamente dall'ambiente di sviluppo, facendo eseguire ai motori, movimenti in parte complessi.

La comunicazione tramite il bus di campo dei profili di moto e la gestione delle motorizzazioni sono alcune delle funzionalità tipicamente già fornite da una piattaforma commerciale, il programmatore dovrà preoccuparsi esclusivamente di configurare in fase di start-up i vari attuatori e controllori presenti.

In aggiunta alle funzionalità e gestione degli assi elettrici, è fondamentale esaminare il set di comandi messi a disposizione; possono esserci semplici comandi standard per la



movimentazione di assi singoli o di assi sincronizzati, oppure comandi avanzati ottimizzati per la specifica piattaforma; un esempio potrebbe essere la possibilità di una decentralizzazione di una gestione del motion sull'azionamento.

L'analisi del set di comandi fa emergere il trade-off tra portabilità e prestazioni, che si genera nella scelta di implementare funzionalità attraverso comandi standard riutilizzabili o altamente specifici per le diverse applicazioni.

1.2 Carico computazionale del Motion Control

Per il funzionamento di una macchina automatica non è sufficiente gestire solo la motorizzazione, ma anche l'intera logica di controllo:

- Funzionamento nominale
- Supporto alle segnalazioni
- Controllo qualità
- Diagnostica

Ognuna di queste attività richiede uno sforzo computazionale, proporzionale alla quantità di dati da processare in real-time. Nella gestione della capacità computazionale della CPU e del bus di campo devono inoltre rientrare tutte le istruzioni per il controllo degli assi.

Ogni elemento che s'interfaccia con il bus richiede una banda che è funzione della quantità di dati real-time che dovrà scambiare con il suo controllore, che a sua volta dialogherà con il suo motore, possa essere, esso sia motore brushless che stepper.

Ogni piattaforma, in funzione dell'architettura e della tipologia dei dispositivi utilizzati, ha una propria politica di gestione di queste risorse. Nonostante le differenti filosofie di gestione delle risorse di calcolo e di trasmissione dei dati, è comune in tutte le piattaforme di automazione concedere all'utente la possibilità di gestire solo una quota delle risorse del sistema.

Nel caso del bus di campo le attività del sistema coincidono con gli strati funzionali utilizzati nel protocollo di comunicazione implementato dallo specifico fornitore, che compongono la piramide del modello ISO-OSI che nei capitoli successivi vedremo nel dettaglio.

Nelle applicazioni che prevedono la presenza di molti assi legati tra loro da reazioni di sincronismo, le attività di motion control sono molto onerose per le risorse di sistema.

E' necessario stimare a priori quanto una determinata configurazione degli assi incida sulle risorse del sistema attraverso una valutazione dell'influenza che tale configurazione ha sulle performance della CPU e del bus di campo.

La valutazione è effettuata tramite un test di laboratorio che mira a ottenere un andamento del comportamento del sistema all'aumentare del numero di assi reali e virtuali configurati (vedi Fig.1.1)

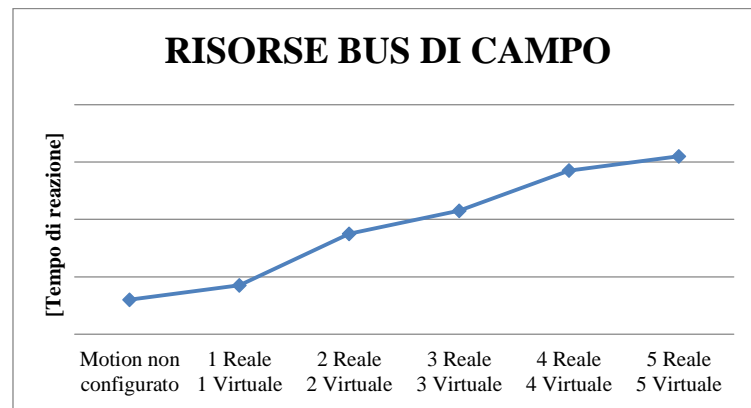


Figura 1.1a: Risorse bus di campo

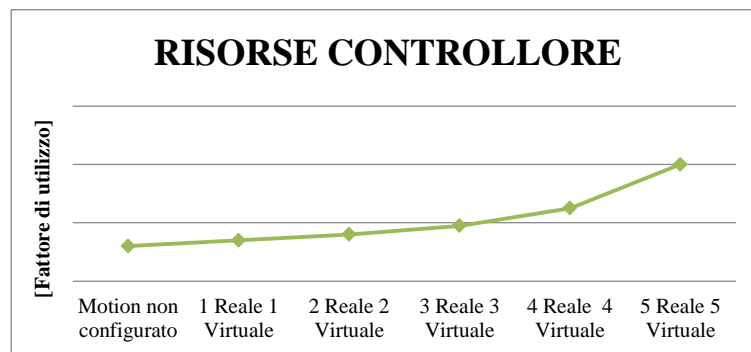


Figura 1.1b: Risorse controllore

Figura 1. 1: Comportamento dei sistemi di automazione all'aumentare del numero di assi

Il test consiste in un insieme di routine che analizzano il sistema al variare del numero di assi configurati, al crescere della complessità delle camme e con dinamiche sempre più spinte. La possibilità di stimare il consumo delle risorse di un sistema a fronte di una determinata configurazione degli assi è utile nella pratica per diversi motivi.

Il primo è la scelta del controllore giacché vi è la necessità di realizzare una macchina con un elevato numero di assi e un'elevata dinamica: i controllori che già in questa fase mostrano di non riuscire a soddisfare le specifiche non sono presi in considerazione.

Analogo ragionamento vale per il bus di campo nel quale si deve gestire una rete di molti dispositivi con tempistiche stringenti, sarà necessario che il bus di campo sia all'altezza dei requisiti in termini di determinismo e in tempi di reazione. Oppure immaginando la stazione stand-alone che ha la peculiarità di poter aggiungere dei moduli opzionali con altri assi elettrici, questo mi permette di soddisfare le esigenze dell'end-user, questo implica che il livello di personalizzazione richiede una flessibilità non solo software ma anche hardware.

In genere è chiaro che migliorare l'efficienza di una macchina significa dimensionare bene le sue parti, in particolare gli azionamenti e tutta la catena cinematica sono fondamentali per quel che riguarda il consumo energetico. L'altra faccia della medaglia è rappresentata dall'efficienza dell'intelligenza che è necessaria ottimizzare.



1.3 Inseguimento di traiettorie e gestione dei sincronismi

L'ultimo aspetto che si prende in considerazione riguarda il comportamento del motion control riguardante le prestazioni dinamiche, legate, in questo caso specifico, all'errore d'inseguimento su certe traiettorie e all'errore dei sincronismi, cioè errori dovuti a ritardi o posizionamenti relativi errati quando gli assi devono operare in camma elettrica oppure con funzionalità gearing.

Per analizzare le prestazioni dinamiche relative all'errore d'inseguimento rispetto a traiettorie predefinite è importante definire un benchmark meccanico di riferimento.

Per l'analisi del comportamento del sistema di motion control e in particolare dell'azionamento, è necessario non soltanto avere il modello del carico (modello noto), ma anche conoscere tutti i parametri del modello (attriti, inerzie, sbilanciamenti etc.). Nel caso dell'inseguimento di traiettoria l'interesse è focalizzato sul fatto che l'inseguimento avvenga con il minor errore possibile rispettando la traiettoria specificata, nelle situazioni reali l'azionamento inseguirà la traiettoria ideale sempre con un certo errore (errore d'inseguimento).

La differenza fra traiettoria ideale e quella reale può essere causata da due fattori: anelli di controllo tarati in maniera non adeguata, la taratura, ad esempio possono essere compiuta tramite una procedura automatica che potrebbe identificare il carico in maniera non corretta; limitazioni dell'azionamento, come limitata banda passante, assenza di filtri di compensazione.

Le vere cause dell'errore di posizione possono essere individuate solo attraverso l'analisi dei dati sperimentali, conoscendo l'architettura dell'azionamento e del carico.

Per valutare le prestazioni delle diverse soluzioni commerciali, il primo passo consiste nell'identificare il carico con un approccio gray-box, partendo da un solo modello teorico equivalente nel quale sono inseriti i dati noti riguardanti il sistema meccanico (forniti da catalogo) e le proprietà dei pezzi (masse, inerzia, coefficiente di smorzamento interno).

Un modello teorico non è altro che una rappresentazione esemplificativa di un sistema reale, in cui vengono schematizzate le sole caratteristiche fisiche che interessa studiare, tramite una serie di regole che legano i parametri interni (grandezze non manipolabili), le sollecitazioni (ovvero gli ingressi, variabili indipendenti) e le uscite (variabili dipendenti).

Secondo il tipo di relazione che intercorre tra le variabili sopra citate, possiamo avere:

- **Modello white box:** il sistema è una *scatola trasparente* di cui si conoscono le componenti interne e il loro funzionamento.
- **Modello black box:** il sistema è una *scatola nera* ovvero non è noto a priori né ciò che contiene né come si comporta. È possibile studiarne il comportamento esclusivamente analizzando le risposte che esso produce a fronte delle sollecitazioni che riceve.



- **Modello gray box:** il sistema utilizza un approccio intermedio tra modello white box e modello black box.

Pur essendo i modelli black box sconosciuti a priori nel loro funzionamento o comportamento è comunque possibile risalire alle loro caratteristiche dinamiche interne in fase di test ovvero a posteriori: per sistemi lineari e tempo invarianti (LTI) ciò che caratterizza infatti il comportamento dinamico del sistema black-box è la sua funzione di trasferimento definita come il rapporto tra la trasformata di Laplace, di Fourier, oppure Trasformata Z dell'uscita $y(t)$ e la trasformata dell'ingresso $x(t)$. Tale funzione di trasferimento, invariante per coppie di uscite-ingressi, è quindi tale che moltiplicata per qualunque ingresso trasformato restituisce la corrispondente uscita trasformata all'ingresso dato. Nel dominio del tempo invece il comportamento del sistema è espresso dalla risposta libera o impulsiva $h(t)$ che si ottiene semplicemente come uscita del sistema ad un impulso applicato e pari all'antitrasformata della funzione di trasferimento. La conseguente risposta nel tempo all'ingresso generico $x(t)$ si ottiene dall'integrale di convoluzione tra l'ingresso $x(t)$ e la risposta all'impulso $h(t)$ del sistema. Data la difficoltà di calcolo dell'operazione di convoluzione, si ricorre spesso al calcolo nel dominio trasformato attraverso le regole di trasformazione e anti-trasformazione.

In sistemi non-lineari invece la risposta impulsiva non è più invariante per coppie ingresso-uscita, ma viene a dipendere dal particolare ingresso applicato.

Durante questa fase d'identificazione ci si avvale dei risultati ottenuti attraverso prove statistiche e prove dinamiche eseguite sul carico reale. Una volta eseguita la modellazione del sistema sulla base delle informazioni note o comunque ricavabili si portano a termine una serie di prove statiche sul sistema per la determinazione in via sperimentale di quei parametri, che non sono facilmente reperibili da catalogo e che dipendono dalle condizioni di funzionamento (attrito di primo distacco, attrito coulombiano, attrito viscoso e altre forze dissipative). [29]

Si parte da valori di coppia molto bassi per arrivare a quel valore per cui il sistema abbandona lo stato di quiete, l'attrito coulombiano e l'attrito viscoso possono essere identificati mediante prove che mettono in relazione coppia e velocità. Per ogni valore di velocità è possibile conoscere il valore relativo di coppia da applicare, partendo da questi grafici è possibile determinare un grafico come quello in Fig.1.2.

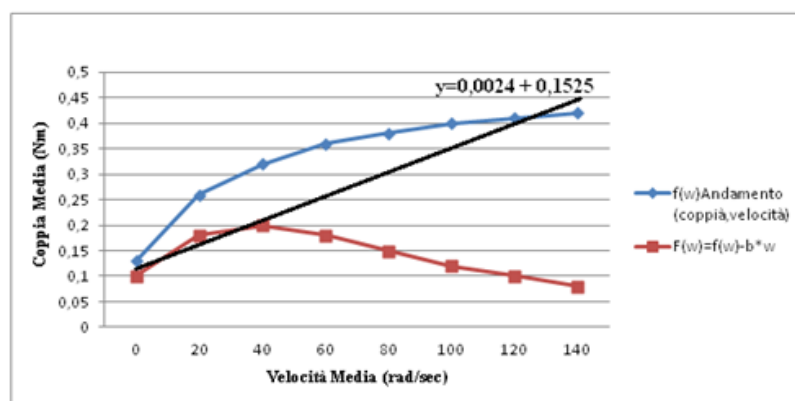


Figura 1. 2: Andamenti coppia-velocità al variare della velocità



La pendenza della retta “m” che approssima una serie di punti rappresenta la somma dei coefficienti di attrito viscoso nei cuscinetti, mentre il coefficiente “q” della stessa retta è indicativo della forza di attrito colombiano.

Una volta completato il modello del sistema reale attraverso le prove statiche, sono implementate una serie di prove di tipo dinamico.

1.4 Benchmarking di motion control

Nel corso degli anni si è assistito a un sempre maggiore impiego di assi elettrici in sostituzione dei dispositivi meccanici, per quel che riguarda la realizzazione dei sincronismi.

La complessità della macchina si sta spostando sempre più dalla meccanica all’elettrica e al controllo software. Questo permette di ottenere nuove funzionalità e più flessibilità, e consente di far interagire più componenti in un sistema sempre più complesso che rispetti le caratteristiche dell’end-user.

Compiere un benchmarking è molto importante per studiare la movimentazione del sistema automatico e soprattutto per capire qual è la sua risposta a una forzatura esterna.

Uno studio approfondito in tutte queste tematiche è stato svolto da Festo, la quale è una realtà mondiale, specializzata nella tecnica dell’automazione elettrica e pneumatica per l’installazione diretta su macchine e impianti di natura differente.

Anche nel motion control, Festo applica il concetto di Energy efficiency, e si realizza inizialmente garantendo un dimensionamento intelligente dei componenti e di sistemi con software ingegneristici; il suo approccio mecatronico permette di combinare le diverse tecnologie (pneumatiche, servopneumatiche, meccaniche ed elettriche) per ottenere una soluzione altamente specialistica senza compromessi.

Grazie all’integrazione e all’interazione dei diversi componenti, si possono realizzare tutti i tipi di movimenti-lineare, rotativi, di presa e con il vuoto.

Un’importante innovazione, che segna il passaggio da un sistema di controllo rigido e centralizzato a un’intelligenza decentralizzata, è la piattaforma di automazione CPX.

Tale piattaforma permette l’integrazione del controllo di dispositivi di diversa natura, la comunicazione avviene attraverso dei protocolli, che sono dei sistemi di comunicazione che permettono, mediante l’opportuna interfaccia, il trasferimento di dati, i quali consentiranno di eseguire la corretta movimentazione degli assi.

Capitolo 2

MODELLIZZAZIONE DEI MOTORI

AC-BRUSHLESS

Nel presente capitolo s'intende dare una panoramica degli aspetti costruttivi e di funzionamento del motore brushless, presentandone, il modello matematico e le strategie di controllo convenzionali. Tutto ciò rappresenterà la base di partenza per le disquisizioni tecniche e gli aspetti specifici presi in esame nei prossimi capitoli.

Il motore sincrono a magneti permanenti (PMSM Permanent Magnet Synchronous Motor), come si evince dal nome stesso, presenta caratteristiche costruttive e di funzionamento del tutto simili ai classici motori sincroni con avvolgimento di eccitazione. La sostituzione di tale avvolgimento con i magneti permanenti, però, conferisce alla macchina in esame alcune importanti caratteristiche che ne fanno un motore sempre più impiegato, soprattutto per quelle applicazioni in cui le specifiche di progetto divengono particolarmente stringenti.

2.1 Generalità motore AC-Brushless

Il motore AC-Brushless è una macchina elettrica rotante di tipo sincrono con rotore a magneti permanenti, funzionante in corrente alternata, caratterizzata, dal fatto che la frequenza f [Hz] delle grandezze ai morsetti e la velocità di rotazione Ω [rad/s], n [giri/s], N [giri/min] è fra loro legate dalla relazione:

$$f = \frac{p}{4*\pi} * \Omega = \frac{p}{2} * n = \frac{p}{120} * N \quad (2.1.1)$$

dove p è il numero di poli della macchina.

Tale macchina è dotata di uno statore e di un rotore, quest'ultimo ruota con la medesima velocità del campo magnetico rotante al traferro, da qui il nome di macchina sincrona.

Lo statore è analogo a quello di una macchina asincrona: esso è dotato di un avvolgimento trifase simmetrico, di norma collegato a stella, e costituisce l'indotto poiché sede di f.e.m. indotta.

Il rotore è detto anche induttore poiché costituisce la sorgente principale del campo magnetico, esso è dotato di un avvolgimento oppure di magneti permanenti. Il rotore può essere di due tipi:



- Rotore liscio, detto isotropo: adottato nel caso di macchine a 2 poli, è chiamato liscio perché, trascurando la disuniformità dovuta alla presenza di cave, il traferro tra statore e rotore è costante in tutti i punti della periferia della macchina. Nei servomotori e nei piccoli motori (fino a qualche decina di kilowatt), l'avvolgimento di eccitazione è sostituito da magneti permanenti (v. Fig.1).
- Rotore a poli salienti, detto anche anisotropo: in questo caso ciascun polo è costituito da una struttura magnetica a forma di parallelepipedo (corpo del polo) e termina con una espansione polare. Il traferro compreso fra l'espansione e lo statore è variabile, aumentando dall'asse del polo verso entrambe le estremità dell'espansione, grazie alla sagomatura di quest'ultima. In questo caso l'avvolgimento è di tipo concentrato, essendo ciascun corpo del polo avvolto con una bobina, e tutte le bobine collegate in serie fra loro a formare l'avvolgimento. Questo tipo di struttura rotorica è adatto per macchine con numero di poli uguale o superiore a quattro.

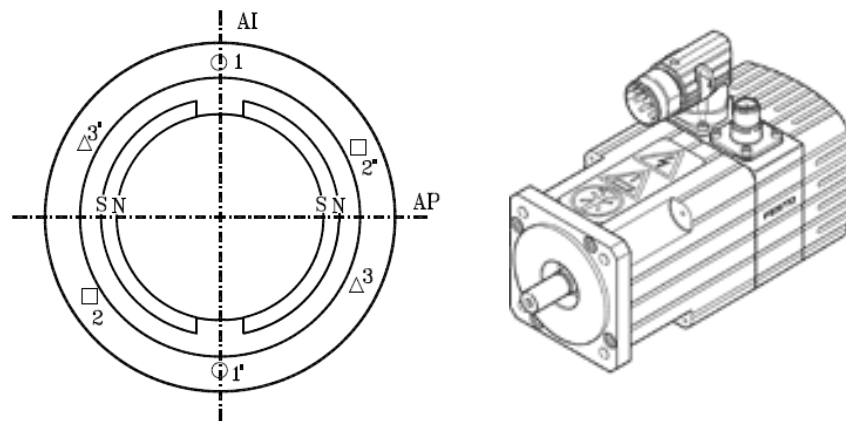


Figura 2. 1: Motore sincrono isotropo a magneti permanenti

In entrambe le soluzioni esistono due particolari direzioni radiali che costituiscono gli assi di simmetria, osservando la figura 2.1 ci possiamo rendere conto che vi sono due assi:

1. Asse Polare (AP): costituisce l'asse magnetico secondo il quale è diretto il flusso di un polo. A seconda che il flusso sia uscente o entrante dal polo d'induttore, si parla di polo nord o Sud;
2. Asse Interpolare (AI): individua la bisettrice tra le direzioni di due assi polari adiacenti. Giacché l'angolo elettrico tra due poli successivi è pari a 180° elettrici, l'asse interpolare definisce la direzione posta a 90° elettrici rispetto all'asse polare, cioè la direzione in quadratura.

Quando la macchina sincrona è usata come generatore, prende il nome di alternatore. [6]

In genere il funzionamento avviene a frequenza e tensione (in valore efficace) costanti: l'alternatore eroga potenza elettrica attiva, a fronte di una potenza meccanica assorbita



all'albero; si può anche verificare uno scambio di potenza reattiva, che può essere erogata (comportamento come condensatore) o assorbita (comportamento come induttore).

A tensione a frequenza di alimentazione costanti, l'impiego da motore non è molto diffuso.

Tale motore non è in grado di autoavviarsi; per l'avviamento è necessario ricorrere a uno dei Seguenti sistemi:

- Impiego di una gabbia di scoiattolo (detta “gabbia di smorzamento”), del tutto simile a quella delle macchine asincrone, che consente l'avviamento asincrono; la macchina poi si sincronizza (“prende il passo”);
- Impiego di un motore di lancio;
- Avviamento tramite alimentazione di una sorgente in grado di regolare la frequenza, partendo da valori molto bassi via via crescenti. [19]

L'introduzione di convertitori elettronici, in grado di regolare a piacere la tensione e la frequenza di alimentazione, ha consentito la rapida diffusione di questi motori. Infatti, la regolazione della tensione e della frequenza ha permesso l'avviamento e la regolazione di velocità in un ampio campo.

Nel seguente elaborato si è fatto riferimento a una macchina sincrona funzionante come motore cioè la potenza attiva si considera sempre erogata dai generatori e assorbita dagli utilizzatori, mentre più delicata è la questione della potenza reattiva, i quali può essere denominata in due modi differenti, il primo è potenza assorbita da un reattore (potenza magnetizzante o induttiva), il secondo è potenza assorbita da un condensatore (potenza elettrizzante o capacitiva), le due potenze differendo solo per il segno, possono essere denominate entrambe potenze reattive, cioè quelle assorbite da reattori.

Dal punto di vista della struttura magnetica, lo statore, poiché interessato da un processo di magnetizzazione variabile nel tempo (campo magnetico rotante), è realizzato con lamierini (aventi spessore di 0,5 mm): i lamierini sono accostati fra loro con i piani di laminazione in senso perpendicolare all'asse della macchina. Il rotore, eccitato in c.c. o a magneti permanenti, è percorso da un flusso costante nel tempo: pertanto, in linea di principio esso può essere realizzato in materiale magnetico massiccio.

L'avvolgimento di armatura (disposto sullo statore) è in genere trifase e in esso sono localizzate tutte le perdite Joule della macchina; manca, infatti, l'avvolgimento del flusso di eccitazione che è prodotto a causa dei magneti. L'assenza di un avvolgimento di rotore non solo influisce positivamente sull'efficienza energetica, ma soprattutto rende più semplice il monitoraggio della temperatura, con sonde poste solo sulla parte fissa, e facilita lo smaltimento del calore che è prodotto in prossimità della superficie esterna; ciò rende possibile realizzare motori molto compatti, a elevate prestazioni specifiche, anche a scapito dell'efficienza. La costruzione dello statore non presenta particolari difficoltà, considerata la comprovata esperienza nelle tecniche, realizzative delle tradizionali macchine sincrone. Il rotore, sede dei magneti permanenti, è invece di più complessa realizzazione. La forma d'onda d'induzione al traferro è strettamente legata alla forma dei magneti, la cui disposizione e



tipologia incidono peraltro su potenza e coppia sviluppabile e sulle caratteristiche di funzionamento, influenzando fortemente il costo complessivo del motore. Come magneti permanenti si possono utilizzare le economiche ferriti, le leghe AlNiCo o i materiali con elementi alle terre rare (SmCo o NdFeB).

I magneti permanenti in genere (escluso le leghe AlNiCo) presentano poi il problema della fragilità e della scarsa lavorabilità, che limita i costruttori nella realizzazione di sagomature complesse e costringe a giocare sulla disposizione dei magneti piuttosto che sulla loro forma.

Le principali caratteristiche costruttive della macchina sincrona sono:

1. Il traferro di tale macchina è sensibilmente maggiore del traferro della macchina a induzione, questo perché nelle macchine sincrone bisogna limitare l'effetto torcente della reazione d'indotto;
2. Le cave sono generalmente rettangolari aperte;
3. L'avvolgimento d'indotto è spesso del tipo a cave frazionarie e in concreto sempre con collegamento a stella;
4. Il sistema d'induttore è generalmente munito di gabbie smorzatrici.

Inoltre, l'impiego dei magneti permanenti al posto del tradizionale avvolgimento di eccitazione complica le tecniche di controllo a campo indebolito ma conferisce alla macchina l'appellativo di motore '*Brushless*', assenza cioè di un sistema di strisciamento a spazzole per la continuità galvanica fra lo spazio fisso e quello mobile; si ereditano così i vantaggi tipici del motore a induzione in termini di robustezza, affidabilità e manutenzione ridotta. La disponibilità di magneti permanenti alle terre rare, inoltre, se da un lato aumenta il costo di realizzazione della macchina, dall'altro garantisce elevate prestazioni specifiche in termini di coppia e potenza, riducendo i pesi e gli ingombri e facendo del motore sincrono a magneti permanenti un'attraente alternativa ai motori più convenzionali quando le specifiche di progetto e di funzionamento divengano particolarmente stringenti.

2.2 Comportamento della Reazione d'indotto

Con il termine reazione d'indotto s'indica l'influenza che la f.m.m. dell'indotto esercita sul valore e sulla distribuzione periferica, lungo il traferro, del flusso prodotto dalla sola f.m.m. dell'induttore.

I principali aspetti del fenomeno dipendono dai seguenti fattori:

1. La direzione relativa delle due f.m.m.;
2. La distribuzione periferica della permeanza del circuito magnetico;
3. La distribuzione periferica delle due f.m.m.

Considerando la prima si ricordi che la f.m.m. dell'induttore M_c agisce secondo l'asse del polo, mentre quella dell'indotto agisce in una direzione qualunque, che dipende dalla



condizione di funzionamento e che è univocamente legata allo sfasamento γ che è l'angolo di reazione della corrente rispetto alla f.e.m longitudinale, intesa come tale quella indotta da un flusso avente direzione dell'asse del polo, quale ad esempio Φ_c dell'induttore, che genera f.e.m (vedi Fig.2.2), mentre E_c è detta di eccitazione. [19]

Le grandezze rappresentate nel diagramma vettoriale della Fig.2.2, sono grandezze il cui significato spaziale può essere esteso anche alle tensioni e alle correnti, con la semplice considerazione che i relativi vettori sono diretti normalmente alle spire nelle quali le corrispondenti grandezze sono massime nell'istante rappresentato, supponendo che l'avvolgimento indotto sia costituito da spire diametrali indipendenti. La reazione presenta diverse caratteristiche tra cui: se la direzione di M_a è secondo l'asse del polo la reazione è prevalentemente smagnetizzante o magnetizzante in base al segno, se è secondo una mezzeria interpolare la reazione è prevalentemente torcente, in ogni altro caso si hanno i due effetti.

Sotto il punto di vista della distribuzione periferica della permeanza del circuito magnetico le macchine sincrone si distinguono in due tipi come abbiamo in precedenza detto: isotrope a rotore liscio e anisotrope a poli salienti che presentano una permeanza molto variabile, con valor massimo secondo gli assi dei poli e minima secondo le mezzerie interpolari.

Sotto il punto di vista della distribuzione periferica delle due f.m.m. si ha che quella dell'indotto può essere ritenuta sinusoidale e così pure quella degli induttori lisci, mentre quella degli induttori a poli salienti è rettangolare. [19]

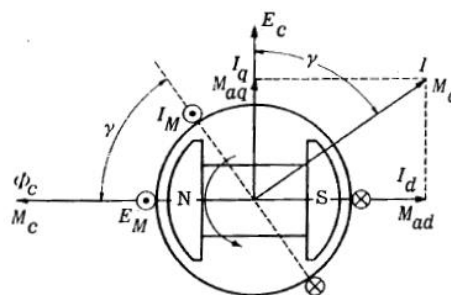


Figura 2. 2: Reazione d'indotto

Nelle macchine isotrope le due f.m.m sono direttamente confrontabili, nel senso che a parità dei loro valori e qualunque sia la loro direzione relativa, esse danno luogo al medesimo flusso. Invece, le macchine anisotrope non lo sono, per valutare gli effetti della loro azione simultanea bisogna renderle tali, a questo scopo si utilizzano le f.m.m. di reazione, cioè $Mpd = Mpsen \gamma$ e $Mpq = Mpcos \gamma$, le quali danno luogo a flussi equivalenti a quelli dovuti alle effettive f.m.m. dell'indotto agenti nei propri circuiti magnetici, nel longitudinale abbiamo la Mad e per il trasversale Maq . Le f.m.m. di reazione si possono valutare in funzione delle corrispondenti f.m.m. d'indotto mediante la seguente espressione:

$$\mathbf{M}_p = c\mathbf{M}_a \quad \text{Dove } c = \text{fattore di reazione} \quad (2.2.1)$$

I cui andamenti sono riportati di seguito, sia in corrispondenza dell'AP sia IP:

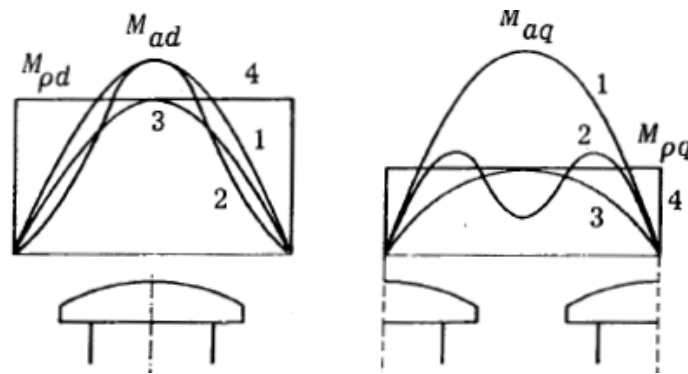


Figura 2. 3: F.m.m di reazione

Estendendo il nostro discorso alle macchine sincrone isotrope, diremo che la f.m.m. di reazione è uguale a quella effettiva dell'indotto.

Della reazione d'indotto si può tener conto, oltre che per mezzo delle citate f.m.m., anche utilizzando i coefficienti di Potier oppure le reattanze di reazione.

I coefficienti di Potier servono quando l'eccitazione sia espressa come corrente d'induttore anziché come f.m.m, in tal caso si valuta una corrente di reazione equivalente a quella d'indotto mediante l'espressione:

$$I_{\rho} = \alpha I \quad \text{dove} \quad \alpha = \text{coefficiente di Potier} \quad (2.2.2)$$

Tale corrente I_{ρ} non va considerata come corrente di induttore, ma come la corrente che si avrebbe nell'indotto, a pari effetto utile, se questo avrebbe stesse caratteristiche costruttive dell'induttore.

Mentre, le reattanze di reazione $X_{\rho}, X_{\rho d}, X_{\rho q}$ sono reattanze da attribuire all'indotto e tali che, moltiplicate per la corrente di indotto o per le sue componenti diano direttamente le f.e.m. che i flussi eccitati dalle corrispondenti f.m.m. generano nell'avvolgimento di indotto.

2.3 Modello matematico della macchina sincrona

Uno dei modelli matematici che più si presta a essere impiegato nella determinazione degli algoritmi di alimentazione in azionamenti controllati è scritto tramite i vettori spaziali delle grandezze di macchina (detti anche componenti simmetrici), e si fonda sulle convenzionali ipotesi semplificative che spesso si adottano nello studio delle macchine elettriche rotanti; fra queste troviamo ipotesi di simmetria trifase, trascurabilità di perdite e di cadute di f.m.m. nel ferro, trascurabilità delle armoniche superiori nella distribuzione di induzione. Nel caso più frequente di motore trifase, siano $A1(t), A2(t), A3(t)$ le tre generiche grandezze di fase del motore, il vettore:

$$A = \frac{2}{3} \sum_{k=1}^3 A_K(t) e^{j\frac{2\pi}{3}(k-1)} \quad (2.3.1)$$



viene detto “vettore spaziale”; esso è il “componente simmetrico ai valori istantanei” della generica grandezza di macchina indicata con la lettera A . Un tale vettore può essere riferito sia allo spazio fisso, cioè nel riferimento statorico, sia allo spazio mobile, ossia nel riferimento di rotore. I riferimenti statorico e rotorico vengono a essere così definiti: sullo statore le fasi dell'avvolgimento sono numerate da 1 a 3 in senso orario ed è assunta un'ascissa angolare α con origine ($\alpha=0$) in corrispondenza dell'asse magnetico della prima fase e orientamento positivo quello orario (Figura 2.4); sul rotore è assunta come riferimento un'ascissa angolare β , con origine ($\beta=0$) in corrispondenza dell'asse magnetico del rotore e verso positivo sempre quello orario (Figura 2.4).

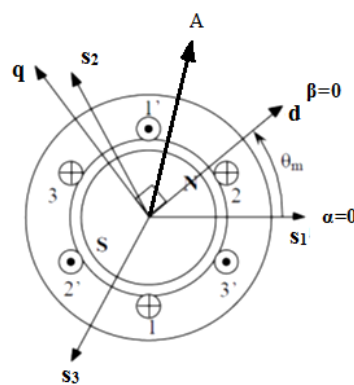


Figura 2. 4: Riferimenti di statore e di rotore

Con J è indicato l'angolo istantaneo tra i riferimenti solidali allo statore e al rotore esprimibile come:

$$\vartheta_m = \alpha - \beta \quad (2.3.2)$$

Restano così definiti un sistema di coordinate cartesiane Oxy solidale allo statore, con l'asse x coincidente con l'asse magnetico della prima fase ($\alpha=0$), e un sistema di riferimento Odq solidale al rotore con l'asse d disposto lungo l'asse polare e ruotato rispetto al precedente di un angolo ϑ_m . [21]

Qui di seguito si farà sempre riferimento al modello matematico che è brevemente richiamato; tale modello ha implicite semplificazioni riguardo alla natura costruttiva della macchina, ma è sufficientemente adeguato ai fini del suo controllo. Si consideri la macchina rappresentata schematicamente in Figura 2.4, costituita da uno statore cilindrico nel quale è disposto un avvolgimento trifase simmetrico tale da generare una distribuzione di forza magnetomotrice al traferro sinusoidale, e un rotore dotato di magneti permanenti e privo di gabbie smorzatrici. Si ammette ancora che lo statore e il rotore siano costituiti da materiale completamente laminato e di permeabilità infinita. Si trascura la saturazione, l'isteresi del ferro e le anisotropie della macchina dovute alle cave.



Partendo dalle equazioni che si riferiscono agli avvolgimenti di statore e di rotore e dai legami flussi-correnti avremo le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} v_{s1} &= R_s i_{s1} + p\psi_{s1} \\ v_{s2} &= R_s i_{s2} + p\psi_{s2} \\ v_{s3} &= R_s i_{s3} + p\psi_{s3} \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Con $p = \frac{d}{dt}$, dove:

$$\begin{cases} \psi_{s1} = L_{SS}(\vartheta m) i_{s1} + M_{SS}(\vartheta m) (i_{s2} + i_{s3}) + \psi_{pm}(\vartheta m) \\ \psi_{s2} = L_{SS} \left(\vartheta m - \frac{2}{3}\pi \right) i_{s2} + M_{SS} \left(\vartheta m - \frac{2}{3}\pi \right) (i_{s1} + i_{s3}) + \psi_{pm} \left(\vartheta m - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \psi_{s3} = L_{SS} \left(\vartheta m - \frac{4}{3}\pi \right) i_{s3} + M_{SS} \left(\vartheta m - \frac{4}{3}\pi \right) (i_{s1} + i_{s2}) + \psi_{pm} \left(\vartheta m - \frac{4}{3}\pi \right) \end{cases} \quad (2.3.4)$$

Ricordando che la somma delle tre correnti di fase è nulla per effetto del collegamento (a centro stella isolato o a triangolo), si ha:

$$\begin{cases} \psi_{s1} = L_S(\vartheta m) i_{s1} + \psi_{pm}(\vartheta m) \\ \psi_{s2} = L_S \left(\vartheta m - \frac{2}{3}\pi \right) i_{s2} + \psi_{pm} \left(\vartheta m - \frac{2}{3}\pi \right) \\ \psi_{s3} = L_S \left(\vartheta m - \frac{4}{3}\pi \right) i_{s3} + \psi_{pm} \left(\vartheta m - \frac{4}{3}\pi \right) \end{cases} \quad \text{Con} \quad L_S(\vartheta) = L_{SS}(\vartheta) + M_{SS}(\vartheta) \quad (2.3.5)$$

Applicando, ora, la procedura per la definizione dei fasori spaziali in un sistema di riferimento solidale con il flusso dei magneti permanenti (asse "d" solidale con il Nord e asse "q" sfasato in anticipo di 90° rispetto l'asse "d"), si ottengono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} \bar{v}_s &= R_s \bar{i}_s + p\bar{\psi}_s + j\dot{\vartheta}_m \bar{\psi}_s \\ \psi_{sd} &= L_d i_{sd} + \psi_{pm} \\ \psi_{sq} &= L_q i_{sq} \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

dove $\bar{v}_s = v_d + jv_q$ con v_d e v_q che sono le proiezioni sugli assi d e q (solidali col rotore) del vettore tensione. Se si compie il bilancio energetico, si ottiene:

$$Re(\bar{v}_s \underline{i}_s) = R_s i_s^2 + Re(\underline{i}_s p \bar{\psi}_s) + Re(j\dot{\vartheta}_m \bar{\psi}_s \underline{i}_s) \quad (2.3.7)$$

$Re(\bar{v}_s \underline{i}_s)$ = totale potenza attiva entrante nel sistema;

$R_s i_s^2$ = perdite per effetto Joule;

$Re(\underline{i}_s p \bar{\psi}_s)$ = variazione dell'energia magnetica interna del sistema;

$Re(j\dot{\vartheta}_m \bar{\psi}_s \underline{i}_s)$ = potenza meccanica = P_m dove:



$$\begin{aligned} P_m &= \operatorname{Re}(j\dot{\vartheta}_m \bar{\psi}_s \dot{\underline{i}}_s) = -\dot{\vartheta}_m \operatorname{Im}(\bar{\psi}_s \dot{\underline{i}}_s) = -\dot{\vartheta}_m \operatorname{Im}[(L_d i_{sd} + \psi_{pm} + jL_q i_{sq})(i_{sd} - j i_{sq})] = \\ &= \dot{\vartheta}_m [(L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \psi_{pm} i_{sq}] \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

L'espressione della coppia è:

$$T_e = \frac{P_m}{\Omega_m} = \frac{P_m}{\Omega_m/n_p} = n_p ((L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \psi_{pm} i_{sq}) \quad (2.3.9)$$

Da quest'ultima relazione:

$$p\dot{\vartheta}_m = \frac{n_p}{j} (T_e - T_r) \quad (2.3.10)$$

Il controllo vettoriale della macchina sincrona si basa su un'opportuna scelta degli assi d e q di riferimento utilizzati dal regolatore dell'alimentatore in modo tale che una componente della corrente statorica agisca esclusivamente sul flusso, mentre l'altra sulla coppia al traferro. In questo modo il motore sincrono è regolato come una macchina in c.c. in cui si agisce separatamente sulla corrente di eccitazione (flusso) e su quella d'indotto (coppia). [9]

Per illustrare la modalità di controllo vettoriale del motore sincrono, si riprenda il modello della macchina precedentemente richiamato, facendo riferimento alle equazioni (2.3.6), (2.3.9), (2.3.10). Sostituendo ai flussi di statore la loro dipendenza dalla corrente di statore e dal flusso dei magneti permanenti, con l'ipotesi che i parametri di macchina siano tempo invarianti, si ha:

$$\begin{cases} v_{sd} = R_S i_{sd} + L_d p i_{sd} - \dot{\vartheta}_m L_q i_{sq} \\ v_{sq} = R_S i_{sq} + L_q p i_{sq} + \dot{\vartheta}_m \psi_{pm} + \dot{\vartheta}_m L_d i_{sd} \end{cases} \quad (2.3.11)$$

Ottenendo così il valore di coppia:

$$T_e = n_p ((L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \psi_{pm} i_{sq}) \quad (2.3.12)$$

A tal punto la modellizzazione potrebbe essere affrontata anche in un secondo modo, facendo riferimento a un sistema di coordinate cartesiane Oxy solidale allo statore, con l'asse x coincidente con l'asse magnetico della prima fase ($\alpha=0$), e un sistema di riferimento Odq solidale al rotore con l'asse d disposto lungo l'asse polare e ruotato rispetto al precedente di un angolo ϑ . Un generico vettore \mathbf{A} avente fase φ nel riferimento statorico, avrà fase $(\varphi - \vartheta)$ in quello rotorico, com'è possibile notare dalla figura sotto riportata.

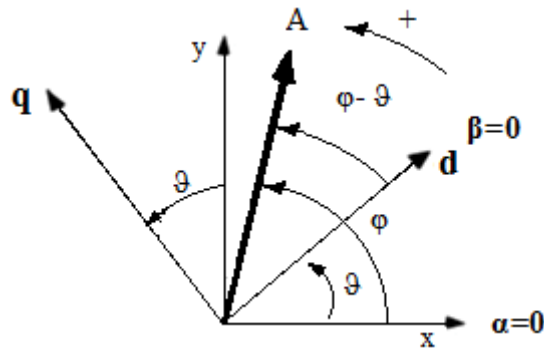


Figura 2. 5: Trasformazione da sistema statorico a rotorico

Il modello matematico ai valori istantanei della macchina brushless a magneti permanenti con albero rigido, statore trifase, rotore anisotropo e campo di eccitazione a distribuzione spaziale sinusoidale, è rappresentato nel riferimento fisso dal seguente set di equazioni:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + L_s \frac{d\mathbf{i}_s}{dt} + L_1 \frac{d}{dt} (\mathbf{i}_s e^{j2p\theta}) + j\omega_r \Phi_r \\ T_e - T_r = J \frac{d\omega_r}{dt} \text{ con } T_e = \frac{3}{2} p \operatorname{Im} \{ \Phi_r \mathbf{i}_s e^{-jp\theta} + L_1 \mathbf{i}_s^2 e^{-jp\theta} \} \end{cases} \quad (2.3.13)$$

Dove \mathbf{v}_s È il vettore spaziale delle tensioni di fase; \mathbf{i}_s è il vettore spaziale delle correnti di fase; ω_r è la velocità angolare del rotore in rad/sec; p è il numero di coppie polari; R_s è la resistenza degli avvolgimenti statorici; $L_s = L_m + L_{\sigma,s}$ è l'induttanza sincrona, somma dell'induttanza di mutua L_m e di quella di dispersione $L_{\sigma,s}$; $L_1 = \frac{\lambda_1}{2\lambda_0} L_m$ con λ_0 e λ_1 rispettivamente calore medio e prima armonica della permeanza di traferro; $\Phi_r = \Phi_r e^{jp\theta}$ con Φ_r flusso di rotore concatenato con lo statore; T_e è il momento della coppia elettromagnetica sviluppato dal motore; T_r è il momento della coppia resistente; J è il momento di inerzia equivalente delle masse rotanti riportato all'albero del motore.

Lo stesso modello matematico può essere riscritto nel riferimento rotorico:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_s^r = R_s \mathbf{i}_s^r + jp\omega_r L_s \mathbf{i}_s^r + L_1 \left[\frac{d\mathbf{i}_s^r}{dt} + jp\omega_r \mathbf{i}_s^r \right] + jp\omega_r \Phi_r \\ T_e - T_r = J \frac{d\omega_r}{dt} \text{ con } T_e = \frac{3}{2} p \operatorname{Im} \{ \Phi_r \mathbf{i}^r + L_1 (\mathbf{i}^r)^2 \} \end{cases} \quad (2.3.14)$$

Dove si sono indicate con apice r le grandezze nel sistema di riferimento rotorico.

Proiettando la prima equazione delle (2.3.14) sugli assi d, q, si ha:

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_q i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} - \omega L_d i_{sd} + \omega \Phi_r \end{cases} \quad (2.3.15)$$

In cui si è posto $\omega = p \cdot \omega_r$, $L_d = L_s - L_1$ e $L_q = L_s + L_1$. Le quantità L_d e L_q sono dette rispettivamente induttanze d'armatura d'asse diretto e d'asse in quadratura, mentre le quantità



$v_{sd}, v_{sq}, i_{sd}, i_{sq}$ sono le componenti del vettore spaziale di tensione e del vettore spaziale di corrente lungo l'asse diretto, lungo l'asse in quadratura.

In termini di componenti lungo gli assi diretto ed in quadratura, l'espressione del momento elettromagnetico assume la forma:

$$T_e = \frac{3}{2} p i_{sq} [\Phi_r + (L_d - L_q) i_{sd}] \quad (2.3.16)$$

Il primo termine della coppia elettromagnetica è dovuto all'interazione tra correnti di statore e flusso di rotore, il secondo termine rappresenta la cosiddetta "coppia di riluttanza" ed è dovuto alla presenza dell'anisotropia magnetica del rotore e alle correnti presenti sull'armatura. Il primo termine è nullo se $i_{sq} = 0$ oppure se il flusso di rotore è nullo; mentre se il secondo termine è nullo o quando si annulli una delle due componenti di corrente o anche in cui $L_d = L_q$, cioè in assenza di anisotropia magnetica del rotore.

Il modello ai valori istantanei in coordinate statoriche (2.3.13) può essere facilmente particolarizzato a regime stazionario sinusoidale imponendo le seguenti condizioni.

$$\omega_r = \text{costante} \xrightarrow{\text{segue}} \vartheta = \omega_r t + \vartheta_0; \quad p\omega_r = \omega$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_s(t) &= \sqrt{2} \mathbf{V}_s e^{j\omega t} & \text{con} & \quad \mathbf{V}_s = V_s e^{j\varphi_v} \\ \mathbf{i}_s(t) &= \sqrt{2} \mathbf{I}_s e^{j\omega t} & \text{con} & \quad \mathbf{I}_s = I_s e^{j\varphi_i} \\ \mathbf{e}_r(t) &= \sqrt{2} \mathbf{E}_0 e^{j\omega t} & \text{con} & \quad \mathbf{E}_0 = \frac{j\omega \Phi_r}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (2.3.17)$$

$$\Phi_r = \Phi_r e^{j\psi}; \quad \mathbf{E}_0 = E_0 e^{j(\psi + \frac{\pi}{2})}; \quad \psi = p\vartheta_0$$

cioè la velocità di rotazione si assume costante e pari alla velocità di rotazione del campo magnetico rotante, tensione e corrente di armatura si assumono sinusoidali a pulsazione costante ω e così pure la tensione indotta a vuoto \mathbf{E}_0 .

L'equazione di equilibrio elettrico delle (2.3.13), tenuto conto anche delle (2.3.17) assume la seguente espressione:

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{E}_0 + (R_s + jX_s) \mathbf{I}_s + jX_1 \mathbf{I}_s e^{j2\psi} \quad (2.3.18)$$

In cui $X_s = \omega L_s$ e $X_1 = \omega L_1$

Nel caso di macchina isotropa $X_1 = 0$, la (2.3.18) è interpretabile con il circuito equivalente di figura 8 con il suo diagramma vettoriale.

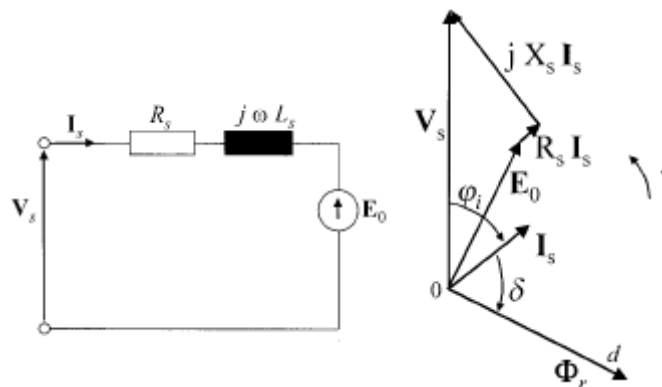


Figura 2. 6: Circuito equivalente e diagramma vettoriale

ed il momento della coppia elettromagnetica assume l'espressione:

$$T_e = \frac{3pE_0I_s}{\omega} \sin \delta \quad \text{con} \quad \delta = \varphi_i - \psi \quad (2.3.19)$$

Dalla (2.3.19) si deduce che, per fissati valori della pulsazione ω , del flusso di rotore e quindi della tensione indotta a vuoto E_0 , in corrispondenza dell'ampiezza I_s della corrente di armatura, la coppia varia al variare dell'angolo delta tra flusso di rotore e f.m.m. di armatura e assume il massimo in corrispondenza di $\delta = \pi/2$.

Nel caso di macchina anisotropa, invece, l'espressione del momento della coppia elettromagnetica diviene:

$$T_e = \frac{3pE_0I_s}{\omega} \sin \delta + 3pL_1I_s^2 \sin 2\delta \quad (2.3.20)$$

dove, oltre al termine di coppia dovuto alla presenza del flusso rotorico, è possibile rilevare la presenza della cosiddetta "coppia di riluttanza", dovuta all'anisotropia rotorica e variabile con il $\sin(2\delta)$. Per macchine anisotrope, quindi, il valore massimo di coppia può non aversi in corrispondenza della condizione di f.m.m. di armatura in quadratura col flusso di rotore $\delta = \pi/2$, ma per valori $\delta < \pi/2$. [14]

2.4 Limiti operativi e velocità caratteristiche di un AC-Brushless

Come per tutti gli azionamenti alimentati da convertitori statici, esistono dei valori limite per la corrente e la tensione che non vanno oltrepassati, pena il malfunzionamento se non la rottura della macchina oppure dei dispositivi elettronici costituenti il convertitore. Per evitare l'insorgere di fenomeni di saturazione magnetica, inoltre, occorre che il flusso concatenato di statore non superi il valore nominale e, per proteggere la macchina dalla smagnetizzazione dei magneti permanenti, si deve avere che la componente di asse diretto della corrente non produca un flusso tale da indebolire il campo magnetico prodotti dai magneti permanenti oltre un valore prefissato.

Analizzando l'espressione della coppia si osserva come l'anisotropia del rotore rappresentata dalla differenza $(L_d - L_q)$ produce una coppia di anisotropia; nel seguito, salvo indicazione contraria, si



prenderà in considerazione il solo caso di macchina sincrona isotropa, cioè tale che risulti $L_d = L_q = L_s$. In questo caso risulta:

$$T_e = n_p(\psi_{pm}c) \quad (2.4.1)$$

Dall'ultima espressione si evidenzia come, ai fini della formazione di coppia, solo la componente in quadratura della corrente statorica risulti efficace, mentre quella diretta non fornisca alcun contributo. Al fine dunque di limitare al minimo il vettore corrente e quindi minimizzare le perdite per effetto Joule, è opportuno operare sul regolatore dell'alimentatore in modo tale che risulti, in ogni istante $i_{sd} = 0$.

In tal modo l'unica equazione elettrica significativa è quella statorica su asse in quadratura:

$$v_{sq} = R_S i_{sq} + L_s p i_{sq} + \dot{\vartheta}_m \psi_{pm} \quad (2.4.2)$$

mentre quella su asse diretto si riduce semplicemente a:

$$v_{sd} = -\dot{\vartheta}_m L_s i_{sq} \quad (2.4.2)$$

Nel nostro caso, i_{sd} e i_{sq} non sono correnti circolanti in avvolgimenti fisicamente distinti, ma sono le componenti, secondo gli assi "d" e "q" solidali con il rotore, di un unico sistema di correnti trifasi: il passaggio dall'uno all'altro sistema si ottiene mediante le formule dei fasori spaziali.

Nel caso di funzionamento a regime le grandezze elettriche riferite ad assi sincroni con l'alimentazione sono costanti e risulta essere:

$$\begin{cases} \dot{\vartheta}_m = \omega \\ v_{sq} = R_S i_{sq} + \omega \psi_{pm} = R_S i_{sq} + E \\ v_{sd} = -\omega L_s i_{sq} \end{cases} \quad (2.4.3)$$

Si può così tracciare il seguente diagramma vettoriale:

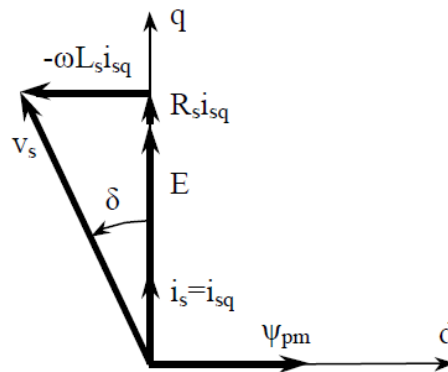


Figura 2. 7: Diagramma vettoriale del motore brushless a regime

Nel caso la caduta resistiva sia trascurabile rispetto a E , si nota che al variare della pulsazione l'angolo δ rimane costante e che l'ampiezza del vettore tensione cresce proporzionalmente alla pulsazione stessa. Si supponga ora di alimentare il motore in modo tale da produrre una componente di corrente sull'asse diretto negativa; in tal caso $i_{sd} < 0$ (non più $i_{sd} = 0$); dunque, a regime, valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega L_s i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega L_s i_{sd} + E \end{cases} \quad (2.4.4)$$

Da cui si deduce il seguente diagramma:

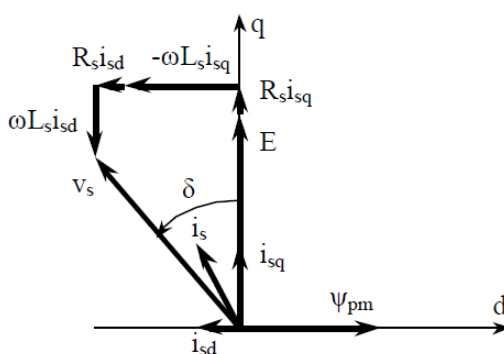


Figura 2. 8: Diagramma vettoriale del motore brushless in presenza di corrente i_{sd} negativa

Dalla costruzione si evidenzia come, a pari componente i_{sq} , l'aggiunta di una componente i_{sd} negativa ha portato ad una riduzione del vettore tensione di alimentazione, ma ad un aumento del vettore corrente. Il dover mantenere la corrente di statore entro un valore massimo prestabilito, imposto dal dimensionamento termico dei componenti dell'alimentatore, comporta dunque la necessità di ridurre la i_{sq} , quindi la coppia, all'aumentare di i_{sd} .

Per velocità inferiori alla velocità base (ω_{base}) conviene mantenere $i_{sd} = 0$ e la componente i_{sq} limitata al valore massimo consentito (i_{smax}) in modo da lavorare in un tratto a coppia costante e pari alla massima possibile, si faccia riferimento alla Fig.2.9.

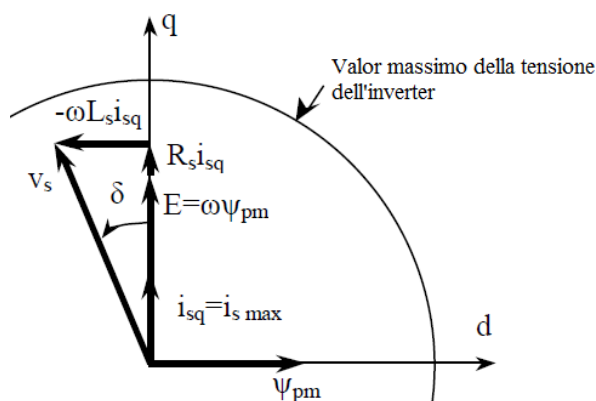


Figura 2. 9: Diagramma vettoriale con i_{sd} e $\omega < \omega_{base}$



All'aumentare della frequenza di alimentazione, dunque della velocità, aumenta, l'E è dunque la tensione di alimentazione necessaria che l'alimentatore è tenuto a fornire. Giunti alla velocità base la tensione di alimentazione è pari alla massima tensione fornibile dall'alimentatore a parte un determinato margine (circa il 10%) necessario alla regolazione della corrente, illustrata nella Fig.2.10.

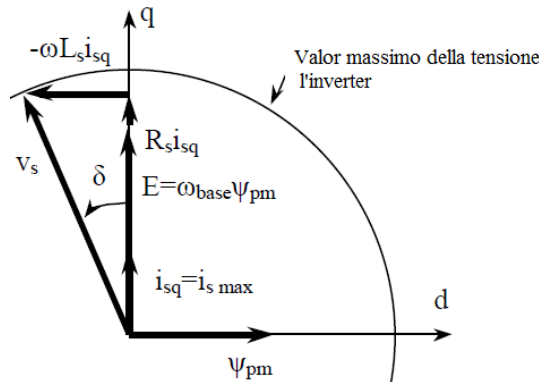


Figura 2. 10: Diagramma vettoriale con i_{sd} e $\omega = \omega_{base}$

Per velocità superiori alla nominale non si può più mantenere. $i_{sq} = i_{max}$ perché l'ulteriore aumento della E richiederebbe una tensione di alimentazione superiore a quella fornita dall'alimentatore che è già la massima disponibile: in tale regione dunque occorre ridurre la i_{sq} per lasciare spazio ad una i_{sd} negativa in modo che risulti sempre:

$$i_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} < i_{max} \tag{2.4.5}$$

A tal punto se andassimo a considerare un caso limite, in cui $E = v_{max}$, $i_{sd} = 0$ e $i_{sq} = 0$ si otterrà una velocità pari a $\omega' = v_{max} / \Psi_{pm}$ e con correnti nulle, avrò, ovviamente coppie nulle. Se avessimo invece, un $i_{sd} < 0$, in cui il motore è ancora in grado di sviluppare coppia. In questo modo si ottiene una sorta di deflussaggio. La coppia diminuisce poiché il valore d' i_{sq} deve diminuire per mantenere nei limiti il modulo della corrente statorica come sotto illustrato.

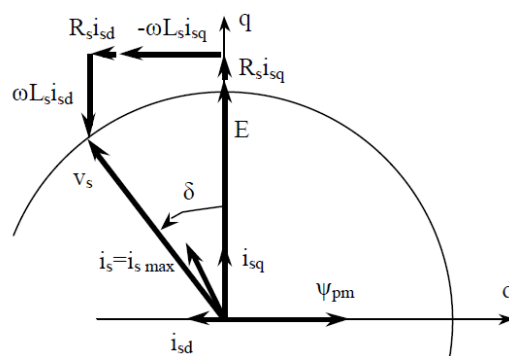


Figura 2. 11: Diagramma vettoriale con $\omega > \omega_{base}$



Dimensionando opportunamente il motore utilizzando dei magneti permanenti a elevata forza coercitiva e con ginocchio nel terzo quadrante, e con traferro sovradimensionato o magneti annegati, è possibile richiedere una corrente i_{sd} pari al rapporto tra ψ_{pm} e L_s , com'è possibile notare dalla seguente Figura 2.12.

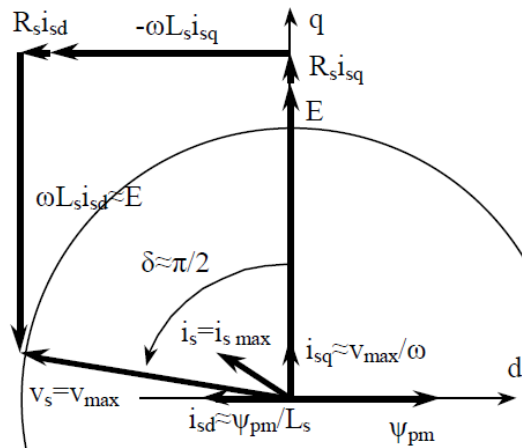


Figura 2. 12: Diagramma vettoriale con $\omega_{base} < \omega < \omega^*$

Il punto di passaggio è definito dal valore della velocità meccanica ω^* . Per $\omega > \omega^*$ la tensione $\omega L_s i_{sd}$ risulta pari a E indipendentemente dalla velocità meccanica. Se si trascurano le cadute resistive, com'è possibile notare dalla Fig.2.13, la corrente i_{sq} vale v_{max}/ω e quindi la coppia risulta inversamente proporzionale alla velocità meccanica.

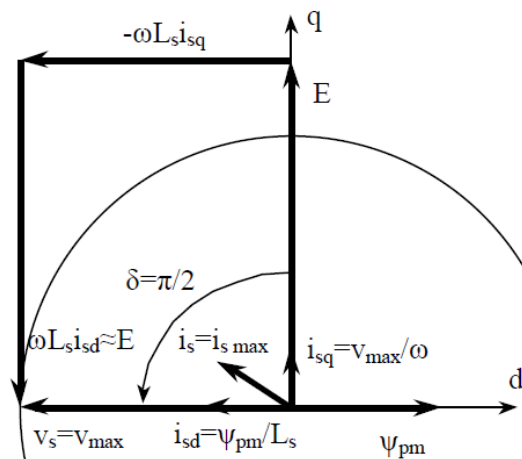


Figura 2. 13: Diagramma vettoriale con $\omega \geq \omega^*$

Nella pratica possiamo, attraverso opportuni mezzi, andare a visionare il campo di operatività di una macchina sincrona a magneti permanenti. In Fig.2.14 sono stati messi in evidenza i profili degli andamenti teorici presi in esame.

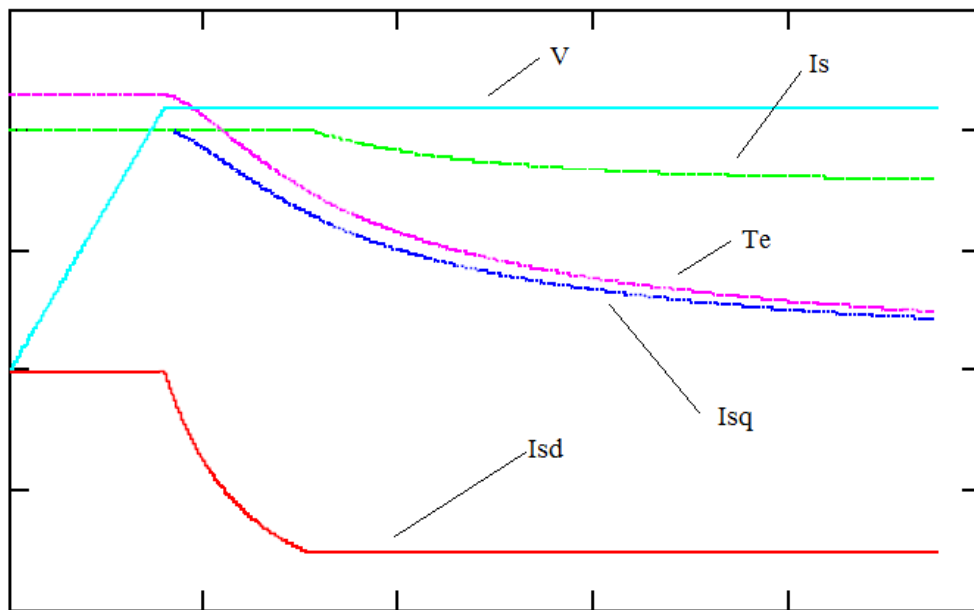


Figura 2. 14: Campo di operatività di un AC-Brushless

E' stato fatto un confronto tra i profili sperimentali, delle correnti i_{sd} e i_{sq} , degli AC-brushless, ottenute utilizzando un programma proprietario Festo di nome FCT (Festo Configuration Tool) il quale ha consentito di visualizzare a schermo gli andamenti delle suddette grandezze in real-time eseguendo un trigger manuale all'interno del programma.

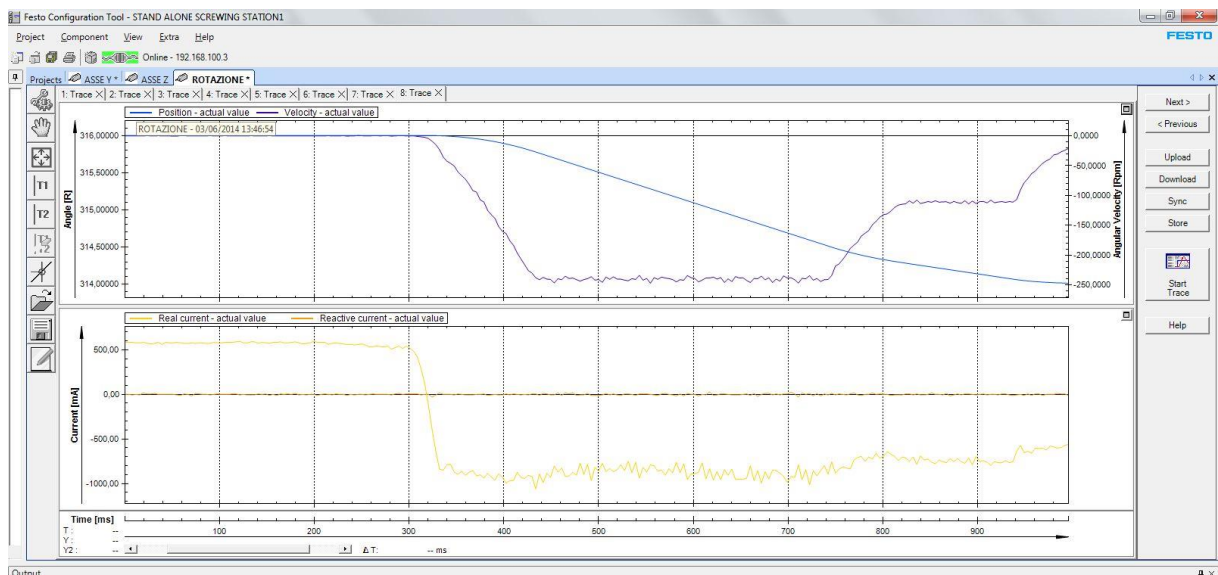


Figura 2. 15: Andamenti della isd e isq

Andiamo a disegnare i limiti in corrente sul piano di Gauss come in Fig.2.16, tale piano è costituito da una circonferenza di raggio I_{smax} e da una circonferenza di raggio $V_s/(\omega L_s)$ il cui centro è spostato, a sinistra rispetto il centro del cerchio delle correnti, di un segmento pari a ψ_{pm}/L_s .

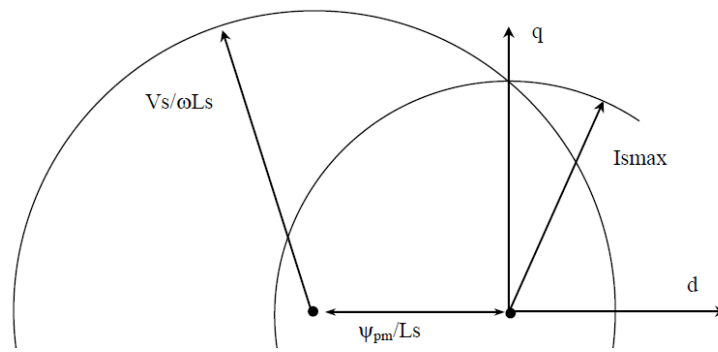


Figura 2. 16: Limiti di Tensione e Corrente

Per velocità inferiori a ω_{base} la circonferenza delle tensioni non cambia in quanto, se si trascurano le cadute resistive, il modulo della tensione di statore cresce proporzionalmente alla velocità. L'angolo δ che è quello tra la ψ_{pm}/L_s e $V_s/\omega L_s$, non cambia e neppure i_{sq} che può assumere, al limite, il valore massimo della corrente statorica I_{smax} . Il triangolo delle correnti, quindi, non cambia quando la velocità è minore della velocità base. Tale figura vale anche per velocità uguali a quella base, velocità alla quale la tensione di statore raggiunge il valore massimo consentito dall'alimentatore e dall'isolamento della macchina.

Per velocità maggiori, il raggio della circonferenza delle tensioni deve decrescere con un andamento inversamente proporzionale alla velocità stessa. L'intersezione tra le due circonferenze determina il punto di funzionamento. Il modulo della corrente di statore può rimanere al suo valore massimo, l'angolo δ aumenta la corrente i_{sd} cresce in modulo ma è negativa, la corrente i_{sq} decresce in modulo per mantenere la corrente di statore costante.

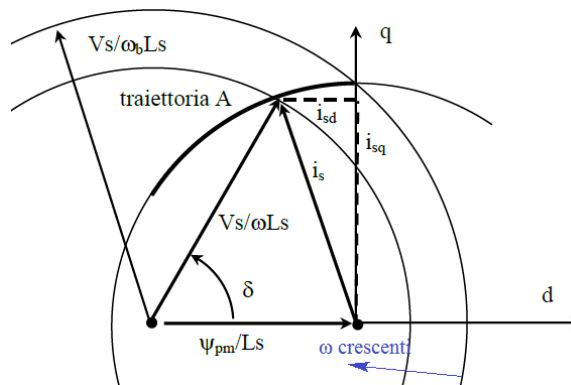


Figura 2. 17: Velocità maggiore della velocità base

Riferendoci alla Fig.2.17, la velocità base corrispondente a $i_{sd} = 0$ e $i_{sq} = I_{smax}$ sarà:

$$\omega_{base} = \sqrt{\frac{V_s^2}{\psi_{pm}^2 + L_s^2 I_{smax}^2}} \tag{2.4.6}$$

Se eventualmente, il rapporto $(\psi_{pm}/L_s) < I_{smax}$, allora esiste una velocità ω^* in cui l'angolo δ risulta essere pari a $\pi/2$. A tale velocità la corrente $i_{sd} = -(\psi_{pm}/L_s)$ ottenendo così una ω^*

$$\omega^* = \sqrt{\frac{V_s^2}{-\psi_{pm}^2 + L_s^2 I_{smax}^2}} \quad (2.4.7)$$

La corrente i_{sq} decresce in modo inversamente proporzionale alla velocità meccanica, la i_s seguirà la traiettoria A fino al punto in cui la circonferenza di raggio $(V_s/\omega^* L_s)$ non interseca quella di raggio i_s , e successivamente seguirà la traiettoria B, si veda la Fig.2.18. [15]

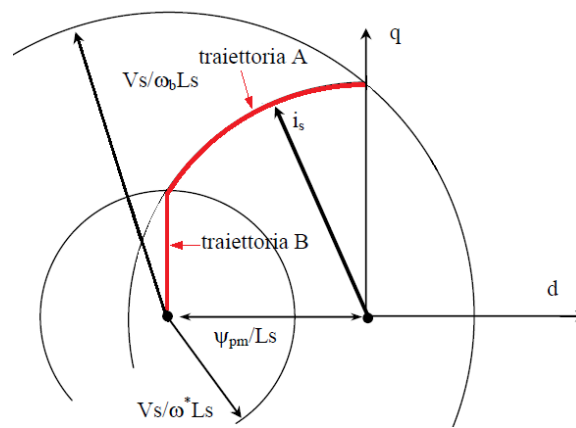


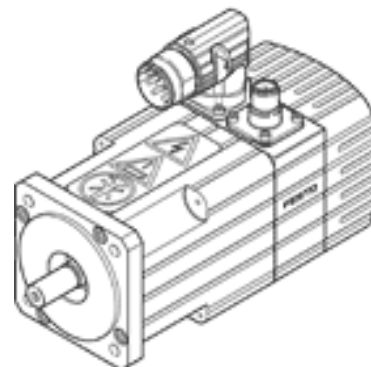
Figura 2. 18: Andamento della i_s

2.5 Monitoraggio parametrico in ambiente Matlab-Simulink

Per il robot di avvitatura stand-alone, si sono utilizzati tre motori Festo EMMS-AS, la cui sigla sta a indicare che sono dei servomotori AC-Brushless. Inoltre, è stato eseguito uno studio parametrico su uno di questi motori, utilizzando un algoritmo in ambiente Matlab&Simulink con la quale è stato possibile visualizzare due dei molti parametri di interesse; di seguito vi è il motore utilizzato per la prova sperimentale:

FESTO

EMMS-AS-70-S-LS-RMB





Caratteristica	Valore
Trasduttore posizione rotore	Encoder
Controllo temperatura	Resistenza PTC
Numero di giri max.	6.300 1/min
Numero di giri nominale	5.300 1/min
Tensione d'esercizio CC, freno	24 V
Classe di isolamento	F
Assorbimento elettrico, freno	11 W
Costante motore	0,647 Nm/A
Potenza nominale, motore	866 W
Tensione nominale CC	360 V
Corrente nominale, motore	2,2 A
Risoluzione trasduttore di posizione del rotore	18 Bit
Resistenza avvolgimenti fase-fase	7,66 Ohm
Induttanza fase-fase avvolgimenti	14,5 mH
Tipo di avvolgimenti	Stella
Corrente di picco	5 A
Classe di misurazione secondo EN 60034-1	S1
Marchio CE (vedi dichiarazione di conformità)	Ai sensi della direttiva CE sulla compatibilità elettromagnetica Ai sensi della direttiva CE sulla bassa tensione
Classe di resistenza alla corrosione CRC	2
Temperatura di stoccaggio	-20 ... 60 °C
Umidità relativa dell'aria	0 - 90 %
Grado di protezione	IP54
Temperatura ambiente	-10 ... 40 °C
Omologazione	C-Tick c UL us - Recognized (OL)
Momento d'inerzia di massa complessivo presa di potenza	0,449 kgcm ²
Coppia di bloccaggio freno	2 Nm
Momento di inerzia di massa freno	0,071 kgcm ²
Coppia nominale	1,43 Nm
Coppia di picco	3,1 Nm
Coppia in condizioni di riposo	1,64 Nm
Carico assiale ammissibile sull'albero	75 N
Carico radiale ammissibile sull'albero	150 N
Peso	2.300 g
Tecnica di connessione elettrica	Connettore maschio
Avvertenza sul materiale	Conforme a RoHS
Conforme alla norma	IEC 60034

Tabella 1: Dati tecnici EMMS-AS-70-S-LS-RMB

Nella Tabella 2 sono riportati brevemente i significati delle sigle del suddetto motore, tali sigle sono importanti per la comprensione del motore e la sua selezione in caso di scelta:

Caratteristiche base	
Caratteristica	Valore
Tecnica motori	AS ca sincrono
Dimensioni flangia per motori	70 mm
Dimensione	S Corta
Uscita albero	Albero liscio
Avvolgimento	LS Bassa tensione, Standard
Connessione elettrica	R Connettore angolare orientabile
Unità di misura	M Encoder assoluto multi turn
Freno	B Freno
Grado di protezione, parte elettrica	Standard

Tabella 2: Significato sigle EMMS-AS-70-S-LS-RMB



I diversi parametri con cui è caratterizzato un motore PM brushless non può considerarsi costante e indipendente dalle condizioni operative del motore stesso. Di conseguenza, non basta misurarne i valori alle sole condizioni nominali per ritenere definito il modello matematico; occorrerà bensì determinare il valore di tali parametri in tutti i punti di possibile funzionamento e, in particolare, al variare di entrambe le componenti i_d , i_q della corrente di statore e per diverse temperature degli avvolgimenti. Un modello matematico accuratamente definito consente alla logica di controllo di lavorare correttamente; su di esso si basa, infatti, sia il calcolo delle correnti di riferimento, sia la definizione dei limiti operativi nel piano di controllo di cui abbiamo parlato nel paragrafo precedente, nonché la strategia di ottimizzazione prestazionale.

In una macchina isotropa si consideri di ricavare una componente di corrente i_q^* proporzionale al valore di coppia desiderato T^* tramite il valore Φ_r del flusso di rotore (controllo in coppia con $i_d^*=0$): immaginando che Φ_r non corrisponda al vero, il valore i_q^* non potrà assicurare che il motore sviluppi la coppia richiesta. Il problema non è rilevante quando si compie un controllo in velocità, giacché l'anello in ω_r compenserà la differenza adattando T^* in modo da assicurare $\omega_r^* = \omega_r$ a regime. È evidente, inoltre, che in ogni caso il rischio di superare i valori limite di corrente e tensione non sussiste, poiché quand'anche i valori di riferimento calcolati dovessero eccedere il dominio di funzionamento, essi sarebbero comunque limitati. Di contro, qualora il calcolo della coppia massima fornisse valori inferiori a quelli che il motore potrebbe effettivamente sviluppare, la prestazione dell'azionamento sarebbe penalizzata rispetto alle sue reali potenzialità. Per lo stesso motivo, la strategia di massimizzazione del rapporto coppia/corrente può non produrre l'effetto desiderato quando il modello matematico è mal caratterizzato, soprattutto nel caso di un motore anisotropo.

Si può pensare adottare un sistema di rilevazione parametrica in grado di lavorare on-line, parallelamente al controllo, che fornisca il valore dei parametri in real-time.

Inoltre, a prescindere dalle problematiche concernenti il controllo, calcolare il valore dei parametri in tempo reale consente di monitorare lo stato di salute della macchina, controllare il degrado delle prestazioni, prevedere eventuali guasti, o comunque rilevarne tempestivamente l'insorgenza, in modo da attivare i sistemi di protezione atti a garantire la sicurezza.

Il monitoraggio parametrico on-line di un motore PM brushless può essere effettuato a mezzo di implementazione di vari algoritmi estimativi. Se si immagina di costituire un sistema integrato unico in cui sia la parte relativa agli algoritmi di controllo sia il monitoraggio parametrico lavorino in maniera sincrona, al fine di alleggerire lo sforzo dell'unità centrale al microprocessore, si può optare per algoritmi ricorsivi come il *Recursive Least Square*. [22]

Quest'algoritmo stima in tempo reale l'induttanza di asse diretto e l'induttanza di asse in quadratura, si tratta di un algoritmo abbastanza noto e che nel caso bidimensionale può essere. Formulato attraverso la seguente equazione algebrica:



$$\bar{\mathbf{L}}_k = \bar{\mathbf{L}}_{k-1} + \mathbf{G}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{m}_k^T \bar{\mathbf{L}}_{k-1}) \quad \text{dove} \quad (2.5.1)$$

$$\bar{\mathbf{L}} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{L}}_d \\ \bar{\mathbf{L}}_q \end{bmatrix} \text{ è il vettore dei parametri stimati;} \quad (2.5.2)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} v_d - R_s i_d \\ v_q - R_s i_q - \omega \Phi_r \end{bmatrix} \text{ è la matrice delle misure;} \quad (2.5.3)$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} 0 & \omega i_d \\ -\omega i_q & 0 \end{bmatrix} \text{ è la matrice delle misure;} \quad (2.5.4)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ è la matrice identità;} \quad (2.5.5)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G}_k = \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{m}_k [\lambda \cdot \mathbf{I} + \mathbf{m}_k^T \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{m}_k]^{-1} \\ \mathbf{P}_k = \frac{1}{\lambda} (\mathbf{P}_{k-1} - \mathbf{G}_k \mathbf{m}_k^T \mathbf{P}_{k-1}) \end{cases} \text{ sono le matrici di correlazione;} \quad (2.5.6)$$

T è l'operatore di trasposizione matriciale;

$\lambda \in [0, 1]$ è il *forgetting factor*

L'algoritmo in questione persegue l'obiettivo di minimizzare la sommatoria del quadrato degli errori di stima, non contiene alcun regolatore da tarare e l'unica quantità da settare è il *forgetting factor* λ , che determina il grado di reattività e di stabilità del sistema.

L'algoritmo lavora in maniera sincrona col sistema di controllo, sfruttando gli stessi valori misurati di corrente e posizione rotorica, e aggiungendo misure di tensione e temperatura; le tensioni di macchina sono ricostruite dai segnali di comando ai componenti controllati e dal valore della tensione nello stadio in continua.

Tale sistema fornirà in uscita il valore stimato delle induttanze d'asse diretto e quadratura al variare delle condizioni di funzionamento del motore.

E' stata allestita una stazione di acquisizione digitale delle grandezze d'interesse, sfruttando la misura digitale della posizione rotorica già resa disponibile per il controllo attraverso FCT(Festo Configuration Tool). Ogni acquisizione, della durata di pochi secondi, è stata eseguita imponendo una coppia di valori costanti i_d^* , i_q^* e mantenendo stabile la velocità ω_r . I dati così ottenuti sono stati successivamente elaborati isolando il contributo dell'armonica fondamentale con algoritmi FFT.

Il valore delle induttanze L_d, L_q è risultato dipendere da entrambe le componenti di corrente i_d, i_q , mentre non si è riscontrata una influenza significativa della velocità di rotazione.

Interpolando linearmente i dati ottenuti, si sono andati a rappresentare gli andamenti delle superfici delle induttanze d'asse diretto L_d e in quadratura L_q :

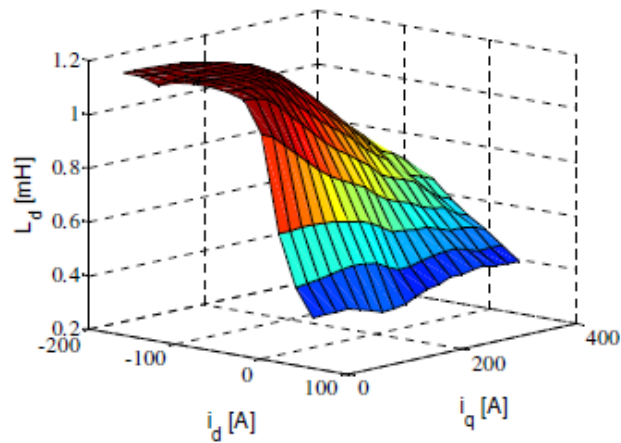


Figura 2. 19: Andamento sperimentale di L_d al variare di i_d e i_q

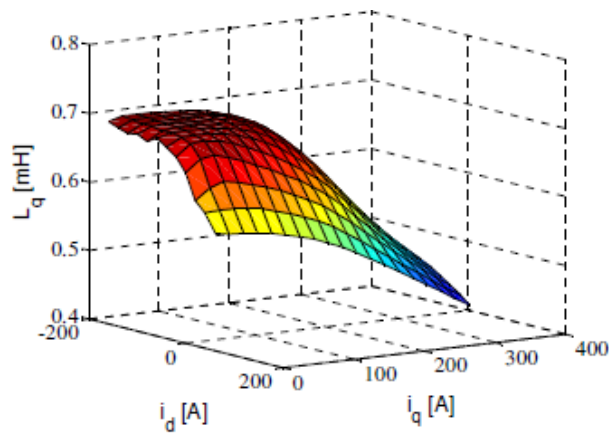


Figura 2. 20: Andamento sperimentale di L_q al variare di i_d e i_q

Avendo attribuito alla quantità $L_d \cdot i_d$ la variazione del flusso totale d'asse diretto per opera della variazione della componente di corrente i_d , il valore di Φ_r è risultato dipendere dalla sola componente di corrente i_q :

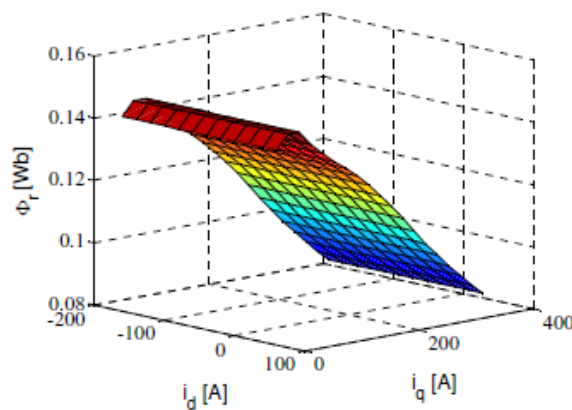


Figura 2. 21: Andamento sperimentale di Φ_r al variare di i_d e i_q

Capitolo 3

AZIONAMENTO ELETTRICO AC-BRUSHLESS

Oggigiorno non si può più fare a meno dell'automazione per cui si continua ad assistere a un continuo processo di sviluppo tecnologico. La tecnica moderna degli azionamenti è caratterizzata da un rapporto sinergico crescente fra componenti elettrici e meccanici costituenti il sistema di comando. E' possibile realizzare dispositivi di azionamento con caratteristiche nuove e migliorate utilizzando un'elettronica di potenza compatta, motori di concezione innovativa, meccaniche ottimizzate, materiali nuovi e con una tecnologia di comunicazione efficiente.

Per comprendere meglio questi dispositivi di azionamento, in questo paragrafo si descriveranno le caratteristiche e i principi di funzionamento dell'azionamento usato per l'applicazione in questione; poiché ogni azionamento elettrico è costituito, oltre che dal motore elettrico, anche da molti altri componenti, si parlerà anche di sistemi di misurazione, elettronica di potenza, trasmissioni, comando e componenti che trasmettono forze.

L'ampia gamma degli azionamenti Festo va dal semplice asse di posizionamento senza la regolazione dell'azionamento, fino al servocomando con circuiti di regolazione intelligenti in grado di controllare le variabili di processo desiderate. L'elettronica di potenza necessaria per realizzare queste funzioni e la relativa elaborazione dei segnali dimostra che oggi gli azionamenti elettrici rappresentano un campo della scienza interdisciplinare che richiede un notevole Know-how.

Gli azionamenti AC-Brushless utilizzano dei motori sincroni a magneti permanenti in cui il campo magnetico di eccitazione è fornito da questi ultimi; il campo di applicazione di questi azionamenti è limitato alle medie-basse potenze, perché potenze elevate richiederebbero l'utilizzo di motori di grossa taglia.

3.1 Caratteristiche dell'azionamento

L'azionamento utilizzato è un "azionamento asse" il cui compito è essenzialmente quello di portare in rotazione un albero a una determinata velocità, imposta da un opportuno riferimento, entro determinati limiti che all'interno dell'FCT (Festo Configuration Tool) si andranno a settare mediante dei Limit Switch di coppia, di velocità e di posizione, che successivamente vedremo più nel dettaglio nel capitolo 6. I requisiti che dovranno essere rispettati sono, quello di avere una totale bidirezionalità dell'azionamento con zona morta nulla intorno allo zero di velocità, sia in condizioni statiche sia dinamiche e il rapporto tra velocità



Ogni azionamento ha una tensione massima che è in grado di erogare, se questa tensione è inferiore a quella massima ammessa dal motore la curva di coppia effettiva risulterà ristretta. Inoltre, se la corrente nominale e di picco dell'azionamento fosse inferiore a quelle del motore anche la coppia massima e di picco sarebbero limitate. Infine è necessario verificare che la potenza richiesta dal motore non sia maggiore della potenza massima (nominale e di picco) fornibile dall'azionamento.

3.2 Architettura di controllo

Un classico convertitore reale utilizzato è, come accennato nel paragrafo precedente, un convertitore bi-stadio con un raddrizzatore a diodi (non controllato) nel primo stadio, un circuito di accoppiamento a tensione V_{dc} , contenente una capacità C di livellamento della tensione, ed un inverter a tensione impressa o V.S.I. (Voltage Source Inverter) con dispositivi a spegnimento comandato (ad esempio IGBT) nel secondo stadio. Di seguito riporto la struttura semplificata dell'azionamento CMMP:

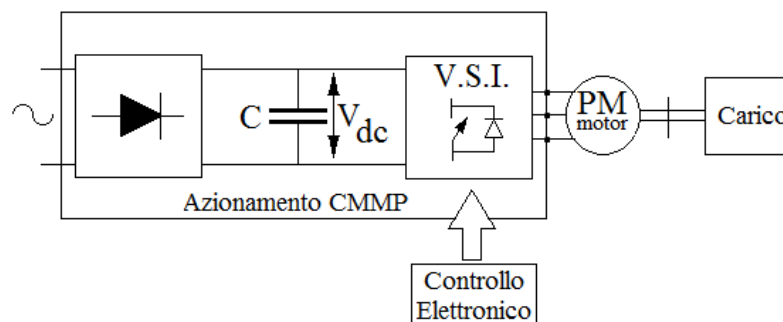


Figura 3. 2: Schema di azionamento convenzionale con ingresso in AC

Lo schema di Figura 3.2, è adatto solamente al caso in cui l'alimentazione è in alternata monofase, ed è messa in evidenza la trasformazione di energia. Il blocco "Controllo elettronico" contiene gli algoritmi e rappresenta la parte "intelligente" dell'azionamento.

Possiamo a tal punto andare a rappresentare lo schema di controllo complessivo di un AC-Brushless, considerando prima il caso in cui abbiamo un alimentatore controllato in corrente (vedi Fig.3.3), e successivamente il caso in cui abbiamo uno controllato in tensione (vedi Fig.3.4). Le figure seguenti sono costituite da quattro macro blocchi:

1. Unità di controllo
2. Alimentatore
3. AC Brushless
4. Carico Meccanico

All'interno del primo vi è il blocco $T(\theta_m)^{-1}$ che rappresenta l'anti-trasformata di Park dai fasori spaziali alle grandezza di fase, nel secondo blocco vi il controllo in corrente che permette alle correnti del motore di inseguire fedelmente i valori di riferimento, da tale blocco escono



sempre delle grandezze di fase, poi abbiamo un terzo blocco che è costituito dalla trasformata di Park che consente la trasformazione da grandezze di fase a fasori spaziali, la coppia che se ne ricava entra nell'ultimo blocco il quale fornirà una velocità che verrà retroazionata all'unità di controllo.

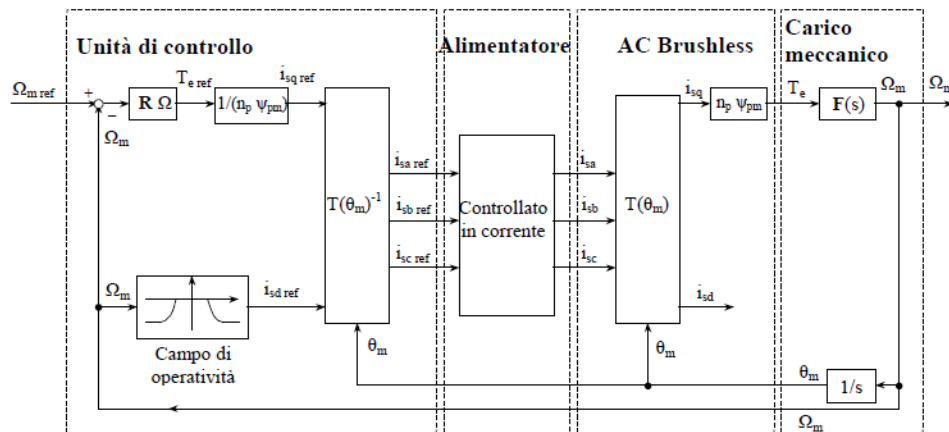


Figura 3. 3: Schema complessivo del controllo con alimentatore di corrente

Preso visione dalla Dispensa di F.Castelli Dezza

Nel caso si voglia considerare la dinamica di statore, lo schema di controllo sarà quello della Fig.3.4, in tal caso l'alimentatore ha il compito di realizzare un riferimento di tensione, mentre la regolazione della corrente è fatta dal primo blocco. [25]

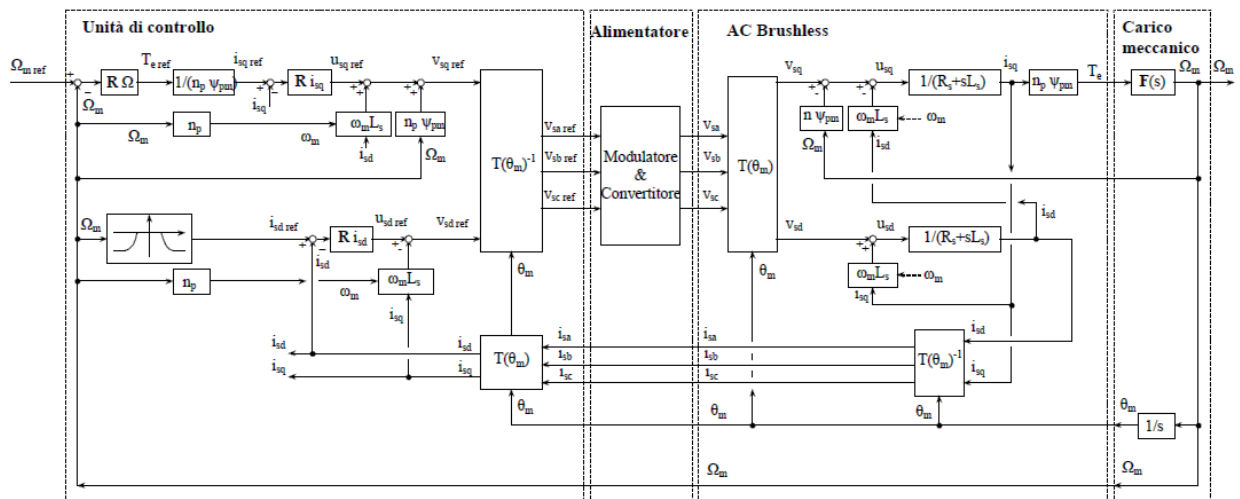


Figura 3. 4: Schema complessivo del controllo con alimentatore di tensione

Preso visione dalla Dispensa di F.Castelli Dezza

A tal punto fatta questa breve descrizione del principio di funzionamento dell'azionamento elettrico, si va a descrivere di seguito la logica di funzionamento dell'azionamento CMMP con una regolazione diretta di coppia, si è supposto che i regolatori di corrente lavorino sulle componenti di corrente nel piano d,q , e non sulle tre correnti di fase; ciò consente di

semplificare la taratura delle costanti dei regolatori stessi. Di contro, però, come deducibile dal modello matematico del motore sincrono a magneti permanenti, non è possibile ricavare il riferimento della tensione d'asse diretto v_{sd}^* dalle sole componenti dirette di correnti i_{sd}^* e i_{sq}^* . Ciò giustifica la presenza del blocco Compensazione (vedi Fig.3.5) che compie la seguente computazione:

$$\begin{cases} v_{sd}^* = \tilde{v}_{sd} - (\omega L_q \hat{i}_{sq}) \\ v_{sq}^* = \tilde{v}_{sq} + (\omega L_d \hat{i}_{sd} + \omega \Phi_r) \end{cases} \quad (3.2.1)$$

Di seguito riporto lo schema di controllo del robot di avvitatura:

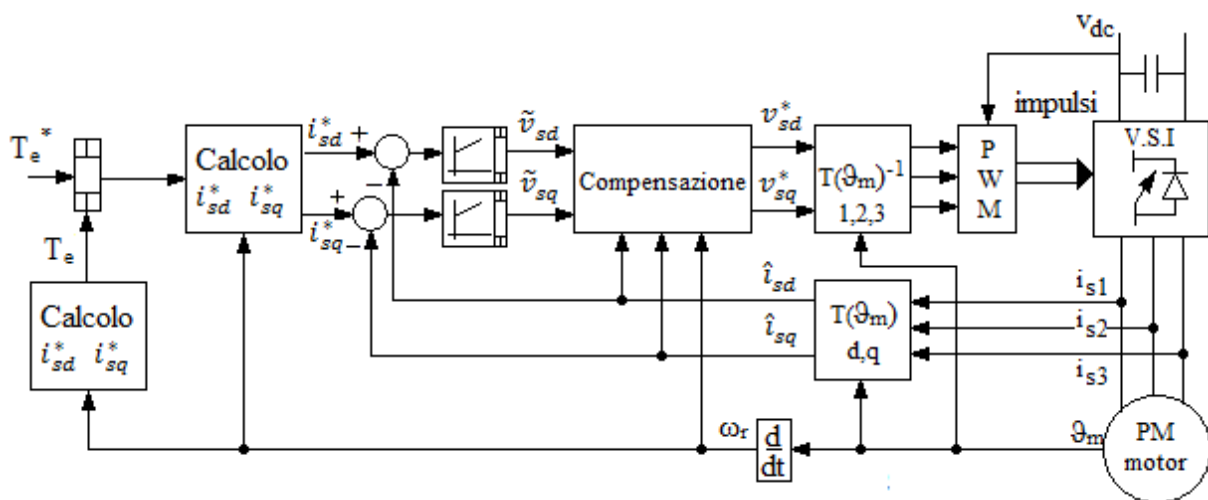


Figura 3. 5: Schema di controllo per motore brushless

Una volta calcolati i valori delle tensioni di riferimento, questi andranno modulati secondo le classiche tecniche di modulazione PWM cioè con una modulazione a larghezza d'impulsi; generalmente si preferisce la modulazione vettoriale denominata Space Vector Modulation (SVM), di cui si discuterà al successivo paragrafo.

3.3 Richiamo generale sull'inverter trifase

Gli inverter dc-ac a commutazione sono usati negli azionamenti elettrici per motori in corrente alternata, dove l'obiettivo è di produrre una tensione alternata sinusoidale, la quale può essere controllata sia in ampiezza sia in frequenza.

Andando a considerare la Fig.3.2 dove abbiamo un azionamento, che alimenta un motore a corrente alternata, com'è possibile notare, la tensione dc è ottenuta raddrizzando e filtrando quella di linea. Quello che desideriamo ottenere è che la tensione ai morsetti del carico, sia regolabile in ampiezza e frequenza.



Questo è possibile grazie all'ausilio dell'inverter dc-ac a commutazione, che riceve in ingresso una tensione continua e ne fornisce in uscita una alternata, l'inverter a commutazione di cui fa parte l'azionamento, ha un flusso di potenza reversibile.

Per il solito funzionamento la potenza fluisce dal lato dc al lato ac, richiedendo un funzionamento come inverter, mentre per rallentare il motore in alternata, l'energia cinetica associata alla sua inerzia e al carico è recuperata e il motore funziona come generatore. Durante questa fase, che sarebbe la fase di frenatura, la potenza non fluisce più come spiegato in precedenza, ma fluisce dal lato ac al dc, quindi il convertitore non funziona più come inverter ma come raddrizzatore. [20]

L'azionamento CMMP-AS è, per tal motivo, costituito da una resistenza inserita in parallelo al filtro di livellamento per dissipare l'energia recuperata durante la frenatura del motore.

L'inverter presente all'interno dell'azionamento fornisce in uscita, come abbiamo già accennato, una tensione trifase, assumendo che l'ingresso di tale inverter sia una tensione continua potremo, allora, denominarli come inverter a tensione impressa VSI (Voltage Source Inverter). Tali inverter possono essere suddivisi in tre classi generali:

1. **INVERTER CON REGOLAZIONE A LARGHEZZA D'IMPULSO (PWM).** In tal caso l'inverter deve controllare l'ampiezza e la frequenza della tensione di uscita, grazie ad una modulazione PWM fatta da valvole controllate. Le valvole sono opportunamente commutate, al fine di ottenere una forma d'onda d'uscita che sia più prossima possibile a quella sinusoidale.
2. **INVERTER AD ONDA QUADRA.** In questi inverter si controlla la tensione continua d'ingresso per controllare l'ampiezza di quella alternata di uscita, e quindi l'inverter deve controllare solo la frequenza della tensione d'uscita. Quest'ultima è alternata e ha una forma d'onda simile a quella quadra, da qui il nome.
3. **INVERTER CON REGOLAZIONE VETTORIALE (SVM).** Questo tipo di regolazione di basa sul controllo del comportamento globale del sistema trifase e non sul controllo separato di ciascuna fase, e consente lo spostamento di armoniche più significative di tensione verso valori di frequenza più elevati.

Nei prossimi paragrafi si andranno a spiegare più nel dettaglio le tecniche di modulazione PWM e SVM, trascurando la tecnica di modulazione a onda quadra perché è quella meno utilizzata nell'ambito della regolazione. [3]

Gli azionamenti elettrici sono usati per andare ad alimentare carichi trifase per tal motivo andiamo a utilizzare degli inverter trifase.

Il circuito utilizzato per un'inverter trifase all'interno del CMMP-AS è costituito da tre rami, uno per ogni fase, come è possibile vedere dalla Fig.3.6; quindi l'uscita di ciascun ramo dipende solo dalla tensione V_d e dallo stato della valvola o interruttore.

La tensione d'uscita non dipende dalla corrente del carico in quanto non esiste l'istante in cui tutti gli interruttori sono aperti, per semplicità vado a trascurare i tempi morti richiesti nei



circuiti ideali. Se si assume che in ogni fase d'inverter conduce uno e uno solo dei due componenti controllati, ciascuna delle tensioni V_a, V_b e V_c è pari a 0 oppure a V_d ; le tensioni di uscita dell'inverter in valore relativo ($v_a = V_a/V_d, v_b = V_b/V_d$ e $v_c = V_c/V_d$) sono pari a 0 oppure ad 1.

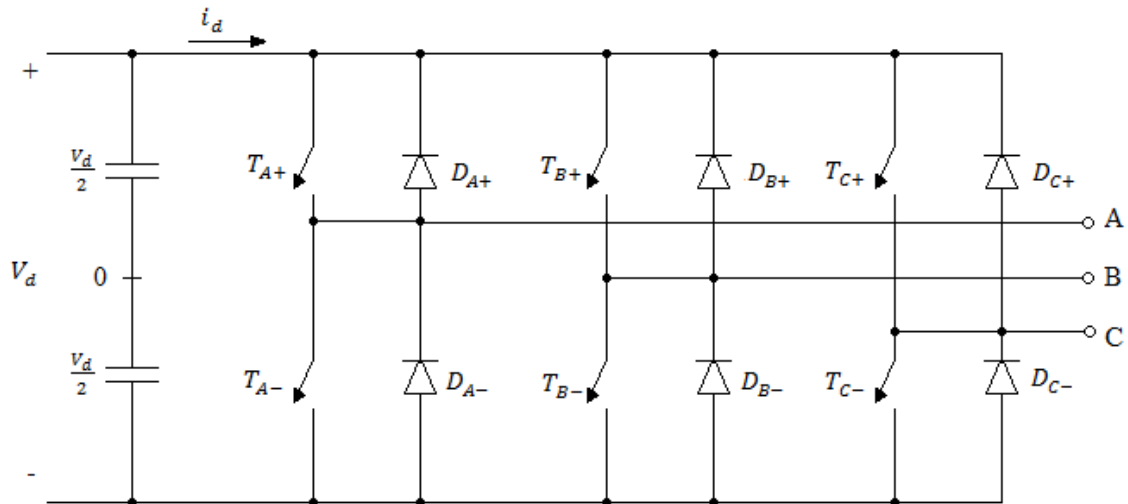


Figura 3. 6: Schematizzazione inverter trifase

Il vettore componente simmetrico è esprimibile come segue:

$$v = \frac{2}{3} (V_a + V_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) = \frac{2}{3} V_d (v_a + v_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + v_c e^{j\frac{4\pi}{3}}) \quad (3.3.1)$$

è di ampiezza nulla se v_a, v_b e v_c sono tutti pari a 0 oppure tutti pari a 1, inoltre è agevole verificare che l'inverter ha 8 stadi possibili di conduzione, cui corrispondono 2 vettori nulli di tensione (\mathbf{v}_0 e \mathbf{v}_7) e 6 vettori attivi ($\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3, \mathbf{v}_4, \mathbf{v}_5$ e \mathbf{v}_6) rappresentati in Fig.3.7 sul piano complesso. Inoltre di seguito riporto il campo di operatività dell'inverter suddetto, dove nei successivi paragrafi verrà spiegato più nel dettaglio. [5]

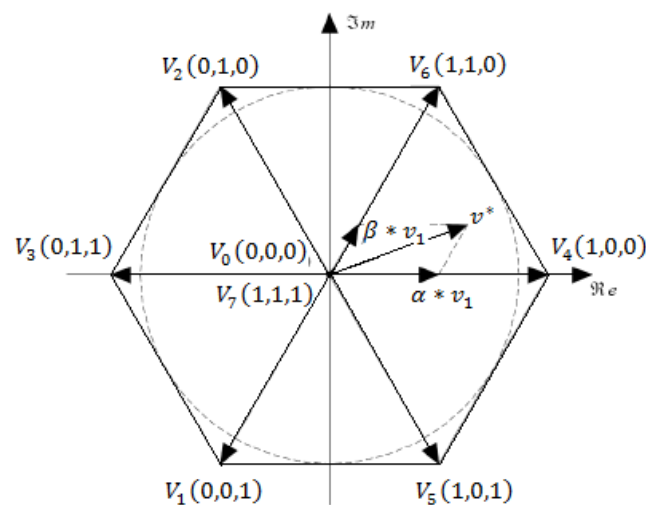


Figura 3. 7: Campo di operatività dell'inverter



3.4 Modulazione PWM (Pulse With Modulation)

Negli inverter trifase con modulazione a larghezza d'impulso lo scopo è quello di controllare l'ampiezza e la frequenza della tensione trifase d'uscita, avendo una tensione di ingresso V_d praticamente costante.

Tale tecnica di modulazione, fornisce una soluzione ai principali problemi dovute alla presenza di armoniche di elevata ampiezza e bassa frequenza nella forma d'onda della tensione d'uscita e conseguenti correnti distorte.

La suddetta tecnica consiste nell'andare a frazionare l'onda quadra con impulsi di larghezza variabile cercando di approssimare un andamento sinusoidale col valor medio variabile degli impulsi, modulando opportunamente gli impulsi, si ha che le armoniche di ampiezza maggiore sono a frequenze molto più elevate della fondamentale, tale situazione è favorevole in quanto, nell'applicazione che è presa in esame in questo elaborato, vi è la presenza di un motore per ogni azionamento che fornisce una componente induttiva. Una tensione PWM produce una corrente all'incirca sinusoidale data l'azione energetica del filtro.

Con tale tecnica sono diversi i vantaggi che se ne ricavano tra cui: una riduzione della potenza reattiva in rete, dinamica dell'azionamento più prestante in quanto si ha una riduzione dei tempi di risposta, ma di contro ci sono anche alcuni svantaggi a cui fare capo: circuito di comando complesso e per poter usufruire di tale tecnica si hanno numerose commutazioni con il conseguente aumento delle perdite.

Per avere tensioni d'uscita trifase equilibrate in uno inverter PWM trifase, la stessa tensione con la forma d'onda triangolare è confrontata con tre tensioni sinusoidali di controllo che sono tra di loro sfasate di 120° , come è possibile notare nella Fig.3.8.

Negli inverter trifase interessano solo le armoniche nelle tensioni concatenate V_{AB} e non quelle riferite alla V_{AN} o alla V_{BN} , il valore di m_f è dispari ed è un multiplo di tre per eliminare la maggior parte delle armoniche dominanti dalla tensione concatenata.

Di seguito è riportato l'andamento grafico della modulante e della portante, viene illustrato l'andamento della V_{AN} e V_{BN} ricavata mediante la tecnica del PWM, in ultima analisi è stata inserita la differenza fra le due forme d'onda, che risulta essere il vero andamento d'interesse, si veda la Fig.3.8 riportata a pagine seguente. [4]

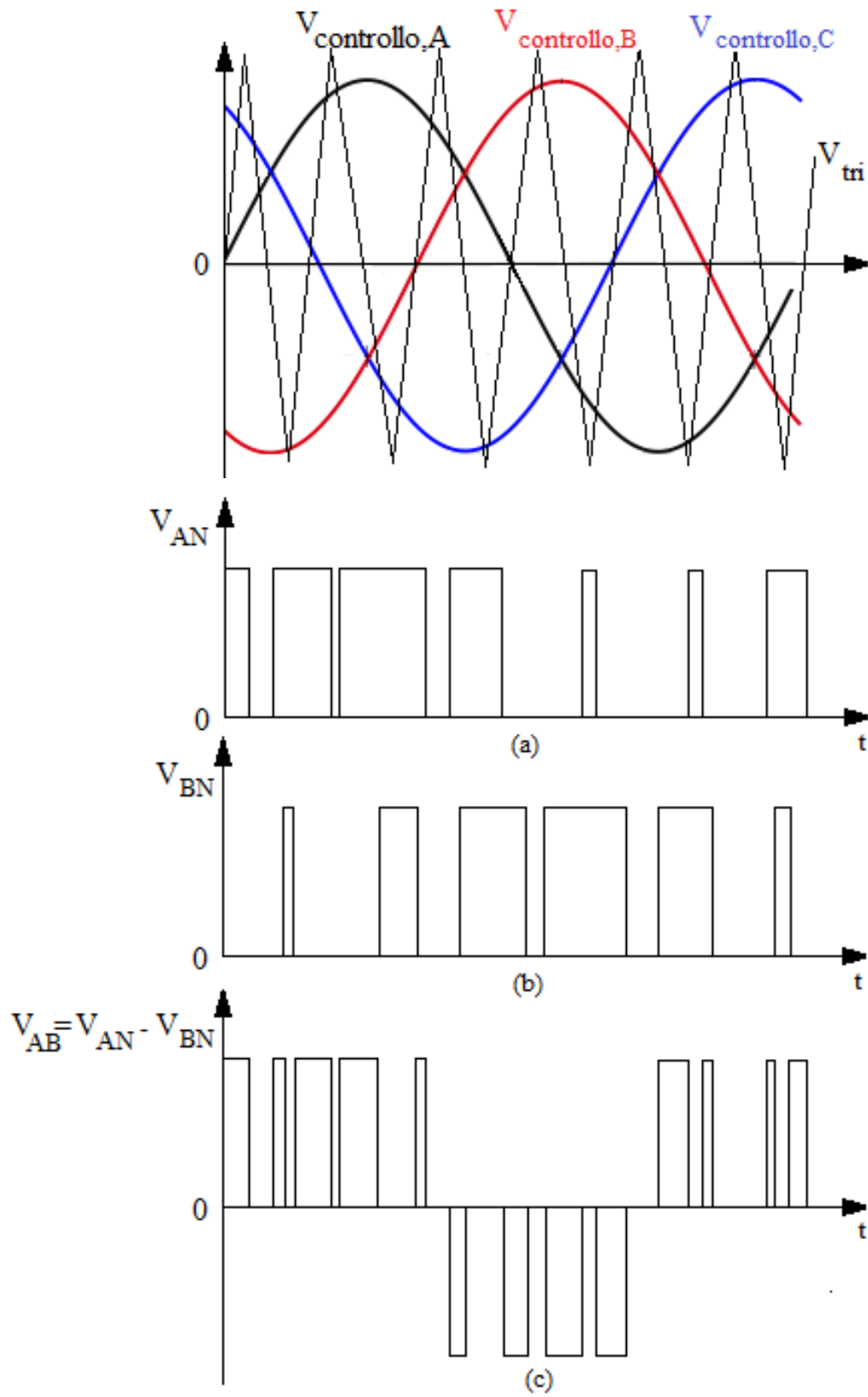


Figura 3. 8: Forme d'onda di un PWM trifase con terna di triangoli omopolari

3.5 Modulazione SVM (Space Vector Modulation)

La tecnica di modulazione SVM (Space Vector Modulation), si basa sul controllo del comportamento globale del sistema trifase e non sul controllo separato di ciascuna fase, non ha bisogno di intersezioni tra un segnale inizialmente incognito e la portante triangolare, consente lo spostamento delle armoniche più significative di tensione verso valori di frequenza più elevati.

Riferendoci alla Fig.3.8, i vettori attivi costituiscono la stella delle tensioni di fase dell'inverter, ed i loro estremi occupano i vertici di un esagono regolare. Alimentando la macchina con un inverter a tensione impressa si ha che il vettore spaziale di tensione può occupare solo 7 posizioni (6 vettori attivi più un vettore nullo) e "salta" dall'una all'altra in corrispondenza di ogni commutazione, mentre il sistema di controllo calcola un vettore spaziale che si muove con continuità nel piano complesso assumendo qualunque valore.

Tale tecnica permette di ottenere che un determinato vettore di tensione \mathbf{v}^* , anche se non può essere seguito con continuità, possa almeno essere ottenuto "in media" nel tempo T , applicando per dei periodi di tempo opportuni i vettori che costituiscono la stella di tensioni di Fig.3.9.

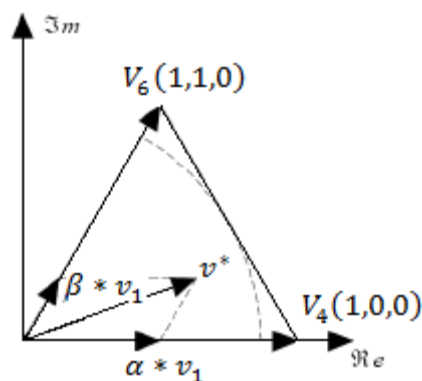


Figura 3. 9: \mathbf{v}^* fasore spaziale nel piano di Park

il vettore \mathbf{v}^* è ottenuto applicando per un tempo t_1 il vettore \mathbf{v}_1 , per un tempo t_2 il vettore \mathbf{v}_2 e per un tempo t_3 uno dei due vettori nulli (\mathbf{v}_0 o \mathbf{v}_7), ottenendo che:

$$\mathbf{v}^* = \frac{t_1}{T} \mathbf{v}_1 + \frac{t_2}{T} \mathbf{v}_2 + \frac{t_3}{T} \mathbf{v}_0 = \alpha \mathbf{v}_1 + \beta \mathbf{v}_2 + \gamma \mathbf{v}_0 \quad (3.5.1)$$

Nella 3.5.1 è stato indicato con α , β e γ i duty-cycles rispettivamente dei vettori \mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_2 , e \mathbf{v}_0 , ed è $\alpha + \beta + \gamma = 1$, nella Fig.3.10 sono visibili anche come sono generati gli istanti di accensione e spegnimento delle diverse valvole dell'inverter. Le accensioni delle valvole inferiori sono complementari rispetto a quelle delle valvole superiori, però si avrà bisogno di un tempo morto tra lo spegnimento di una valvola e l'accensione della valvola a lei



complementare, questo per evitare accensioni contemporanee che provocherebbero dei corti e lederebbero inevitabilmente il dispositivo.

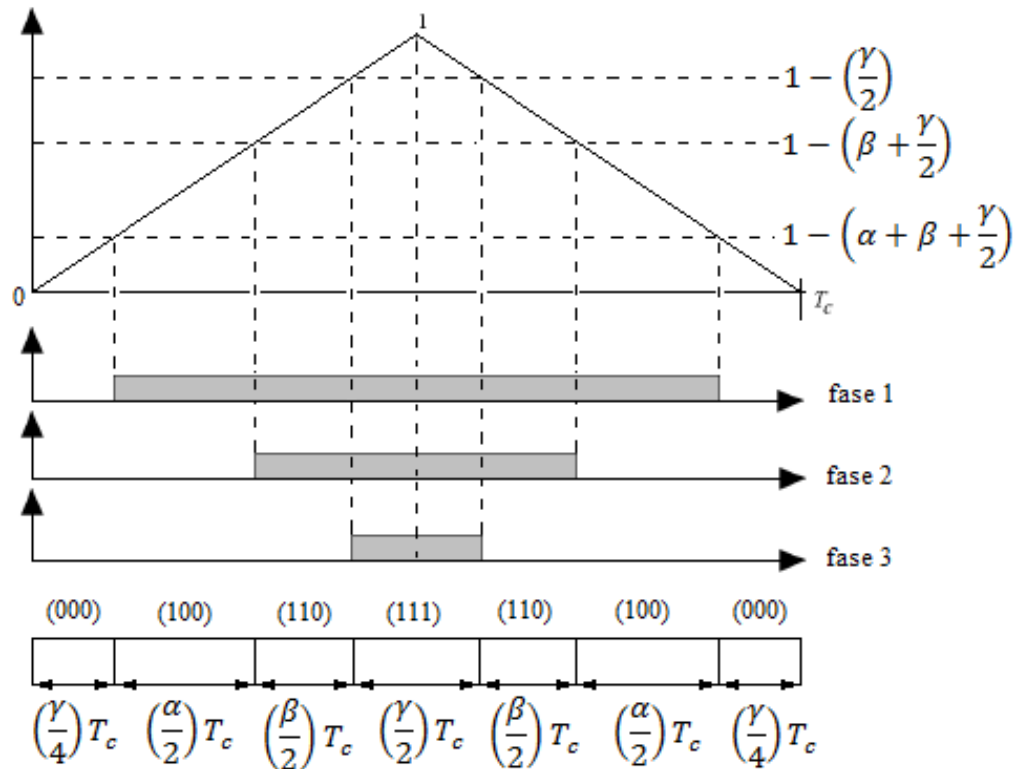


Figura 3. 10: Space Vector Modulation

In conclusione, tale tecnica nell'eseguire una trasformata di Park ad assi fissi del riferimento di tensione, le componenti del fasore tramite opportuni calcoli, forniscono l'informazione sul settore in cui si trova il vettore v^* e i segnali di riferimento da comparare con la portante triangolare a frequenza opportuna. Il limite dell'indice di modulazione per restare all'interno della sinusoidalità è 0,95 e corrisponde a operare nel cerchio iscritto all'esagono i cui vertici sono formati da sei vettori di Park. [4]

3.6 Ottimizzazione tra rete elettrica e apparecchiature con il CMMP-AS

Diversi sono i disturbi di natura elettromagnetica immessi in rete, tali disturbi sono tanto più importanti quanto più l'applicazione richiede massima precisione, per tal motivo devono essere minimizzati per quanto possibile, a tal proposito nell'ambito dell'automazione industriale sono stati progettati degli azionamenti elettrici che sono in grado, attraverso la loro tecnologia, di minimizzare le armoniche fastidiose immesse nelle varie applicazioni, grazie alla loro elettronica di potenza.

Per il sistema di movimentazione dopo aver selezionato la taglia dei motori da utilizzare, dove tutta la progettazione hardware è presente nel capitolo 6, si è scelta la versione Premium degli



azionamenti Festo che sarebbero i CMMP-AS. Essi sono stati progettati al fine di non aggiungere disturbi alla linea di alimentazione, poiché una loro cattiva progettazione può distorcere la forma d'onda del segnale a causa delle armoniche di corrente iniettate, produrre interferenze elettromagnetiche che provocherebbero errori nelle misure e interferenze con segnali di comunicazione e di controllo.

Quest'ultimo problema è importante perché gli azionamenti comunicano con altri azionamenti e con l'unità elettronica CPX con bordo il PLC Festo, attraverso diversi protocolli di comunicazione; per lo scambio di dati è stato scelto il CANopen, si veda il Cap.5.

A causa di eventuali problemi dovuti a sistemi elettronici di potenza e al loro impatto negativo sulla linea di alimentazione e sulle utenze a essa collegate, si è scelto, un approccio per rendere minimo tale impatto andando a prevedere di filtrare le armoniche di corrente e le interferenze elettromagnetiche prodotte dai convertitori.

Nei paragrafi precedenti abbiamo detto che all'interno del CMMP-AS vi è un convertitore ac-dc, il quale è usato come interfaccia con la sorgente di tensione elettrica, ed è usato per convertire la tensione alternata a frequenza di rete in tensione continua. Questa conversione avviene per mezzo di un ponte raddrizzatore a diodi non controllato, la cui uscita raddrizzata è una tensione continua, poi è inserita all'uscita dello stesso un condensatore di filtro di elevata capacità per ridurre il ripple nella tensione continua. [5]

Nel caso in questione si è alimentato l'azionamento con una tensione monofase dove, le armoniche tipiche in una forma d'onda monofase della corrente d'ingresso sono quelle riportate nella seguente tabella, nella quale le correnti armoniche I_h sono riportate alla fondamentale I_1 in valore percentuale:

h	3	5	7	9	11	13	15	17
$\left(\frac{I_h}{I_1}\right)\%$	73.2	36.6	8.1	5.7	4.1	2.9	0.8	0.4

Tabella 3: Armoniche tipiche di una corrente monofase senza filtro di rete

In presenza di un'impedenza interna della sorgente L_s di valore finito, in ogni fase della sorgente, la distorsione della tensione nel punto di connessione può essere rilevante; più alta è l'induttanza più grande risulta essere la distorsione.

In conclusione, per migliorare la forma d'onda della corrente assorbita dalla rete elettrica si possono usare induttori e condensatori collegati al ponte raddrizzatore a diodi, l'approccio più semplice è quello di aggiungere un induttore sul lato ac del ponte, tale aggiunta comporta un valore effettivo più alto dell'induttanza L_s del lato ac, andando così a ridurre le armoniche e migliorare il fattore di potenza.

Il CMMP-AS è un azionamento con frenatura a recupero grazie anche alla presenza di un reostato interno, in cui il flusso di potenza attraverso il convertitore s'inverte durante la

frenatura, mentre l'energia cinetica associata all'inerzia del carico è recuperata e restituita al sistema elettrico di alimentazione. Durante la frenatura a recupero, sono tolti gli impulsi al gate dei tiristori ed è possibile quindi eseguire il recupero di energia.

Per risolvere i problemi dovuti alle armoniche immesse, diversi enti nazionali e internazionali si sono mobilitati, per cercare dei limiti che consentissero di mantenere una buona qualità della potenza, tra cui il CENELEC EN 50 006, IEC Norma 555-3, VDE 0160, IEEE 519-1992.

Uno degli azionamenti utilizzato per la realizzazione pratica del robot di avvitatura, è quello riportato nella seguente figura:

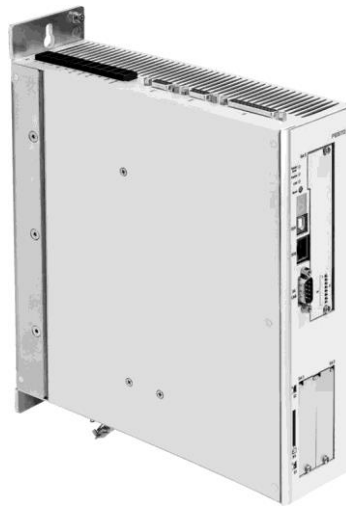


Figura 3. 11: Azionamento elettrico CMMP-AS-3A-C5-MO

Questa gamma di controllori fornisce una soluzione altamente funzionale per movimenti dinamici, è ideale per gestire e controllare Camme Elettriche, come quella realizzata per effettuare l'avvitamento, il quale ha bisogno per poter essere realizzato, di un'azione contemporanea di due assi: quello di discesa e quello di rotazione.

Gli strumenti software forniti da Festo offrono un concetto integrale di messa in servizio, mediante la parametrizzazione, tali strumenti hanno integrato un riavvio sicuro dell'azionamento in caso del suo blocco per applicazioni in sicurezza ed è munito di un SD per immettere nei controllori parametri e firmware. Per quanto riguarda le funzioni integrate abbiamo il Safe Torque Off che permette di implementare facilmente lo stop di emergenza.

Inoltre quest'azionamento è in grado di effettuare un:

- CONTROLLO DI POSIZIONE
- CONTROLLO IN CORRENTE
- CONTROLLO DI COPPIA

Diversi sono i protocolli di comunicazione che tale azionamento è in grado di supportare, questi sono elencati al paragrafo 3.6 tabella 6.

L'electric drives in linea di massima, si basa sulla seguente architettura per compiere il controllo:

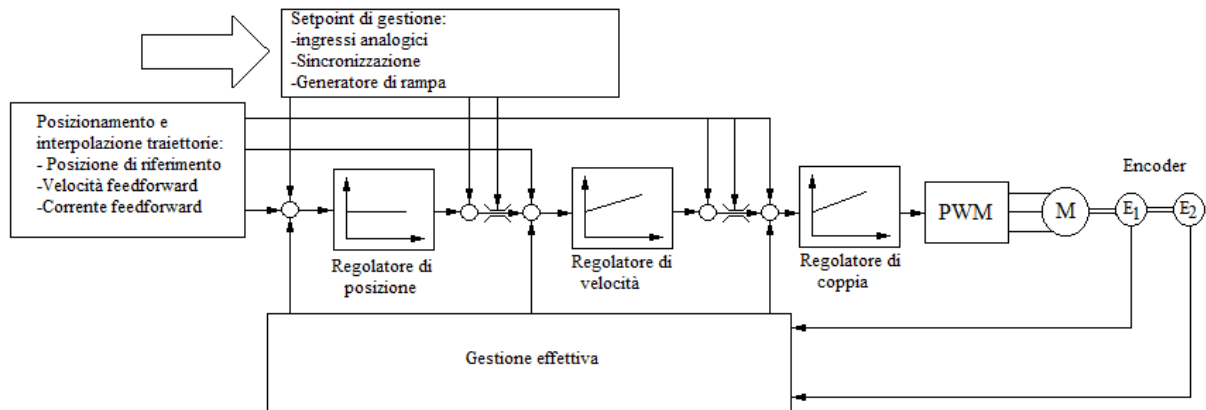


Figura 3. 12: Architettura semplificata CMMP-AS

Come detto in precedenza, il numero di azionamenti è pari al numero di motori, poiché ogni motore è gestito da un singolo azionamento. Nel robot di avvitatura gli azionamenti che sono stati utilizzati sono i seguenti:

1. CMMP-AS-C5-3A-M3: utilizzato per alimentare il primo motore EMMS-AS-70 il quale ha permesso di movimentare l'asse Y cioè l'orizzontale, ha la possibilità di espansione STO (Safe Torque Off) sicurezza funzionale integrata nella scheda principale, inoltre c'è slot di espansione per bus di campo e vi è la possibilità di inserire il modulo per la sicurezza; per tali ragioni è l'azionamento più performante.
2. CMMP-AS-C5-3A-M0: utilizzato per alimentare il secondo motore EMMS-AS-70 il quale ha permesso di movimentare l'asse Z cioè il verticale, questo ha la stessa dimensione fisica come CMMP-AS . M3, ha STO sicurezza funzionale integrata nella scheda principale, non vi è alcuno slot di espansione per bus di campo e non vi è nessuna scheda di espansione per modulo di sicurezza.
3. CMMP-AS-C5-3A: è stato utilizzato per alimentare il terzo motore EMMS-AS-55 il quale ha permesso di movimentare la rotazione; questo è l'azionamento base della Festo.

Come si può notare i tre azionamenti sono di differenti, ma si sarebbero potuti utilizzare tre azionamenti uguali, che avrebbero reso la situazione ottimale.

Prendendo in esame l'azionamento CMMP-AS-C5-3A-M3, risulta essere composto dalle seguenti parti visibili in Fig.3.13:

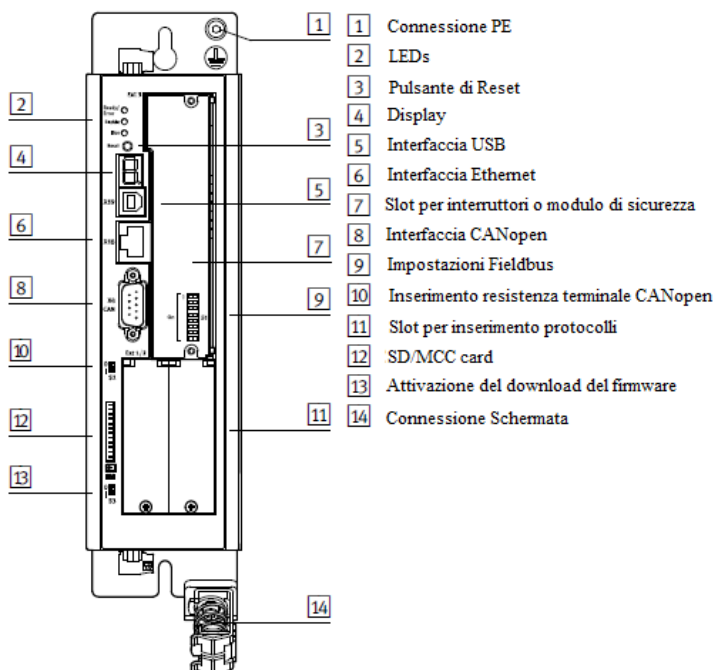


Figura 3. 13: Vista frontale CMMP-AS-C5-M3

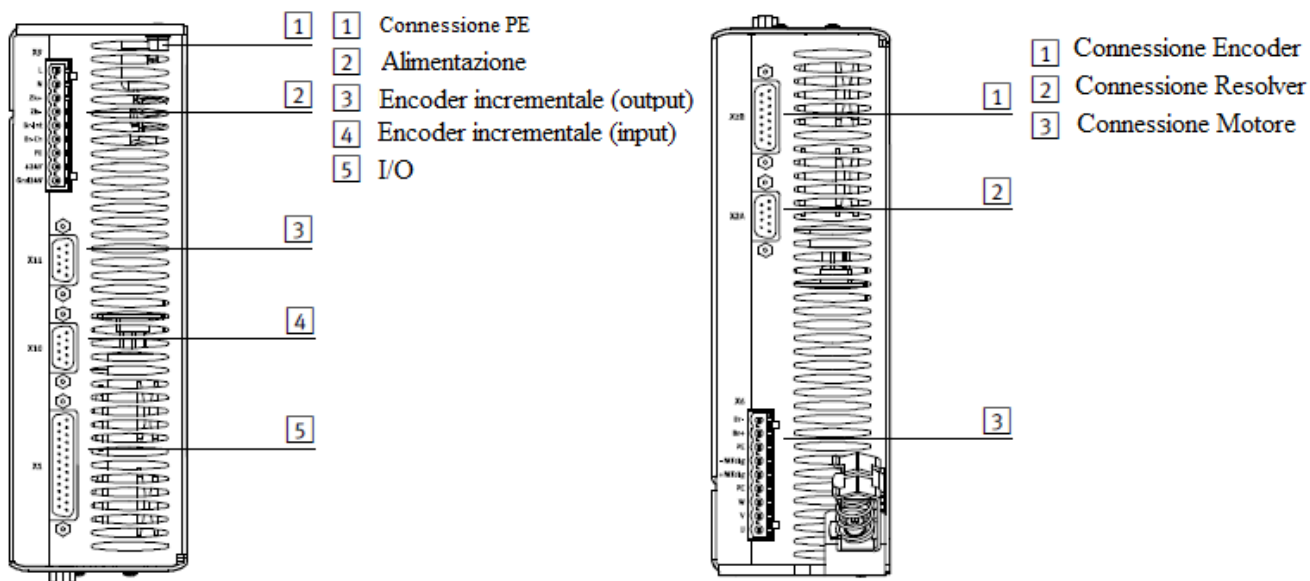


Figura 3. 14: A sx Vista dall'ALTO, a dx Vista dal BASSO

I rispettivi significati della sigla dell'azionamento sono:

CMMP = Motor controller Premium; AS = AC; C5 = Corrente nominale 5A; 3A = Tensione di ingresso 100÷230 V AC; M0 = senza slot; M3 = 3 slot.

Qui di seguito riporto alcune tabelle utili, la prima tabella rende evidente i dati caratteristici che differenziano i vari azionamenti:



Motor controller for motor type	CMMD-AS Servo motor	CMMS-AS Servo motor	CMMP-AS Servo motor	CMMS-ST Stepper motor
Positioning records	2 x 63	63	255	63
Measuring system	Incremental/absolute		Analogue/incremental/absolute	Incremental
Extended I/O interface	4 working modes		Flexibly configurable	4 working modes
Notification of remaining distance	1 for n		Separately for all positions	1 for n
Torque reduction	No		Separately for all positions	No
Record linking	Linear		With branching	Linear
STO/SS1	To EN 61800-5-2		To EN 61800-5-2	To EN 61800-5-2

Tabella 4: Confronto Controllori

CMMP-AS-	C2-3A-...	C5-3A-...	C5-11A-P3-...	C10-11A-P3-...	C20-11A-P3
Type of mounting	Screwed onto mounting plate				
Display	7-segment display				
Parameterisation interface	-				RS232
	USB, Ethernet				-
Active PFC	Yes		-		
DIP switches	Firmware download/fieldbus settings ¹⁾ /CAN terminating resistor				-
SD card slot	Memory card → 18				-
Encoder interface input	Resolver				
	Incremental encoder with analogue or digital tracking signals				
	Absolute encoder with EnDat V2.1 serial/V2.2				
	Absolute encoder with HIPERFACE				
	Additional input for synchronous/cam disc operation				
Encoder interface output	Actual value feedback via encoder signals in speed control mode				
	Setpoint specification for downstream slave drive				
	Resolution up to 16,384 ppr				
Braking resistor, integrated [Ω]	60		68		47
Pulse power of braking resistor [kVA]	2,8		8,5		12
Braking resistor, external [Ω]	≠ 70		≠ 70		30 ≠ 100
Impedance of setpoint input [kΩ]	20				
Number of analogue outputs	2				
Operating range of analogue outputs [V]	±10				
Resolution of analogue outputs	9 bits				
Characteristics of analogue outputs	Short circuit proof				
Number of analogue inputs	3				
Operating range of analogue inputs [V]	±10				
Characteristics of analogue inputs	1x differential, resolution 16 bits				
	2x single-ended, resolution 10 bits				
	Configurable for speed setpoint value/torque setpoint value/position setpoint value				
Mains filter	Integrated				
Max. motor cable length [m]	25 (without external mains filter)				
Product weight [g]	2,100		2,200		3,800
					8,000

Tabella 5: Dati tecnici generali

Programming software	Controller manufacturer	Interfaces					
		CANopen	PROFIBUS DP	DeviceNet	EtherCAT	EtherNet/IP	PROFINET RT
CoDeSys TwinCAT	Festo						
	Beckhoff	■	■	■	■	■	■
	Other manufacturers						
RSLogix5000	Rockwell Automation	-	-	■	-	■	-
Step 7/TIA Portal	Siemens	-	■	-	-	-	■

Tabella 6: Funzioni per la programmazione del PLC



Interfaces	I/O	CANopen	PROFIBUS DP	DeviceNet	EtherCAT	EtherNet/IP	PROFINET RT
Number of digital logic outputs	5						
Characteristics of digital logic outputs	Freely configurable						
Number of digital logic inputs	10						
Operating range of logic inputs [V]	8 ... 30						
Characteristics of logic inputs	Freely configurable						
Process coupling	16 positioning records	-					
	255 positioning records ¹⁾	250 positioning records					
Communication profile	-	DS 301, FHPP+	DP-V0/FHPP+	FHPP+	DS 301, FHPP+	FHPP+	FHPP+
		DS 301, DSP402			CoE: DS 301, DSP402		
Max. fieldbus transmission rate [Mbps]	-	1	12	0.5	100	100	100
Interface							
CMMP-AS-...-M0	Integrated	■	■	-	-	-	-
CMMP-AS-...-M3	Integrated	■	■	-	-	-	-
	Optional ²⁾	-	-	■	■	■	■
CMMP-AS-C20-11A-P3	Integrated	■	■	-	-	-	-
	Optional ²⁾	-	-	■	■	■	-

Tabella 7: Dati tecnici-Interfaccia Fieldbus

CMMP-AS-	C2-3A-...	C5-3A-...	C5-11A-P3-...	C10-11A-P3-...	C20-11A-P3
Output data					
Output voltage range [V AC]	3x 0 ... 270		3x 0 ... 360		
Nominal current [A _{eff}]	2.5	5	5	10	20
Peak current at [A _{eff}]	5	10	10	20	41.5
Max. peak current duration [s]	5		3		2
Peak current at [A _{eff}]	10	20	20	40	-
Max. peak current duration [s]	0.5		0.5		-
Max. intermediate circuit voltage [V DC]	320/380 ¹⁾		560		
Output frequency [Hz]	0 ... 1,000				
Load supply					
Nominal voltage phases	1		3		
Input voltage range [V AC]	100 ... 230 ±10%		3x 230 ... 480 ±10%		
Max. nominal input current [A]	3	6	5.5	11	20
Rated output [VA]	500	1,000	3,000	6,000	12,000
Peak output [VA]	1,000	2,000	6,000	12,000	25,000
Mains frequency [Hz]	50 ... 60				
Logic supply					
Nominal voltage [V DC]	24 ±20%				
Nominal current [A]	0.55/2.05 ²⁾	0.65/2.15 ²⁾	1/3.5 ²⁾		
Max. current of digital logic outputs [mA]	100				

Tabella 8: Dati Elettrici

Capitolo 4

AZIONAMENTO PNEUMATICO

E' noto che la tecnologia pneumatica studia le tecniche per l'impiego dell'aria compressa, tale tecnologia trova ampia applicazione in moltissimi settori della produzione industriale, oltre all'utilizzo di essa per la costruzione di macchine e di linee produttive.

La moderna componentistica e i sistemi di pneumatica avanzata stanno evolvendo verso un'integrazione sempre più spinta con unità di tipo elettronico, tanto da poter parlare di sistemi pneumotronici.

Negli ultimi anni si stanno affermando logiche di progettazione completamente nuove, che determinano un sostanziale incremento delle caratteristiche cinematiche e dinamiche dei singoli componenti e dei sistemi composti; sono cambiati i parametri di vita media dei componenti, gli ingombri e i tempi di risposta.

Nel presente capitolo saranno descritte in linee generali le caratteristiche della pneumatica, prestando un'attenzione particolare agli unici dispositivi pneumatici presenti nella stazione di avvitatura. Uno di questi è l'HGDT, che sarebbe la pinza pneumatica a tre griffe, usata per poter effettuare la presa del pezzo; è chiaro che per poter comandare la pinza è stata usata un'elettrovalvola, in grado mediante un impulso elettrico di aprire e chiudere le griffe, consentendo o escludendo il passaggio dell'aria compressa.

L'impulso elettrico eccita una bobina presente all'interno dell'elettrovalvola, tale impulso elettrico è fornito in base alle esigenze desiderate, attraverso un programma scritto in ambiente CoDeSys e caricato all'interno del PLC.

Con i paragrafi successivi, si vogliono dare tutti i mezzi necessari per comprendere il motivo per il quale si è scelta una pinza pneumatica al posto di un'elettrica e le metodologie utilizzate per scelta.

Inoltre si andrà a spiegare le macro differenze che vi sono fra le varie elettrovalvole e i motivi per i quali si è scelta, tra le tante elettrovalvole in commercio, quella monostabile a 5 vie, denominata 5/2.

4.1 Caratteristiche della pneumatica

In pneumatica s'impiega aria atmosferica filtrata, compressa, deumidificata e molte volte lubrificata. La capacità dell'aria di immagazzinare energia meccanica è dovuta alla sua elasticità, quando è sottoposta a compressione, l'aria riduce il proprio volume, ma appena finisce l'azione di compressione essa riprende il suo volume iniziale. L'importanza della



pneumatica non dipende tanto dalla capacità di trasportare energia, quanto dalla possibilità di fornire lavoro utile nel luogo e nella quantità richieste dalle applicazioni più diverse.

Le caratteristiche favorevoli che rendono di difficile sostituzione la pneumatica in molte applicazioni, soprattutto nel campo dell'automazione, sono dovute al fatto che l'aria compressa è innocua è disponibile ovunque, gli impianti, inoltre, non possiedono il ramo di ritorno perché dopo l'uso, l'aria può essere scaricata in atmosfera. L'aria compressa non possiede effetti corrosivi diversi da quelli dell'aria atmosferica, le forze sono regolabili se pur in modo non preciso, inoltre, gli spostamenti di assi sono rapidi e si possono avere accelerazioni molto elevate. I problemi inerenti alla sicurezza sono inferiori rispetto alle tecnologie elettriche.

Come ogni situazione ci sono dei vantaggi e degli svantaggi, citiamo ora alcune situazioni dove l'uso dell'aria compressa viene limitata. L'aria compressa ha una pressione modesta, questo comporta l'impossibilità di ottenere forze elevate. A causa dell'elasticità dell'aria, si ottengono dei movimenti poco regolari e posizionamenti imprecisi; in pratica, la posizione degli organi mobili pneumatici è garantita solo a fine corsa, attualmente questi inconvenienti si possono superare impiegando valvole proporzionali. Per limitare il rumore allo scarico bisogna impiegare dei silenziatori.

Si può desumere che la tecnologia pneumatica è ideale per tutte quelle applicazioni in cui sono necessari movimenti definiti, rapidi e sicuri, le cui forze da esercitare non sono elevate.

4.2 Panoramica sui dispositivi pneumatici

Andando a considerare le diverse e molteplici funzioni svolte, i dispositivi pneumatici possono essere distinti nelle diverse categorie:

1. ELEMENTI PER PREPARARE L'ARIA COMPRESSA
2. ATTUATORI
3. VALVOLE
4. SENSORI E TRASDUTTORI

Riferendoci alla prima categoria, con il termine preparare l'aria compressa significa comprimerla, trattarla per depurarla dalle polveri e dall'umidità e in seguito lubrificarla, immagazzinarla per renderla disponibile in modo continuo. Gli elementi che sono responsabili di questo processo sono:

- Compressori
- Filtri
- Deumidificatori
- Lubrificatori



Il secondo gruppo cioè quello riferito agli attuatori, trasformano l'energia potenziale contenuta nell'aria compressa in lavoro utile realizzando movimenti rettilinei, oscillanti e rotatori. Gli elementi che appartengono a tale gruppo sono:

- Cilindri
- Attuatori lineari
- Attuatori rotativi
- Motori pneumatici

Nel terzo gruppo si dicono valvole tutti quei dispositivi che sono in grado di trasformare le caratteristiche dell'aria compressa per quanto riguarda il percorso, la portata e la pressione. Le valvole di cui parla tale gruppo sono:

- Valvole distributrici
- Valvole regolatrici di portata
- Valvole riduttrici di pressione
- Valvole proporzionali

Infine nel quarto gruppo vi sono i sensori e trasduttori che sono utili per il controllo della macchina e per la misura delle grandezze pneumatiche. Ricordiamo:

- Sensori pneumatici
- Pressostati
- Manometri
- Vacuometri

4.5 Pinze pneumatiche e calcolo della forza di presa

Le pinze pneumatiche sono organi costituite da due o più griffe, mosse da cilindri pneumatici nella gran parte dei casi. HGDT è la pinza a tre griffe essa è calettata a un motore rotativo elettrico denominato ERMB, la prerogativa della pinza è di prendere e rilasciare oggetti. Tali pinze sono ideali per la manipolazione di piccoli pezzi, di solito sono a doppio effetto e le griffe possono esercitare sia una forza in chiusura, per la presa degli oggetti dall'esterno, sia in apertura per la presa degli oggetti dall'interno esercitando pressione sulle pareti di un foro. Nell'applicazione è stato scelto infatti, una pinza a doppio effetto con forzatura in chiusura, poiché deve poter afferrare il tappo della bottiglia dall'esterno.

La forza esercitata dalle griffe può essere dosata regolando la pressione, in questo modo la presa diviene delicata oppure energetica. La forza di chiusura della pinza va determinata sia in base al peso da sollevare che alla velocità di spostamento, se per caso lo spostamento dovesse essere troppo rapido rispetto alla forza di chiusura, l'inerzia del pezzo può farlo scivolare dai punti di presa.



A seconda del movimento delle griffe le pinze pneumatiche si suddividono in:

- PINZE A FULCRO
- PINZE A GRIFFE PARALLELE

Nel caso in questione risulta, come già accennato in precedenza, una pinza a tre griffe, quindi a fulcro. In queste pinze le griffe compiono un movimento di rotazione, la forza esercitata sul pezzo da prendere dipende dalla distanza del punto di contatto rispetto al centro di rotazione delle griffe.

Inoltre, alle griffe possono applicarsi delle prolunghe conformate in modo da adattarsi alla forma dell'oggetto da prendere, nel robot di avvitatura, infatti sono state costruite delle prolunghe a L con la parte interna zigrinata, al fine di aumentare l'attrito radente tra le dita e il tappo; di seguito riporto la pinza utilizzata nel progetto:



Figura 4. 1: HGDT-25-A Pinza pneumatica

Nella tabella 9 sono stati riportati i dati più significativi, al fine di effettuare una scelta congrua con l'obiettivo che si vuole raggiungere.

Forza di presa per griffa a 6 bar in chiusura	69 N
Corsa per dito di presa	3 mm
Rilevamento posizione	Per sensore di finecorsa
Forza di presa complessiva a 6 bar in apertura	246 N
Forza di presa complessiva a 6 bar in chiusura	207 N
Massa max. per ogni utensile di presa esterno	10 g

Tabella 9: Dati tecnici HGDT-25-A

Per quanto riguarda le pinze pneumatiche a griffe parallele, il movimento di presa si ottiene mantenendo le griffe parallele e pertanto la forza esercitata sul pezzo resta costante qualsiasi sia il punto di contatto con l'organo di presa, si veda la Fig.4.2.



Figura 4. 2: DHPS-25-A Pinza pneumatica parallela

Nella tabella 9 sono stati riportati i dati più significativi, al fine di effettuare una scelta congrua con l'obiettivo che si vuole raggiungere.

Forza di presa per griffa a 6 bar in chiusura	228 N
Corsa per dito di presa	7,5 mm
Rilevamento posizione	Per sensore di finecorsa
Forza di presa complessiva a 6 bar in apertura	500 N
Forza di presa complessiva a 6 bar in chiusura	450 N
Massa max. per ogni utensile di presa esterno	350 g

Tabella 10: Dati tecnici DHPS-25-A

Fatta questa panoramica sulle due macro categorie di pinze pneumatiche, possiamo ora soffermarci maggiormente sul calcolo della forza di presa necessaria per prendere il tappo. Ricordiamo, che sulle griffe della pinza sono state applicate prolunghe, progettate al fine di prendere il tappo senza che quest'ultimo scivoli, infatti si è preferito fare le dite di presa, con la parte interna zigrinata in modo da aumentare l'attrito radente fra tappo e dita.

Inoltre giacché il robot di avvitatura non è stato progettato solo per avvitare tappi di bottiglia ma anche bulloni su piaste, quindi, è chiaro che il sistema di presa cambia; in tale situazione dovrà essere progettato in modo tale che le dita di presa siano adatte all'obiettivo che si vuole raggiungere.

Generalmente sui dati di catalogo è riportata la forza per ogni griffa F_g , in ogni caso la forza esercitata da ogni griffa potrebbe essere maggiore o minore di quella riportata a catalogo.

Andando a considerare il caso in questione, consideriamo le dita non sagomate e il moto verticale. A tal proposito si veda la seguente Figura 4.3, andando a compiere un calcolo sulla forza necessaria per la presa:

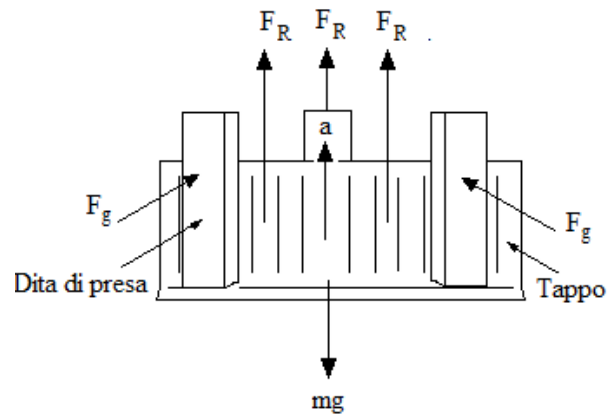


Figura 4. 3: Gestione delle forze pinza-tappo moto verticale

Le relazioni che saranno applicate saranno le seguenti:

$$3 \cdot F_r \geq m \cdot (g + a) \cdot S \quad (4.3.1)$$

$$F_r = \mu F_g \quad (4.3.2)$$

$$F_g \geq \frac{m(g+a)}{3\mu} \cdot S \quad (4.3.3)$$

Dove: μ è il Coefficiente d'attrito e va da 0,5 a 0,7; mentre S è Coefficiente di sicurezza.

Invece nella Figura 4.4 andiamo a valutare le forze agenti durante il moto orizzontale, dove il dito che è soggetto a una maggiore sollecitazione del pezzo durante la movimentazione risulta essere F_{g1} .

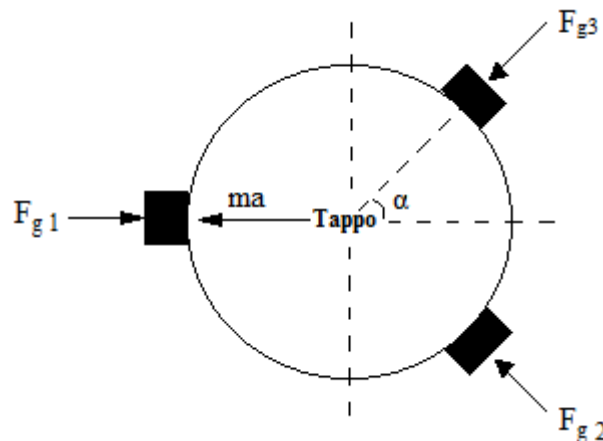


Figura 4. 4: Equilibrio delle forze pinza-tappo moto orizzontale vista dall'alto

Forza del pistone:

$$F_{g1} + F_{g2} + F_{g3} = 3F_g \rightarrow F_{g2} = 3F_g - F_{g1} - F_{g3} \quad (4.3.4)$$



Equilibrio orizzontale:

$$F_{g1} - F_{g2} \cos \alpha - F_{g3} \cos \alpha - ma = 0 \rightarrow F_{g1} = F_{g2} \cos \alpha + F_{g3} \cos \alpha + ma \quad (4.3.5)$$

Ulteriore condizione da impostare è che $F_{g2} = F_{g3} = F$ a tal punto facendo le opportune sostituzioni avremo:

$$F_{g1} = 2F \cos \alpha + ma \quad (4.3.6)$$

$$F_{g2} = F_{g3} = F = \frac{F_{g1}}{2 \cos \alpha} - m \quad (4.3.8)$$

Limite di forza è:

$$F_{g1} \leq 3F_g \rightarrow \frac{3}{2}F_g + \frac{ma}{2} \leq 3F_g \rightarrow F_g \geq \frac{ma}{6} \quad (4.3.9)$$

Equilibrio verticale è:

$$mg \leq (F_{g1} + F_{g2})\mu \rightarrow mg \leq 3F_g\mu \rightarrow F_g \geq \frac{mg}{3\mu} \quad (4.3.10)$$

Andando a considerare l'equazioni del moto orizzontale si avrà:

$$F_g \geq \frac{mg}{3\mu} \cdot S \quad \text{e} \quad F_g \geq \frac{mg}{6} \cdot S \quad (4.3.11)$$

Durante un ciclo di lavoro la direzione assunta dalle forze d'inerzia possono essere molteplici. E' necessario dimensionare le pinze usando la forza da erogare nel caso più oneroso, ecco perché si è preferito usare l'HGDT-25-A, in quanto ogni singola griffa mi permette di erogare una forza di 69 N con un totale, considerando tutte le griffe, di 207 N, valore leggermente maggiore di quello che effettivamente servirebbe. Considerando la massa del tappo di 10 gr, le forze di attrito nella fase di avvitatura e svitatura, avrei avuto bisogno di una forza di 160 N, ma per andare sul sicuro, si è preferito sovradimensionare il tutto utilizzando una pinza che riuscisse a erogare la forza suddetta.

Di seguito riporto il tragitto che la pinza dovrà compiere Fig.4.5; quest'ultima andrà prendere il tappo in $z=280$ e $y=5$, trasportarlo lungo la traiettoria di figura e andare a effettuare in $z=47$ e $y=280$ l'avvitatura sulla parte superiore della bottiglia, una volta effettuata l'avvitatura la pinza sgancierà il tappo. Lo step successivo sarà quello di andare a riprendere il tappo ed effettuare la fase di svitatura, al fine di andare a riposizionare il tappo nell'ubicazione di partenza, per ripetere il ciclo.

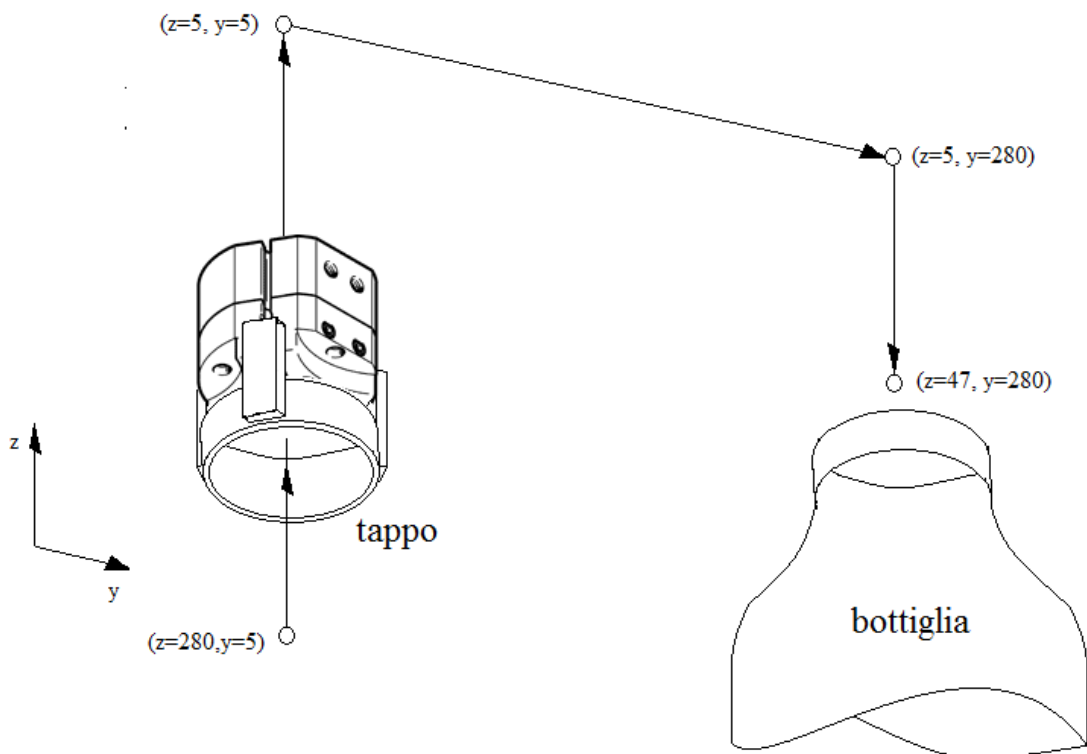


Figura 4. 5: Traiettorie utili per effettuare avvitatura

Inoltre, è doveroso fare una precisazione: la forza di presa che una pinza pneumatica può erogare cala all'aumentare della lunghezza delle dita, inoltre la forza di presa della pinza sul pezzo genera un momento flettente sulle guide, ciò aumenta l'attrito, il quale si oppone alla forza di presa stessa.

4.6 Caratteristiche generali Elettrovalvole

L'elettrovalvola è un dispositivo che consente il passaggio di un fluido (liquido o gassoso) attraverso il varco individuato dalla valvola stessa. L'"elettro" nel nome indica che l'attuatore dell'azionamento meccanico della valvola, viene sostituito da un attuatore comandato elettricamente, solitamente un solenoide.

La più semplice elettrovalvola è infatti costituita da un dispositivo meccanico di apertura e chiusura molto simile a una membrana, che è alzata o abbassata per variare la pressione all'interno delle camere del dispositivo, permettendo la fuoriuscita o la ritenzione del fluido immesso. Questa membrana è attuata da un solenoide che, percorso da corrente, attira un nucleo ferroso all'interno di un canale interno, causando così lo spostamento meccanico dell'elemento occludente del dispositivo, e quindi l'apertura o la chiusura dell'elettrovalvola.

Le valvole di controllo della direzione, dette anche valvole distributrici, permettono di interrompere il flusso d'aria o di indirizzarlo in condotti alternativi. Tali elettrovalvole possono essere attuate da corrente continua o alternata. Le valvole distributrici hanno dei fori,

dette vie, per l'ingresso e per l'uscita dell'aria compressa. Per indirizzare l'aria sulle varie vie, le valvole devono cambiare il loro stato, cioè la posizione dei condotti interni.

Possiamo definire come:

- **Numero di vie**, il numero complessivo di fori per i quali può entrare o uscire aria.
- **Numero di posizioni**, il numero degli stati che può assumere una valvola.

Per designare una valvola distributrice spesso si usano due numeri, ad esempio 5/2, dove il primo indica il numero di vie, il secondo il numero di posizioni. Inoltre, secondo la permeanza nel tempo dello stato assunto, le valvole si possono distinguere in monostabili e bistabili.

Si dicono monostabili le valvole che ritornano nella posizione iniziale quando cessa l'azione di comando, il cui simbolo di tale valvola contiene una molla che indica il ritorno automatico.

Si dicono bistabili le valvole che permangono nella posizione raggiunta quando cessa l'azione di comando. Nel simbolo delle valvole bistabili si devono indicare i comandi necessari per far loro assumere la posizione attiva e per farle tornare alla posizione di partenza .

L'elettrovalvola utilizzata per comandare la pinza pneumatica è una 5/2, cioè una cinque vie, due posizioni; precisamente è stata installata, l'elettrovalvola MHE2-MS1H-5/2-QS-4, la quale come è possibile notare dalla Fig.4.6 risulta essere una valvola monostabile in quanto ha la molla che come abbiamo detto poc'anzi indica il ritorno automatico.

In queste valvole gli scarichi sono separati dalla via di alimentazione, quindi non c'è pericolo che l'aria in ingresso venga convogliata direttamente allo scarico. Queste sono le valvole più impiegate in pneumatica perché comandano i dispositivi a doppio effetto come cilindri, attuatori rotativi, pinze di presa.

Data la loro importanza si trovano in commercio valvole 5/2 di tutti i tipi costruttivi, di tutte le taglie e con tutti i sistemi di comando. Costituiscono l'elemento base delle unità di valvole montate in un unico corpo e contenenti più elementi collegati tra loro.

Di seguito riporto l'elettrovalvola citata in precedenza, usata per comandare la pinza di presa:



Figura 4. 6: Elettrovalvola MHE2-MS1H-5/2-QS-4

Riporto nella tabella 11 i principali dati tecnici dell'elettrovalvola sopra citata:

Funzione valvola	5/2, monostabile
Portata nominale normale	90 l/min
Attacco pneumatico 1	QS-4
Pressione d'esercizio	-0,9 ... 8 bar
Tipo di azionamento	Elettrico
Tempo di commutazione azionamento	1,9 ms
Tempo di commutazione disazionamento	1,7 ms
Valori caratteristici bobina	24 V cc

Tabella 11: Dati tecnici MHE2-MS1H-5/2-QS-4

Tali valvole appartengono alla famiglia delle fast-switching in quanto hanno tempi di risposta fino a 2 millisecondi; quindi velocità, dinamica e precisione sono requisiti richiesti più che mai, in automazione industriale. Sono dispositivi con tempi di ciclo brevi, costi relativamente bassi, forniscono una massima affidabilità di processo, robustezza e durata, per questi motivi riescono a soddisfare il mercato tecnologicamente esigente.

Riescono a lavorare per 24 ore di continuo consentendo 500 milioni di cicli, facile installazione grazie a IP65 il quale lo rende insensibile alle polveri e umidità.

È doveroso, a tal punto, considerare sia gli accessori di cui è provvista l'elettrovalvola, sia specificare il tipo di collegamento effettuato tra elettrovalvola e pinza.

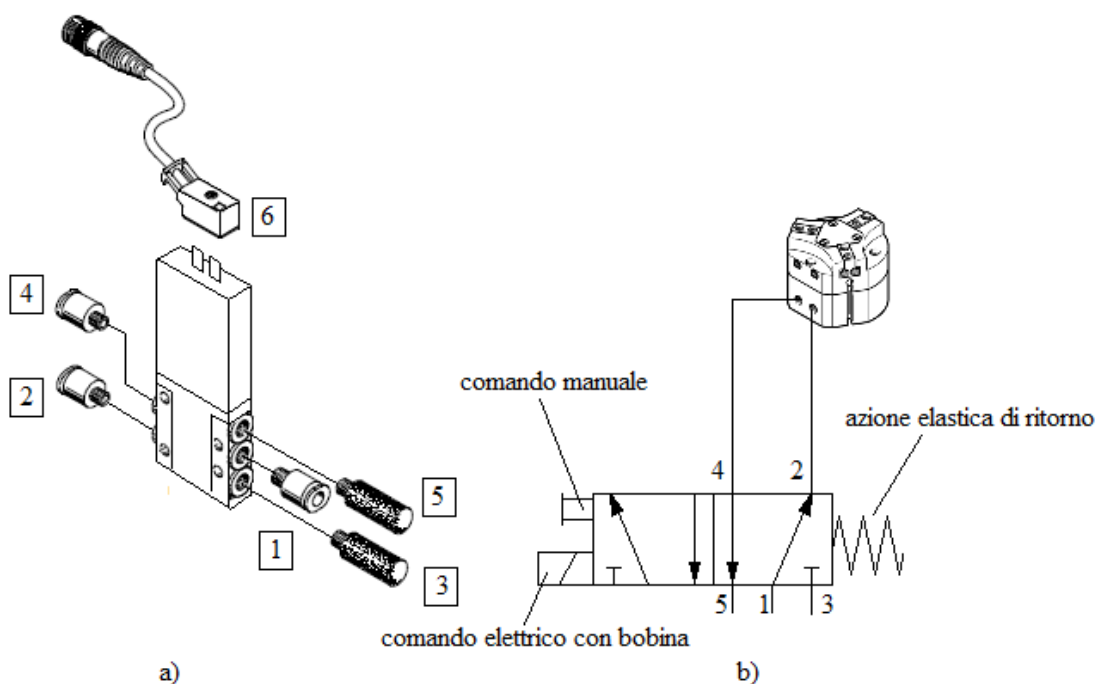


Figura 4. 7: Accessori e Collegamento Elettrovalvola-Pinza



Nella Fig.4.7a abbiamo:

[1] è il plug-in che viene inserito nel canale 1, quello della mandata dell'aria principale;

[2] il plug-in che viene inserito nel canale 2, quello che consente il passaggio dell'aria una volta eccitata la bobina;

[3] e [5] sono degli scarichi che vengono otturati da Silenziatori che limitano il suono in dB durante le commutazione della valvola;

[4] è simile a [1], toglie aria e la valvola essendo monostabile, ripristina la sua posizione di partenza;

[6] connettore con cavo che mi consente di comandare l'elettrovalvola dalla CPX-CEC-M1.

4.7 Comando elettrico della valvola con servopilota

Il termine comando si usa per indicare la tipologia di intervento compiuto per commutare le valvole, secondo il tipo di energia impiegata, si hanno diversi comandi:

1. **Manuali;**
2. Meccanici;
3. Pneumatici;
4. **Elettrici.**

Come è possibile notare dalla Fig.4.7 l'elettrovalvola utilizzate nel lavoro di tesi è costituita da un comando di tipo manuale e da uno elettrico.

Per comando manuale, s'intende l'azionamento realizzato da forze muscolari, s'impiega quando bisogna comandare direttamente un attuatore o quando si deve testare il corretto funzionamento della valvola.

Per comando elettrico, s'intende il comando dovuto alla corrente che circola in una bobina alimentata mediante un connettore standardizzato. Il funzionamento delle valvole ad azionamento elettrico, dette anche, come abbiamo ripetuto nel precedente paragrafo, elettrovalvole, si basa sull'attrazione magnetica operata dalla bobina percorsa da corrente su un'ancoretta costituita da un nucleo ferroso.

Per il comando elettrico si ricorre a un servopilota, si possono in tal modo impiegare piccole potenze elettriche per la commutazione. Bisogna ricordare però che le valvole servopilotate funzionano se il condotto di alimentazione è in pressione.

E' necessario a tal punto fare una breve precisazione: rispetto all'energia necessaria per la commutazione, l'azionamento delle valvole può essere diretto o servopilotato.

Nell'azionamento diretto, la forza esterna di comando deve essere in grado di commutare, da sola, la valvola. L'azionamento diretto si può impiegare in tutte le valvole comandate in pressione e in quelle a spola con comando manuale.



Nell'azionamento servopilotato l'energia per commutare la valvola è fornita dall'aria compressa; l'azione esterna serve solo per avviare la commutazione. Il servopilota è indispensabile nelle valvole azionate elettricamente e in quelle manuali con otturatore.

L'azionamento elettrico è essenziale nelle automazioni perché permette di abbinare i pregi della pneumatica, nel campo degli attuatori, ai pregi dell'elettronica nel campo dell'acquisizione dei segnali e nella trattazione delle informazioni.

Nella Fig.4.8 riportata a pagina seguente, è possibile notare il percorso della corrente nella bobina dell'elettrovalvola con elettronica fast-switching, come quella utilizzata, dove è possibile notare nella prima fase una scarica dei condensatori poi l'andamento della corrente della bobina controllata a 1 A mentre la corrente nella linea di alimentazione subisce un abbassamento sino a 400mA, a 3ms si ha un crollo della corrente di mantenimento della bobina fino a 500mA ove rimarrà tale perché controllata. La corrente nella linea di alimentazione a 3ms andrà a 0mA per un breve periodo per poi mantenersi a 100mA per la restante parte del tempo.

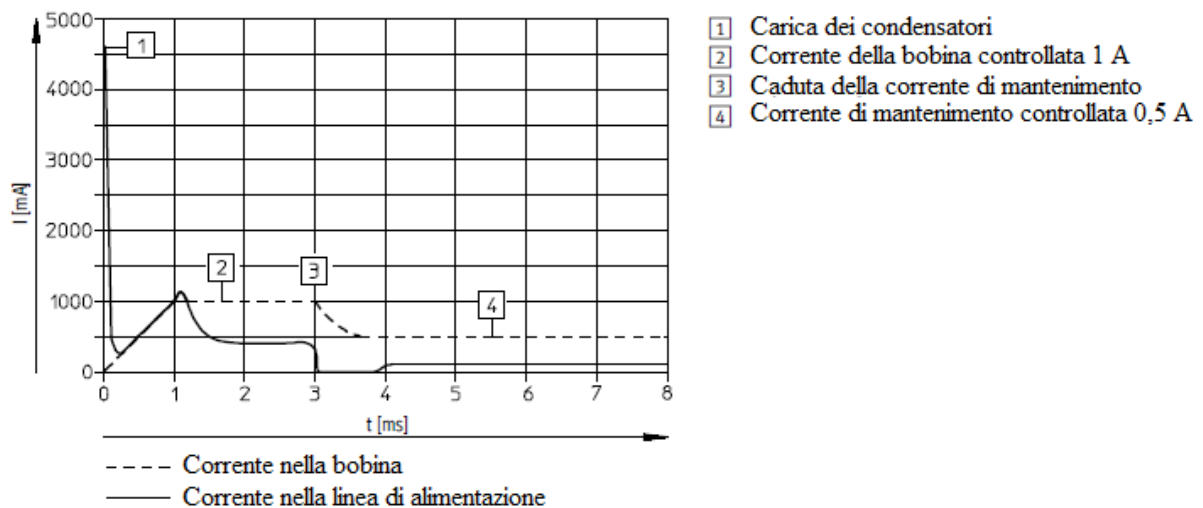


Figura 4. 8: Percorso della corrente nella bobina e nella linea di alimentazione

4.8 Tecnica proporzionale e architettura di controllo

La tecnica proporzionale è stata pensata per ovviare all'inconveniente maggiore della pneumatica, il quale consiste nell'impossibilità di controllare in modo preciso i movimenti e le forze esercitate a causa della comprimibilità dell'aria.

Con tale tecnica sono possibili applicazioni che prima erano riservate all'oleodinamica o all'azionamento elettrico, come il posizionamento continuo, in tale tecnica proporzionale il valore della grandezza rilevato in uscita si adegua al valore impostato in ingresso.

La tecnica proporzionale si avvale di un'architettura di controllo detta anello di retroazione (Fig.4.9) formato da:



- Azionamento;
- Attuatore;
- Sensore-trasduttore;
- Elemento di Comparazione;
- Elemento di elaborazione e amplificazione

L'Azionamento è costituito da una valvola proporzionale che ha la funzione di aprire in maggior o minor misura la luce di efflusso, mediante un otturatore comandato elettricamente, l'attuatore è costituito da una pinza pneumatica.

Il Sensore-Trasduttore è un dispositivo che rileva la grandezza da controllare, come la pressione, la portata e la converte in un segnale elettrico.

L'elemento di comparazione confronta il segnale che è stato rilevato dal sensore-trasduttore con il valore impostato e invia le differenze all'elemento di elaborazione. Il valore che è impostato, è generato esternamente al controllo proporzionale e può variare nel tempo.

L'elemento di elaborazione e amplificazione genera una corrente di intensità tale da attivare la valvola proporzionale in modo da annullare le differenze rilevate dall'elemento di comparazione.

Spesso l'elemento di comparazione e quello di elaborazione sono uniti in un unico componente detto regolatore di corrente.

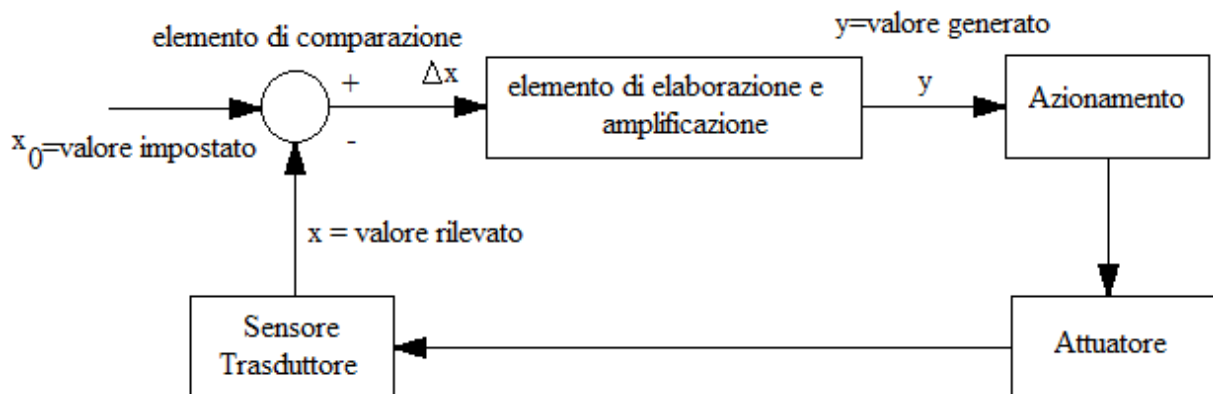


Figura 4. 9: Architettura dell'anello di retroazione

In pneumatica la tecnica proporzionale comprende le seguenti funzioni:

- Regolazione proporzionale della pressione;
- Regolazione proporzionale della portata;
- Regolazione proporzionale della posizione;

Per quanto riguarda il controllo proporzionale della pressione richiede un valore di tensione di riferimento, impostato dall'utente, che definisca esattamente l'andamento della pressione.



Inoltre, per ottenere un controllo proporzionale della pressione sono necessari, una valvola proporzionale di controllo della pressione, un elemento di comparazione, elaborazione e amplificazione, detto anche regolatore di corrente e un sensore-trasduttore che genera una corrente elettrica proporzionale alla pressione.

Per quanto concerne il controllo proporzionale della portata, la regolazione richiede un valore di tensione di riferimento, impostato dall'utente, che definisca esattamente l'andamento della portata. Inoltre, per ottenere un controllo proporzionale della portata sono necessari, una valvola proporzionale di controllo della portata, un elemento di comparazione, elaborazione e amplificazione, detto anche regolatore di corrente e un sensore-trasduttore che genera una corrente elettrica proporzionale al valore della portata.

Infine, il controllo proporzionale della posizione prevede una data tensione di riferimento che definisce una posizione, per ottenere un controllo proporzionale della posizione sono necessari, una valvola proporzionale di controllo della portata e della direzione; un elemento di comparazione, elaborazione e amplificazione, detto anche regolatore di corrente e un trasduttore di posizione che genera una corrente elettrica funzione della posizione.

Come si può notare, è stato fatto un breve sunto sulle tecniche proporzionali, ma nel caso preso in esame si è preferito non utilizzare una valvola proporzionale, poiché le esigenze di funzionamento non lo richiedevano, l'esigenza che si aveva era solo quella di aprire e chiudere la pinza all'occorrenza. E' chiaro che è stato fornito all'elettrovalvola un'intelligenza mediante la scrittura di un programma caricato all'interno del PLC, in grado di gestire le uscite dello stesso. Attraverso questo programma si sono abilitate le uscite in base alle mie esigenze, fornendoli la 24 V, così facendo la bobina era eccitata e la pinza si chiudeva, quando si diseccitava la bobina, la molla riportava le griffe della pinza alla loro posizione di partenza.[23]

Capitolo 5

PROTOCOLLI DI COMUNICAZIONE

Con il termine *comunicazioni*, s'intende l'insieme delle discipline scientifiche e tecniche che si occupa dello studio, della progettazione, della costruzione e dell'utilizzo di sistemi per la trasmissione a distanza di informazioni rappresentate sotto forma di segnali elettrici.

La funzione di trasmissione è la caratteristica essenziale di qualsiasi sistema di comunicazione, il cui scopo specifico è il trasferimento di dati tra parti diverse.

Nel presente capitolo saranno discusse quelle che sono le caratteristiche generali dei protocolli CANopen ed Ethernet e come i dispositivi sono stati mappati per far sì che ci potesse essere comunicazione e trasferimento dati, si descriverà dettagliatamente la struttura dei frame inviati in trasmissione e ricezione e quali sono stati i cablaggi effettuati al fine di realizzare il robot di avvitatura stand alone.

5.1 Caratteristiche generali dei protocolli

Diversi sono i protocolli di comunicazione che si sarebbero potuti utilizzare, per scambiare informazioni tra i vari dispositivi. Quello che si è preferito usare, per gli azionamenti descritti nel capitolo 3, è il CANopen, il quale è il protocollo di comunicazione proprietario Festo. Si consideri che grazie all'inserimento di uno slot sulla parte anteriore dell'azionamento, vi sia la possibilità di utilizzare altri protocolli come:

- Profibus
- ProfiNET
- EtherCAT
- DeviceNet
- EtherNet/IP

Per lo scambio di informazione tra i tre azionamenti e il PLC si è preferito utilizzare, come già accennato, il CANopen, poiché rispetta a pieno le caratteristiche richieste per ottenere un buono scambio di informazioni tra i dispositivi.

Nel settore dell'automazione industriale sta diventando sempre più stringente l'esigenza di avere uno scambio di dati veloce e al tempo stesso affidabile, questo per velocizzare i processi e aumentare la qualità nel motion control. A tale scopo tutti i protocolli condividono un approccio di tipo mecatronico basato, sulle conoscenze dello State-of-the-art, e sui Vantaggi che il bus di campo fornisce ai sistemi.

L'obiettivo dell'automazione moderna è quello di voler raggiungere la massima produttività con un'alta efficienza; per controllare e analizzare numerosi processi è obbligatoria una comunicazione a livelli, che sono ancora oggi spesso separati. Con tale comunicazione a livelli tutti i dispositivi devono essere in rete, utilizzando CANopen, Modbus TCP e / o EtherCAT. La "tecnologia di controllo piramidale" mostra le diverse esigenze di comunicazione su ogni singolo livello. Come si può notare dalla Fig.5.1, nel Management Level troviamo l'Ethernet; esso è utilizzato molto in ufficio perché permette la connessione di apparecchiature come stampanti, PC. Consente una diagnostica remota e permette il collegamento in rete di macchine.

In seguito troviamo il Control Level che attraverso Ethernet e Modbus TCP compie un monitoraggio sulla produzione e sui processi. Inoltre, vi è un'interazione con il PLC e con diversi sistemi di visualizzazione; utilizzando la tecnologia Ethernet si possono colmare lunghe distanze.

Nell'ultimo livello troviamo il CANopen, esso ci consente di avere uno scambio di informazioni rapido tra diversi dispositivi via DIP switches, facile identificazione della rete e dei dispositivi che ne fanno parte, informazione su errori di comunicazione, diagnostica con LEDs e HMI (Human Machine Interface). Sempre sullo stesso livello troviamo l'EtherCAT, il quale ci consente di avere uno scambio di dati senza DIP switches, questa risulta essere l'unica macro differenza rispetto a quanto detto per il CANopen.

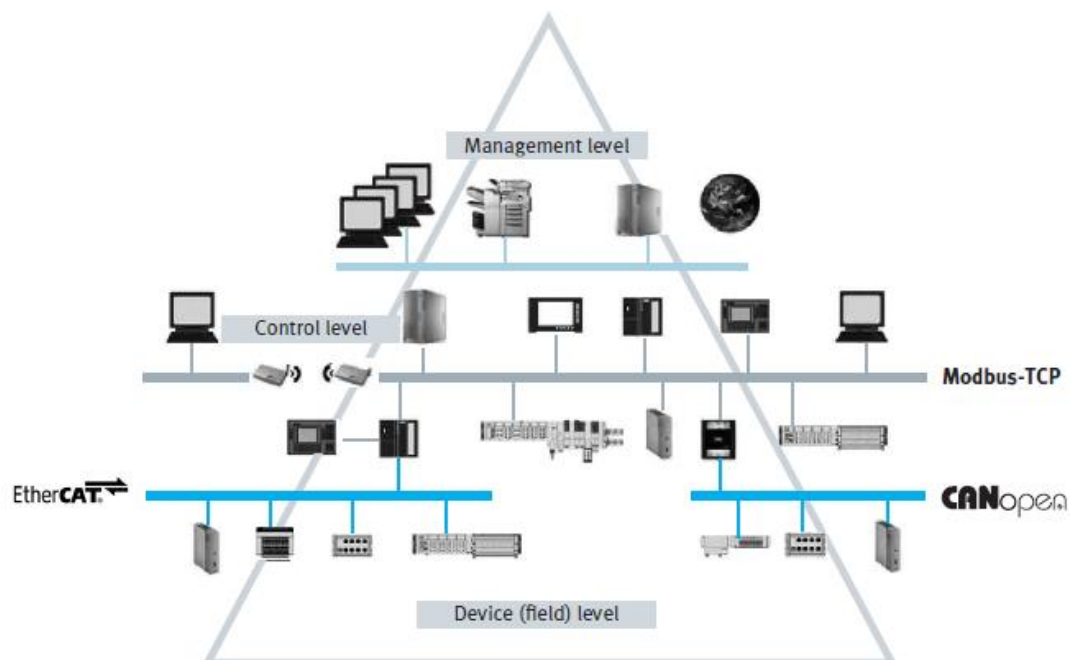


Figura 5. 1: Tecnologia di controllo piramidale

Di seguito saranno illustrati i concetti base dei vari protocolli di comunicazione, al fine di comprendere al meglio il funzionamento del sistema integrato complessivo. Le reti di comunicazione industriale costituiscono l'infrastruttura attraverso la quale i vari componenti



di un processo produttivo scambiano le informazioni tra loro. Questa infrastruttura è formata da una parte fisica che costituisce l'hardware necessaria a comunicare e una parte software chiamata protocollo di comunicazione che determina, attraverso un set di regole, come a livello logico le informazioni circolano sui dispositivi hardware.

Le reti industriali hanno vissuto una certa evoluzione negli anni, seguendo con ritardo le innovazioni introdotte nelle reti general purpose come vengono definite le normali reti da ufficio o domestiche, questo ritardo è dovuto principalmente alla differenza di obiettivi che si pongono queste reti.

Negli ultimi anni si è registrata da parte di molte reti industriali, una decisa spinta verso l'adozione del livello fisico di ethernet per le loro comunicazioni. Questo fatto ha portato aziende come Siemens, Bosch-Rexroth, Allen Bradley e molte altre a offrire una soluzione ethernet ai propri clienti in alternativa al classico e sperimentato Fieldbus.

La scelta della rete di comunicazione, determina che tipo di informazioni è possibile far circolare in rete e la frequenza con cui nuove informazioni sono disponibili ai dispositivi connessi in rete. Si comprende subito che l'efficienza complessiva dell'impianto sia intimamente legata a questa scelta, per questa ragione negli anni sono state sviluppate varie soluzioni per meglio soddisfare i vari bisogni industriali. Le reti che verranno analizzate e confrontate per poter scegliere il protocollo di comunicazione che meglio rispetta le caratteristiche della stazione di avviamento stand alone, sono:

1. Bus di campo
2. Ethernet Industriale

Nei prossimi paragrafi si andrà a richiamare alcuni concetti base per la trasmissione di dati, ci soffermeremo maggiormente sul protocollo di comunicazione utilizzato per far comunicare tra loro i controllori: cioè il CANopen.

Inoltre, s'illustrerà la comunicazione tra i vari dispositivi presenti, come quella che si ha tra laptop e touch panel, tra laptop e PLC, tra laptop e azionamenti e tra smart-camera e PLC, la quale avviene mediante Ethernet. [27]

5.2 Bus di comunicazione digitale, tecniche di codifica e rilevamento errori

L'uso della comunicazione digitale sta aumentando notevolmente nel campo industriale, i segnali analogici sono convertiti in numeri binari e trasmessi sotto forma di segnali digitali

Richiamando alcuni concetti, la comunicazione può essere simplex, quando il servizio trasferisce un solo flusso informativo, o duplex, quando il servizio trasferisce due flussi informativi per utente del servizio in direzioni opposte. Distinguiamo ulteriormente tra due tipi di comunicazione duplex:

- Full duplex
- Half duplex



La comunicazione full duplex, avviene quando il servizio trasmette le informazioni in entrambe le direzioni contemporaneamente. La comunicazione half duplex, avviene quando il servizio trasmette le informazioni in entrambe le direzioni, ma non contemporaneamente.

Detto brevemente cosa voglia dire comunicazione, adesso ci si soffermerà su cosa vogliono dire protocollo di comunicazione e bus. Un sistema computerizzato è costituito da un numero di componenti distinti: processori, memorie e periferiche. Questi componenti devono condividere e scambiarsi informazioni costituite da istruzioni o dati, e affinché ciò sia permesso è necessario fornire un mezzo fisico per il trasferimento delle informazioni e stabilire un set di regole mutualmente condivise che governino la comunicazione. Questa combinazione di regole (bus protocol) e mezzo fisico per il trasporto di segnali costituisce un bus.

I bus giocano un ruolo significativo nell'integrazione di sistemi di acquisizione real-time e sistemi di controllo, dove forniscono l'interfaccia tra un computer e gli strumenti che misurano e controllano i fenomeni fisici del mondo esterno. La parola "bus" è spesso utilizzata in un senso più ristretto per indicare qualsiasi tipologia di interconnessione lineare.

In una rete CANopen tutti i componenti collegati sul bus hanno gli stessi diritti, ascoltano in parallelo tutti i messaggi e sono sempre pronti a ricevere e solo se necessario cominciano a trasmettere se nessun altro componente sta inviando messaggi sul bus tale comunicazione è denominata event-driven, il protocollo risulta essere un multi - master/multi - slave la sua velocità di trasmissione dati è di 1Mbit/s.

Il metodo di comunicazione è di tipo multi-master, in cui tutti i nodi possono essere master e tutti possono chiedere in qualsiasi istante di trasmettere sul bus. Per risolvere i conflitti ogni nodo è dotato di un identificativo, che determina la priorità che il dispositivo ha nella competizione per accedere al bus, e in base all'identificativo il ricevente decide se processare il dato o meno.

I trasferimenti delle informazioni su un bus sono inizializzati dai bus master, potendo esserci più master sullo stesso bus vi è la necessità di risolvere eventuali conflitti tramite un processo di arbitraggio. Una volta inviato il messaggio, gli slave comparano queste informazioni con un set di indirizzi validi interamente noti e, se trovano corrispondenza diventano connessi, successivamente lo slave partecipa al trasferimento delle informazioni e quando quest'ultimo è completato, slave e master si disconnettono.

Nella comunicazione digitale i bit possono essere trasmessi usando numerosi metodi di codifica. Il termine codifica si riferisce al modo in cui i bit sono rappresentati nella trasmissione delle stringhe di impulsi, lo scopo è far sì che la trasmissione possa avvenire alla massima velocità consentita affinché il ricevitore possa ricevere e decodificare correttamente le informazioni. Questa velocità è chiamata velocità di modulazione che s'intende il numero di segnali, in questo caso bit, che sono trasmessi nell'unità di tempo dipendente anche dal tipo di canale di comunicazione, ed è esprimibile come $V_m=2/T$. Il compito principale della codifica è identificare quale bit è 0 e quale 1.



Un primo metodo è la trasmissione completamente binaria o bipolare, nel quale esiste un impulso specifico per il bit 0 e un altro per il bit 1: il bit 1 può essere spedito come un impulso di segno positivo e il bit 0 come un impulso di segno negativo. Quando non c'è nessun impulso, la linea è a tensione di 0 Volt.

Un altro metodo è chiamato trasmissione semi-binaria o unipolare, nel quale vi è un impulso solamente per il bit 1, mentre i bit 0 sono espressi dall'assenza di impulsi.

Un terzo metodo è chiamato trasmissione a gruppo di bit o multi-livello. In questo metodo ogni impulso rappresenta più bit. Questo è possibile se sono disponibili più livelli di tensione in cui, ciascun livello rappresenta una combinazione diversa di bit. Per esempio, se gli impulsi hanno quattro livelli di tensione, questi possono essere usati per rappresentare le quattro possibili combinazioni di due bit, come illustrato in figura 5.2.

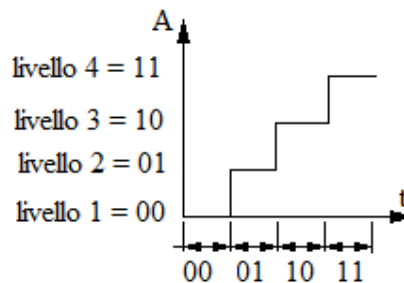


Figura 5. 2: Codice a quattro livelli

Infatti per distinguere quattro combinazioni sono necessari due bit, e poiché il tempo di arrivo di un livello di tensione è sempre lo stesso, perché determinato dallo stesso criterio di Nyquist, otterremo che, mentre la velocità di modulazione rimane la stessa, la velocità di trasmissione invece raddoppia. Ciò però è impossibile per motivi di funzionamento, isolamento e di sicurezza, allora aumentare il numero dei livelli, a parità di tensione massima, comporta che il singolo livello diventi sempre più piccolo, finché in ricezione non sia più distinguibile dal rumore, sempre presente. Esistono numerosi metodi per eseguire la codifica dei dati tra cui ricordiamo l'NRZ e la codifica Manchester.

- **NRZ (No Return to Zero):** dove per trasmettere l'informazione digitale dalla sorgente alla destinazione, è necessario associare i bit alle variazioni di una quantità fisica, che utilizzerà il mezzo trasmissivo per trasportare i dati. Lo stato digitale "1" è rappresentato con un segnale alto, lo stato digitale "0" è rappresentato con un segnale basso. Il trasmettitore e il ricevitore non hanno di solito lo stesso clock, questo è importante perché entrambi sfruttano le transizioni del segnale per sincronizzarsi, in assenza di variazioni della quantità fisica si ha l'impossibilità di sincronizzazione

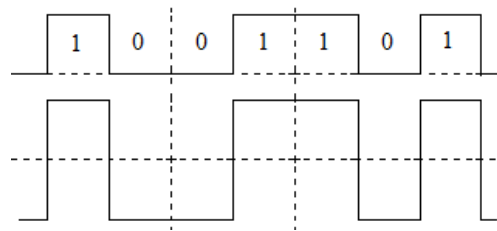


Figura 5. 3: Codifica NRZ

- Codifica Manchester:** Associa una transizione del segnale per ogni bit inviato. Lo stato digitale “1” è rappresentato con una transizione al semiperiodo fra il segnale alto e il segnale basso, lo stato digitale “0” è rappresentato con una transizione al semiperiodo fra il segnale basso e il segnale alto. Essendo sempre presente una variazione del segnale, anche una stringa di 0 o di 1 non dà problemi di sincronizzazione.

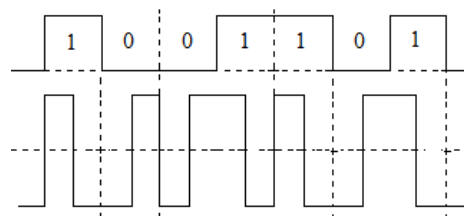


Figura 5. 4: Codifica Manchester

Per quanto concerne gli errori possono essere introdotti dalla presenza di rumore e interferenze durante la trasmissione dell'informazione attraverso un bus. Poiché la frequenza di tali errori è generalmente bassa, la maggior parte dei bus è sprovvista di sistemi di rilevamento degli errori.

I moderni bus ad alte performance generano e controllano uno o più bit di parità per bus cycle: questo metodo semplice di rilevazione degli errori si basa sul principio che se tutte le configurazioni di bit elaborate, presentano un numero dispari di 1 e ne viene individuata una con un numero pari, allora c'è la possibilità che si sia verificato un errore.

Per garantire che tutte le configurazioni contengano un numero dispari di 1 è necessario aggiungere davanti al bit più significativo (MSB, Most Significant Bit, il bit più a sinistra) un bit di parità, che corrisponde ad un 1 o ad uno 0 a seconda che la configurazione iniziale abbia un numero pari o dispari di 1.

Quando viene rilevato un errore di parità legato a un indirizzo, la richiesta di connessione viene ignorata. Quando, invece, viene rilevato un errore di parità legato ai dati, si procede alla ritrasmissione dell'informazione.

Questo metodo ha tuttavia dei limiti nel rilevamento di più errori su una stessa configurazione di bit. Per questo sono stati sviluppati sistemi di rilevazione più avanzati detti codici a ridondanza ciclica CRC, Cyclic Redundancy Codes, che per l'appunto è un codice di rilevazione degli errori e non di correzione.



Il CRC si basa su un algoritmo che calcola un codice binario, detto cycle redundancy code, come risultato di alcune operazioni aritmetiche e logiche sui dati. Questo codice è inviato insieme ai dati attraverso il bus, e il ricevente esegue le stesse operazioni verificando che il risultato coincida con quello ricevuto: se ciò non avviene si è in presenza di un errore.

Le moderne implementazioni del CRC non eseguono i calcoli con delle formule, ma utilizzano delle tabelle preformattate per velocizzare il processo.

5.3 Protocollo di comunicazione CANopen e procedure di accesso

Il CAN il cui acronimo è Controller Area Network è un protocollo di comunicazione seriale di tipo probabilistico, in grado di gestire sistemi di controllo distribuiti di tipo real-time, con un elevato livello di sicurezza e di integrità dei dati trasmessi.

Tale protocollo ha una struttura per il trasferimento dati, nella quale sono definiti i seguenti messaggi:

1. DATA FRAME
2. REMOTE FRAME
3. ERROR FRAME
4. OVERLOAD FRAME

La struttura del pacchetto dati è la seguente:

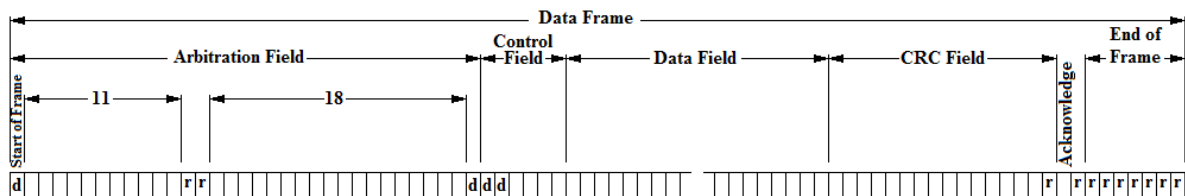


Figura 5. 5: Struttura del Frame CAN

Il DATA frame è usato per trasmettere dati da un nodo a un altro. Il frame inizia con un bit Start of frame usato per la sincronizzazione dei nodi e in seguito vengono trasmessi i seguenti campi:

- **Arbitration Field:** contiene le informazioni necessarie durante la fase di arbitraggio per assegnare il possesso del bus quando questo è conteso da più nodi. Questo contiene Identifier e l'RTR dove se è "0" il frame è DATA, se è "1" il frame è REMOTE. Nell'arbitraggio avrà la priorità maggiore l'identificatore con il numero binario più basso.
- **Control Field:** è composto da 6 Bit, gli ultimi 4 in ordine di trasmissione costituiscono il DLC che codifica il numero di byte di dato contenuti nel messaggio (0-8 byte).
- **Data Field:** contiene i byte che codificano l'informazione trasmessa con il messaggio, i bit sono trasmessi partendo sempre dal più significativo.



- **CRC Field:** è impiegato come sistema per la rilevazione degli errori di trasmissione ed è composto dalla CRC sequence, il CRC Delimiter bit utilizzato per chiudere la trasmissione del CRC, in pratica lui funziona andando a fare una sommatoria di tutti i bit trasmessi e verifica se effettivamente sono arrivati tutti rispettando la distanza di hamming che varia da protocollo a protocollo.
- **ACK Field:** durante ACK il nodo trasmittente invia un bit recessivo (r) e qualunque nodo della rete abbia ricevuto il messaggio formattato in modo corretto, risponde inviando un bit dominante (d) che sovrascrive il precedente. Il nodo trasmittente riceve in questo modo l'ACK cioè conferma dell'avvenuta corretta ricezione da parte di almeno un nodo e chiude la trasmissione con un bit recessivo che costituisce l'ACK Delimiter.
- **END of FRAME:** costituito da 7 bit recessivi.

Il REMOTE frame serve a sollecitare l'invio di un determinato Data Frame da parte di un nodo interrogato. Il nodo trasmettitore interessato risponderà con un Data Frame contenente l'informazione richiesta nel campo Data Field. La struttura del messaggio è simile a quella del Data Frame eccetto che il Remote Frame ha un bit RTR di tipo recessivo e che non esiste il Data Field.

L'ERROR Frame è generato da ogni nodo che rileva un errore e provoca la ritrasmissione del messaggio da parte del nodo trasmettitore. Poiché è sufficiente che un solo segnali un errore per avere la ritrasmissione, il protocollo CAN prevede che ciascun nodo memorizzi il proprio stato di salute, autoescludendosi in caso di tasso di errore elevato dettata dalla distanza di Hamming che indica il numero di errori che un protocollo può sopportare durante la comunicazione.

Nel CAN Bus possiamo avere anche l'Interframe Space, che precede ogni Data Frame e Remote Frame, essa ha una funzione separatrice. In termini di struttura non si tratta di un vero e proprio messaggio, ma di una sequenza indefinita di bit suddivisa in campi per specificare gli eventi ammessi, come sospensione, interruzione della trasmissione, bus idle (bus libero).

Infine troviamo l'OVERLOAD Frame è inviato da un nodo che risulta occupato per ritardare la trasmissione del Data Frame e del Remote frame successivo.

Poiché è sufficiente che un nodo invii un Overload Frame perché la comunicazione di tutti gli altri venga automaticamente ritardata, per questo tipo di messaggi il protocollo CAN prevede un meccanismo di confinamento dei nodi più lenti: non possono infatti essere inviati più di due Overload Frame successivi da parte dello stesso ricevitore.

Le specifiche del protocollo impongono al nodo trasmittente di sottoporre a operazioni di bit-stuffing i campi di Start of frame, Arbitration, Control e la CRC sequence dei DATA e REMOTE Frame.

Quando il trasmettitore rileva 5 bit consecutivi di identico valore nella sequenza da inviare e appartenente alla bit-stuffing area, automaticamente inserisce un bit di valore opposto nella



sequenza, in questo modo introduce sul segnale trasmesso un fronte recessivo-dominante su cui i nodi si risincronizzeranno.

Detto questo, ora andiamo a sviluppare un'analisi più accurata del protocollo utilizzato per la comunicazione tra gli oggetti presenti nel robot, tale protocollo è il CANopen che è un protocollo standard proprietario Festo elaborato dall'associazione CAN in Automation, il suffisso open sta a indicare la sua caratteristica a essere open-source cioè ogni utente può fornire suggerimenti per apportare eventuali modifiche. Questo standard ha pressoché sostituito i protocolli CAN specifici dei produttori, così l'utilizzatore finale ha un'interfaccia di comunicazione indipendente dai produttori.

E' un protocollo utilizzato in automazione, all'interno del modello ISO/OSI, CANopen implementa i livelli a partire dal livello di rete in su. Lo standard CANopen consiste di uno schema di indirizzamento, di diversi piccoli protocolli di comunicazione e di un livello di applicazione definito da un profilo di dispositivo.

I protocolli di comunicazione hanno un supporto per la gestione di rete, per il controllo dei dispositivi e delle comunicazioni tra nodi, e includono un semplice livello di trasporto per la segmentazione/desegmentazione dei messaggi. Il protocollo di basso livello, che implementa il livello fisico e il livello datalink, è normalmente il CAN, sebbene i profili di dispositivo di CANopen possano essere implementati da dispositivi che utilizzano altri mezzi di comunicazione, come ad esempio l'Ethernet.

Layer 7	<i>Application Layer</i>
Layer 6	<i>Presentation Layer</i>
Layer 5	<i>Transport Layer</i>
Layer 4	<i>Session Layer</i>
Layer 3	<i>Network Layer</i>
Layer 2	<i>Logical Link Control</i>
	<i>Medium Access Control</i>
Layer 1	<i>Physical Layer</i>

Tabella 12: Modello ISO/OSI

I profili di comunicazione e di dispositivo di base del CANopen sono forniti dal CAN in Automation, (CiA) draft standard 301. I profili di dispositivi più specializzati sono basati sul profilo di base, e sono specificati in molti altri standard del CiA, come il CiA401 per i moduli di I/O e il CiA402 per il controllo del movimento, quest'ultimo è il protocollo inserito in FCT per lo sviluppo del progetto.



L'interfaccia CANopen è sempre disponibile poiché è già incorporata nel controllore CMMP-AS-...-M3/M0 e nel modulo elettronico CPX-CEC-M1 che sarebbe il PLC scelto per quest'applicazione particolare, in quanto l'unico a supportare la progettazione della camma elettrica.

La connessione CAN-Bus è stata realizzata a norma con il connettore D-SUB a 9 poli la cui rappresentazione secondo la regola dell'arte è riportata nella tabella 13:

	N°Pin		Denominazione	Descrizione
		1	-	Non occupato
	6		CAN-GND	Terra
		2	CAN-L	Segnale CAN negativo (Dominant Low)
		7	CAN-H	Segnale CAN positivo (Dominant High)
		3	CAN-GND	Terra
		8	-	Non occupato
		4	-	Non occupato
		9	-	Non occupato
		5	CAN-Shield	Schermatura

Tabella 13: Occupazione connettori interfaccia CANopen

Il bus CAN offre la possibilità di collegare in rete tutti i componenti di un impianto in modo semplice e a prova di errori, un presupposto, a questo riguardo, è che vengano rispettate tutte le istruzioni, secondo lo stato dell'arte, relative al cablaggio.

Nella Fig.5.6, è rappresentato lo schema di collegamento interno del cavo CANopen, lo stesso cavo è costituito da due fili intrecciati, isolati fra loro, avvolti insieme in modo elicoidale, allo scopo di ridurre l'induzione elettromagnetica tra le coppie di fili. Il CAN H e CAN L vengono pilotate dai nodi in modo differenziale e per effetto di ciò il CANopen è praticamente insensibile alle interferenze elettromagnetiche. Inoltre per eliminare i disturbi provocati dalle emissioni di radiazioni elettromagnetiche, il bus risulta essere schermato. [30]

Nella figura a sinistra della 5.6, sono rappresentati non solo i collegamenti con i cavi ma anche gli stessi connettori, sui quali sono state inserite le sigle dei rispettivi componenti a cui sono collegati. Vi è una corrispondenza di posizioni dalla figura di sinistra alla foto di destra, dove il CANopen risulta essere quello con il cavo viola.

Di notevole importanza sono le resistenze di terminazione R il cui valore è di 120Ω con una tensione applicata di 5 V, le cadute di tensione che si creano sulle resistenze determinano uno smorzamento del pacchetto, così facendo si evita una riflessione di dati sulla linea. Tali resistenze possono essere inserite direttamente nel connettore, oppure sia i CMMP sia la CPX hanno a bordo la possibilità, qualora il connettore non né fosse provvisto, di inserire e disinserire una resistenza di 120Ω .

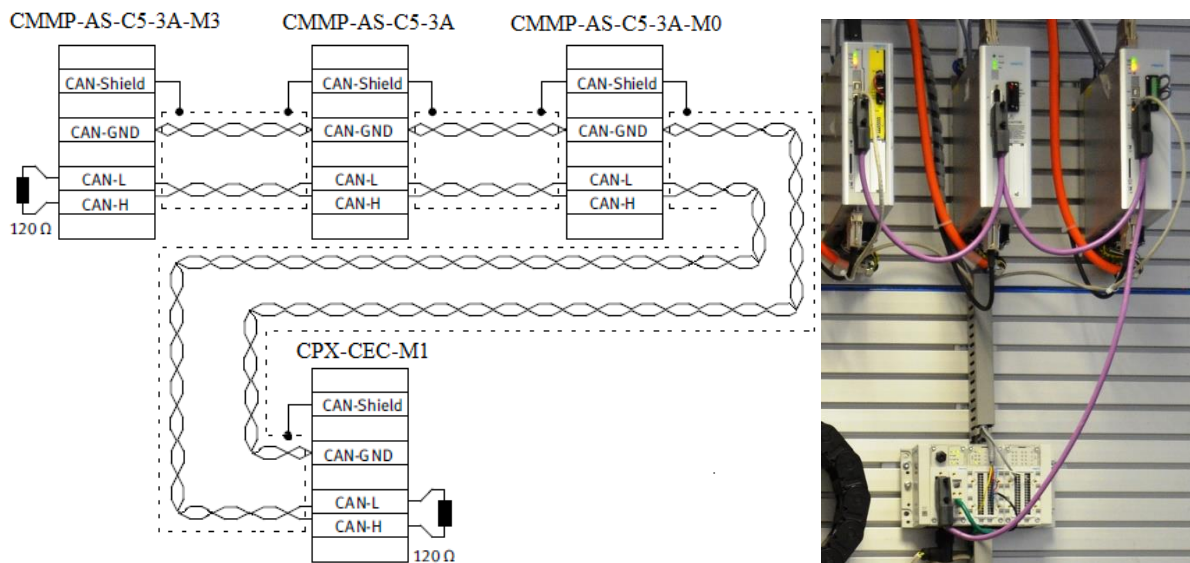


Figura 5. 6: Schema di cablaggio cavo CANopen e collegamento sui dispositivi

Se il cablaggio non fosse eseguito a regola d'arte, allora sul CAN-Bus potrebbero verificarsi delle anomalie durante l'esercizio. Questi errori causano un non funzionamento del motorcontroller, infatti, durante il cablaggio dell'Handling avendo dovuto adattare le lunghezze dei cavi e avendo dovuto fare tutti i cablaggi dei connettori, nella fase preliminare dove si è andato a verificare la comunicazione fra i vari dispositivi, i controller attraverso un LED rosso fornivano un responso negativo, per la mancanza di comunicazione.

A tal punto sono state fatte una serie di prove, cioè si è cercato di dividere il problema andando a verificare la comunicazione tra PLC e ogni singolo azionamento con un altro cavo CANopen. Così facendo si è verificato che la comunicazione vi era quindi, è stato scartato qualsiasi problema di parametrizzazione software, a quel punto si sono ricontrollati i cablaggi dei connettori ed è stato notato che all'interno di un connettore vi era un collegamento a massa. Quest'ultimo impediva la comunicazione di tutto il resto dell'impianto, ecco perché fare un cablaggio a regola d'arte risulta essere indispensabile per il suo corretto funzionamento.

Un cablaggio a regola d'arte prevede i seguenti accorgimenti:

- Su ogni estremità del cavo CAN deve essere presente una resistenza terminale esattamente di $120\Omega \pm 5\%$. In genere nelle schede CAN o in un PLC è già incorporata una simile resistenza terminale, che deve essere contemplata in maniera adeguata.
- Per il cablaggio utilizzare un cavo schermato esattamente con due coppie di conduttori intrecciati.
- Utilizzare una coppia di conduttori intrecciati per il collegamento di CAN-H e CAN-L.
- Per CAN-GND utilizzare insieme i conduttori dell'altra coppia.
- Il cavo viene schermato in tutti i nodi sui collegamenti CAN-Shield.
- Per mantenere il più possibile minimo il collegamento delle interferenze, non installare i cavi del motore parallelamente ai conduttori di segnale.
- Schermare e collegare a massa i cavi in modo appropriato.



- Caratteristiche del cavo CAN-Bus: 2 paia di 2 conduttori intrecciati, da $d=0,22 \text{ mm}^2$ la resistenza del doppino deve essere $< 0,2 \text{ } \Omega/\text{m}$; lo Schermo deve avere impedenza caratteristica che va da 100 ... 120 Ω .

Sono necessari diversi passi operativi per realizzare una connessione CANopen funzionante. Alcune di queste impostazioni dovrebbero o devono essere eseguite prima di attivare la comunicazione CANopen.

Questo paragrafo riassume le fasi operative necessarie sui lati dello slave per la parametrizzazione e configurazione. Alcuni parametri sono attivati solo dopo la memorizzazione e il reset, perciò si consiglia di eseguire la messa in servizio con l'FCT senza collegamento al bus CANopen.

Al momento di configurare la connessione CANopen l'utilizzatore deve adottare alcune misure, solo dopo si dovrebbe parametrizzare la connessione fieldbus su entrambi i lati. Quello che di solito viene fatto e parametrizzare prima gli slave e poi il master.

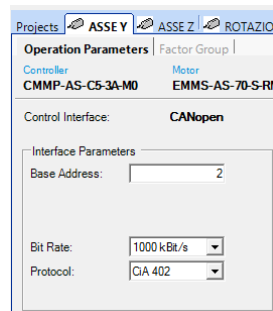


Figura 5. 7: Parametrizzazione CANopen in FCT

Facendo riferimento alla Fig.5.7 è stato impostato complessivamente 3 parametri diversi.

Il Bit Rate che determina la velocità di trasmissione in kBit/s, utilizzata sul CAN-Bus. Bisogna tenere presente che le elevate Bit Rate richiedono una lunghezza minima del cavo.

Viene impostato il numero di nodo base, per ottenere un'identificazione univoca nella rete bisogna assegnare un numero di nodo ad ogni utente, il quale può comparire solo una volta. L'apparecchiatura viene indirizzata tramite questo numero.

Per quanto riguarda la voce Protocol ci sono due profili di scelta possibili: il primo è quello del profilo di posizionamento Festo FHPP (Festo Handling Positioning Profile), ottimizzato su misura per le applicazioni di destinazione delle funzioni di manipolazione e posizionamento, l'FHPP consente di controllare e parametrare in modo unitario i diversi sistemi fieldbus e controller Festo; il secondo è quello che è stato effettivamente utilizzato e sarebbe il profilo di comunicazione CiA 402 per il controllo del posizionamento.

Tenere presente che i parametri menzionati nella Fig.5.7 possono essere modificati solo se il protocollo è disattivato, inoltre dopo un reset dei controllori, la parametrizzazione della funzionalità CANopen viene conservata solo se il set di parametri del motorcontroller è stato salvato e caricato nei controllori stessi.



Detto questo, è stato assegnato a ogni dispositivo un indirizzo IP per far sì che la comunicazione Ethernet potesse avvenire tutta in una sottorete, questo ha permesso di comunicare direttamente con ogni singolo controllore mediante il PC, con l'ausilio di quest'ultimo, attraverso FCT si sono parametrati tutti i dispositivi, andando ad assegnare:

- Base Address=1 al Master cioè il terminale elettronico CPX, cioè il PLC;
- Base Address=2 allo slave Asse Y il cui controllore è il CMMP-AS-C5-3A-M0;
- Base Address=3 allo slave Asse Z il cui controllore è il CMMP-AS-C5-3A;
- Base Address=4 allo slave Rotazione il cui controllore è il CMMP-AS-C5-3A-M3;

Nella comunicazione CANopen abbiamo i seguenti messaggi che vengono anche denominati frame:

- **SDO (Service Data Object)** che vengono utilizzati per la normale parametrizzazione del motorcontroller.
- **PDO (Process Data Object)** fornisce la possibilità di scambio rapido dei dati di processo (ad es. velocità effettiva, accelerazioni e posizionamenti)
- **SYNC (Synchronisation Message)** che sarebbe la sincronizzazione di diversi nodi CANopen;
- **EMCY (Emergency Message)** Trasmissione di messaggi di errore;
- **NMT (Network Management)** sono servizi di rete: si può ad esempio agire contemporaneamente su tutti i nodi CANopen.
- **HEARTBEAT (Error Control Protocol)** ha il compito del monitoraggio della comunicazione mediante messaggi periodici.

Ogni messaggio inviato sul CAN contiene un tipo di indirizzo, che permette di accertare per quale utente bus era destinata l'informazione. Questo numero viene definito identificatore. Quanto più basso è l'identificatore, tanto più alta è la priorità del messaggio. Per ogni oggetto di comunicazione summenzionato è stato definito un identificatore, in Fig.5.8 è visibile la struttura base di un messaggio CANopen:

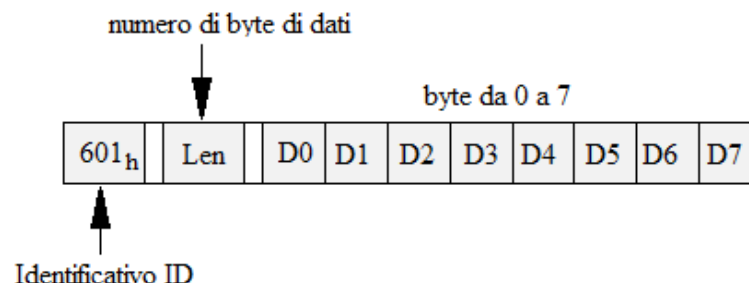


Figura 5. 8: Struttura messaggio CANopen

Di seguito riporto la modalità con cui avviene l'effettivo scambio di informazioni tra i dispositivi. Il PLC invia un pacchetto che sarà ricevuto da uno specifico controllore, il quale



dopo averlo ricevuto, invia un messaggio di Acknowledge, cioè un messaggio di avvenuta ricezione al PLC, inviando un SDO. Successivamente, il controllore trasmette al PLC un PDO, ed è proprio qui che si inizia la vera e propria parametrizzazione con scambi di informazioni relative alla velocità, alle accelerazioni e posizioni. A tal punto il PLC rinvia un PDO al CMMP e informa lo stesso che la comunicazione è avvenuta con successo e che lui ha ricevuto tutti i dati trasmessi. Com'è possibile notare si ha, per ogni modifica dei parametri e per ogni esecuzioni di comandi un continuo flusso di dati tra il PLC che è il Master e i vari Slave che sarebbero, i Controllori.

Una volta individuata la natura del messaggio il controllore cui appartiene il messaggio, si connette con il PLC e inizia a comunicare.

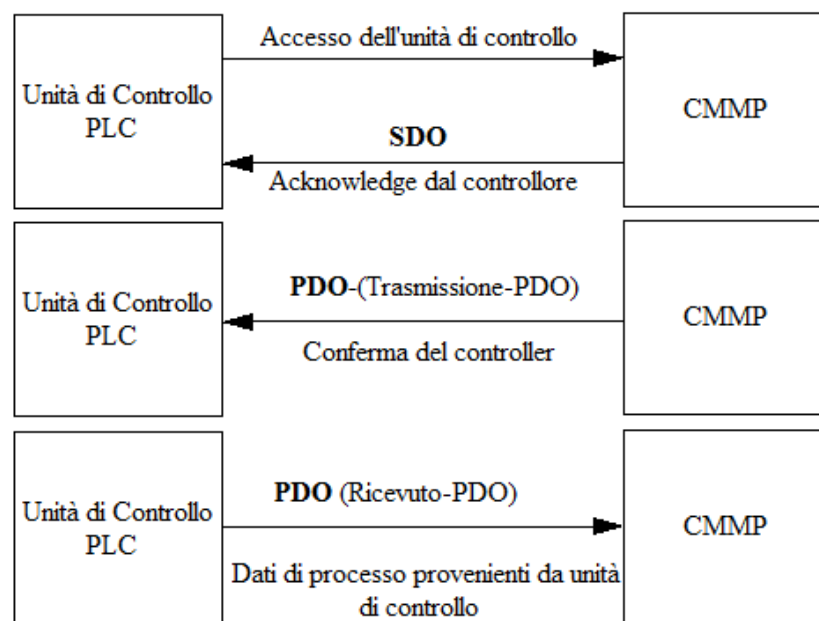


Figura 5. 9: Procedura di accesso e scambio di dati

5.3.1 Accesso Service Data Object SDO e descrizione dei messaggi

Tramite gli SDO Service Data Objects si può accedere all'indice degli oggetti del controller, questo accesso è particolarmente semplice e chiaro. Perciò è opportuno creare prima l'applicazione solo con gli SDO e solo successivamente adattare alcuni accessi ai PDO Process Data Objects, che sono più rapidi ma anche più complicati.

Gli accessi SDO partono sempre dal sistema di comando principale (host), che trasmette al controllore un comando di scrittura per modificare un parametro dell'indice degli oggetti o un comando di lettura per leggere un parametro. Per ogni istruzione l'host riceve una risposta, che riporta il valore letto o funge da segnale di conferma in caso di errore di scrittura.

Il motorcontroller riconosce di essere il destinatario dell'istruzione solo se l'host la trasmette con un determinato identificatore.

L'identificatore è formato dalla base 600_h più il numero di nodo del motorcontroller. Il motorcontroller risponde con l'identificatore 580_h più il numero di nodo.



La struttura delle istruzioni o delle risposte dipende dal tipo di dato dell'oggetto da leggere o scrivere, perché devono essere trasmessi o ricevuti 1, 2 o 4 byte di dati. I comandi per scrivere un valore nel controller iniziano con un'identificazione diversa secondo il tipo di dati. Invece l'identificazione della risposta è sempre la stessa, le istruzioni di lettura iniziano sempre con la stessa identificazione e il controller risponde in modo diverso secondo il tipo di dati restituiti, i numeri sono in notazione esadecimale. In ogni caso bisogna attendere la tacitazione da parte del motorcontroller per trasmettere altre richieste. I dati che nel caso esaminato vengono supportati sono: UINT8 valore di 8 bit senza segno da 0 ÷ 255, INT8 valore di 8 bit con segno da -128 ÷ 127.

Di seguito in Fig.5.10 riporto le istruzioni di lettura e scrittura di tale protocollo di comunicazione.

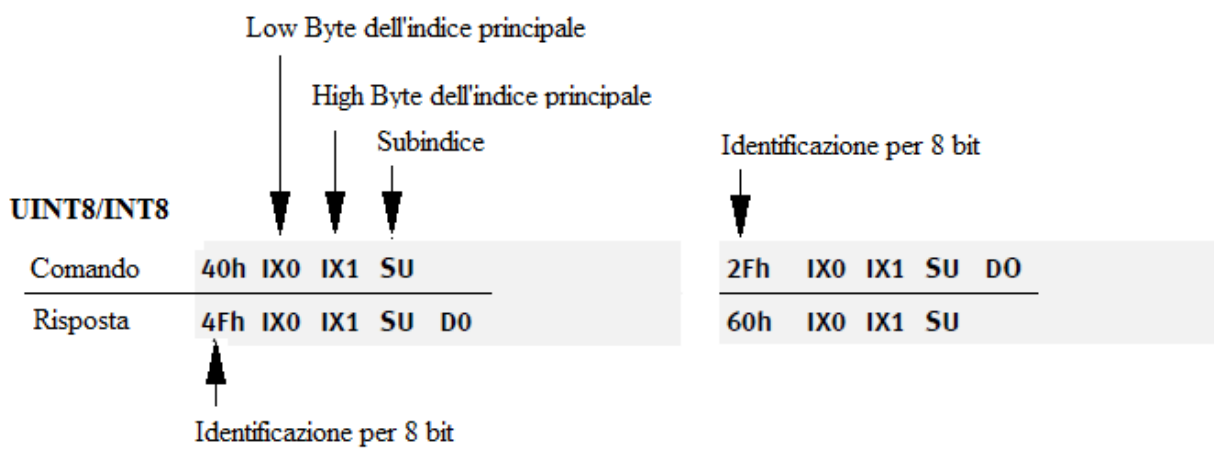


Figura 5. 10 A sinistra istruzioni di lettura, a destra istruzioni di scrittura

La trasmissione non avviene sempre con successo, ma vi è la possibilità che ci siano degli errori, a tal proposito andiamo a descrivere brevemente quando viene trasmesso un messaggio di errore SDO. In caso di errore durante la lettura o scrittura, il controller risponde con un messaggio di errore al posto della tacitazione.

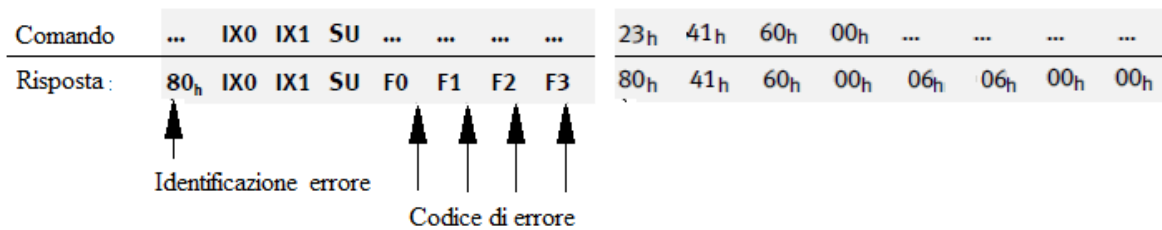


Figura 5. 11 Messaggio di errore SDO

Come è possibile notare dalla Fig.5.11 il codice di errore F0 F1 F2 F3, può assumere un determinato valore esadecimale, tale valore ha un preciso significato, ad esempio se avessimo 06h 06h 00h 00h questo codice esadecimale ci fornisce l'informazione che è avvenuto un accesso errato dovuto a un problema hardware.

5.3.2 Messaggio Process Data Object PDO



I PDO (**P**rocess **D**ata **O**bjects) permettono di trasmettere i dati in funzione dell'evento. Nel PDO diversamente da un SDO, la tacitazione non viene eseguita durante la trasmissione di un PDO, perciò dopo l'attivazione del PDO, tutti i destinatari devono essere in grado di elaborare in qualsiasi momento i PDO eventualmente in arrivo. In genere ciò comporta un notevole carico nel software del calcolatore host.

A questo svantaggio è contrapposto il vantaggio per il fatto che il calcolatore host non deve interrogare ciclicamente i parametri trasmessi tramite un PDO, il che determina una notevole riduzione del carico CAN-Bus e dei tempi di risposta.

Il controller trasmette il PDO quando si verifica un determinato evento; chi ha ricevuto il PDO lo analizza e conferma l'avvenuta ricezione (si veda la Fig.5.12). Il controller dispone di quattro PDO di trasmissione e di quattro PDO di ricezione. Nei PDO si possono mappare pressoché tutti gli oggetti dell'indice, cioè il PDO contiene come dati il valore effettivo della velocità, il valore effettivo della posizione o simile. Prima, però, bisogna comunicare al controller quali dati sono trasmessi perché il PDO contiene solo dati utili e non informazioni concernenti il tipo di parametro.

Il valore effettivo della posizione e il valore effettivo della velocità vengono trasmessi rispettivamente nei byte di dati D0 ... D3 del PDO e nei byte D4 ... D7.

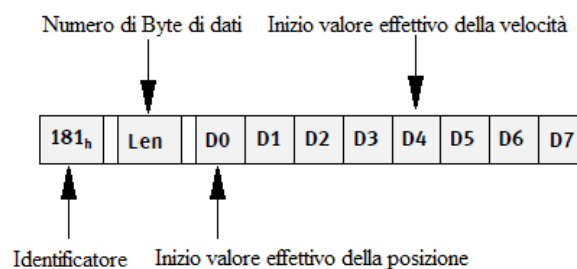


Figura 5. 12: Messaggio PDO

5.3.3 Messaggio di sincronizzazione SYNC

Diverse unità di un impianto possono essere tra loro sincronizzate. A questo scopo una delle unità, in genere il sistema di comando principale, trasmette periodicamente i messaggi di sincronizzazione. Tutti i controller collegati ricevono questi messaggi e li utilizzano per il trattamento dei PDO.

La sincronizzazione tra ricevitore e trasmettitore avviene grazie alle tecniche di codifica che sono state spiegate nel paragrafo 5.1, attraverso il quale s'invia un bit con uno stato differente dai bit precedenti e così il ricevitore ha la possibilità di sincronizzarsi, di campionare il segnale e di trovare il tempo di bit.

Una tecnica molto utilizzata oltre a quelle descritte nel paragrafo summenzionato, è il bit Stuffing nel quale il trasmettitore se rileva cinque Bits uguali consecutivi, gli accoda un bit complementare, questo permette al ricevitore e al trasmettitore di sincronizzarsi.



Di seguito riporto il frame del messaggio SYNC:

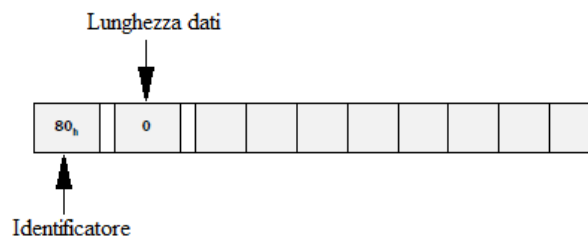


Figura 5. 13: Messaggio SYNC

5.3.4 Messaggio di Emergenza EMCY

Il controller monitora il funzionamento dei moduli più importanti, ossia alimentazione di tensione, modulo terminale, analisi encoder e slot tecnologici. Inoltre è controllata in modo continuo la temperatura del motore e dei fincorsa.

Le parametrizzazioni errate possono determinare messaggi di errore; in caso di errore, sul display del controller appare il relativo numero. In caso di più messaggi di errore contemporaneamente, allora sul display appare sempre l'informazione con la massima priorità cioè il numero più piccolo.

Il controllore trasmette il messaggio di EMERGENZA in caso di errore o se l'errore viene tacitato. L'identificatore di questo messaggio è composto dall'identificatore 80_h e dal numero di nodo del regolatore in oggetto. Dopo un reset, il regolatore è nello stato Error free, che eventualmente abbandona immediatamente perché sin dall'inizio è presente un errore.

Sono possibili diverse transizioni di stato identificabili con numeri differenti, tra cui:

- Nr.0, inizializzazione ultimata, non ci sono errori;
- Nr.1, non è presente alcun errore e ora si verifica un errore, viene trasmesso un telegramma Emergency con il codice dell'errore che si è verificato;
- Nr.2, si cerca di tacitare gli errori, però non tutte le cause sono eliminate;
- Nr.3, è già presente un errore e si verifica un secondo errore, viene trasmesso un telegramma Emergency con il codice del nuovo errore.
- Nr.4, si cerca di tacitare gli errori e tutte le cause sono eliminate, viene trasmesso un telegramma Emergency con il codice di errore 0000.

Al momento dell'errore il controller trasmette un messaggio di EMERGENZA. L'identificatore di questo messaggio è composto dall'identificatore 81_h e dal numero di nodo del controller in oggetto. Il messaggio di EMERGENZA è formato da 8 byte di dati, i primi due byte contengono un error_code; il terzo byte contiene un altro codice di errore 1001_h , i rimanenti 5 byte contengono degli zeri.

Di seguito è possibile notare la struttura del frame del messaggio EMCY in Fig.5.14.

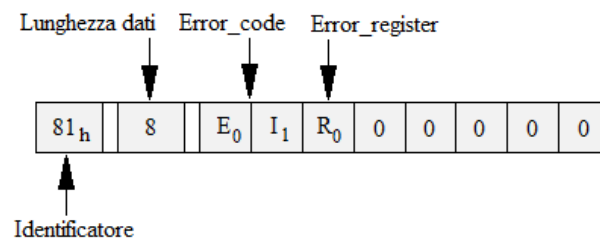


Figura 5. 14: Messaggio di Emergenza EMCY

5.3.5 Gestione della rete servizio NMT Network Management

La gestione della rete permette di pilotare tutte le unità CANopen. Perciò l'identificatore è riservato con la massima priorità (000h). Tramite il servizio NMT si possono trasmettere istruzioni a uno o a tutti i regolatori. Ogni istruzione è formata da due byte, il primo contiene il codice operativo di istruzione command specifier CS e il secondo, l'indirizzo del nodo node ID, del regolatore in oggetto. Tramite l'indirizzo del nodo di riferimento, cioè il master si possono attivare tutti i nodi presenti nella rete. Così è possibile che in tutte le apparecchiature venga ad esempio attivato contemporaneamente un reset. I regolatori non tacitano le istruzioni NMT, solo indirettamente è possibile dedurre un'esecuzione riuscita.

Di seguito viene riportata la struttura del messaggio NMT:

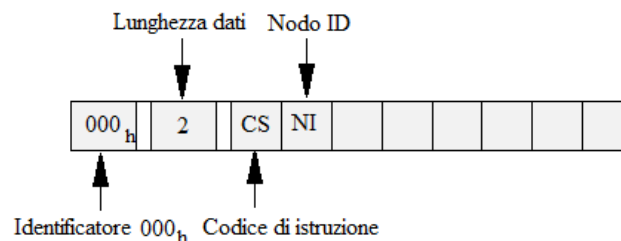


Figura 5. 15: Messaggio Network Management NMT

Tramite il byte CS nel messaggio NMT si possono attivare le variazioni di stato, che sono orientate sostanzialmente allo stato di destinazione quali l'avvio, lo stop, il reset etc.

Nel parametro NI bisogna specificare il numero di nodo oppure zero se si devono indirizzare tutti i nodi presenti nella rete Broadcast.

Determinati oggetti di comunicazione non possono essere utilizzati in funzione dello stato NMT, così, ad esempio, è assolutamente necessario impostare lo stato NMT su un parametro preciso in modo che il regolatore possa trasmettere i PDO. Fra due messaggi NMT in successione su un bus, anche per diversi nodi, deve essere disponibile minimo un tempo ciclo doppio in modo che il regolatore di posizione possa elaborare correttamente i messaggi NMT.

5.3.6 Heartbeat Error Control Protocol e possibili regolazioni

Si può attivare il cosiddetto protocollo Heartbeat per monitorare la comunicazione fra slave e master: lo slave trasmette ciclicamente dei messaggi al master, il quale può controllare se



questi messaggi appaiono periodicamente e quindi adottare apposite misure se essi non arrivano. Tale protocollo è trasmesso attraverso l'identificatore 700_h più il numero di nodo. Si veda di seguito la struttura di tale messaggio.

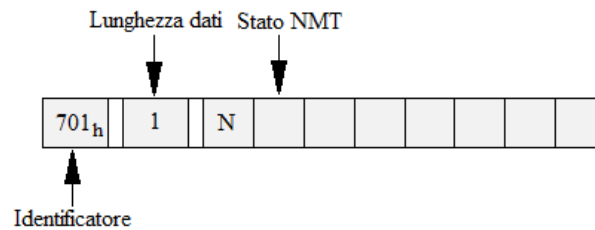


Figura 5. 16: Struttura messaggio Heartbeat

Sin ora abbiamo fatto una breve descrizione sui messaggi che consentono la comunicazione in CANopen. Mediante appositi programmi che consentono la parametrizzazione e corretti cablaggi, si ottiene il risultato voluto e cioè una corretta comunicazione tra i vari azionamenti e tra azionamenti e PLC.

Inoltre, settando i parametri in maniera corretta e richiamando i giusti identificatori è possibile effettuare una regolazione di corrente e quindi di coppia, di velocità e di posizione.

L'identificatore che viene richiamato per quanto riguarda la coppia è $60F6_h$ chiamato torque_control_parameters, ovviamente potrà essere controllato anche il guadagno di coppia 01_h torque_control_gain e la costante di tempo 02_h torque_control_time.

Oltre alla coppia possiamo andare ad agire sulla regolazione di velocità, il set di parametri del controller deve essere adattato all'applicazione e cioè al robot di avvitatura. In questo caso il guadagno dipende notevolmente dalle masse eventualmente accoppiate al motore. Al momento della messa in funzione dell'impianto i dati devono essere determinati in modo ottimale con l'ausilio del software. Bisogna far attenzione perché impostazioni errate dei parametri del regolatore di velocità possono provocare forti oscillazioni ed eventualmente danneggiare irrimediabilmente parti dell'impianto.

L'identificatore che viene richiamato per quanto riguarda la velocità è $60F9_h$ chiamato velocity_control_parameters, ovviamente potrà essere controllato anche il guadagno di velocità 01_h velocity_control_gain.

Per il regolatore di posizione, sull'ingresso è presente il valore nominale della posizione position_demand_value ed il valore effettivo della posizione position_actual_value, quest'ultimo valore viene introdotto dal trasduttore angolare del motore.

È possibile limitare la grandezza di uscita per mantenere stabile il circuito di regolazione della posizione, la grandezza di uscita viene introdotta nel regolatore di velocità come valore nominale del numero di giri. Anche qui come i casi precedenti abbiamo diversi identificatori che hanno differenti significati, ad esempio $60FB_h$ è position_control_parameter_set.

Al momento della messa in funzione dell'impianto i dati del regolatore di posizione devono essere determinati in modo ottimale con l'ausilio del software. Impostazioni errate dei

parametri del regolatore di posizione possono provocare forti oscillazioni ed eventualmente danneggiare irrimediabilmente parti dell'impianto.

Il regolatore confronta la posizione nominale con la posizione effettiva e dalla differenza, forma una velocità di correzione contemplando il guadagno. La velocità di correzione, è introdotta nel regolatore di velocità mentre il regolatore di posizione è relativamente lento rispetto al regolatore di corrente e di velocità. Perciò funziona internamente con modulatori, cosicché il lavoro di stabilizzazione è ridotto e quindi è in grado di pendolare rapidamente.

In genere come regolatore di posizione è sufficiente un elemento proporzionale.

Il regolatore converte in velocità anche le variazioni di posizione minime, quindi in caso di una piccola anomalia a es. breve bloccaggio dell'impianto, potrebbero verificarsi processi di stabilizzazione troppo intensi con velocità molto elevate. Tutto ciò deve essere evitato se l'uscita del regolatore viene limitata appropriatamente tramite l'oggetto `position_control_v_max`. Con l'oggetto `position_error_tolerance_window` si può definire: la differenza di posizione entro cui il regolatore non interviene, denominato campo morto. [28]

5.3.7 Comunicazione CANopen tra Master e Slave

Come già accennato nei paragrafi precedenti la comunicazione avviene attraverso una trasmissione di continui messaggi tra Master e Slave, bensì tra il PLC e gli azionamenti.

Nel robot di avvitatura il Master il cui base Address è 1, risulta essere l'unità CPX-CEC-M1 cioè il PLC Festo. Quest'ultimo è stato riportato qui di seguito:

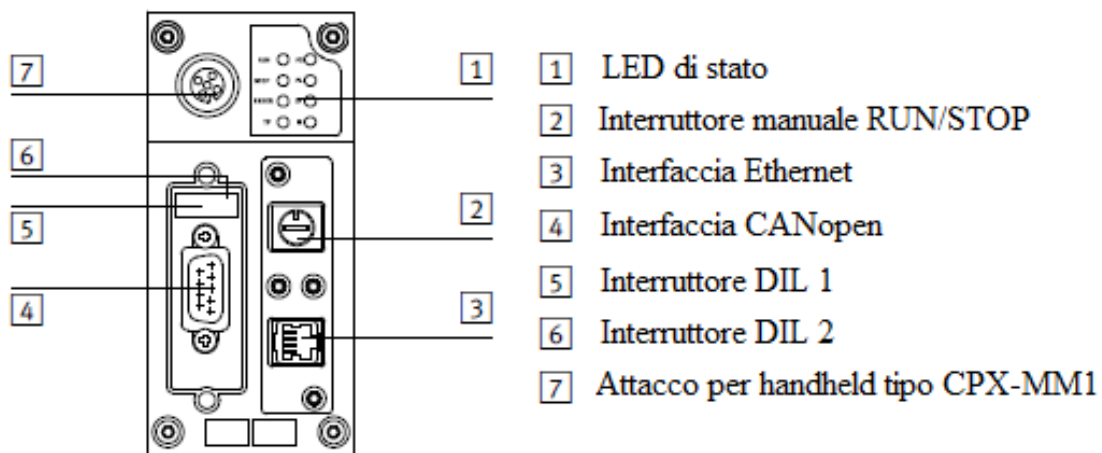


Figura 5. 17: Modulo elettronico CPX-CEC-M1 funzionante da PLC Master

Tale unità è programmabile in ambiente CoDeSys il cui programma per il funzionamento del robot è riportato nel Capitolo 7, la CPX-CEC-M1 è destinata unicamente all'impiego nei terminali elettronici CPX.

Per tali componenti bisogna rispettare alcune norme, tra cui quella di utilizzare solo sorgenti di energia in grado di garantire un isolamento elettrico sicuro della tensione d'esercizio e



rispettare i requisiti generali per i circuiti elettrici PELV previsti dalle norme IEC/DIN EN 60204-1.

Nella CPX-CEC-C1/-M1 è possibile attivare o disattivare la tempificazione del bus CAN 120 Ω , ponendo a ON in DIL 2.1 e OFF il DIL 2.2. L'alimentazione dell'apparecchio avviene tramite il blocco di interconnessione, ossia tramite l'alimentazione della tensione d'esercizio per elettronica e sensori. Il master CANopen integrato nell'unità di controllo può attivare sia sistemi elettrici sia pneumatici attraverso il bus di campo. L'ampia libreria di funzioni CoDeSys fornisce la possibilità di una diagnostica e monitoraggio del funzionamento dei sistemi Handling.

La scelta di questo modulo elettronico è stata fatta perché la CPX-CEC-M1 include anche la nuova libreria Softmotion per il controllo del movimento e interpolazione di assi, con tale libreria è possibile fare otto sincronizzazioni di assi, ma la cosa molto interessante è la possibilità di utilizzare la Camma elettronica, la quale ha consentito di effettuare la vera e propria azione di avvitatura, cioè discesa dell'asse Z e contemporanea rotazione dell'asse R. Senza l'utilizzo della libreria Softmotion è comunque possibile farlo, andando a utilizzare una modalità di interpolazione di assi in FCT.

Con questa modalità però, si è costretti a parametrizzare il sistema in FCT, definire posizioni e velocità e caricare tutto nei singoli azionamenti, questo procedimento ha il vantaggio di essere più semplice rispetto ad un'implementazione Softmotion, perché non va stilato un programma a hoc, ma ha lo svantaggio che ogni qual volta dovessi fare una modifica dovrei riparametrizzare e ricaricare nuovamente le modifiche per ogni singolo controllore, quindi rende il tutto poco agevole e veloce. Con il Softmotion, invece una volta stilato il programma, basta cambiare i valori di posizione, velocità e accelerazioni all'interno dello stesso e caricarli nel PLC. Si hanno prestazioni dinamiche elevate, grande efficienza, tempi ciclo ridotti e ottime prestazioni di posizionamento alle alte velocità.

In linea di massima, la logica che vi è dietro è la seguente: si utilizza FCT per parametrare i dispositivi e settare i giusti protocolli di comunicazione, successivamente il progetto software viene caricato all'interno degli azionamenti. A tal punto, viene scritto il programma di movimentazione del robot in Structured Text (ST), il quale viene caricato all'interno del PLC. Da questo momento in poi il PLC e il Master invieranno i vari comandi scritti nel programma agli azionamenti, mediante messaggi. Tali messaggi saranno elaborati dagli azionamenti e permetteranno la movimentazione dei motori alle posizioni, velocità e accelerazioni impostate all'interno del programma. E' chiaro che i motori a loro volta trasmetteranno il moto agli assi elettrici calettati su di essi, la loro movimentazione avverrà passo dopo passo, in base al programma scritto in CoDeSys.

Di seguito per un maggior chiarimento, si riporta il collegamento effettuato tra il PLC e gli azionamenti mediante il CANopen (Fig.5.18). Si consideri, inoltre che al PLC viene connesso il PC, quest'ultimo è utilizzato per scaricare nel PLC il programma di movimentazione stilato.

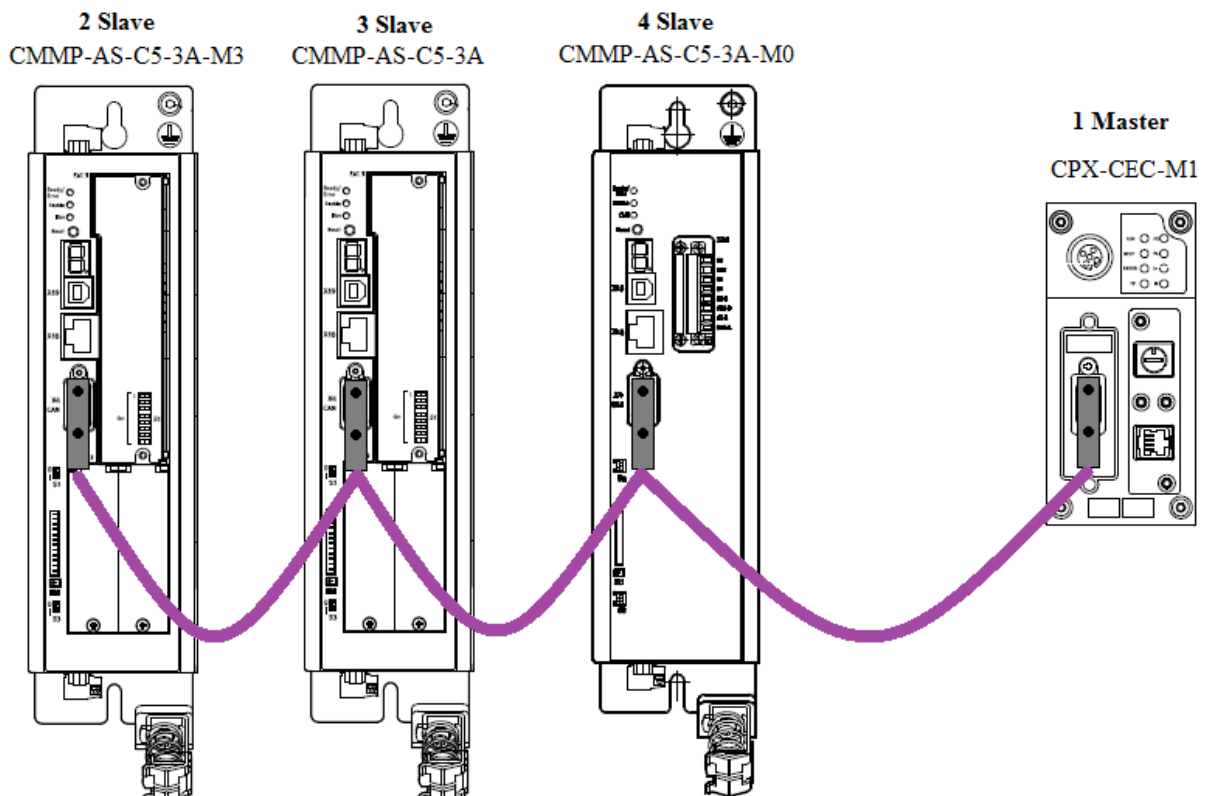


Figura 5. 18: Collegamento CANopen

5.4 Caratteristiche generali Industrial Ethernet

La crescente complessità dei dispositivi da inserire nei processi produttivi, la sempre maggior spinta a decentrare negli slave parte dell'intelligenza presente nella rete, ha provocato un aumento della banda trasmissiva richiesta, cosa che i normali bus di campo non erano in grado fornire. Questo ha portato i produttori di reti industriali a ricercare un nuovo mezzo trasmissivo per soddisfare le nuove esigenze. Questa ricerca ha vagliato molti standard e alla fine si è concentrata sull'ethernet in particolare sul suo protocollo a livello data link.

Ethernet offriva il vantaggio di essere già ampiamente diffuso in ambito consumer, dove si era già imposto come standard mondiale di fatto. Questo ha permesso di poter contare su un gran numero di produttori in grado di fornire dispositivi con prestazioni sempre più elevate a prezzi competitivi. L'ethernet general purpose non era adatto ad essere utilizzato in ambito industriale a causa di collisioni tra pacchetti, ritrasmissioni e per tempi di attesa casuali.

E' stato necessario attendere alcune innovazioni per rendere l'ethernet utilizzabile in ambito deterministico e Real Time.

Passiamo in rassegna questi problemi e le loro soluzioni:

- 100 Mb/s



A causa dell'elevato numero di bit di overhead, necessari al funzionamento del protocollo ethernet, è stato necessario raggiungere la velocità di trasmissione di 100Mb/s per ottenere un netto miglioramento rispetto ai bus di campo.

- Full-duplex
E' stato necessario sostituire lo standard half-duplex con il full-duplex per ridurre drasticamente la probabilità di collisione dei pacchetti ed eliminare il non determinismo introdotto dalle ritrasmissioni.
- Switch
Un'altra innovazione volta a ridurre le collisioni è stata la sostituzione dei comuni HUB con i più evoluti switch, in grado di riconoscere il traffico e creare un canale comunicativo tra ogni dispositivo che lo richiede, garantendo così la comunicazione immediata a ogni coppia di dispositivi.

Non appena questo livello tecnologico è stato raggiunto ogni azienda produttrice di bus di campo ha creato la propria versione in chiave ethernet del proprio protocollo di comunicazione. In questo modo Siemens produttrice di Profibus ha creato ProfiNet, Allen Bradley da DeviceNet/ControlNet ha introdotto EtherNet/IP, da Safety-BUS nasce SafetyNet.

Le differenze principali tra queste reti risiedono nell'architettura del sistema di comunicazione, nel modo in cui vengono evitate le collisioni tra pacchetti, nella costruzione del campo data del pacchetto ethernet e nella modifica o meno dello standard ethernet.

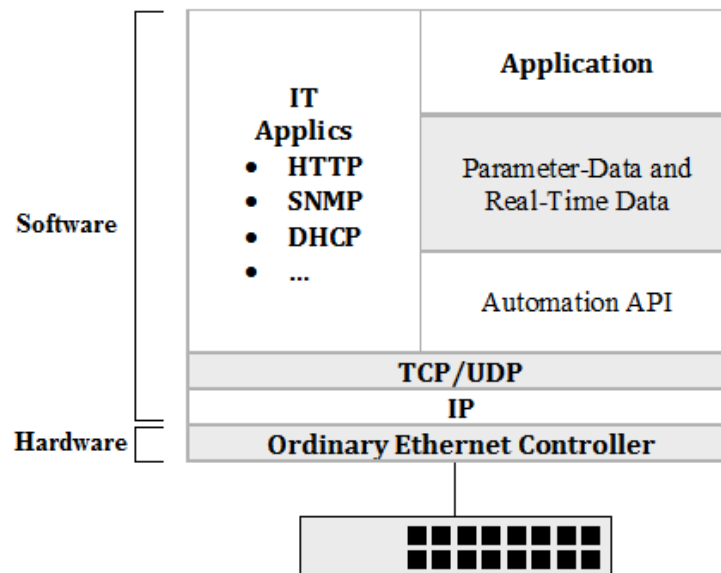


Figura 5. 19: Struttura standard del protocollo Ethernet

Come visibile in Fig.5.19, con modifica allo standard ethernet s'intende la sostituzione di uno o più livelli compresi tra 1 e 4 del modello ISO/OSI. In questo caso le modifiche non interessano i primi 2 livelli definiti dalla normativa IEEE 802.3 che determinano l'hardware su



cui circolano i dati e come avviene l'accesso alla rete, ma si concentrano sui livelli 2 e 3, lo stack TCP/IP e UDP/IP, ciò è sul modo in cui i dispositivi scambiano i dati.

Essendo questi i protocolli maggiormente utilizzati della rete real-time ethernet, sono di seguito riportati i tratti salienti:

- TCP (Trasmission Control Protocol) è un protocollo orientato alla connessione, utilizza dei pacchetti di servizio per stabilire mantenere e chiudere la connessione tra mittente e destinatario; in questo modo garantiscono l'arrivo alla destinazione dei pacchetti, nell'ordine in cui sono stati spediti. Nella trasmissione viene richiesta una conferma da parte del ricevitore e in caso di errori sulla rete il pacchetto viene ritrasmesso. A causa di questa struttura, il protocollo TCP non garantisce il determinismo nella comunicazione e quindi non viene utilizzato per comunicazione Real-Time ma solo per dati di parametrizzazione e diagnostica.
- UDP (User Datagram Protocol) è un protocollo non connesso, i messaggi vengono spediti in rete senza garantire la consegna del pacchetto e l'ordine di arrivo, ma eliminando i messaggi di servizio si viene a creare una comunicazione più leggera e veloce rispetto al TCP. Per questo motivo viene preferito nelle comunicazioni Real-Time dove la ritrasmissione di un pacchetto perso non farebbe altro che peggiorare la performance della rete.

La modifica di questi due protocolli è pratica abbastanza comune dei produttori di reti industrial ethernet, che così facendo aumentano le performance della rete a scapito però della compatibilità diretta con le altre reti ethernet. Alcuni esempi di queste reti sono: SERCOS III, EtherCAT, CC-Link IE, ProfiNet (IRT).

D'altra parte uno dei maggiori pregi delle reti industrial ethernet non modificate, è la loro capacità di fondersi senza l'aggiunta di hardware specifici con le altre reti ethernet già presenti, come la gestione di magazzino, risorse umane, acquisti-vendite etc. permettendo così il passaggio diretto di informazioni tra la rete di processo industriale all'infrastruttura di ufficio sfruttando pienamente la semplicità di diagnostica e l'accesso rapido alle informazioni offerto dalla rete. In questo modo l'azienda riesce a migliorare i propri processi produttivi e risparmiare sull'infrastruttura di comunicazione. Esempi pratici di questa tipologia di rete sono: EtherNet/IP, Modbus-IDA.

Un ultimo aspetto riguardante la connettività aumentata nelle reti industrial ethernet è la gestione della sicurezza informatica, intesa come protezione dalle istruzioni non autorizzate sulla rete.

Uno dei principali rischi di connettere la rete industriale alla rete di ufficio è infatti l'ingresso di persone estranee alla rete, che una volta ottenuto l'accesso possono danneggiare l'impianto o rubare informazioni riservate. Diventa quindi importante predisporre strutture particolari come router e firewall per proteggere la propria infrastruttura.



Riassumendo i principali vantaggi di ethernet sui bus di campo sono:

- Maggior larghezza di banda, è possibile trasmettere una quantità maggiore di dati, questo permette di utilizzare slave con intelligenza a bordo, decentrando parte del controllo e svolgendo attività di monitoraggio dei dispositivi stessi al fine di pianificare la manutenzione.
- E' possibile migliorare le prestazioni temporali rispetto ai bus di campo.
- E' possibile connettere un maggior numero di dispositivi e coprire un'area maggiore rispetto ai Fieldbus.
- E' possibile reperire materiali da vari produttori e a prezzi competitivi in quando ethernet è uno standard internazionale.
- Si semplifica il commissioning, della manutenzione, e dell'individuazione dei guasti.
- E' possibile connettersi direttamente ad altre reti ethernet già presenti.

5.4.1 Struttura del frame Ethernet

La struttura del pacchetto Ethernet detto frame è riportato qui di seguito.

Preamble	SFD	Destination MAC Address	Source MAC Address	EtherType	Payload	FCS
-----------------	------------	--	-----------------------------------	------------------	----------------	------------

Figura 5. 20: Struttura del Frame Ethernet

Questo è il frame, in altre parole il pacchetto dati ricevuto dallo strato del datalink nella pila dei protocolli è:

- Preamble (preambolo), di 7 byte: questi primi byte hanno valore 10101010 e servono a "svegliare" i dispositivi del ricevente e a sincronizzare gli oscillatori con quelli del mittente.
- Start Frame Delimiter (SFD), di 1 byte: questo byte ha valore 10101011 e la serie dei due bit a 1, indica al destinatario che sta arrivando del contenuto importante; è protetto mediante la violazione del codice Manchester descritto nei paragrafi 5.2.
- Destination MAC Address (indirizzo di destinazione), di 6 byte: questo campo contiene l'indirizzo LAN del dispositivo di destinazione; se l'indirizzo non corrisponde, il livello fisico del protocollo lo scarta e non lo invia agli strati successivi;
- Source MAC Address (indirizzo sorgente), di 6 byte;
- EtherType (campo tipo), di 2 byte: questo campo indica il tipo di protocollo del livello di rete in uso durante la trasmissione, oppure nel caso di frame IEEE 802.3 la lunghezza del campo dati;



- Payload (campo dati), da 46 a 1500 byte: contiene i dati reali, che possono essere di lunghezza variabile; se i dati superano la capacità massima, vengono suddivisi in più pacchetti, mentre se i dati non raggiungono la lunghezza minima di 46 byte, viene aggiunto un pacchetto riempitivo della lunghezza opportuna;
- Frame Check Sequence (FCS), controllo a ridondanza ciclica (CRC), di 4 byte: permette di rilevare se sono presenti errori di trasmissione; in pratica, il ricevente calcola il CRC mediante un algoritmo e lo confronta con quello ricevuto in questo campo.

È molto simile al frame IEEE 802.3, tranne che per il campo tipo, che nell'802.11 diventa Tipo o Lunghezza e il preambolo ridotto a 7 byte con 1 byte trasformato in Start of Frame.

Nel protocollo Ethernet il mittente invia il frame nella LAN in modalità broadcast, il frame attraversa tutta la LAN, viene ricevuto da tutti i dispositivi presenti, ma solo il dispositivo che riconosce il proprio indirizzo di destinazione lo riceverà, mentre tutti gli altri lo scarteranno. Il frame ricevuto può contenere errori, la maggior parte dei quali sono verificabili dal controllo CRC, un frame che non supera il controllo CRC viene scartato.

L'Ethernet non prevede la ritrasmissione del frame scartato, né una notifica della sua perdita agli strati superiori, questo lo rende poco affidabile, ma è semplice ed economica. Il compito di provvedere alla ri-trasmissione dei frame perduti viene demandato agli strati superiori (cioè al protocollo TCP). La gestione delle collisioni e dell'occupazione simultanea ovvero condivisa del canale di trasmissione viene gestita mediante il CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Anche da questo punto di vista, l'ethernet non è in grado di garantire né la consegna di un frame, né che il frame sia consegnato entro un tempo prevedibile.

Nei sistemi Ethernet recenti, il problema non si presenta poiché con gli switch, la crescita della capacità fa in modo che le collisioni si eliminano e si rende molto più improbabile la congestione. Di converso nelle reti "switched" può manifestarsi perdita di frame, dovute alla limitata dimensione dei buffer nei dispositivi.

5.4.2 Cablaggio dei dispositivi nella sottorete

Come si può intuire il CANopen non è stato l'unico protocollo utilizzato nel robot per la trasmissione di dati ma è stato utilizzato anche l'Ethernet, il quale ha permesso di interfacciare il PC con i vari dispositivi in rete.

Per connettere i vari dispositivi è stato utilizzato per il cablaggio un cavo RJ-45, nella tabella 14 è stato riassunto il significato dei vari pin e a quali segnali rispettivamente corrispondono. Sulla sinistra della tabella riportata a pagina seguente, vi è la rappresentazione del connettore femmina, con la relativa numerazione dei pin, mentre sulla destra vi è la rappresentazione del cavo munito del connettore maschio.

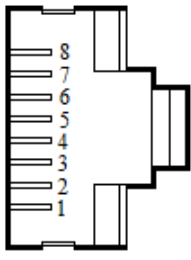

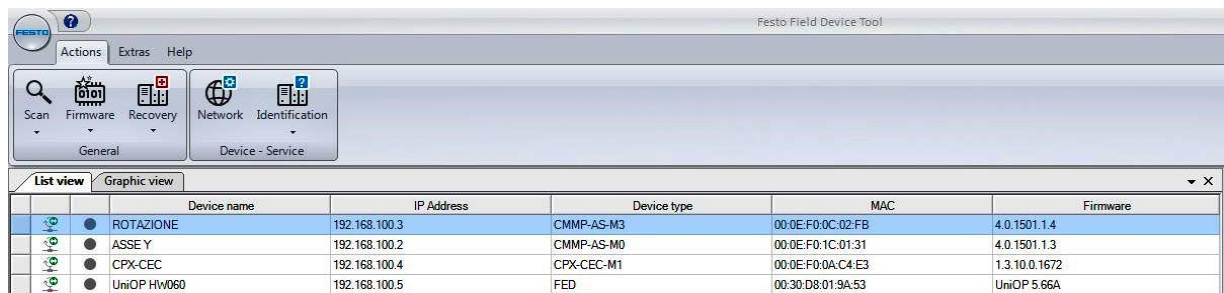
Connettore femmina	Connettore maschio	Pin	Segnale	Spiegazione
		1	TD+	Dati di trasmissione+
		2	TD-	Dati di trasmissione-
		3	RD+	Dati di ricezione+
		4	n.c.	Non collegato
		5	n.c.	Non collegato
		6	RD-	Dati di ricezione-
		7	n.c.	Non collegato
		8	n.c.	Non collegato
		Corpo	Schermo	Schermo

Tabella 14: Occupazione pin dell'interfaccia Ethernet

Per poter effettuare un cablaggio corretto e per poter gestire da PC tutti i dispositivi connessi nella sottorete LAN è stato utilizzato uno switch, il quale è un dispositivo di rete che si occupa di commutazione a livello datalink del modello ISO/OSI.

Lo switch agisce sull'indirizzamento e sull'instradamento all'interno delle reti LAN mediante l'indirizzo fisico, seleziona i frame ricevuti e li dirige verso il dispositivo corretto. L'instradamento avviene per mezzo di una corrispondenza univoca porta-indirizzo, il collegamento dello switch è in Figura 5.23.

Per assegnare a ogni dispositivo un indirizzo IP, in modo tale che gli stessi possano far parte della stessa sottorete, bisogna utilizzare diversi programmi di gestione nodi, tra cui per gli azionamenti e la CPX l'FFT (Festo Field Device Tool), per la camera l'SBO- Device Manager. Questi consentono non solo di gestire i dispositivi Ethernet, ma danno la possibilità di aggiornare files e firmware. Di seguito riporto l'assegnazione degli indirizzi IP.

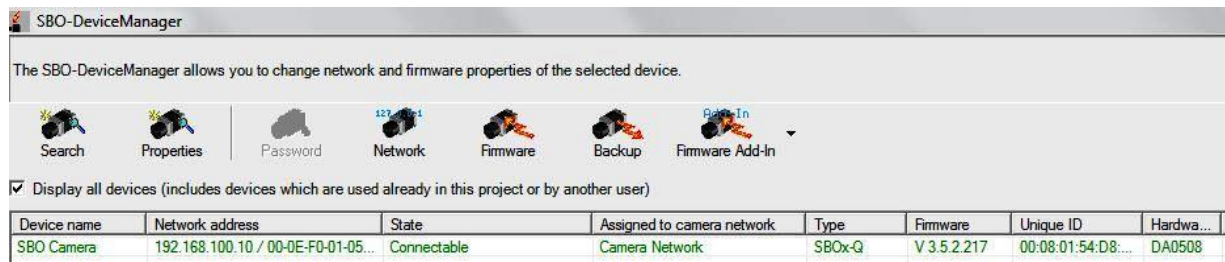


Device name	IP Address	Device type	MAC	Firmware
ROTAZIONE	192.168.100.3	CMMP-AS-M3	00:0E:F0:0C:02:FB	4.0.1501.1.4
ASSE Y	192.168.100.2	CMMP-AS-M0	00:0E:F0:1C:01:31	4.0.1501.1.3
CPX-CEC	192.168.100.4	CPX-CEC-M1	00:0E:F0:0A:C4:E3	1.3.10.0.1672
UniOP Hw060	192.168.100.5	FED	00:30:D8:01:9A:53	UniOP 5.66A

Figura 5. 21: Assegnazione degli indirizzi IP in FFT

Come è possibile notare dalla Figura 5.21, mancano due componenti: uno è il CMMP-AS-C5-3A responsabile della movimentazione dell'asse Z e l'altro è l'SBOI-Q-R1B cioè la smart camera responsabile del controllo di visione per la verifica della corretta avvitatura del tappo di bottiglia.

La mancanza del primo componente all'interno della lista è perché avendo usato un azionamento datato, esso non era munito di porta Ethernet bensì della seriale, quindi qualsiasi modifica ai parametri è stata fatta connettendo l'azionamento al PC mediante il cavo seriale in COM10; mentre per quanto riguarda la camera è stato possibile assegnare un indirizzo IP ma da un ulteriore programma specifico, il quale risulta essere l'SBO-Device Manager, il cui screenshot è riportato nella Fig.5.22.



Eseguiti i giusti collegamenti e assegnati i vari indirizzi IP si verifica lo stato della connessione, che se dovesse essere come in Figura 5.22, cioè Connectable, allora il dispositivo è collegato correttamente ed è pronto a comunicare. Mediante l'utilizzo dei programmi FCT per gli azionamenti, del FED designer per il touch panel e del CheckOpti per l'SBO camera è stato possibile parametrizzare i componenti e qualsiasi modifica fatta può essere caricata facilmente via Ethernet, all'interno dei dispositivi, muniti di una intelligenza a bordo.

Numerose sono state le prove fatte per mettere a punto il robot e ogni qual volta si andavano a fare delle modifiche, bastava cliccare in FCT il tasto Download e successivamente Store, per caricare i parametri all'interno degli azionamenti.

Il FED designer è stato il programma utilizzato per programmare il FED 501 cioè il touch-panel e grazie al collegamento Ethernet, si è reso possibile il caricamento del programma dal PC al FED.

Per la parametrizzazione del sistema vision e per caricare i parametri nella camera, si è utilizzato CheckOpti, con quest'ultimo è stato possibile acquisire l'immagine in Real-time, processarla e definire i limiti consentiti per far sì che l'avvitatura possa essere accettata o meno. Infine, via Ethernet è stato possibile caricare all'interno del PLC il vero e proprio programma di gestione dei movimenti, velocità e accelerazioni del robot scritto in ambiente CoDeSys, in cui tutte le informazioni e i comandi passano per via Ethernet al PLC che poi va a comunicare con gli azionamenti in CANopen.

In Fig.5.23 è stato riportato lo schema di collegamento completo fra azionamenti, PLC, smart-camera, PC e touch panel. Nella seguente figura sono mostrati nel dettaglio i collegamenti effettuati in CANopen e per l'Ethernet industriale.

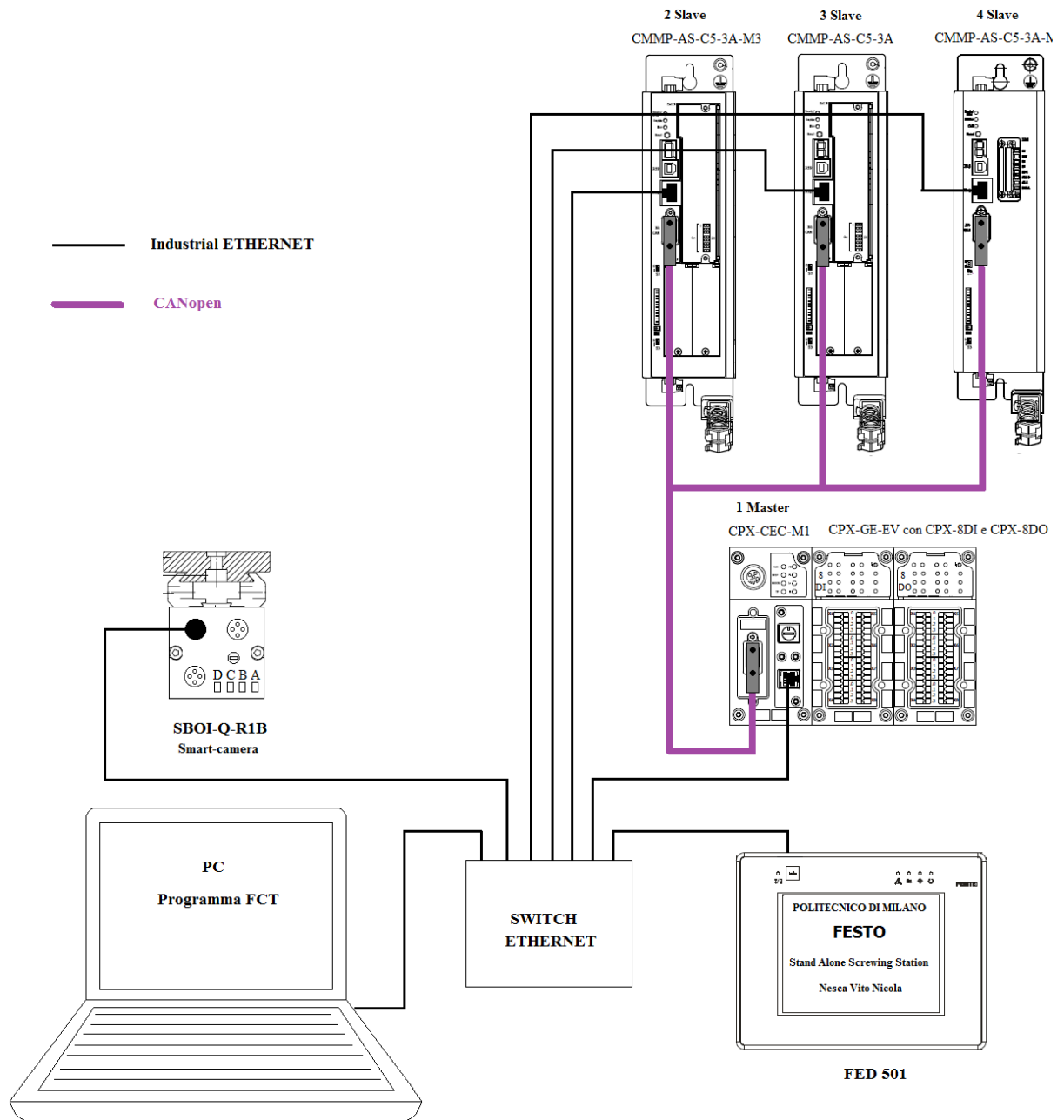


Figura 5. 23: Collegamenti Ethernet e CANopen tra i vari dispositivi

Capitolo 6

PIANIFICAZIONE, PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE STEP-by-STEP

Nel seguente capitolo si vuole discutere più nel dettaglio le fasi di pianificazione, di progettazione e di processo che sono state adottate per la realizzazione della stazione di avvitatura stand-alone. L'espressione stand-alone indica che un oggetto o un software è in grado di funzionare da solo in maniera indipendente da altri oggetti o software, infatti l'handling è stato progettato e programmato in modo che possa funzionare con la sola prerogativa che sia alimentato a 220 V AC per il circuito di potenza e 24V DC per il circuito ausiliario e che sia munito di un proprio PLC che permetta la gestione indipendente dell'intero sistema.

saranno discussi numerosi software di programmazione che, grazie al loro utilizzo, hanno permesso la corretta scelta della componentistica hardware al fine di progettare e realizzare un sistema altamente preciso e veloce, concorde con quelle che sono le richieste di mercato nell'ambito dell'automazione industriale.

Inoltre, sarà evidenziato il vantaggio ricavato dalla costruzione di una Work Breakdown Structure (WBS), detta anche Struttura di Scomposizione del Lavoro, dove s'intende l'elenco di tutte le attività che compongono un progetto, attraverso un albero gerarchico all'interno della quale sono presenti materiali, software, servizi e obiettivi.

6.1 Work Breakdown Structure WBS

Prima di effettuare la progettazione e realizzazione del sistema Handling, è stata fatta una pianificazione sulle attività da svolgere per il raggiungimento dell'obiettivo, compresi quelli che sono i corsi di formazione specifici per la conoscenza dei singoli prodotti. Questa pianificazione è stata formalizzata attraverso la redazione di una Work Breakdown Structure (WBS) riportata in Fig.6.1, che come già accennato nella parte introduttiva di questo capitolo, non è altro che l'elenco di tutte le attività che compongono un progetto bensì, consente di dividere in modo sistematico e organizzativo il lavoro in macroattività e in attività elementari. Vengono definiti i compiti, i quali si trovano alla fine della scomposizione gerarchica delle singole parti del progetto come: descrizione del lavoro, input attesi e risultati da conseguire. Nel pacchetto management ci sono tutte le attività di controllo, di formazione e di supervisione



del progetto, invece nei pacchetti successivi, si entra più nel dettaglio sull'assegnazione e sulla programmazione dello stato di avanzamento del lavoro.

Mediante un albero gerarchico sono stati elencati i metodi, procedure, materiali, software e servizi finalizzati al conseguimento dell'obiettivo. La WBS deve includere il lavoro definito dal progetto e includere tutto il necessario, interno ed esterno alla realizzazione dello stesso, non deve assolutamente includere, per la regola del 100% principio base della WBS, alcun lavoro al di fuori dai limiti del progetto, in altre parole non può includere più del 100% del lavoro. Tale regola si applica anche al livello di attività, infatti il lavoro rappresentato dalle attività in ciascun pacchetto deve dare, sommato, il 100% del lavoro necessario per completare il pacchetto stesso. Con questo metodo è stato possibile schematizzare al meglio l'attività produttiva.

Nella WBS saranno richiamati Step-by-Step tutte le procedure da percorrere per il raggiungimento dell'obiettivo, dalla fase di progettazione affiancata da numerosi software utilizzati per: la scelta, il dimensionamento, la gestione dei dispositivi in rete, la parametrizzazione, la programmazione e infine i software utilizzati per il sistema vision. Inizieremo la fase di progettazione utilizzando un software chiamato Pro/E il quale è un modellatore 3D, in seguito utilizzeremo PositioningDrives, utilizzato per il dimensionamento e il calcolo dei profili motion di assi elettromeccanici, motori elettrici e controller.

Una volta scelta la componentistica hardware, grazie anche ai programmi appena citati, si passerà dall'assemblaggio meccanico e al cablaggio elettrico. Per una corretta comunicazione tra i dispositivi saranno assegnati, come abbiamo descritto nel capitolo precedente, degli indirizzi IP che permetteranno a tali componenti di appartenere ad una sottorete e questo sarà possibile grazie all'ausilio di programmi responsabili della gestione dei nodi in rete come l'FFT il cui acronimo è Festo Field Device Tool e SBO Device Manager.

Si passerà poi alla parametrizzazione degli azionamenti, motori e assi utilizzando il software FCT, si andranno a testare le singole comunicazioni con la movimentazione dei singoli assi. Si descriverà il programma sviluppato con cui sarà possibile effettuare la procedura di: presa del tappo, avvitatura, svitatura e ripristino della posizione di partenza. Messo a punto il programma e testato il ciclo di funzionamento, si procederà nell'installazione della smart camera, la quale verrà inserita in rete attraverso il software SBO Device Manager e parametrizzata attraverso un programma chiamato CheckOpti. L'acquisizione dell'immagine avverrà via Ethernet e il programma che sarà utilizzato per la visualizzazione in Real-Time sarà il CheckKon.

Come è possibile notare dalla seguente figura, come ultima fase saranno brevemente analizzati gli end-user, bensì i potenziali clienti che potrebbero dimostrarsi interessati a tale applicazione.

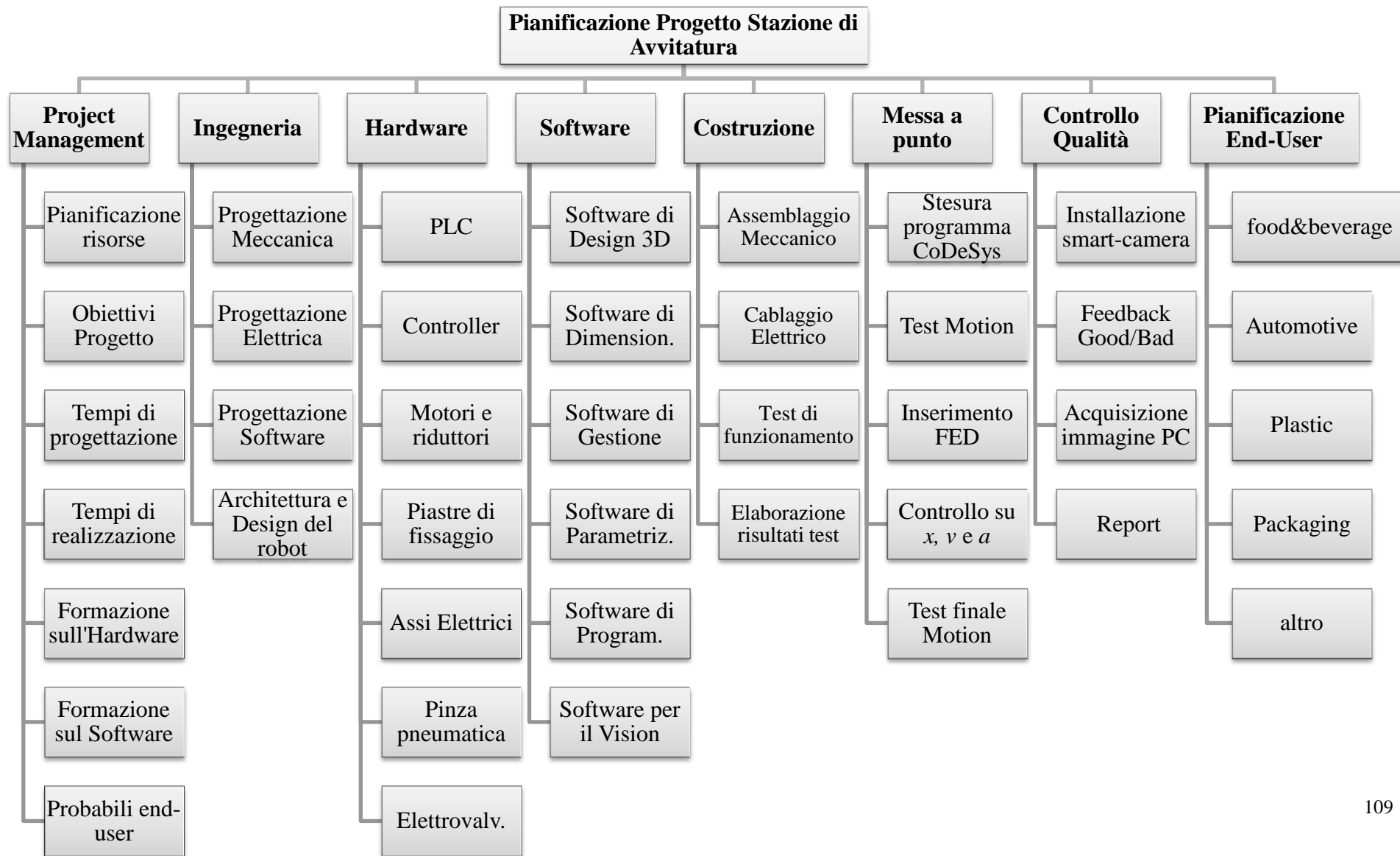


Figura 6. 1: Work Breakdown Structure

6.2 Caratteristiche generali assi elettrici

Nel seguente paragrafo saranno descritti i componenti hardware scelti per la realizzazione del sistema, mentre nei paragrafi successivi verranno spiegate le metodologie utilizzate per la corretta scelta dei componenti.

La stazione di avvitatura come abbiamo spiegato in precedenza, è costituita quasi totalmente da componenti elettrici, solo la parte di presa del tappo è stata pensata pneumatica che è risultata essere anche la parte più impegnativa in termini di progettazione meccanica.

Sono stati inseriti due assi elettrici a portale DGE per il moto orizzontale, gli stessi sono stati tra loro calettati attraverso un giunto chiamato KSK, questo ha permesso di inserire un solo motore e di avere una movimentazione sincrona, il motore utilizzato per la movimentazione è un Brushless taglia 70.

In seguito vi è un asse elettrico a sbalzo DGEA per il moto verticale movimentato da un motore di taglia 70 comprensivo di freno e un asse rotativo ERMB sul quale è montato un motore di taglia 55, che mi ha permesso la rotazione della pinza.

Andiamo a fare una breve classificazione sugli assi elettrici, soffermandoci maggiormente su quelli che effettivamente sono stati impiegati per la realizzazione del sistema in questione, cioè su gli assi elettrici la cui trasmissione è a cinghia (vedi Fig.6.2):



Figura 6. 2: Classificazione assi elettrici a cinghia

Gli assi elettrici a cinghia, come specificato possono essere lineari o rotativi, hanno una forza trasmissibile dipendente dalla larghezza della cinghia, questi permettono il raggiungimento di lunghezze e velocità piuttosto elevate.

La cinghia funziona silenziosamente, ha una buona capacità di smorzamento, una massa ridotta e rendimento elevato, ha un corpo di trazione o in fibra di vetro avvolta o in fune di acciaio zigrinato. I denti sono realizzati in una miscela di poliuretano e gomma, spesso vengono rivestiti con uno strato di nylon per proteggerli dall'usura. Le cinghie dentate sono utilizzate sia in attuatori lineari sia rotativi.

Nella seguente figura, riporto la sezione degli assi prima citati, al fine di comprendere la disposizione della cinghia all'interno del componente.



Figura 6. 3: Trasmissione del moto per mezzo della cinghia dentata

Costruttivamente le parti che compongono la trasmissione del moto attraverso la cinghia sono le seguenti:

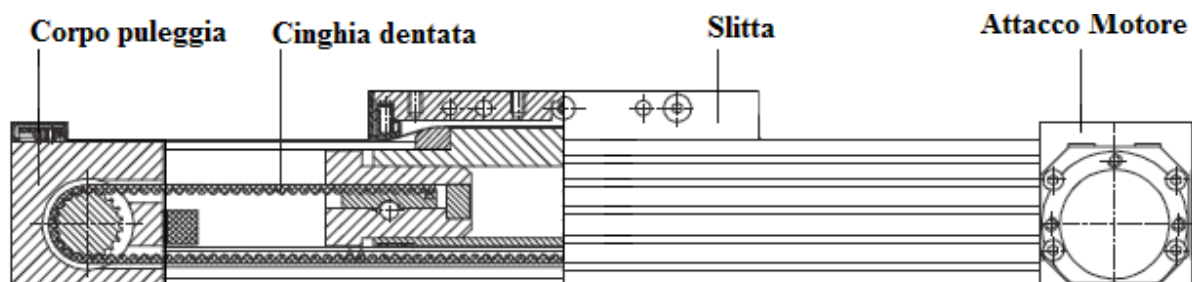


Figura 6. 4: Elementi della trasmissione del moto

La cinghia ha la dentatura su una sola superficie, le forze sono trasmesse in direzione longitudinale e con un corretto tensionamento non è necessario fare manutenzione della cinghia.

6.2.1 Procedura analitica per la scelta di assi e motori elettrici

La stazione di avvitatura stand alone, deve spostare lungo l'asse Z, attraverso un asse elettrico un carico di 5 Kg e 10 Kg lungo l'asse Y. I 5 Kg sono dovuti al peso del blocco di rotazione comprensivo di staffe e 10 Kg sono dovuti dai 5 kg precedenti più il peso dell'asse verticale. Le corse su cui deve essere movimentato sono riportate in Fig.6.5, il tempo ciclo richiesto è di 7 secondi. Si vogliono determinare e dimensionare gli assi e i motori da utilizzare.

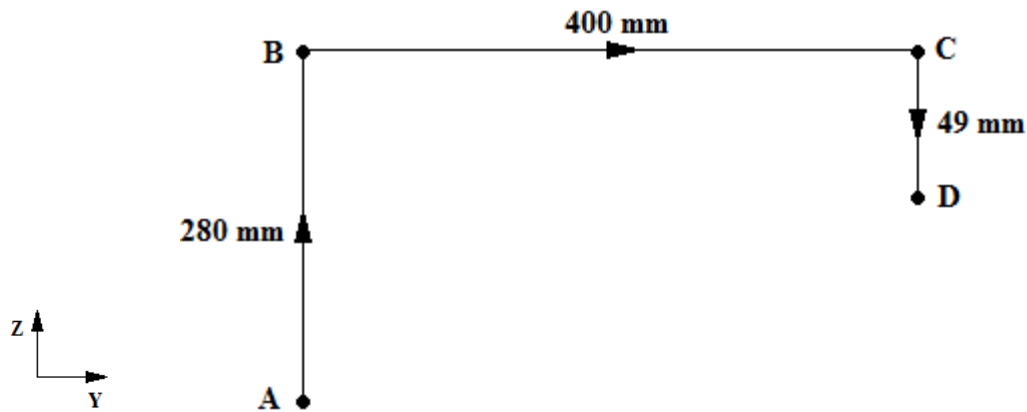


Figura 6. 5: Profilo di movimentazione

Il tempo complessivo richiesto è di 7 sec, ripartito nella fase di avvitatura che deve essere di 5 sec mentre di svitatura 2 sec. La lunghezza complessiva del profilo è:

$$L_T = AB + BC + CD = 729 \text{ mm} \quad (6.2.1.1)$$

La ripartizione dei tempi risulta essere la seguente:

$$T_{AB} = \frac{T}{L_T} \cdot AB = 1,9 \text{ sec} \quad (6.2.1.2)$$

$$T_{BC} = \frac{T}{L_T} \cdot BC = 2,7 \text{ sec} \quad (6.2.1.3)$$

$$T_{CD} = \frac{T}{L_T} \cdot CD = 0,33 \text{ sec} \quad (6.2.1.4)$$

Non andremo a considerare il tempo T_{CD} perché il tratto CD sarà interessato dalla camma elettrica, grazie alla quale potremo compiere l'operazione di avvitatura e svitatura. Nel tratto CD il profilo motion avrà velocità e accelerazioni più contenute.

Adesso andiamo a calcolare la velocità media V_m :

$$\frac{1}{2} V_m \cdot 1,9 + \frac{1}{2} V_m \cdot 2,7 + \frac{1}{2} V_m \cdot 0,33 = 2 \quad (6.2.1.5)$$

$$V_m = 0,4 \text{ [m/s]} \quad (6.2.1.6)$$

Questa risulta essere la velocità media dell'asse Z, la cui accelerazione è:

$$a = \frac{V_m}{0,25} = 1,6 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (6.2.1.7)$$

A tal punto andiamo a calcolare la forza F, che ci permetterà di determinare l'asse:

$$F = m \cdot a = 5 \cdot (9,81 + 1,6) = 78,48 \text{ N} \quad (6.2.1.8)$$



Per l'asse verticale la scelta ricade su un asse a sbalzo con trasmissione a cinghia chiamato DGEA-18-400-ZR-WB-KV, dove nei successivi paragrafi si parlerà più nel dettaglio. Adesso andiamo a valutare la massa di tutto l'asse verticale considerando il peso dell'asse stesso, il peso del rotativo, quello dei kit assiali e quello del distributore rotativo GF.

$$m_{DGEA} = m_{corsa\ 0} + \left(0,35 \frac{kg}{100mm} di\ corsa\right) = 2,8 + 0,35 \cdot 400 = 4,2kg \quad (6.2.1.9)$$

$$m_{rotativo} = m_{ERMB} + m_{GF} + m_{kit\ assiale} \cong 12kg \quad (6.2.1.10)$$

Il passo successivo è quello di andare a scegliere il giusto asse per la movimentazione orizzontale. S'inizia calcolando la velocità considerando il profilo di figura:

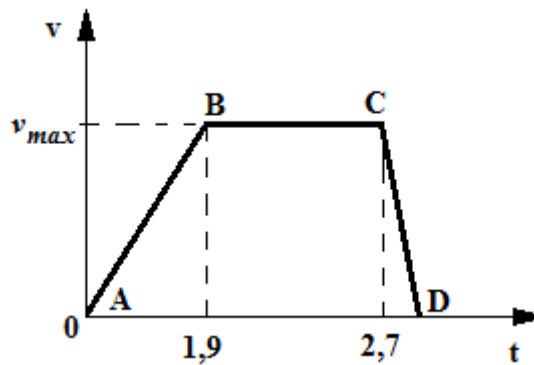


Figura 6. 6: Profilo di velocità trapezoidale

$$v_{max} = \frac{v_m}{t_2 - t_1} = \frac{0,4}{2,7 - 1,9} = 0,5 \text{ [m/s]} \quad (6.2.1.11)$$

$$a = \frac{v_{max}}{t_1} = 0,27 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (6.2.1.12)$$

La forza che andremo a calcolare mi guiderà nella giusta scelta dell'asse Y.

$$F = m \cdot a = 12 \cdot (9,81 + 0,27) = 120,96 \text{ N} \quad (6.2.1.13)$$

Avendo una forza simile che si sviluppa lungo l'asse Y, la scelta ricade su un asse a portale con cinghia dentata DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK, la cui forza sviluppabile lungo l'asse Y è di 150 N, ma andando a considerare altre variabili tra cui l'attrito dinamico, le sollecitazioni dovute alle continue accelerazioni e decelerazioni, si è voluto volontariamente aggiungere un secondo asse in parallelo al primo, per fornire al sistema un'elevata compattezza e rigidità, al fine di spingere al massimo le prestazioni del sistema. Di seguito, sarà fatta una trattazione analitica che ci consente di scegliere i motori opportuni. Nei calcoli sotto riportati, siamo andati a dimensionare il motore adeguato per l'asse orizzontale bensì per l'asse Y.



Tipicamente sulle schede tecniche sono riportati i dati necessari a calcolare il momento di inerzia complessivo.

$$J_t = J_0 [kgcm^2] + J_H \left[\frac{kgcm^2}{m} \right] \cdot c [m] + J_L \left[\frac{kgcm^2}{kg} \right] \cdot m [kg] = \quad (6.2.1.14)$$

$$2,87 + 0,6 \cdot 0,4 + 1,66 \cdot 12 = 2303 \text{ kgmm}^2 = 0,002303 \text{ kgm}^2$$

Con c corsa dell'asse [m] e m massa del carico [Kg]. Adesso andiamo a calcolare $\dot{\omega}$ che mi consentirà di effettuare il calcolo della M_{at} che risulta essere la coppia di accelerazione totale.

$$\dot{\omega} = 2\pi \frac{a \left[\frac{m}{s^2} \right]}{p \left[\frac{m}{rev} \right]} = 111,7 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \quad (6.2.1.15)$$

Nel caso dell'asse a cinghia, p è uguale alla costante di avanzamento e indica sempre i millimetri di avanzamento del carrello corrispondenti a un giro di puleggia.

La coppia di attrito M_F che compare all'interno della coppia complessiva da erogare all'albero è pari 0,072 Nm. Di seguito calcoliamo la coppia totale che tiene in considerazione della coppia di accelerazione totale più la coppia di attrito.

$$M_t = M_{at} + M_F = J_t \cdot \dot{\omega} + M_F = 0,33 \text{ Nm} \quad (6.2.1.16)$$

Il passo successivo è quello di determinare il numero di giri del motore:

$$n = \frac{v_{max} \cdot 60}{p} = 333,3 \text{ RPM} \quad (6.2.1.17)$$

Avendo calcolato velocità e coppia da erogare è possibile selezionare il motore utilizzando le curve di coppia riportate nei dati di catalogo. La coppia totale richiesta deve essere inferiore alla coppia di picco, dalla curva di coppia di seguito riportata seleziono l'EMMS-AS-40-M con coppia nominale pari a 0,22 Nm.

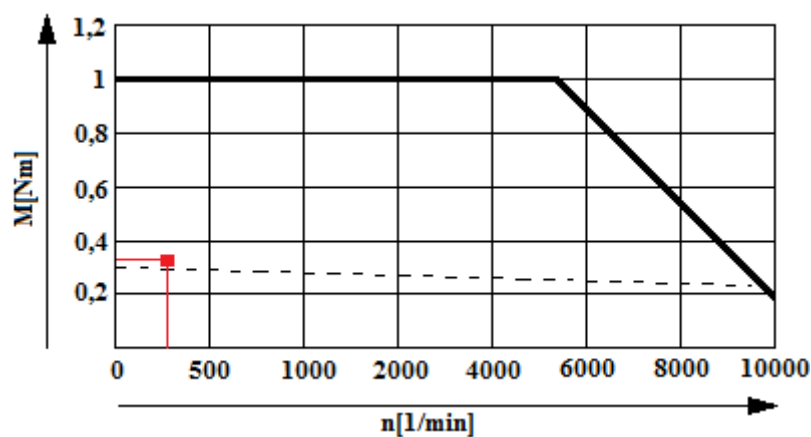


Figura 6. 7: Grafico da catalogo per EMMS-AS-40-M



Un'ulteriore verifica che viene fatta è il rapporto tra le inerzie. Esso è usato per avere un'indicazione sulle prestazioni che avrà il controllo d'anello, se il rapporto ha un valore maggiore di C il controllo sarà poco reattivo e il sistema retrazionato è instabile.

C'è una costante che dipende dall'efficienza del controllo, per i motori Stepper (retroazionati) è tipicamente pari a 10 mentre per i motori Brushless è possibile arrivare fino a 16.

$$C = \frac{23,03+0,045}{0,045} = 512,77 \gg 16 \quad (6.2.1.18)$$

Essendo il rapporto tra le inerzie molto maggiore della condizione limite per i motori Brushless, allora si cerca l'inerzia del motore che consente di sceglierlo:

$$J_M \geq \frac{J_t}{15} = 1,53 \text{ kgcm}^2 \quad (6.2.1.18)$$

Tale valore corrisponde a un motore di taglia 100, ma è stato scelto un motore EMMS-AS-70-S servendomi di un riduttore EMGA-60-P-G3-SAS-55, il cui rapporto di trasmissione è pari a 1:3, così facendo il nuovo rapporto tra le inerzie sarà pari a:

$$C = J_G + \frac{J_0[\text{kgcm}^2] + J_H \left[\frac{\text{kgcm}^2}{m} \right] \cdot c[m] + J_L \left[\frac{\text{kgcm}^2}{\text{kg}} \right] \cdot m[\text{kg}]}{i^2} = 2,69 \ll 16 \quad (6.2.1.19)$$

Dove i è il numero del rapporto di trasmissione.

Come è possibile notare, dopo aver utilizzato il riduttore si è riuscito ad avere un rapporto tra le inerzie accettabile, in base ai limiti convenzionalmente usati. Il nuovo numero di giri del motore, dopo aver introdotto il riduttore è:

$$n' = 333,3 \cdot 3 \cong 1000 \text{ RPM} \quad (6.2.1.20)$$

Ha questa velocità la coppia nominale del motore è ancora maggiore di 0,2 Nm.

E' stato scelto un motore con una taglia maggiore, per tutelare il motore da uno sfruttamento troppo intensivo che potrebbe condurlo a surriscaldamento. Per la scelta del motore che movimentava l'asse verticale e quello riguardante la rotazione, è stato utilizzato un procedimento analogo.

6.2.2 Assi Elettrici a cinghia dentata - Stato dell'arte

Gli azionamenti elettrici a velocità regolabile consentono di variare la velocità di funzionamento dei motori elettrici che storicamente operavano a una sola velocità predeterminata. Essi possono essere impiegati sia come apparati a sé stanti, sia come parte di un sistema di automazione integrato. In molti Paesi l'incremento del livello di automazione nelle industrie è obbligatorio per sopravvivere ed essere competitivi sul mercato globale.



L'automazione industriale implica il controllo delle caratteristiche di moto, quali accelerazione, velocità e posizione, delle macchine dotate di organi in movimento. In tale ambito, l'azionamento elettrico a velocità variabile risulta un componente indispensabile di qualunque tecnologia di automazione sia nel panorama attuale sia secondo le tendenze evolutive del settore. Una delle principali funzioni presenti in un sistema di automazione industriale è sicuramente il controllo del movimento degli assi.

I requisiti cui deve soddisfare l'attuatore impiegato in una moderna applicazione industriale di movimentazione asse sono:

- alto rapporto potenza/peso;
- alte velocità di avanzamento e accelerazioni;
- alta precisione e flessibilità;
- alta affidabilità;
- alto rendimento (perdite contenute);
- possibilità di controllo in remoto;
- compattezza e semplicità di installazione.

Storicamente il tipo di attuatore impiegato era pneumatico ma, nel corso degli anni, si è osservata la progressiva sostituzione a favore dell'utilizzo degli azionamenti elettrici, decretando la nascita e lo sviluppo del cosiddetto "asse elettrico", intendendo con questo termine l'impiego di un azionamento elettrico per la movimentazione lineare o rotativa di sistemi meccanici. Le motivazioni che hanno spinto all'introduzione degli azionamenti elettrici e degli assi elettrici sono legate sostanzialmente al soddisfacimento dei requisiti elencati in precedenza e, in generale, a una maggiore flessibilità e possibilità di integrazione nel sistema di controllo offerte da un attuatore controllato elettricamente rispetto a uno pneumatico. Il dispositivo di controllo e comunicazione permette la regolazione del flusso di potenza dalla sorgente di alimentazione primaria, attraverso il convertitore, verso il motore elettrico in funzione delle richieste del sistema di controllo remoto e delle grandezze elettriche e meccaniche misurate attraverso i sensori e trasduttori.

A tal proposito si vuole ora descrivere più nel dettaglio gli assi elettrici che sono stati effettivamente usati per la realizzazione del robot, la scelta è stata fatta andando a considerare: i calcoli fatti nel paragrafo 6.2.1 e i risultati ottenuti mediante il PositioningDrives che nei prossimi paragrafi vedremo. Nella tabella 15 sono riportate le caratteristiche generali e le quantità utilizzate:

Asse elettrico	Tipologia di asse	Impiego	Quantità
DGEA-18-400-ZR-WB-KV	A Sbalzo	Asse Z	1
DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK	A Portale	Asse Y	2
ERMB-20	Rotativo	Rotazione	1

Tabella 15: Elenco Assi utilizzati

Seguendo l'ordine elencato in tabella, andiamo a considerare il primo asse elettrico, cioè il **DGEA-18-400-ZR-WB-KV** utilizzato per la movimentazione dell'asse verticale, a esso sarà calettato l'intero sistema di rotazione, vedi figura 6.8.



Figura 6. 8: Asse elettrico a sbalzo DGEA-18-400-ZR-WB-KV

Tale asse risulta essere a sbalzo con trasmissione meccanica attraverso cinghia dentata. Di seguito andiamo a giustificare la sigla e a tal proposito è stata inserita la tabella 16, dove sono stati riportati i dati tecnici più significativi.

Taglia	18
Corsa di lavoro	400 mm
ZR	Asse a sbalzo con cinghia dentata
WB	Albero su entrambi i lati
KV	Supporto giunto motore
Forza di spinta F_x max.	230 N
Precisione di ripetizione	$\pm 0,05$ mm
Momento di inerzia di massa J_H per m di corsa	6 kgcm^2
Momento di inerzia di massa J_L per kg di carico	$1,66 \text{ kgcm}^2$
Momento d'inerzia di massa J_O	$2,87 \text{ kgcm}^2$

Tabella 16: Dati tecnici DGEA-18-400-ZR-WB-KV e significato sigle

Per una migliore comprensione che si riferisce all'accoppiamento meccanico asse/motore, è stata inserita la figura 6.9. In essa è presente un Kit assiale campana flangia EAMM-A che rende possibile calettare il motore elettrico all'asse.

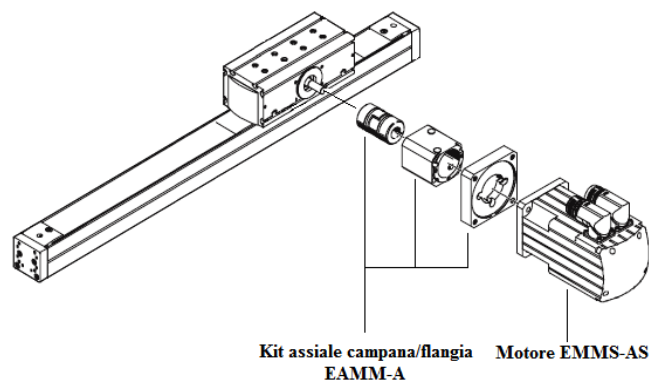


Figura 6. 9: Connessioni meccaniche

Inoltre, come dimostra la procedura analitica (paragrafo 6.2.1) è stato inserito un riduttore il quale mi ha permesso di ridurre il rapporto tra le inerzie e aumentare il numero di giri, così facendo si è potuto usare per l'asse verticale un motore di taglia 70. Per quanto riguarda il riduttore, è stato usato un EMGA-60-P-G3-SAS-70 con rapporto di trasmissione 3:1, questo risulta essere un riduttore di tipo epicicloidale.

Tali riduttori sono costituiti da un sistema di uno o più ingranaggi chiamati satelliti, montati su un organo porta-satelliti chiamato planetario (vedi verde), che ruotano intorno ad un pignone centrale anche detto solare (vedi giallo); il tutto è posto all'interno di una ruota dentata internamente detta corona (vedi rosso). L'asse di rotazione del planetario e del solare coincidono. Il rapporto di trasmissione e la serie di ingranaggi sono usati molto spesso per aumentare la velocità; quanto detto è possibile visionarlo nella seguente figura.

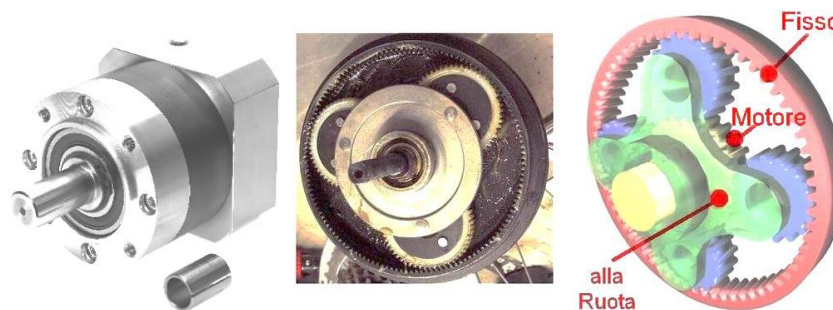


Figura 6. 10: Riduttore epicicloidale EMGA

I riduttori sono stati accoppiati ai motori responsabili della movimentazione dell'asse verticale e orizzontale, mentre non è stato utilizzato alcun riduttore per il motore responsabile della rotazione.

Adesso andiamo a considerare il secondo asse elettrico utilizzato, cioè **DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK** che risulta essere un asse elettrico a portale, esso è stato utilizzato per la movimentazione dell'asse orizzontale, bensì dell'asse Y. La sua scelta è stata fatta considerando la procedura analitica e il software PositioningDrives, vedi figura 6.7.



Figura 6. 11: Asse elettrico a portale DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK

Risulta essere doveroso giustificare la sigla e a tal proposito è stata inserita la tabella 16, dove sono stati riportati i dati tecnici più significativi.

Taglia	25
Corsa di lavoro	400
ZR	Asse lineare a cinghia dentata
RF	Guida a rulli
LB	Albero a sinistra
RK	Nessun albero a destra
GK	Slitta standard
Forza di spinta F_y max.	150N
Precisione di ripetizione	+/-0,1 mm
Momento di inerzia di massa J_H per m di corsa	0,188 kgcm ²
Momento di inerzia di massa J_L per kg di carico	2,052 kgcm ²
Momento d'inerzia di massa J_O	1,75 kgcm ²

Tabella 17: Dati tecnici DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK e significato sigle

Per una migliore comprensione riguardante l'accoppiamento meccanico asse/motore, è stata inserita la Fig.6.12, nel quale vi è un giunto meccanico e un Kit assiale campana flangia EAMM-A. Grazie al giunto e al Kit assiale campana/flangia è stato possibile l'accoppiamento del motore elettrico all'asse. Anche qui è stato inserito un riduttore il quale mi ha permesso di ridurre il rapporto tra le inerzie e aumentare il numero di giri, in tal modo si è potuto usare, per l'asse orizzontale un motore di taglia 70.

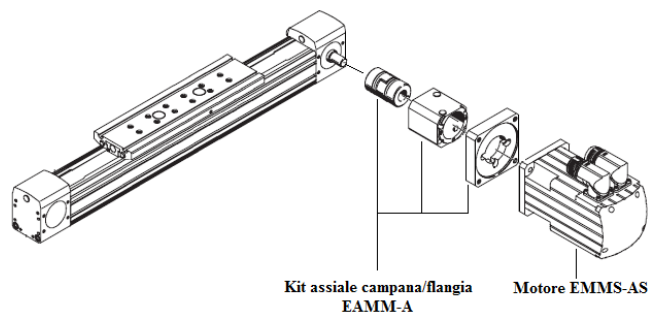


Figura 6. 12: Connessioni meccaniche

Inoltre per aumentare la stabilità del sistema, sbilanciata dal peso dell'asse verticale e dalle notevoli sollecitazioni dovute dalle continue accelerazioni e spostamenti, è stato inserito, come accennato in precedenza, un secondo DGE calettato al primo, attraverso un albero di collegamento ammortizzato, chiamato KSK (Fig.6.13). L'albero di collegamento permette di muovere i due assi in sincronismo.



Figura 6. 13: Albero di collegamento KSK-25-200

E' evidente che la scelta di inserire due assi in parallelo per irrobustire il sistema, non risulta essere l'unica soluzione possibile, ma in alternativa si sarebbe potuto inserire un DGE con una taglia superiore. La scelta dei due assi è stata fatto in base alla disponibilità di magazzino.

Infine l'ultimo asse che andremo a descrivere è l'asse elettrico rotativo **ERMB-20** (Fig. 6.14), il quale è stato utilizzato per effettuare la rotazione della pinza è quindi l'avvitatura. Il modulo rotativo ERMB consente la regolazione di angoli di rotazione illimitati e flessibili, la forza del motore è trasmessa alla flangia, per mezzo di una cinghia dentata con un determinato rapporto di trasmissione. I vantaggi che si hanno, sono quelli concernenti un supporto stabile dell'albero di trasmissione e alla sua forma compatta.



Figura 6. 14: Asse elettrico rotativo ERMB-20

Nella tabella 18 sono riportati i dati tecnici più significativi.

Taglia	20
Max. coppia motrice	0,7 Nm
Numero di giri max., ingresso	1350 1/min
Angolo di rotazione	Infinito

Tabella 18: Dati tecnici ERMB-20

Per una migliore comprensione riguardante l'accoppiamento meccanico asse/motore, è stata inserita la Fig.6.15, nel quale vi è un giunto meccanico e un Kit assiale campana flangia EAMM-A. Grazie al giunto e al Kit assiale campana/flangia è stato possibile l'accoppiamento del motore elettrico all'asse. Sull'ERMB, attraverso una piastra di adattamento è stato possibile agganciare la pinza pneumatica responsabile della presa del tappo, Fig. 6.15.

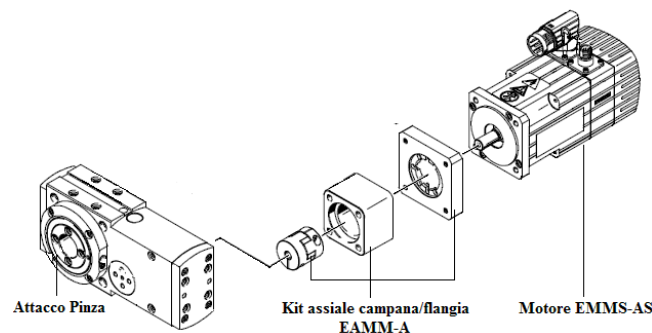


Figura 6. 15: Connessioni meccaniche



6.2.3 Motori Brushless – Stato dell’arte

Elemento essenziale di un azionamento elettrico è il motore elettrico, che a seconda delle caratteristiche del tipo di moto impresso al sistema azionato può essere a moto continuo (rotante o lineare) o incrementale (rotante o lineare). Gli azionamenti elettrici attualmente impiegati nell’ambito dei sistemi di automazione industriale utilizzano motori di tipo in corrente continua, asincroni e sincroni a magneti permanenti (di tipo brushless) e, per basse potenze, motori stepper o comunemente chiamati passo-passo.

Gli azionamenti in corrente alternata (sia con motori asincroni sia sincroni) a velocità variabile, stanno trovando un forte consenso in virtù delle peculiarità specifiche. Il motore sincrono a magneti permanenti di tipo brushless, si può dire che rappresenti l’unica vera “innovazione” della seconda metà del XX secolo. Non presenta limiti teorici di potenza (se non di convenienza economica) ed è possibile un miglioramento delle caratteristiche laddove si abbia uno sviluppo sui magneti permanenti. È pertanto prevedibile che questo tipo di prodotto avrà uno sviluppo equilibrato ma costante nei servoazionamenti, specialmente nelle applicazioni di movimentazione assi, mentre non è pensabile una concorrenza diretta verso gli asincroni a breve periodo, essenzialmente per questioni di costo delle materie prime (magneti).

Nuove tipologie di motori stanno facendo il loro ingresso nelle applicazioni industriali: in letteratura si contano numerosi articoli, conferenze, relazioni, e diversi brevetti sui motori a riluttanza, di tipo sincrono o a riluttanza commutata. Non si può certo dire che questi motori siano applicati in modo diffuso, nonostante ciascuno di essi possa vantare caratteristiche interessanti quali, ad esempio la predisposizione a essere controllati in modo relativamente facile mediante tecniche di tipo sensorless. Infatti, le possibilità di sviluppo commerciale sono molto legate ai progressi ottenibili a livello di algoritmi di controllo.

Un aspetto interessante degno di citazione è lo sviluppo delle applicazioni che fanno uso di motori lineari, specialmente se di tipo sincrono a magneti permanenti. Nel caso si utilizzino motori rotanti è necessaria, infatti, una trasmissione con vite senza fine, con pignone/cremagliera e con cinghia dentata, per adattare le caratteristiche del moto a quelle dell’asse da movimentare, condizionando inevitabilmente le caratteristiche dinamiche e di precisione del sistema di movimentazione, e il costo e la complessità meccanica.

In tal senso i motori di tipo lineare possono perciò rappresentare una valida scelta alle tradizionali macchine elettriche rotanti, soprattutto nel settore dell’automazione industriale. I fattori che ne hanno limitato fino ad oggi la diffusione commerciale sono legati sostanzialmente a:

- una forte necessità di integrazione meccanica con la macchina azionata, il che implica un progetto specifico per le nuove macchine e una riprogettazione per quelle esistenti;
- il motore lineare è adatto solo a un funzionamento con moto a senso alternato e implica la presenza di un controllo di posizione;
- la mancanza di un’unificazione dimensionale, come è norma per i motori rotanti.

Lo studio finalizzato alla progettazione e all'impiego degli azionamenti con motori sincroni lineari nelle applicazioni industriali rappresenta quindi un'attività a forte contenuto di innovazione, direzione nella quale si stanno attualmente muovendo i principali costruttori di motori elettrici e le aziende utilizzatrici.

Negli ultimi anni, infine, si sono fortemente sviluppate le metodologie di progettazione ottimizzata al computer. Attraverso programmi di simulazione specifici sono possibili l'analisi elettromagnetica, meccanica e termica e l'ottimizzazione delle prestazioni del motore preliminarmente alla realizzazione sperimentale del prototipo, infatti il simulatore che è stato utilizzato risulta essere il PositioningDrives, software di cui si parlerà più avanti.

Nella seguente tabella riporto i motori che sono stati utilizzati per le varie movimentazioni, scelti utilizzando sia la procedura analitica riportata al paragrafo 6.2.1 e sia il software di simulazione sopra citato.

Motore elettrico	Tipologia di motore	Impiego	Quantità
EMMS-AS-70-S-LS-RMB	Brushless	Asse Z	1
EMMS-AS-70-S-LS-RMB	Brushless	Asse Y	1
EMMS-AS-55-M-LS-TMB	Brushless	Rotazione	1

Tabella 19: Motori utilizzati

Come è possibile notare il motore Brushless di taglia 70 è stato utilizzato sia per l'asse Z che per l'asse Y (Fig.6.16).



Figura 6. 16: EMMS-AS-70-S-LS-RMB

Risulta essere doveroso giustificare la sigla e a tal proposito è stata inserita la tabella 20, dove sono stati riportati i dati tecnici più significativi e i rispettivi significati delle sigle.



Taglia	70
Momento d'inerzia di massa	0,449 kgcm ²
Coppia nominale	1,43 Nm
Numero di giri nominale	5300 1/min
Corrente nominale	2,2
S	Dimensione Corta
LS	Bassa tensione standard
R	Connettore angolare
M	Encoder Assoluto Multi turn
B	Freno

Tabella 20: Dati tecnici EMMS-AS-70-S-LS-RMB e significato sigle

Oltre a questo motore, per il blocco rotativo è stato usato un motore di taglia 55, il quale è stato montato mediante un kit assiale sull'asse rotativo ERMB-20. Questo motore è il vero responsabile della rotazione della pinza pneumatica. Di seguito si veda la Fig.6.17, nella quale è stato riportato il motore brushless montato nella stazione di avvittatura.



Figura 6. 17: EMMS-AS-55-M-LS-TMB

Risulta essere doveroso giustificare la sigla e a tal proposito è stata inserita la tabella 20, dove sono stati riportati i dati tecnici più significativi e i rispettivi significati delle sigle.

Taglia	70
Momento d'inerzia di massa	0,245 kgcm ²
Coppia nominale	0,68 Nm
Numero di giri nominale	6600 1/min
Corrente nominale	2,2
M	Dimensione Media
LS	Bassa tensione standard
T	Cassetta di distribuzione
M	Encoder Assoluto Multi turn
B	Freno

Tabella 21 Dati tecnici EMMS-AS-55-M-LS-TMB e significato sigle



6.2.4 Cenno sull'Encoder Assoluto Multi-turn

L'encoder assoluto multi-turn presente all'interno dei motori brushless EMMS-AS, utilizzati per la movimentazione degli assi della stazione di avvitatura, presentano il vantaggio di non perdere la posizione reale in mancanza di alimentazione, ad ogni accensione del sistema la posizione risulta quindi immediatamente disponibile. In tali dispositivi, i segnali elettrici d'uscita codificano l'esatta posizione istantanea del rotore rispetto al corpo; così, in qualsiasi momento, un adeguato circuito di decodifica può decodificare e visualizzare la posizione angolare dell'asse in esame. I dati riguardanti lo spostamento dell'asse, cioè direzione, velocità e accelerazione sono derivati dall'elaborazione della sua posizione assoluta nel tempo.

Mediante tale dispositivo è possibile effettuare la ricerca del riferimento o tecnicamente chiamato "homing". Quest'ultima è un'operazione per cui il circuito di controllo muove l'asse, in modo tale da leggere un segnale di riferimento che individua la posizione da considerarsi come lo "zero" dell'asse. Su questo punto vengono azzerati i contatori e da quel momento, la posizione del rotore sarà nota per il costante aggiornamento dello spostamento rispetto a questo "zero".

In questi encoder sono presenti dei sensori ottici (fotoresistenze o fotodiodi) che leggono una matrice di aree trasparenti e opache, stampate sul rotore. La matrice che se ne ricava è realizzata con un'alternanza di aree tali da codificare un settore di rotore pari alla sua risoluzione angolare.

Questi trasduttori, per la loro vastissima gamma di modelli, sono validamente applicati in svariate aree di competenza, tra cui: controlli di processo industriale, macchine utensili, strumenti di misura e come nel caso del progetto preso in esame in questo elaborato, di robot industriali.

6.3 Simulatore PositioningDrives

Negli ultimi anni si sono fortemente sviluppate le metodologie di progettazione ottimizzata al calcolatore, dove attraverso programmi di simulazione specifici è possibile l'analisi elettromagnetica, meccanica e termica nonché l'ottimizzazione delle prestazioni del motore preliminarmente alla realizzazione sperimentale del prototipo.

Ultimata la procedura analitica per la determinazione degli assi e dei motori elettrici, riportata al paragrafo 6.2.1, è stata fatta una verifica incrociata con il simulatore dimensionale PositioningDrives. Questo software permette di determinare in base a pochi dati iniziali, il profilo di velocità, accelerazioni, comportamenti termici e redige a fine elaborazione dati, una lista di componenti che potrebbero soddisfare il profilo motion. Nella lista sono presenti assi elettrici, azionamenti e motori, compatibili e idonei per il raggiungimento dell'obiettivo.

Di seguito non riporterò le schermate del programma, ma i report ottenuti, relativi all'asse Z, all'asse Y e al modulo rotativo.






6.3.1 Report PositioningDrives Asse Z

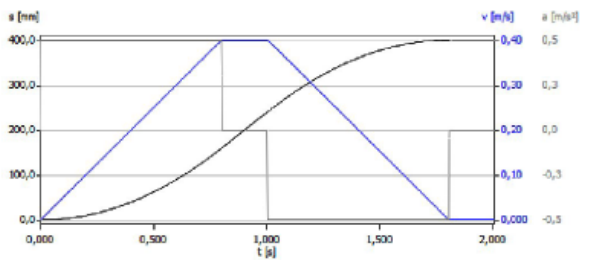
FESTO									
Positioning Motion Profiles									
Mode	Stroke	Moving mass	Travel time	Speed	Stoke_v	Time_v	Acceleration	Deceleration	Dwell time
[A,R]	[mm]	[kg]	[s]	[m/s]	[mm]	[s]	[m/s ²]	[m/s ²]	[s]
A	400	5	1,800	0,400	79,63	0,199	0,500	0,500	0,200

Tabella 22: Motion Profiles PositiongDrives

Positioning Solution proposal for positioning drives

		
<u>Axis:</u> DGEA-18-ZR-WV	<u>Motor:</u> EMMS-AS-70-S-LS-RxB <u>Gear</u> 3:1 (EMGA-60-P-G3-SAS-70)	<u>Controller:</u> CMMP-AS-C5-3A-Mx <u>Supply voltage</u> User defined 230 VAC (Single-phase)

Technical data		Load calculated from:		
Axis technology	Tooth belt		Required	Possible
Guide	Ball bearing	Effective stroke	400 mm	800 mm
Motor type	Servo AC			
Maximum ambient air temperature	25 °C	Repetition accuracy	0,5 mm	0,05 mm
Assembly position, Axis	Vertical 270 °	Maximum moving mass	5 kg	23 kg
		Additional external force	0,0 N	

<p>This solution offers you the following</p> <p>Travel time 1,800 s Cycle time 2,000 s Dwell time 0,200 s Duty ratio 90 % Load Axis 40 % Load Motor 2 % Load Guide 6 %</p> <p>Dimensioning of the guide was done with the following basic data:</p> <p>Assembly position, Axis Vertical 270 °</p> <p style="text-align: center;">Moving mass</p> <p>Distance of load X 10 mm Distance of load Y 50 mm Distance of load Z 10 mm</p>	<p>Motion profile see diagram (Detailed motion profile, Complete)</p>  <p style="text-align: right;">Diagram with: Controller Supply voltage = 230 VAC (Single-phase) User defined</p>
---	---

Assicurarsi che i seguenti valori dinamici del dimensionamento si riferiscono e non superino i valori limite delle apparecchiature.



**Positioning
Part List**



	Part List	Amount	Order Code	Item name	Stroke in addition
1	195611	1	DGEA-18-400-ZR-WV	Cantilever axis	2 * 81,0 mm
2	552190	1	EMGA-60-P-G3-SAS-55	Gear	
3	550957	1	EAMM-A-F28-60G	Axial kit	
4	Options	1	EMMS-AS-70-S-LS-RMB	Servo motor AC	
5	Options	1	CMMP-AS-C5-3A-M0	Controller	

Tabella 23: Part List Axis Z

**Positioning
Results Diagrams
Detailed motion profile, Complete**

Total			
Travel time	Cycle time	Dwell time	Duty ratio
1,800 s	2,000 s	0,200 s	90%
Maximum			
Speed	Acceleration	Deceleration	
0,400 m/s	0,500 m/s ²	0,500 m/s ²	

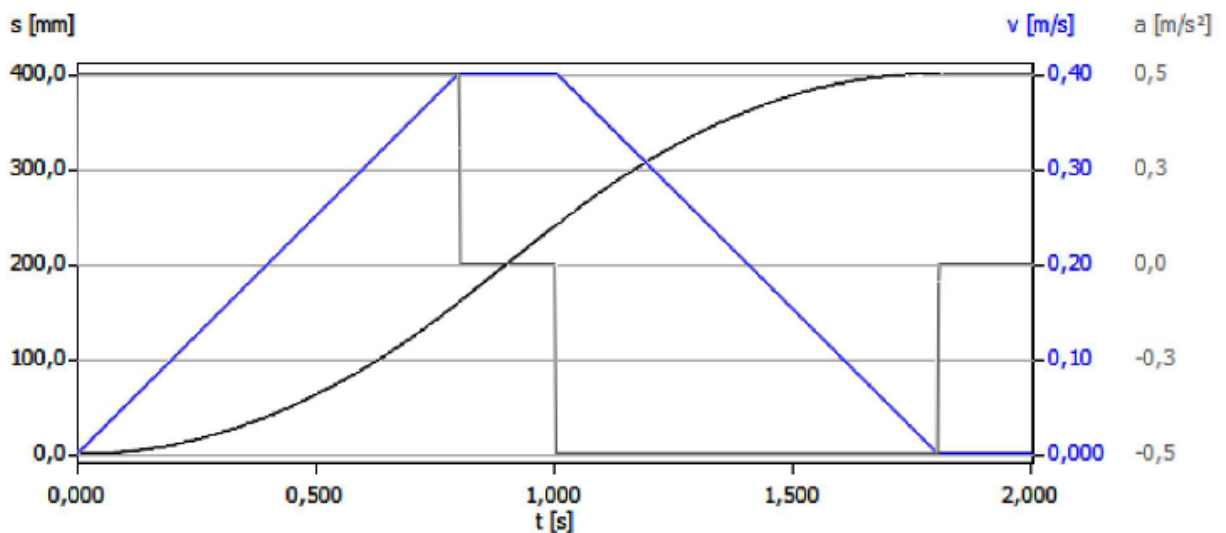


Figura 6. 18: Diagramma Motion Profile Asse Z



Positioning

FESTO

Dynamic data

Axis (with Controller Supply voltage = 230 VAC (Single-phase)

Type	DGEA-18-400-ZR-WV
Calculated maximum speed	0,400 m/s
Calculated maximum acceleration	0,500 m/s ²
Required usable force	81,4 N
Peak torque Pinion	0,62 Nm
Maximum pinion revolution	296 rpm
Maximum jerk	4920 m/s ³
Displacement during emergency stop	2,748 mm

Motor

Type	EMMS-AS-70-S-LS-RxB
Maximum motor revolution	889 rpm
Acceleration torque	0,09 Nm
External torque plus Friction	0,07 Nm
Root mean square of torque	0,07 Nm
Calculated maximum power	8,5 W
Root mean square of power	6,2 W
Calculated maximum current	0,1 A
Root mean square of current	0,1 A
Current for emergency stop	2,1 A

Mass moment of inertia

Translatory	13,126 kgcm ²
Rotatory	0,439 kgcm ²
External moment of inertia with respect to motor1	642 kgcm ²
Moment of inertia ratio	4,666

**Positioning****FESTO****Product data**

Axis	DGEA-18-400-ZR-WV
Effective stroke	800 mm
Repetition accuracy	0,05 mm
Maximum moving mass	23 kg
Usable force	195,0 N
Maximum acceleration	50,000 m/s ²
Maximum speed	3,000 m/s
Motor	EMMS-AS-70-S-LS-RxB
Rated speed (Voltage = 360 V)	5300 rpm
Rated torque	1,43 Nm
Rated current	2,2 A
Peak torque	3,10 Nm
Peak current	5,0 A
Mass moment of inertia	0,448 kgcm ²
Controller	CMMP-AS-C5-3A-Mx
Supply voltage	
Logic section	24 V DC
Power section	230 V AC
Intermediate circuit voltage	380 V DC
Rated current	5,0 A
Peak current	10,0 A
Braking resistance, integrated	60 Ohm / 20,0 W
Gear	EMGA-60-P-G3-SAS-70
Gear transmission ratio	3:1
Efficiency factor	96 %
Mass moment of inertia	0,135 kgcm ²



6.3.2 Report PositioningDrives Asse Y

Positioning Motion Profiles

Mode	Stroke	Moving mass	Travel time	Speed	Stoke_v	Time_v	Acceleration	Deceleration	Dwell time
[A,R]	[mm]	[kg]	[s]	[m/s]	[mm]	[s]	[m/s ²]	[m/s ²]	[s]
A	400	10	1,300	0,500	149,55	0,299	1,000	1,000	0,200
R	0	10	1.300	0.500	149,55	0,299	1,000	1,000	0,200

Tabella 24: Motion Profiles PositioningDrives Asse Y

Positioning Solution proposal for positioning drives

Axis:
DGE-25-ZR-RF-GK
Axial kit: EAMM-A-F28-60G

Motor:
EMMS-AS-70-S-LS-RxB
Gear:
3:1 (EMGA-60-P-G3-SAS-70)

Controller:
CMMP-AS-C5-3A-Mx
Power section
230 VAC (Single-phase)

Technical data		Load calculated from:		
Axis technology	Tooth belt	Effective stroke	Required	Possible
Guide	Roller	Repetition accuracy	400 mm	5000 mm
Motor type	Servo AC	Maximum moving mass	0,5 mm	0,1 mm
Maximum ambient air temperature	25 °C	Additional external force	10 kg	0,0 N
Assembly position, Axis	Horizontal 0 °			

This solution offers you the following performance

- Travel time 2,600 s
- Cycle time 3,000 s
- Dwell time 0,400 s
- Duty ratio 87 %
- Load Axis 1 %
- Load Motor 49 %
- Load Guide 90 %

Dimensioning of the guide was done with the following basic data:

- Assembly position, Axis Horizontal 0 °
- Assembly position, Guide Sideways

Moving mass

- Distance of load X 10 mm
- Distance of load Y -100 mm
- Distance of load Z 50 mm

Motion profile see diagram (Detailed motion profile, Complete)

Diagram with: Controller Supply voltage = 230 VAC (Single-phase)



Positioning

FESTO

Part List

	Part List	Amount	Order Code	Item name	Stroke in addition
1	534392	1	DGE-40-400-ZR-RF-GK	Linear drive	2 * 100,0 mm
2	552190	1	EMGA-60-P-G3-SAS-70	Gear	
3	550957	1	EAMM-A-F28-60G	Axial kit	
4	Options	1	EMMS-AS-70-S-LS-RMB	Servo motor AC	
5	Options	1	CMMP-AS-C5-3A-M3	Controller	

Tabella 25: Part List Axis Y

Positioning

Results Diagrams

Detailed motion profile, Complete

Total

Travel time	Cycle time	Dwell time	Duty ratio
2,600 s	3,000 s	0,400 s	87%

Maximum

Speed	Acceleration	Deceleration
0,500 m/s	1,000 m/s ²	1,000 m/s ²

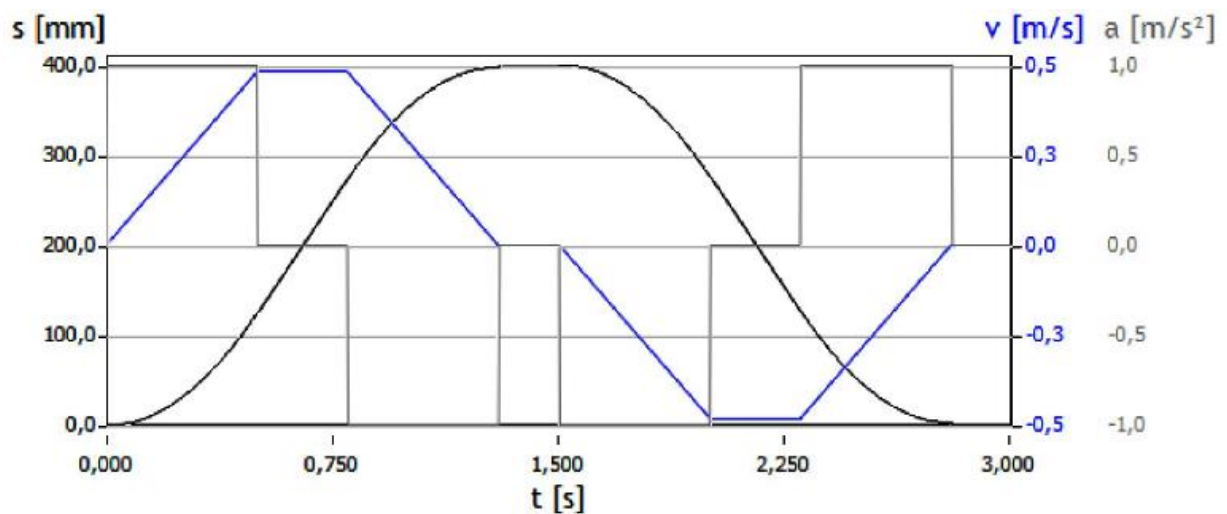


Figura 6. 19: Diagramma Motion Profile Asse Y



Positioning



Results Diagrams

Motion Profile N.1

Total			
Travel time	Cycle time	Dwell time	Duty ratio
1,300 s	1,500 s	0,200 s	87%
Maximum			
Speed	Acceleration	Deceleration	
0,500 m/s	1,000 m/s ²	1,000 m/s ²	

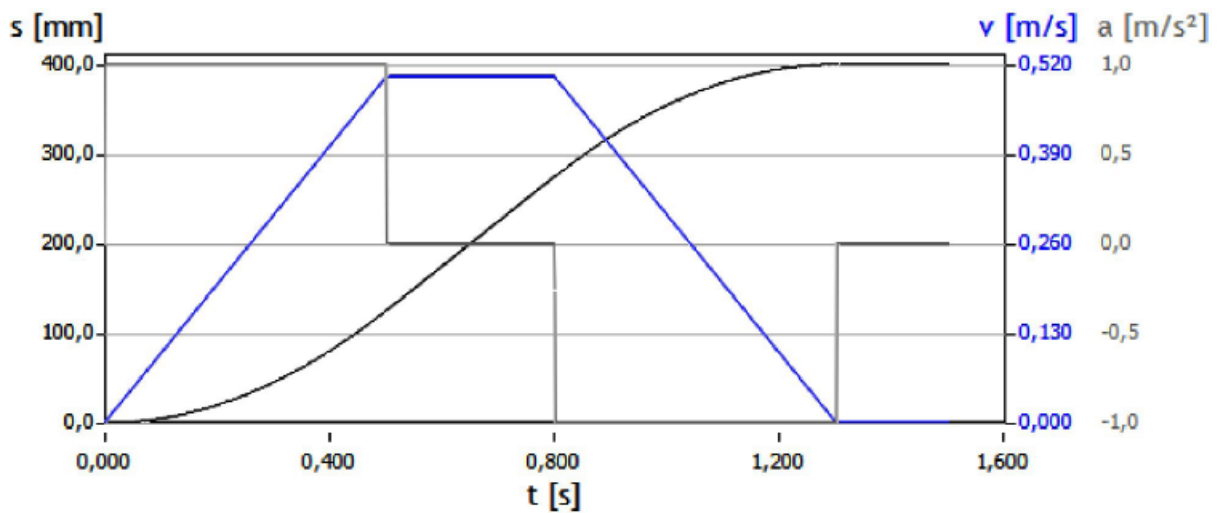


Figura 6. 20: Diagramma Motion Profile Andata

Motion Profile N.2

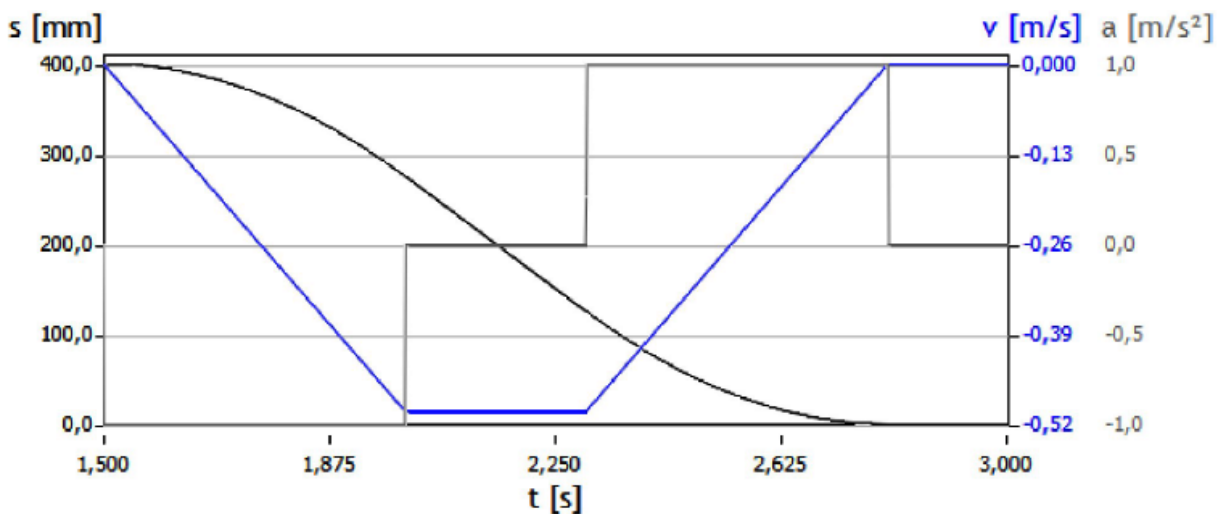


Figura 6. 21: Diagramma Motion Profile N.2


FESTO
Positioning
Dynamic data
Axis (with Controller Supply voltage = 230 VAC (Single-phase)

Type	DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK
Calculated maximum speed	0,500 m/s
Calculated maximum acceleration	1,000 m/s ²
Required usable force	12,0 N
Peak torque Pinion	1,28 Nm
Maximum pinion revolution	240 rpm
Maximum jerk	4840 m/s ³
Displacement during emergency stop	3,102 mm

Motor

Type	EMMS-AS-70-S-LS-RxB
Maximum motor revolution	889 rpm
Acceleration torque	0,09 Nm
External torque plus Friction	0,07 Nm
Root mean square of torque	0,07 Nm
Calculated maximum power	8,5 W
Root mean square of power	6,2 W
Calculated maximum current	0,1 A
Root mean square of current	0,1 A
Current for emergency stop	2,1 A

Mass moment of inertia

Translatory	48,299 kgcm ²
Rotatory	1,729 kgcm ²
External moment of inertia with respect to motor1	6,329 kgcm ²
Moment of inertia ratio	17,698


FESTO
**Positioning
Product data**
Axis DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK

Effective stroke	5000 mm
Repetition accuracy	0,1 mm
Maximum moving mass	50 kg
Usable force	565,0 N
Maximum acceleration	50,000 m/s ²
Maximum speed	10,000 m/s
Mass moment of inertia	8,718 kgcm ²

Pinion

Maximum torque	12,10 Nm
Mass moment of inertia	1,306 kgcm ²
Feed constant	125 mm

Motor
EMMS-AS-70-S-LS-RxB

Rated speed (Voltage = 360 V)	5300 rpm
Rated torque	1,43 Nm
Rated current	2,2 A
Peak torque	3,10 Nm
Peak current	5,0 A
Mass moment of inertia	0,448 kgcm ²

Controller
CMMP-AS-C5-3A-Mx

Logic section	24 V DC
Power section	230 V AC
Intermediate circuit voltage	380 V DC
Rated current	5,0 A
Peak current	10,0 A
Braking resistance, integrated	60 Ohm / 20,0 W

Gear
EMGA-60-P-G3-SAS-70

Gear transmission ratio	3:1
Efficiency factor	96 %
Mass moment of inertia	0,135 kgcm ²



6.3.3 Report Positioning Drives Modulo Rotativo

Positioning Motion Profiles



Mod	Rotation Angle	Mass mom. inertia	Torque	Travel time	Revolution	Angle_n	Time_v	Acceleration	Deceleration	Dwell time
[A]	[°]	[kgcm ²]	[Nm]	[s]	[rpm]	[°]	[s]	[rpm/s]	[rpm/s]	[s]
A	720	1,8	-0,5	2	83	445	0,9	150	150	0,2

Tabella 26: Motion Profiles Positioning Drives Modulo Rotativo

Positioning Solution proposal for positioning drives



Axis:
ERMB-20
4,5:1



Motor:
EMMS-AS-55-M-LS-xx



Controller:
CMMP-AS-C5-3A-Mx
Supply voltage User defined
230 VAC (Single-phase)

Technical data		Load calculated from:	
Axis technology	Tooth belt	Required	Possible
Motor type	Servo AC		
Maximum ambient air temperature	25 °C		
	Mass moment of inertia	1,800 kgcm ²	128,756 kgcm ²
	External torque	0,50 Nm	4,15 Nm

This solution offers you the following

- Travel time: 2,000 s
- Cycle time: 2,200 s
- Dwell time: 0,200 s
- Duty ratio: 91 %
- Load Motor: 17 %

Motion profile see diagram (Detailed motion profile, Complete)

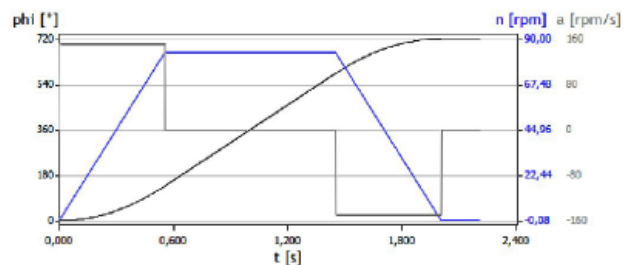


Diagram with: Controller Supply voltage = 230 VAC (Single-phase) User defined



**Positioning
Part List**



	Part List	Amount	Order Code	Item name
1	552706	1	ERMB-20	Rotary module
2	550979	1	EAMM-A-D32-55A	Axial kit
3	Options	1	EMMS-AS-55-M-LS-xx	Servo motor AC
4	Options	1	CMMP-AS-C5-3A	Controller

Tabella 27: Part List Axis Modulo Rotativo

**Positioning
Results Diagrams**

Detailed motion profile, Complete

Total			
Travel time	Cycle time	Dwell time	Duty ratio
2,000 s	2,200 s	0,200 s	91%
Maximum			
Speed	Acceleration	Deceleration	
83 rpm	150 rpm/s	150 rpm/s	

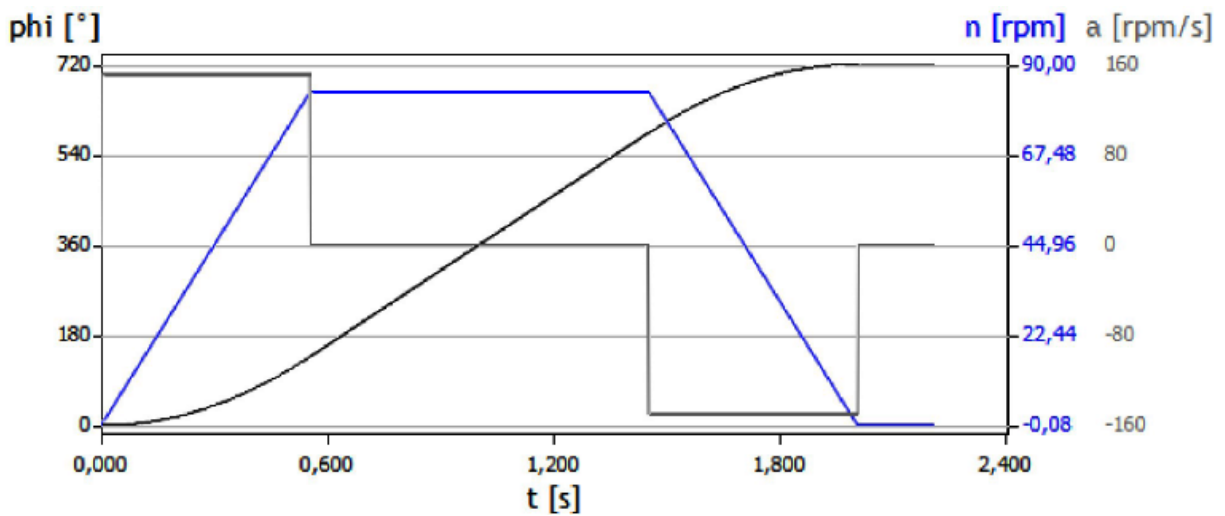


Figura 6. 22: Diagramma Motion Profile Modulo Rotativo


FESTO
Positioning
Dynamic data
Rotary module,
Controller Supply voltage = 230 VAC (Single-phase) User defined

Type	ERMB-20
Maximum revolution	83 rpm
Calculated maximum acceleration	150 rpm/s
Required maximum torque	0,62 Nm
Maximum pinion revolution	373 rpm
Maximum jerk	954930 rpm/s ²
Displacement during emergency stop	0,69 °

Motor

Type	EMMS-AS-55-M-LS-xx
Maximum motor revolution	373 rpm
Acceleration torque	0,19 Nm
External torque plus Friction	0,18 Nm
Root mean square of torque	0,18 Nm
Calculated maximum power	3,5 W
Root mean square of power	3,2 W
Calculated maximum current	0,3 A
Root mean square of current	0,3 A
Current for emergency stop	0,7 A

Mass moment of inertia

Rotatory	1,859 kgcm ²
External moment of inertia with respect to motor	0,142 kgcm ²
Moment of inertia ratio	1,636



Positioning Product data

FESTO

Rotary module ERMB-20

Torque 0,67 Nm
(Total Mass moment of inertia Selected drive = 7,554 kgcm²)

Maximum acceleration 297088 rpm/s
Maximum revolution 300 rpm

Motor **EMMS-AS-55-M-LS-xx**

Rated speed (Voltage = 360 V) 6600 rpm
Rated torque 0,67 Nm
Rated current 1,2 A
Peak torque 2,70 Nm
Peak current 5,0 A
Mass moment of inertia 0,223 kgcm²

Controller **CMMP-AS-C5-3A-Mx**

Supply voltage
Logic section 24 V DC
Power section 230 V AC

Intermediate circuit voltage 380 V DC
Rated current 2,5 A
Peak current 5,0 A
Braking resistance, integrated 60 Ohm / 10,0 W

6.4 Simulatore Pinza pneumatica a tre griffe

Nel paragrafo 4.3 sono riportate le caratteristiche generali, i dati tecnici riferite alla pinza scelta e la procedura analitica utilizzata per il calcolo della presa del tappo.

Per avere una maggiore sicurezza che la pinza scelta sia quella corretta, si è preferito fare una verifica incrociata con un simulatore che consente di trascurare meno variabili in gioco. Tale simulatore permette di inserire in modo preciso, i dati riferiti al pezzo da trasportare andando a calcolare la massa del pezzo considerando il suo peso specifico, consentono di specificare la lunghezza della corsa complessiva richiesta, quindi la corsa delle due dita insieme. Inoltre sono richiesti dati riferiti al singolo dito di presa (Fig.6.23).

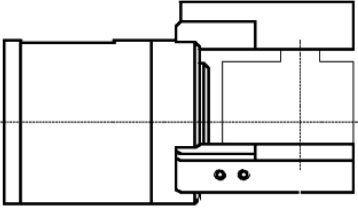
Applicazione		Dati del pezzo	
		Distanza del baricentro -> piano 0:	20 mm
		Massa del pezzo:	9.5 g
		Corsa richiesta:	3 mm
		Indicazioni relative ad un singolo dito di presa	
		Massa dell'utensile sulla pinza:	8.1 g
		Distanza del baricentro -> piano 0:	20 mm
		Distanza Punto di serraggio -> piano 0:	20 mm

Figura 6. 23: Dati del pezzo e dell'utensile

Impostati i valori precedenti, si passa a un ulteriore schermata (Fig.6.24) dove è possibile impostare accelerazioni cui è soggetto il pezzo, posizione della pinza, direzione di avanzamento, pressione di lavoro e calcolo del coefficiente di attrito valutato tra metallo e plastica.

Posizionamento		Indicazioni relative al movimento	
		Accelerazione in:	Direzione z
		Massima accelerazione lineare:	0.5 m/s ²
		Posizionamento	
		Posizione della pinza:	verticale
		Direzione di presa:	in chiusura
		Presa con accoppiamento meccanico o geometrico:	Accoppiamento mecca
		Varie	
		Pressione di lavoro:	6 bar
		Coefficiente di attrito:	0.5
		Fattore di sicurezza:	2
		Temperatura:	20 °C

Figura 6. 24: Ulteriori impostazioni Pinza



A tal punto, impostati i valori precedenti vi è l'ultima schermata (Fig.6.25) dove viene fornito il grado di utilizzo della pinza in percentuale, vengono forniti i risultati relativi a forze, distanze, momenti sviluppabili sui tre assi di lavoro e massime sollecitazioni possibili.

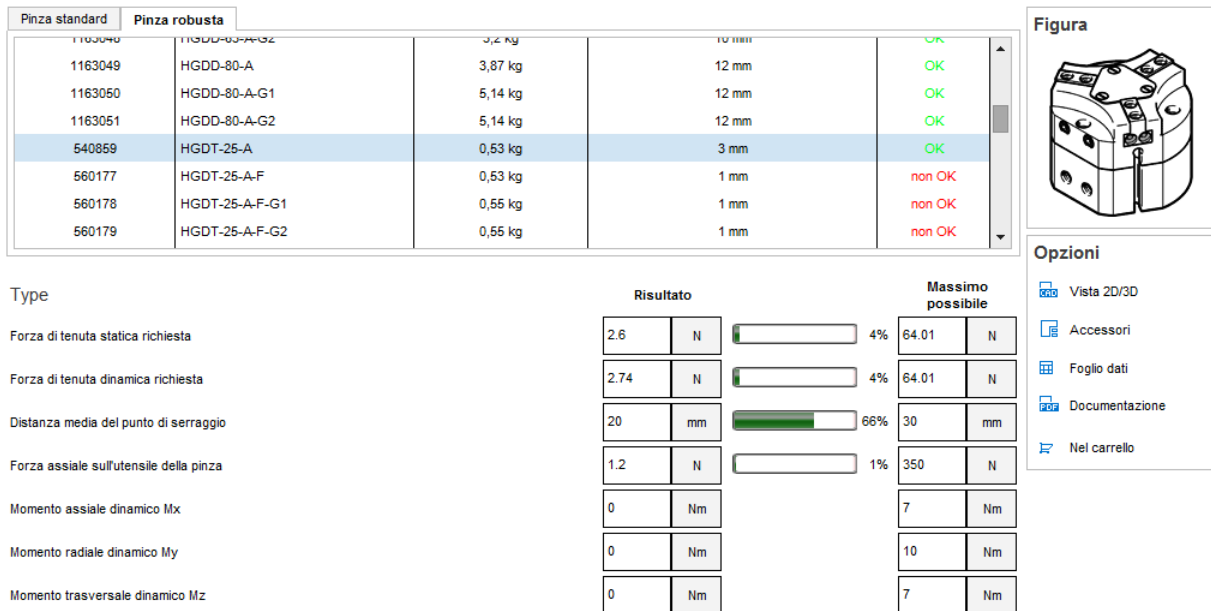


Figura 6. 25: Verifica della corretta scelta della Pinza

Come è possibile notare dalla figura la pinza scelta, cioè HGDT-25-A, risulta essere ottima per il trasporto del carico da movimentare, infatti si sarebbe potuto scegliere anche una pinza meno robusta con caratteristiche inferiori rispetto a quella scelta.

Possiamo affermare con fermezza, che in base alle considerazioni fatte nel paragrafo 4.3 e ai dati ottenuti dal simulatore, la verifica incrociata è andata a buon fine e quindi la scelta della pinza è stata fatta in modo corretto.

6.5 Progettazione mediante il modellatore 3D

Questo paragrafo ha come obiettivo quello di spiegare lo step successivo al dimensionamento dei singoli componenti opportunamente scelti e cioè quello relativo alla costruzione del prototipo della stazione di avvitatura mediante un modellatore 3D.

Il software 3D utilizzato è chiamato Pro/E, il quale è un modellatore CAD tridimensionale parametrico creato dalla Parametric Technology Corporation (PTC), questo offre funzionalità di modellazione di parti solide e ibride, modellazione di assiemi e realizzazione di disegni tecnici per l'ingegneria meccanica (vedi Fig.6.26).

In Pro/E diversi sono i modelli solidi che possono essere assemblati tramite vincoli geometrici o cinematici per formare un complessivo, attraverso l'utilizzo di questo modellatore può essere fatta una simulazione cineto dinamica oppure se ne può semplicemente realizzare la messa in



tavola. Dopo aver appreso il funzionamento del programma, è stato possibile iniziare la fase di assemblaggio che ha visto numerose modifiche in fase di sviluppo. La parte che viene esclusa in questa sezione è la parte degli azionamenti e del modulo elettronico CPX, con i relativi collegamenti. Per la costruzione del prototipo 3D, come già detto sono stati utilizzati i componenti dimensionati nei paragrafi precedenti.

L'asse a sbalzo è stato utilizzato per l'asse verticale, mentre i due assi a portale sono stati posizionati parallelamente per gestire la movimentazione orizzontale. La parte che è risultata più complessa in fase progettuale è stata quella relativa al blocco rotante. Tale blocco rotante è stato calettato sull'asse a sbalzo attraverso la costruzione di una serie di piastre, su quest'ultime è stato possibile calettare l'asse rotativo, il distributore rotativo e il manicotto.

Il manicotto è stato progettato in alluminio al fine di unire il distributore rotativo con l'asse rotativo. Per la realizzazione del prototipo sono stati utilizzati i seguenti componenti riportati in Tabella 28.

N°	Codice	Quantità	Tipo	Descrizione
1	540859	1	HGDT-25-A	PINZA PNEUMATICA
2	552706	1	ERMB-20	ASSE ROTATIVO
3	550979	1	EAMM-A-D32-55A	KIT ASSIALE
4	550113	1	EMMS-AS-55-M-LS-TMB	SERVOMOTORE BRUSHLESS
5		2		PIASTRE E MANICOTTO
6	539287	1	GF-1/8-2	DISTRIBUTORE ROTATIVO
7	195612	1	DGEA-25-400-ZR-WB-KV	ASSE A SBALZO
8	550957	2	EAMM.A.F38-60G	KIT ASSIALE
9	552191	2	EMGA-60-P-G5-SAS-70	RIDUTTORE
10	550117	2	EMMS-AS-70-LS-RMB	SERVOMOTORE BRUSHLESS
11	534391	2	DGE-25-400-ZR-RF-LB-RK-GK	ASSE A PORTALE
12	192577	1	KSK-25-200	ALBERO DI COLLEGAMENTO
13	150736	8	MUP-18-25	SUPPORTO CENTRALE
14	539363	1	HMID-LP	KIT PER SISTEMI MULTIASSE
15	539365	1	HMIZB-E03	KIT PER SISTEMI MULTIASSE
16	539368	1	HMV5-DL25	KIT PER SISTEMI MULTIASSE
17	539378	1	HMIA-E05-1	PROFILO D'APPOGGIO
18	539971	1	HMLVD-LP-DL25-40	KIT PER SISTEMI MULTIASSE
19	153294	2	QSKL-M5-4	RACCORDO AD INNESTO A L
20	542439	1	HAPG-SD2-32	KIT PINZA

Tabella 28: Distinta materiali meccanici

In Fig.6.26, è riportato il 3D del robot di avvitatura, le due viste aiutano a comprendere come, effettivamente il sistema dovrà essere assemblato nella successiva fase di montaggio.

In Fig.6.27, è riportata la messa in tavola 2D, ricavata dal 3D; mediante una funzione diretta del PRO/E, sono messe in evidenza le tre viste utili: frontale, laterale e dall'alto. Nella Fig.6.28, invece è stato fatto uno zoom della vista frontale e laterale.



STAZIONE DI AVVITATURA STAND ALONE MEDIANTE MODELLATORE 3D PRO/E

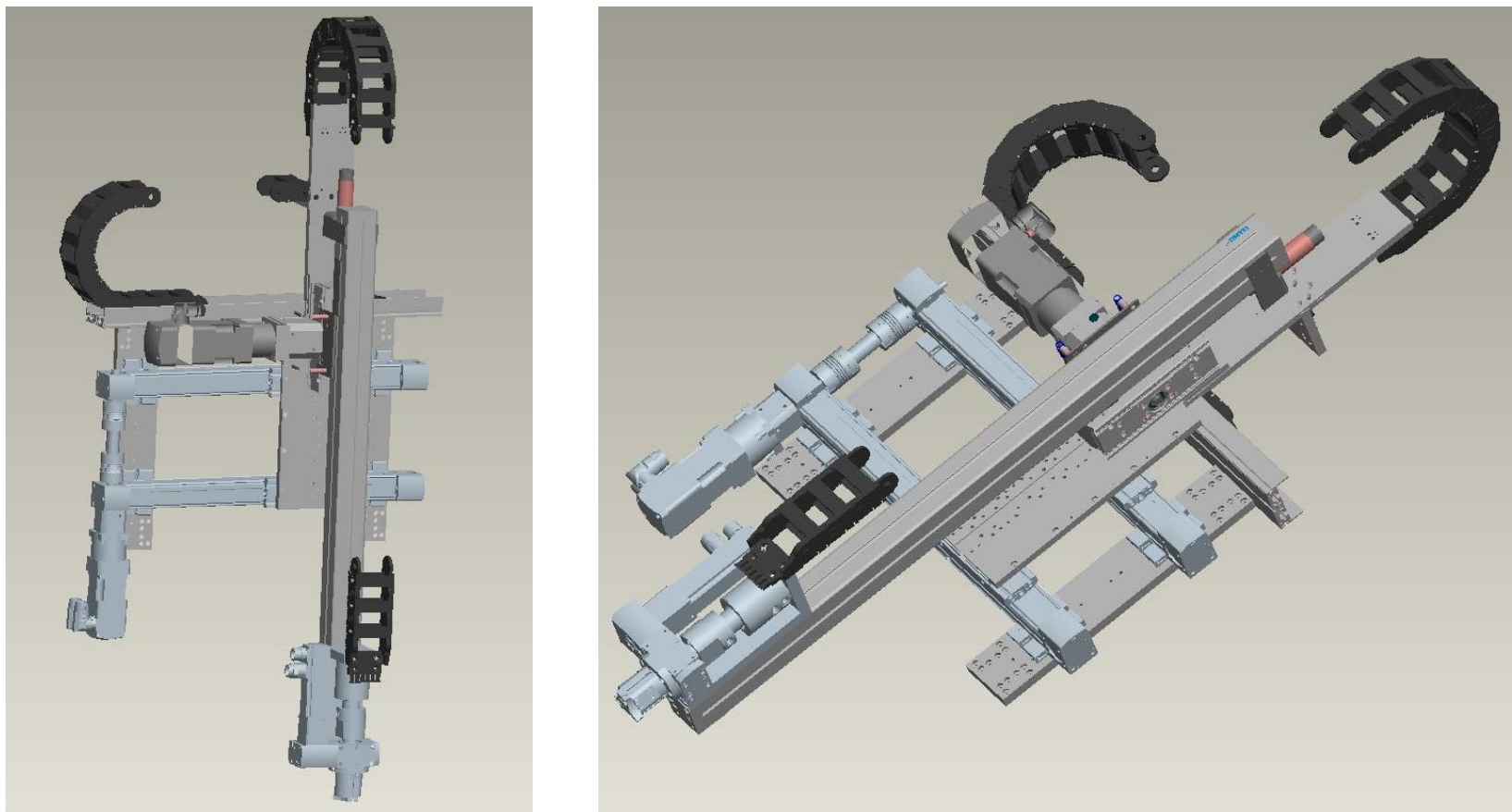


Figura 6. 26: Prototipo della stazione di avvitatura in PRO/E

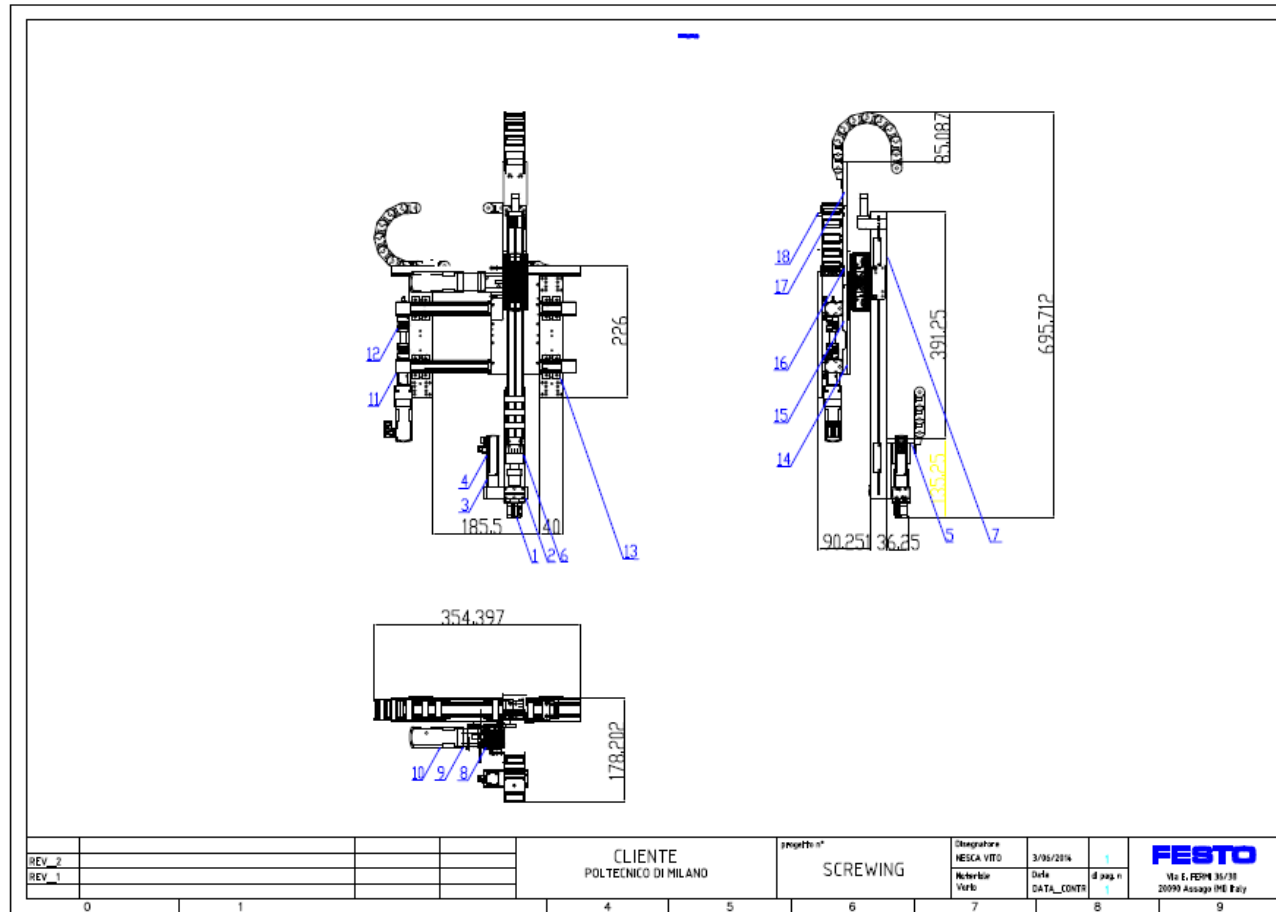


Figura 6. 27: Messa in tavola prototipo

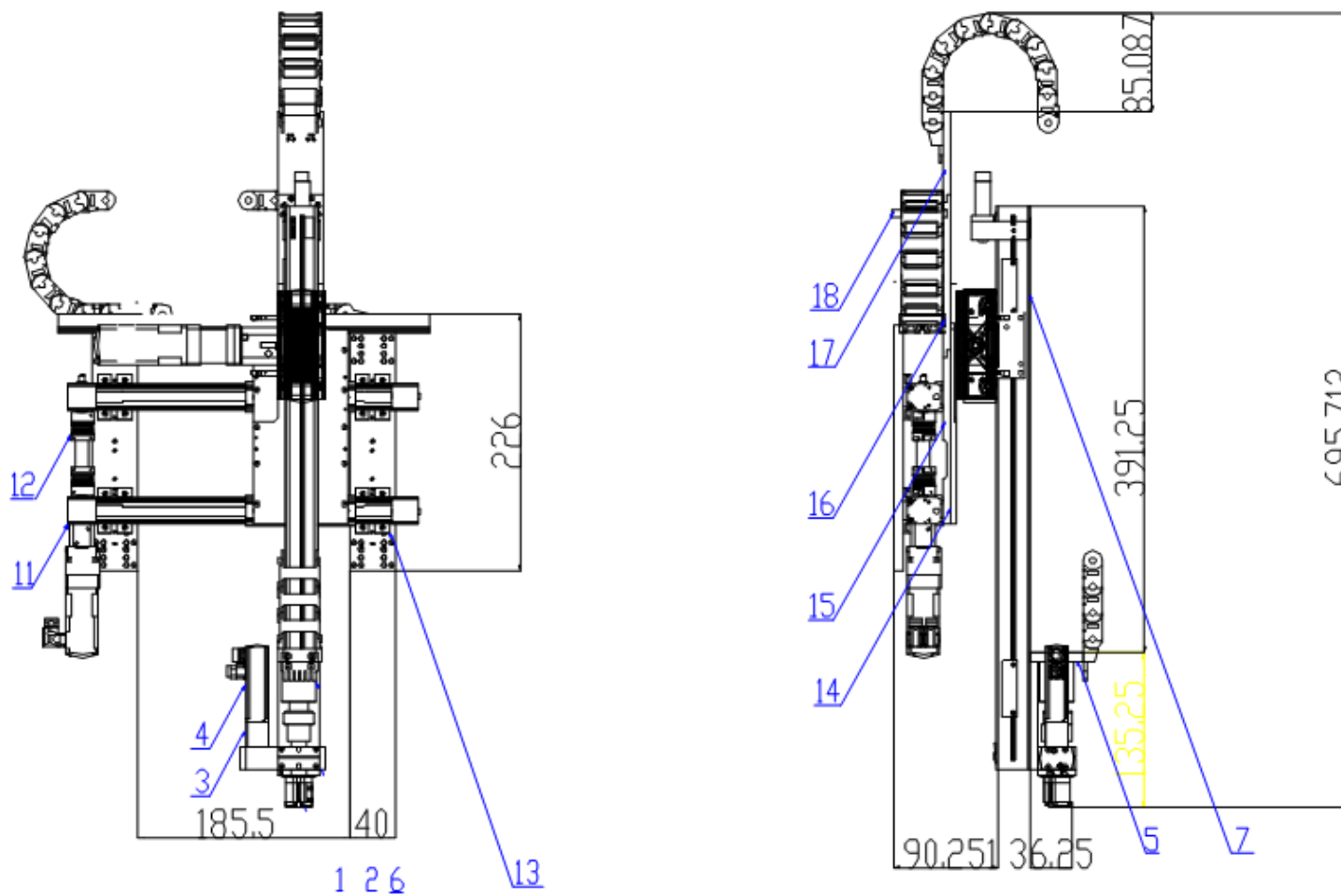


Figura 6. 28: Zoom vista frontale e laterale



6.6 Parametrizzazione in FCT (Festo Configuration Tool)

Una volta completato il prototipo attraverso il modellatore 3D, si è passati alla parte realizzativa, comprensiva sia di parte meccanica che di parte elettrica con gli opportuni collegamenti. In questo secondo step sono stati uniti tutti i componenti: dagli assi, ai motori, agli azionamenti, al PLC, al PC, al touch panel e alla smart-camera.

Inizialmente ci si è soffermati sull'assemblaggio della parte meccanica, la quale è stata montata su di un piano orizzontale per facilitare il lavoro, terminato l'assemblaggio è posto il sistema in modo che possa lavorare in posizione verticale, si è passati al collegamento dei cavi motore e dei cavi encoder i quali attraverseranno tutta la catenaria dell'Handling e si collegheranno ai rispettivi azionamenti, questi ultimi riceveranno il comando di movimentazione dal PLC opportunamente programmato in CoDeSys.

A tal punto terminato il montaggio meccanico ed elettrico, si è passati al terzo step, quello relativo alla parametrizzazione dei singoli assi di movimentazione. Il conseguimento di questo step è stato possibile grazie all'utilizzo del software FCT (Festo Configuration Tool).

Festo Configuration Tool è la piattaforma software per la configurazione e la messa in servizio di vari componenti Festo. L'FCT è costituito dai seguenti componenti:

- Un framework nella fase iniziale del programma che mi consente di impostare i componenti da utilizzare e i vari supporti software disponibili per quelle apparecchiature.
- Un plug-in per le specifiche esigenze di ogni tipo di componente. Questi sono gestiti e avviati dal framework.

Con lo strumento di configurazione Festo, l'utente che abbia familiarità con il dispositivo collegato al PC, può intraprendere la configurazione e la messa in servizio del componente supportato dai plug-in usati.

Grazie alla chiara rappresentazione nel Festo Configuration Tool FCT, tutti gli attuatori all'interno di un dato sistema possono essere gestiti e memorizzati in un singolo progetto.

Per un'ulteriore messa in servizio, il software FCT consente i movimenti dei sistemi assiali in singoli passi o in sequenze. Si può accedere a strumenti per scrivere singoli record nel processo teach-in nella tabella record di movimento e funzioni Trace.

Al fine di comprendere in FCT come parametrizzare il sistema qui di seguito riporto, in modo sequenziale, le procedure e i passi da seguire per completare il settaggio dei parametri.

Inoltre si prenda come esempio la parametrizzazione dell'asse Y è la medesima procedura dovrà essere utilizzata per il settaggio dei parametri relativi all'asse Z e all'Asse di Rotazione. Inoltre è stato utilizzato il software FFT, discusso nel paragrafo 5.4.2, dove si è assegnato a ogni singola movimentazione e quindi a ogni singolo controllore un indirizzo IP al fine di inserire tutti i componenti all'interno di una sottorete LAN.



- Una volta avviato FCT, è stato creato un nuovo progetto ed è stata fatta una selezione delle componentistiche da scegliere fra controllori, motori e assi. E' stato selezionato per l'asse Y il controllore CMMP-AS-C5-3A-M0, l'asse elettrico DGE-25-400-ZR-RF-GK e il motore elettrico EMMS-AS-70-S-LS-RMB.

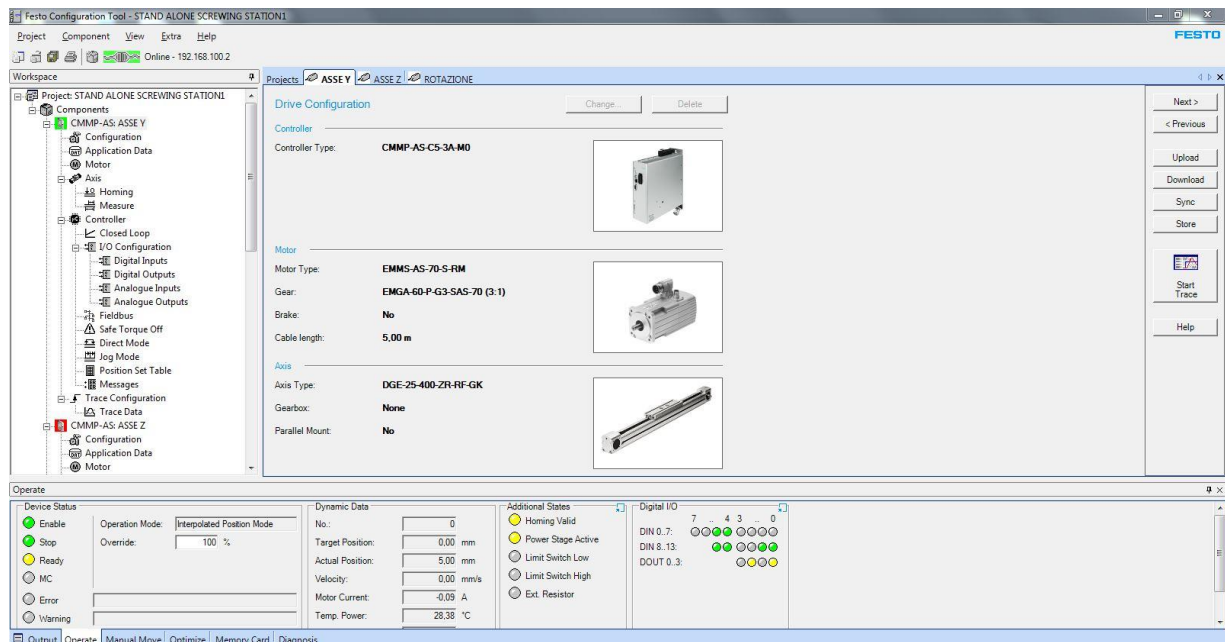


Figura 6. 29: Screenshot Configuration FCT

- Selezionare il mezzo di comunicazione, CANopen, in Operating Mode Settings; in Environment selezionare la direzione di movimentazione scelta per l'asse in questione e il carico totale. Nell'ultima finestra disponibile sono stati definiti i messaggi di sistema: Motion Complete, valore anomalo, monitoraggio tempi di fermo, gestione errori, indicazione di quali errori vengono segnalati e come.

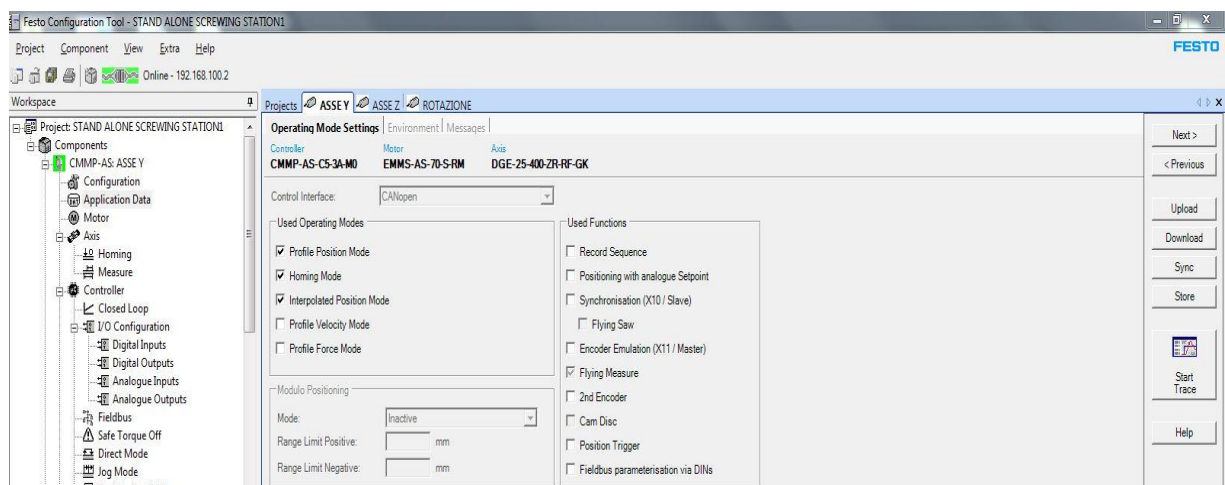


Figura 6. 30: Screenshot Application Data FCT



- Inserire i riferimenti del motore in questione, dalla massima corrente alla corrente nominale, all'energia di Joule.

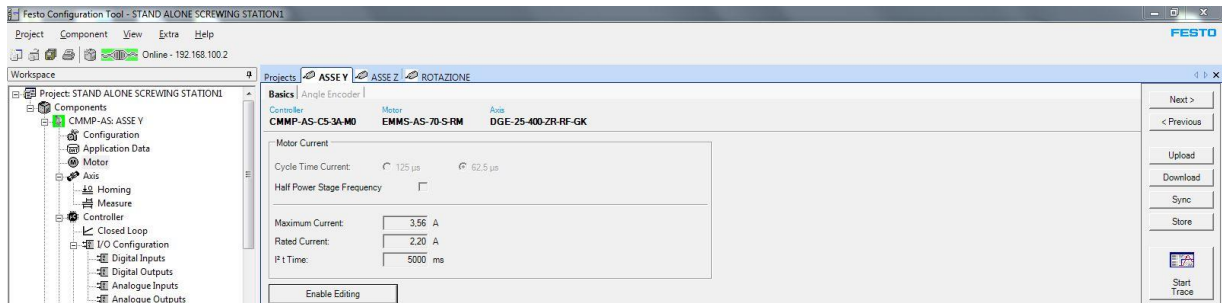


Figura 6. 31: Screenshot Motor FCT

- Parametrare i limiti di velocità voluti e accettabili dall'asse stesso, fornire informazioni sulla presenza di eventuali finecorsa e se questi sono normalmente aperti o normalmente chiusi.

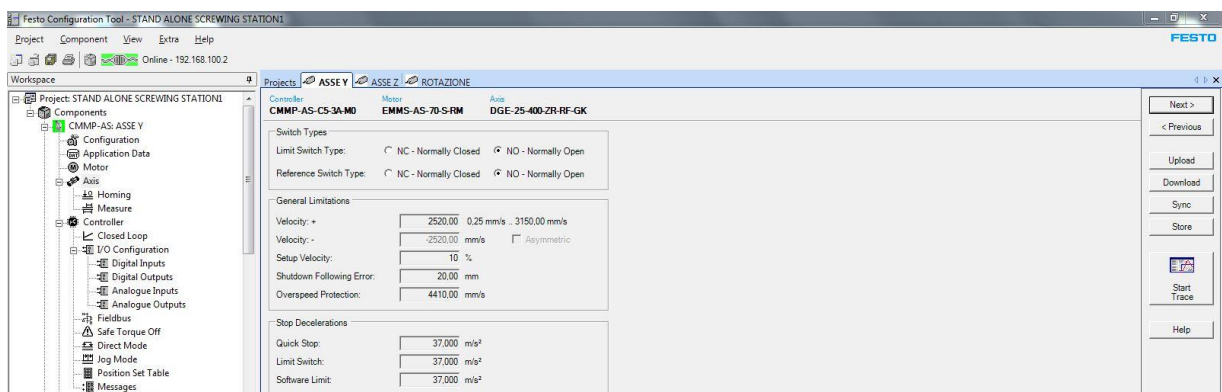


Figura 6. 32: Screenshot Axis FCT

- Determinare e descrivere il procedimento homing, con le relative velocità, accelerazioni e attenuazioni in valore percentuale del ginocchio della rampa.

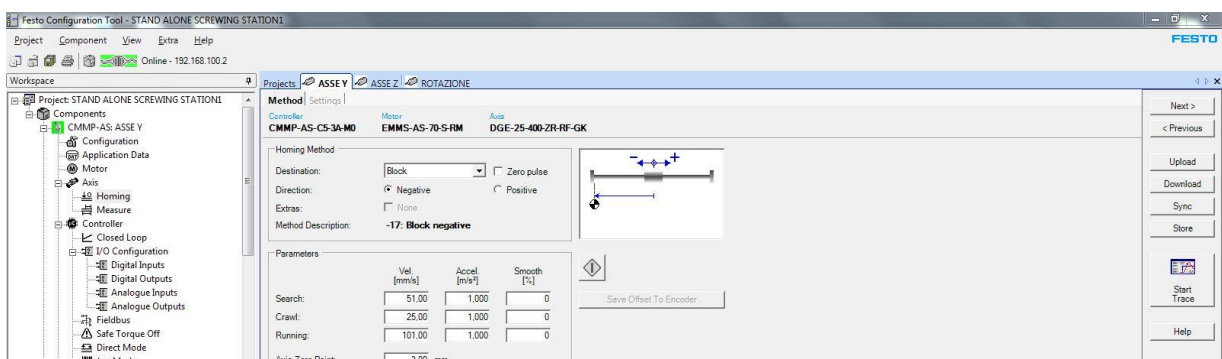


Figura 6. 33: Screenshot Homing FCT



6. Lettura di informazioni relative alle misure meccaniche dell'asse e possibile dichiarazione di altri parametri come la costante di avanzamento e i Limit Switch.

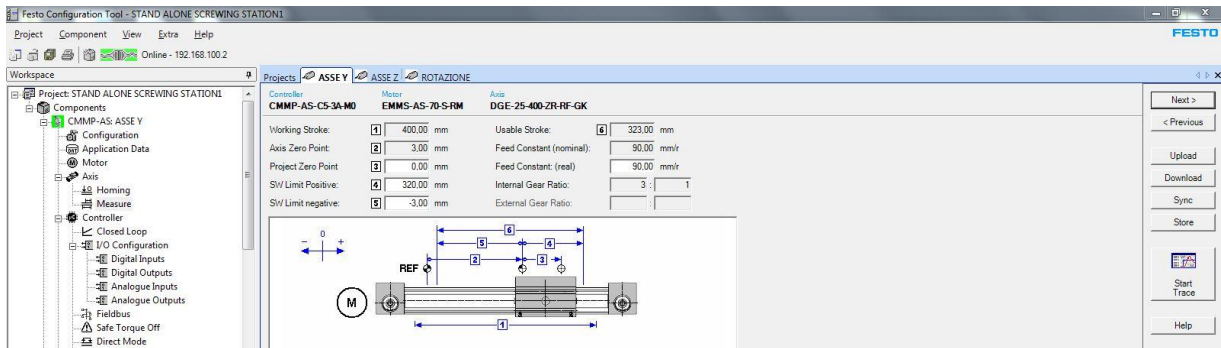


Figura 6. 34: Screenshot Measure FCT

7. Impostare parametri del controllore, con la relativa scelta della tecnica di modulazione e il corretto settaggio della logica di comunicazione, nel nostro caso DIN5 e fieldbus.

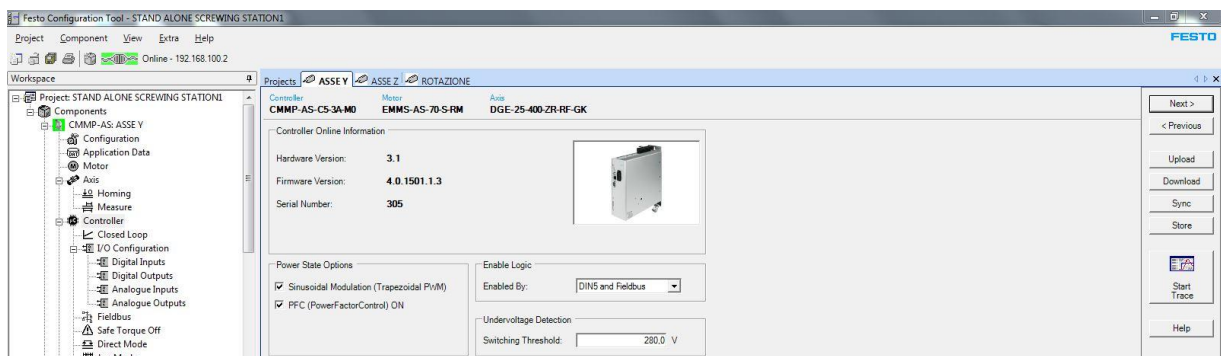


Figura 6. 35: Screenshot Controller FCT

8. Calcolare le impostazioni ad anello chiuso per il sistema configurato, dal controllo di corrente per effettuare il controllo di coppia al controllo di velocità e di posizione, determinazione del tempo ciclo.

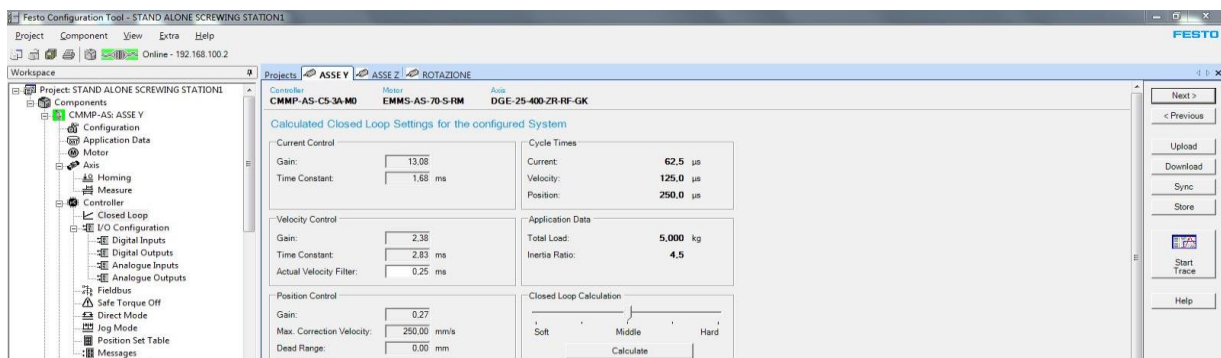


Figura 6. 36: Screenshot Closed Loop FCT



- Dichiarazione sulla disponibilità dei segnali digitali e analogici e configurazione degli stessi. Assegnazione degli input ai singoli DIN, impostazione dei parametri relative alle uscite digitali, settare le combinazioni di posizionamento e i comandi di esecuzione, inclusi tutti i parametri, per es. per la posizione, la velocità, l'accelerazione, la forza e la limitazione del jerk.

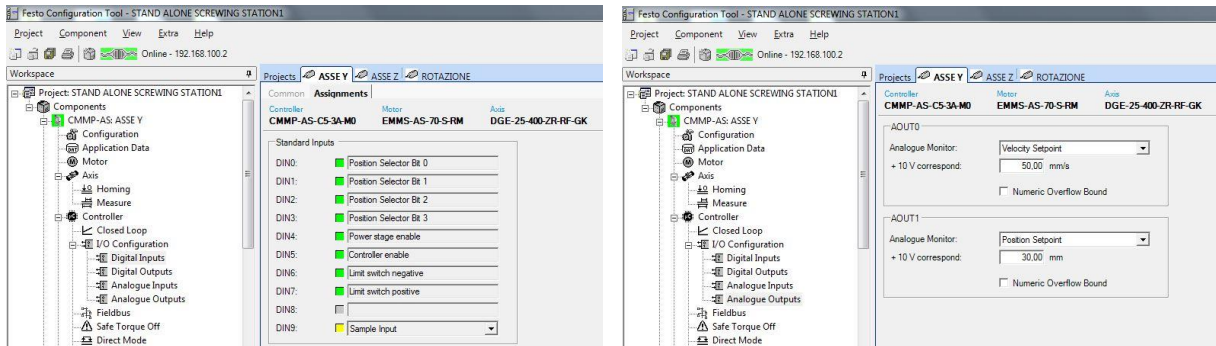


Figura 6. 37: Screenshots I/O Configuration FCT

- Impostare i parametri del fieldbus, attribuire il Base Address, il Bit Rate e il nome del protocollo cui riferirsi.

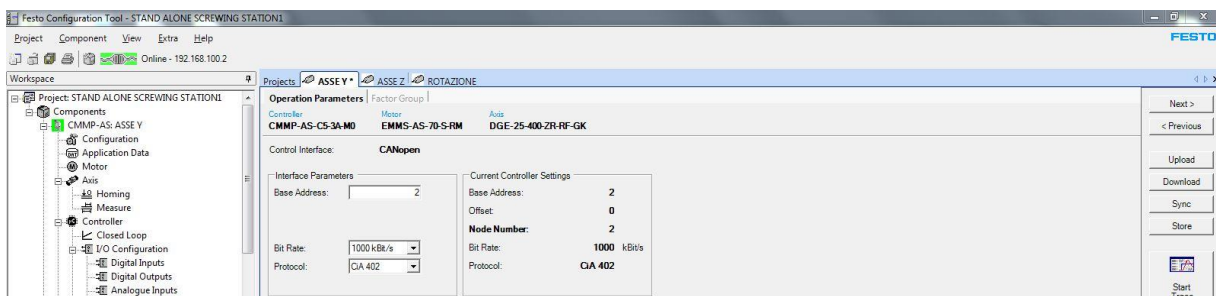


Figura 6. 38: Screenshot Fieldbus FCT

- Stato del Safe Torque Off, citato nel capitolo 5.

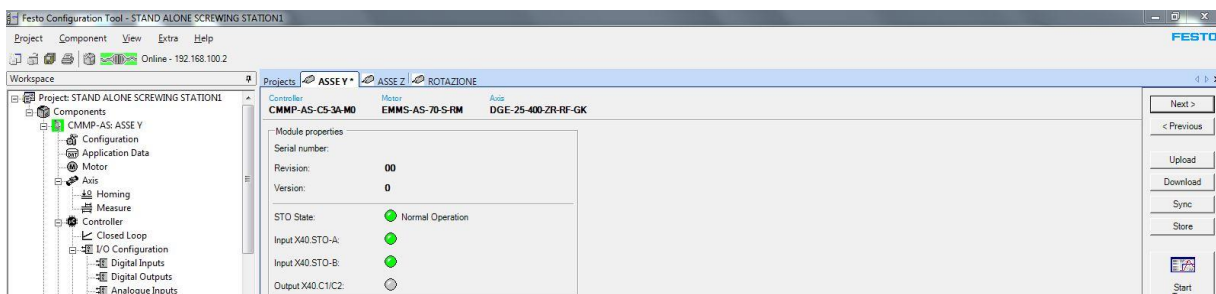


Figura 6. 39: Screenshot Safe Torque Off FCT



12. Impostazione del motion profile, tra cui posizione, velocità e forza. Con rappresentazione del possibile andamento senza alcuno smussamento della curva.

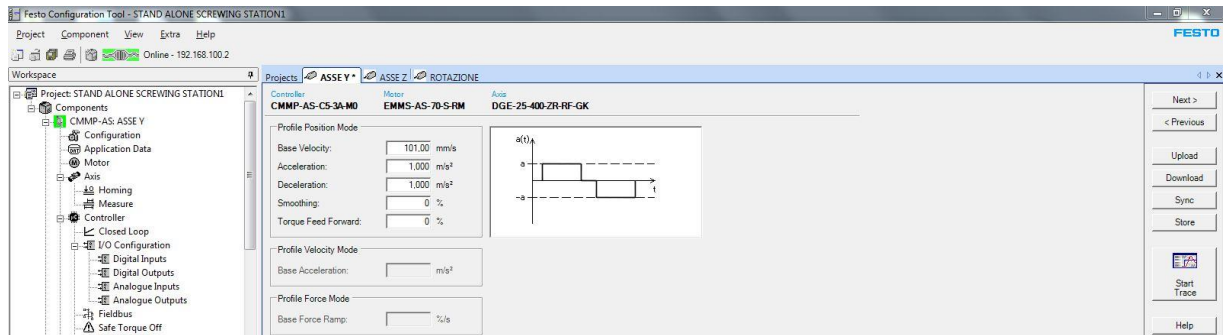


Figura 6. 40: Screenshot Direct Mode FCT

13. Inserire opzioni per funzioni di jog ovvero di avanzamento, tra queste vengono settate velocità, accelerazioni, decelerazioni per il profilo motion.

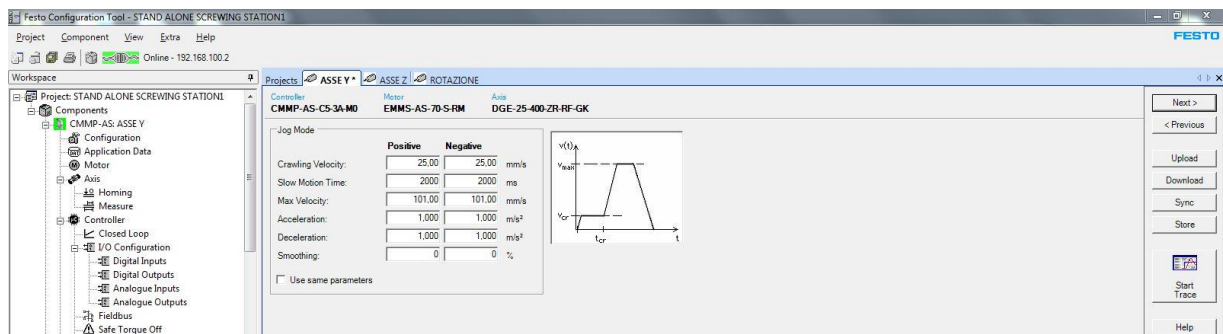


Figura 6. 41: Screenshot Jog Mode FCT

14. Inserire i valori opportuni in una tabella chiamata Position Set Table, attraverso la quale è stato possibile testare i mie assi in modo ciclico e manuale. Quest'operazione è stata fatta in fase preliminare, per verificare il corretto funzionamento dei singoli assi.

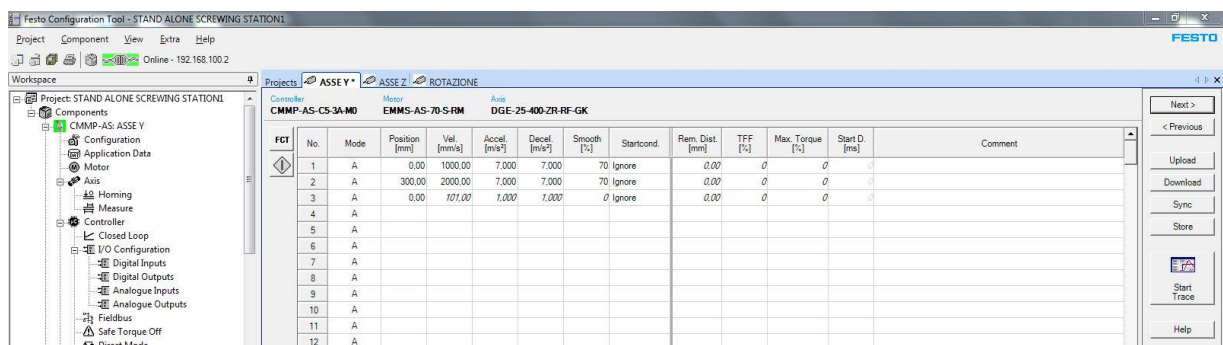


Figura 6. 42: Screenshot Position Set Table FCT



15. Visualizzazione di messaggi diagnostici, tra cui monitoraggio delle sovratensioni, sovratemperature, violazioni dei limiti di velocità, angoli encoder, problemi sul bus di campo e tanti altri parametri che vengono monitorati.

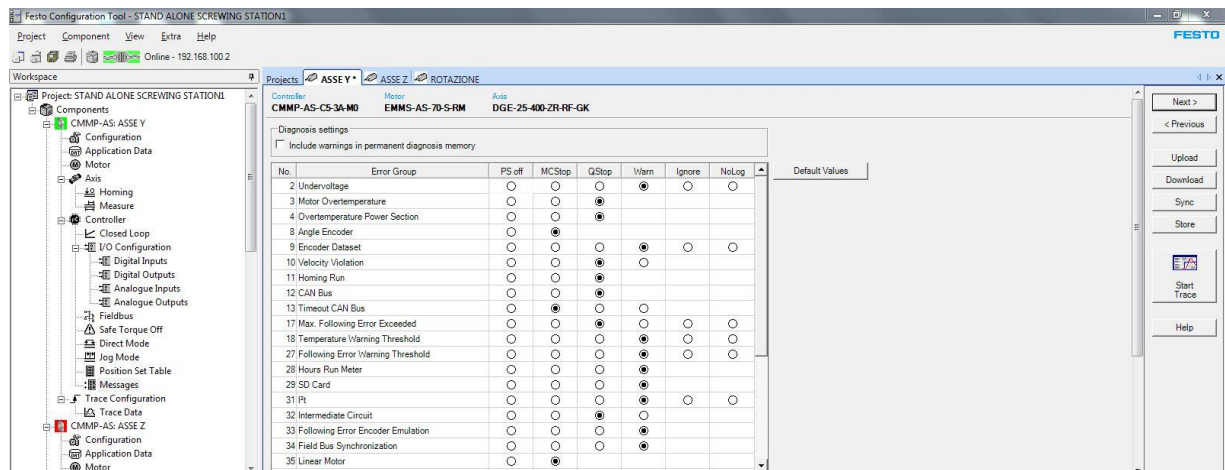


Figura 6. 43: Screenshot Messages FCT

16. Visualizzazione del trace in Real time, questo per visionare gli andamenti nel tempo della posizione, velocità e anche della corrente di asse diretto e in quadratura del motore.

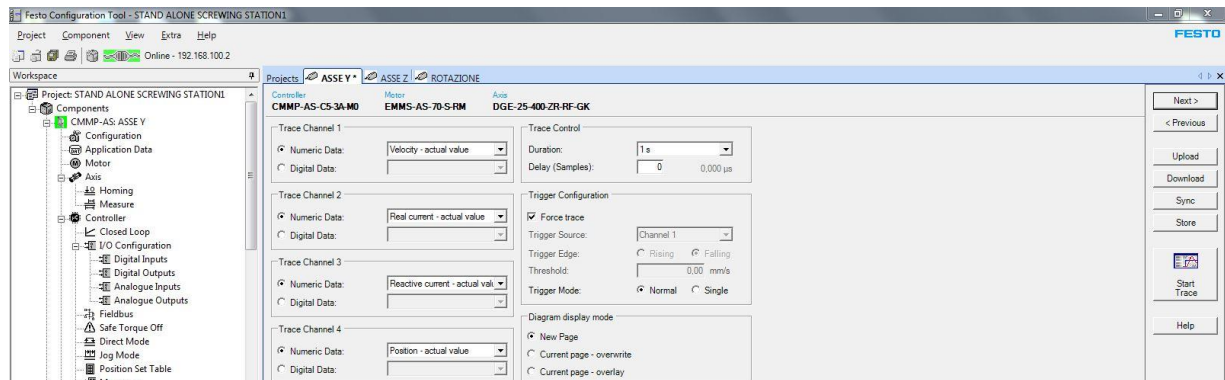


Figura 6. 44: Screenshot Trace Configuration FCT

17. Dopo aver completato il progetto, deve essere collegato il PC al controllore CMMP-AS con un cavo LAN.
18. Trasferire i dati del progetto dal computer al controllore attraverso un download e Store del progetto ultimato.
19. A tal punto, sempre nello stesso progetto è stato possibile aggiungere ulteriori configurazioni riferite alla parametrizzazione dei successivi assi. La procedura utilizzata per questi ultimi risulta essere identica a quella presa in esempio.
20. Il successivo passo sarà quello di scrivere il programma in CoDeSys, ritornare in FCT e estrarre gli andamenti in Real-Time degli assi, quanto detto è riportato al Cap.7.



6.7 Controllo di Visione mediante Smart Camera

La Smart Camera o telecamera intelligente è un sistema di visione compatto che integra entro un unico contenitore una telecamera e un sistema di digitalizzazione ed elaborazione delle immagini, oltre ai dispositivi accessori per l'interfacciamento col mondo esterno come porte di comunicazione e I/O digitali. Il design compatto rende la videocamera uno strumento ideale per il controllo di qualità.

La camera ha un'intelligenza integrata è quindi munita di microprocessori dedicati con sistemi operativi relativamente semplici, ha spesso il vantaggio di una maggiore affidabilità in ambienti industriali e consente l'avviamento del sistema in frazioni di secondo. La presenza di un processore in ogni telecamera semplifica applicazioni, in cui numerose unità debbano operare indipendentemente e contemporaneamente. Grazie all'intelligenza a bordo è possibile effettuare la parametrizzazione della camera attraverso un software e poi caricare tale programma nel dispositivo. Le architetture che impiegano l'uso di telecamere intelligenti vengono denominate ad intelligenza distribuita, contrapposte a soluzioni tradizionali denominate ad intelligenza centralizzata.

L'impiego di Smart Camera è spesso orientato ad applicazioni semplici, ma la tecnologia dei processori consente di fatto di disporre di potenze di calcolo di diverse migliaia di MIPS (milioni di istruzioni per secondo, unità di misura della frequenza di esecuzione delle istruzioni effettuata da un microprocessore) fino a 1 GHz, equivalenti a PC di fascia medio alta.

Fatta questa breve panoramica sul dispositivo, ritorniamo a parlare della stazione di avvitatura; dopo aver accurato in FCT il corretto funzionamento dei singoli assi, si è passati al quarto step, ovvero all'installazione ed alla programmazione della Smart Camera SBOI-Q-R1B, inserita al fine di controllare la chiusura o meno del tappo di bottiglia, restituendo rispettivamente un feedback GOOD o BAD.



Figura 6. 45: Smart camera SBOI-Q-R1B

Tale dispositivo, attraverso una staffa a L, è stato calettato sulla parte frontale dell'ERMB-20, quindi la camera è trasportata dall'asse verticale su tutto il profilo di movimentazione. Inizialmente si sono avuti alcuni problemi dovuti alle oscillazioni della camera durante la



movimentazione, tali problemi sono stati risolti andando a utilizzare una funzione di smooth che ha consentito di smussare le curve di velocità e accelerazione in prossimità del ginocchio degli andamenti.

Il segnale di trigger e quindi l'acquisizione dell'immagine, come è possibile notare dettagliatamente nel paragrafo relativo alla programmazione in CoDeSys, è stato dato all'uscita della camma elettrica e cioè quando si ha il tappo di bottiglia avvitato e le griffe della pinza fuori dalla visuale della camera.

I dati tecnici della camera con il relativo significato della sigla, sono riportati nella tabella seguente:

Modello della Smart camera	SBOI-Q-R1B
Risoluzione [Pixel]	640*480
Tempo di esposizione [ms]	0,027 ... 1000
Frequenza immagine [fps]	150
Fissaggio obiettivo	Ottica integrata
Tipo rilevamento	Monocromatico
Distanza di lavoro [mm]	22 ... 1000
Campo visivo [mm]	14*10 ... 520*390
Numero massimo di programmi	256
SBO	Smart camera compatta
I	Ottica integrata
Q	Videocamera per controllo qualità
R1	640 x 480 Pixel, risoluzione VGA
B	Monocromatico

Tabella 29: Dati tecnici SBOI-Q-R1B

Una Smart Camera comprende di norma almeno alcuni tra questi dispositivi:

- Un sensore per il rilevamento delle immagini.
- Circuiti per la digitalizzazione dell'immagine.
- Memoria per la registrazione di una o più immagini.
- Un processore per l'elaborazione.
- Memoria per programmi e dati di elaborazione.
- Interfacce di comunicazione Ethernet e CANopen per la comunicazione con il comando host (PLC).
- Linee di I/O digitali.
- Un adattatore per lenti e obiettivi di vario tipo.
- Dispositivi integrati di illuminazione (normalmente basati su LED).
- Un'uscita video per visualizzazione di immagini e risultati di elaborazione.



Le Smart Camera sono in generale impiegate per gli stessi tipi di applicazioni in cui sono usati sistemi di visione più complessi, laddove considerazioni di ingombro, costo o affidabilità rendano impraticabile l'impiego di PC o di elaboratori esterni. I criteri per la scelta sono stati fatti in base all'ingombro, alla risoluzione dell'immagine e alla distanza di lavoro.

Di seguito è stato riportato nello specifico le varie parti della Smart Camera SBOI-Q-R1B:

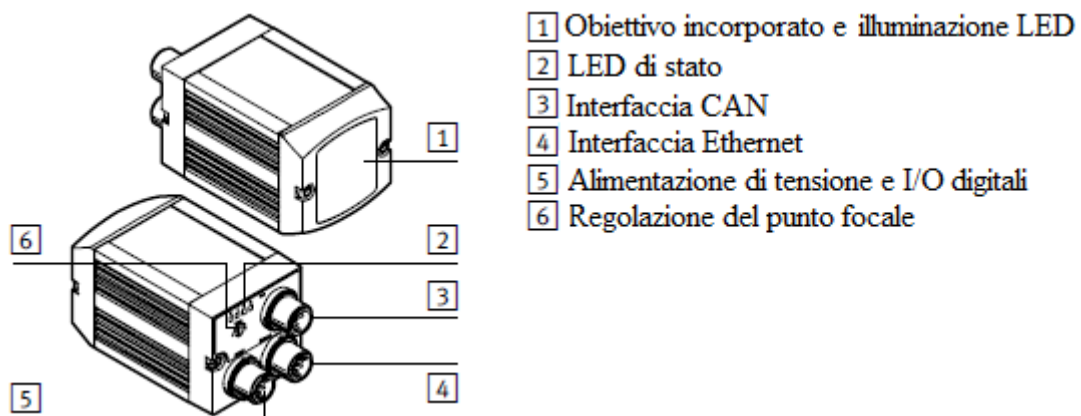
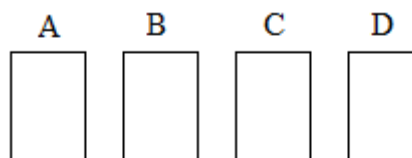


Figura 6. 46: Parti della smart camera

I cui LED di stato, come è possibile notare dalla Figura 6.46, sono posti sul retro della camera e risultano avere le seguenti funzioni:



LED di stato		Stato	Descrizione
A	Stato di pronto	LED verde lampeggiante	l'apparecchio è pronto
		LED rosso acceso	inizializzazione attiva
		LED spento	stato indefinito, es. manca tensione d'esercizio
B	Traffico Ethernet	LED verde lampeggiante	traffico di dati Ethernet
		LED spento	nessun traffico di dati Ethernet
C	Attività	LED rosso acceso	errore
		LED rosso lampeggiante	avvertenza
		LED giallo acceso	l'apparecchio è pronto per la valutazione
		LED spento	valutazione attiva
D	Emissione	LED rosso acceso	l'ultima valutazione ha rilevato un BAD
		LED giallo acceso	l'ultima valutazione ha rilevato un GOOD
		LED spento	nessun risultato

Tabella 30: LED di stato smart camera



Con i LED di stato è possibile avere un feedback in real-time, del corretto o meno avvvitamento del tappo.

Per la connessione con il modulo elettronico CPX è stato utilizzato un connettore M12 inserito nella porta 5 (vedi Fig.6.46) e in base alle funzioni sono stati collegati le uscite e i vari ingressi digitali in modo opportuno (vedi tabella 31).

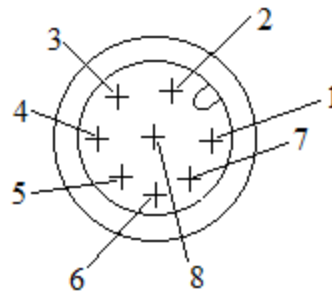


Figura 6. 47: Connettore M12

Pin	Segnale	Descrizione	Colore	CPX
1	I0	Segnale di trigger	Bianco	DO X5.2
2	24 DC	Tolleranza $\pm 10\%$	Marrone	DI X8.0
3	Riservato	Non collegare	Verde	NC
4	O1	L'ultima valutazione ha rilevato una parte GOOD	Giallo	DI X8.0
5	I1	Segnale acquisizione ingressi e di conferma errori	Grigio	NC
6	O0	Ready segnale 1: apparecchio pronto segnale 0: apparecchio non ancora pronto	Rosa	DI X4.2
7	0 V	0 V	Blu	DI X8.1
8	O2	L'ultima valutazione ha rilevato una parte BAD	Rosso	DI X6.2

Tabella 31: Alimentazione e I/O Digitali

I campi tipici di impiego per questa tipologia di camera sono:

- Ispezione automatica per controllo qualità, per la rilevazione di difetti o mancanza di componenti.
- Posizionamento di precisione di assi.
- Controllo qualità 2D sulle dimensioni meccaniche dei pezzi.
- Misure senza contatto.
- Selezione e orientamento di pezzi.
- Lettura e verifica di codici (Barcode, Datamatrix, caratteri alfanumerici – OCR).
- Ispezione di materiali per la rilevazione di difetti o la verifica dimensionale.
- Individuazione di posizione e rotazione di pezzi per la guida robot e il prelievo automatico di pezzi.



Per la telecamera ci sono quattro modalità disponibili:

1. Triggered: cattura l'immagine con un segnale di trigger, generato da un master o da un sensore non appena il pezzo è di fronte alla camera.
2. Free Run: non è necessario un segnale di trigger, l'immagine viene catturata e processata continuamente, in presenza o meno dell'oggetto nel campo di visione. In caso di pezzo BAD o non presente, si attiverà un output BAD; in caso di pezzo nel campo di visione, di qualità ottimale, si attiverà l'output GOOD.
3. Image-based trigger: non è necessario un segnale di trigger, la telecamera è in modalità Free Run e l'acquisizione dell'immagine avviene solo quando il pezzo è nella posizione definita via software.
4. Fixed Framerate: l'immagine viene catturata, ispezionata e processata in continuo ad un ritmo fisso. Il segnale di trigger è sempre presente, la camera inizia il successivo ciclo di ispezione in accordo con la ciclica predefinita.

Tale sistema di visione risulta essere altamente flessibile e largamente funzionale grazie ai suoi tools di programmazione, funzionalità sfruttabili della Smart Camera, scelti in base al tipo di controllo che si deve effettuare.

Esistono diversi tools utilizzabili: ROI, C-Tool, Edge Finder, Blob Finder, Patter Matching, Simple Measurement, Multiple Measurement, Ray Tool, Checking Brightness, Checking Colour, Coordinate Transformation, Datamatrix code reader, Barcode reader, Optical Character Recognition (OCR). I tools di programmazione utilizzati per il controllo della corretta avvitatura del tappo sono stati il ROI e il Simple measurement. Il primo tool, il cui acronimo è Region Of Interest, delimita l'area da utilizzare e da analizzare effettuando una valutazione pixel per pixel, nel caso in questione è stato utilizzato per concentrare l'attenzione sulla zona di chiusura del tappo. Il secondo tool è stato il Simple Measurement, che ha permesso di effettuare un controllo più accurato andando a misurare la distanza tra il profilo inferiore del collo della bottiglia e il profilo superiore del tappo. Se questa misura rientrava nei limiti imposti grazie al software, il pezzo veniva definito GOOD quindi l'avvitatura andava a buon fine, altrimenti BAD, e la bottiglia doveva essere scartata dalla produzione.

Abbiamo detto, nel paragrafo 5.4.2, che grazie al software SBO Device-Manager è stato possibile assegnare un indirizzo IP alla camera per fare in modo che essa potesse appartenere alla sottorete desiderata. Fatto questo, sono stati utilizzati altri due programmi per la gestione della camera: CheckOpti e CheckKon.

Il software CheckOpti è utilizzato per impostare i programmi di controllo, una volta registrate le immagini dei pezzi campione, l'utilizzatore può definire le caratteristiche da controllare selezionandole da una lista e applicandole nel punto desiderato del pezzo campione. All'interno di un programma di controllo è possibile definire fino a 256 caratteristiche, ottimizzandole attraverso la funzione di presentazione del pezzo. A questo punto il programma di controllo può essere memorizzato in una delle 256 allocazioni di memoria disponibili della videocamera. Esempi dei criteri di controllo, sono la misurazione della lunghezza verticale



come nel caso in esame, misurazione della lunghezza orizzontale, misurazione angolare, misurazioni sul contorno dei pezzi e determinazione dell'area.

Di seguito per facilitare la comprensione è stato riportato lo Screenshot del programma (vedi Fig.6.48), dove sulla sinistra è riportato l'oggetto campione a cui tutte le future immagini dovranno fare riferimento, in alto a destra vi sono i tools utilizzati per la parametrizzazione del campione in esame e infine in basso a destra sono presenti i pezzi accettabili (bollino verde) e non accettabili (bollino rosso). Ovviamente la determinazione dell'accettabilità del pezzo diviene sempre più stringente quanto più stringenti diventano i limiti dimensionali imposti.

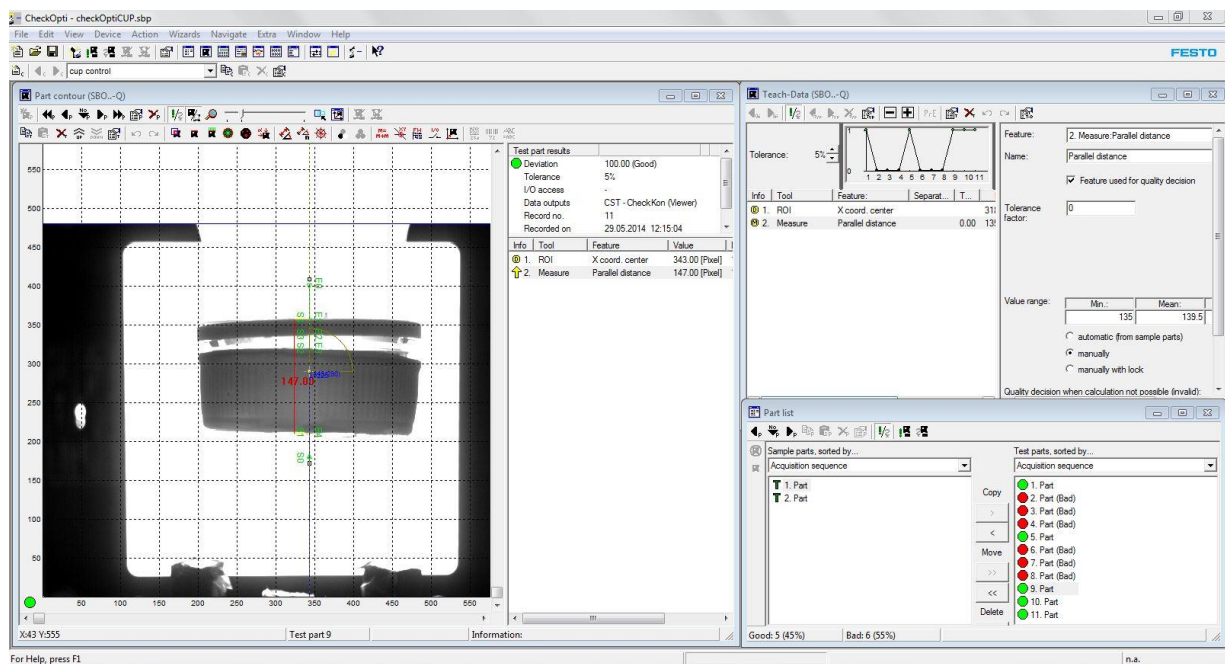


Figura 6. 48: Screenshot CheckOpti

Una volta parametrizzato il campione su cui far riferimento, per mezzo del cavo ethernet collegato alla porta 4 della camera (vedi Fig.6.46) e allo switch LAN, è possibile acquisire l'immagine in Real-time utilizzando il software CheckKon.

Il software CheckKon permette di visualizzare, archiviare e adattare tutti gli eventi all'interno della videocamera, dalla registrazione delle immagini fino al settaggio dei parametri di I/O. Questo significa poter selezionare il modo di valutazione, visualizzare e modificare i parametri di sistema, analizzare gli ultimi pezzi rilevati e visualizzare/protocollare le immagini dei pezzi e le caratteristiche derivanti da esso. Come abbiamo precedentemente detto l'immagine viene scattata dopo la fase di avvitatura, nel momento in cui viene fatto il CamOut, cioè quando l'asse Z sta per ritornare nella posizione iniziale. L'asse scende e contemporaneamente gira per eseguire l'avvitatura, effettuando la cosiddetta Camma Elettrica, successivamente l'asse risale e nel momento in cui la camera visualizza il tappo di bottiglia, ormai avvitato, cattura l'immagine per effettuare il controllo, la trasmette al CheckKon per visualizzarla sul PC e fornisce il feedback desiderato. Anche se l'immagine non viene visualizzata a schermo la

camera comunque acquisisce l'immagine e fornisce il responso visualizzabile dal LED di stato della camera.

Per aumentare il contrasto dell'immagine, al fine di avere un contorno più delineato, si è preferito inserire una retroilluminazione sulla parte posteriore della bottiglia. Tale retroilluminatore è stato posizionato in corrispondenza del tappo, in modo da trovarsi perfettamente in posizione quando la camera acquisisce l'immagine.

Di seguito riporto gli screenshots del programma, dove è possibile visualizzare la differenza tra un pezzo GOOD e un pezzo BAD.

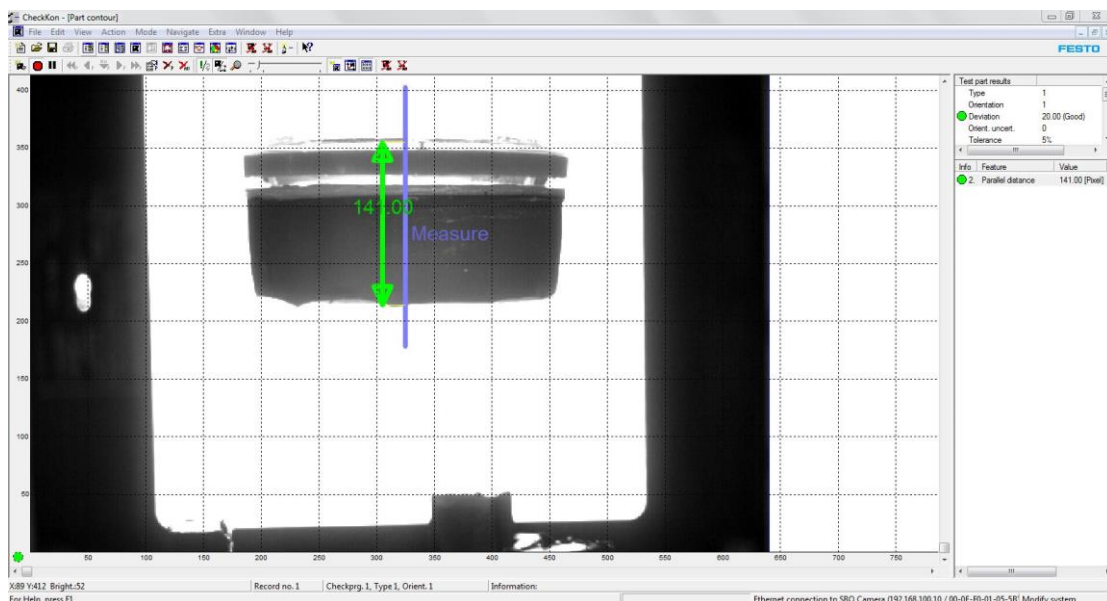


Figura 6. 49: Pezzo GOOD

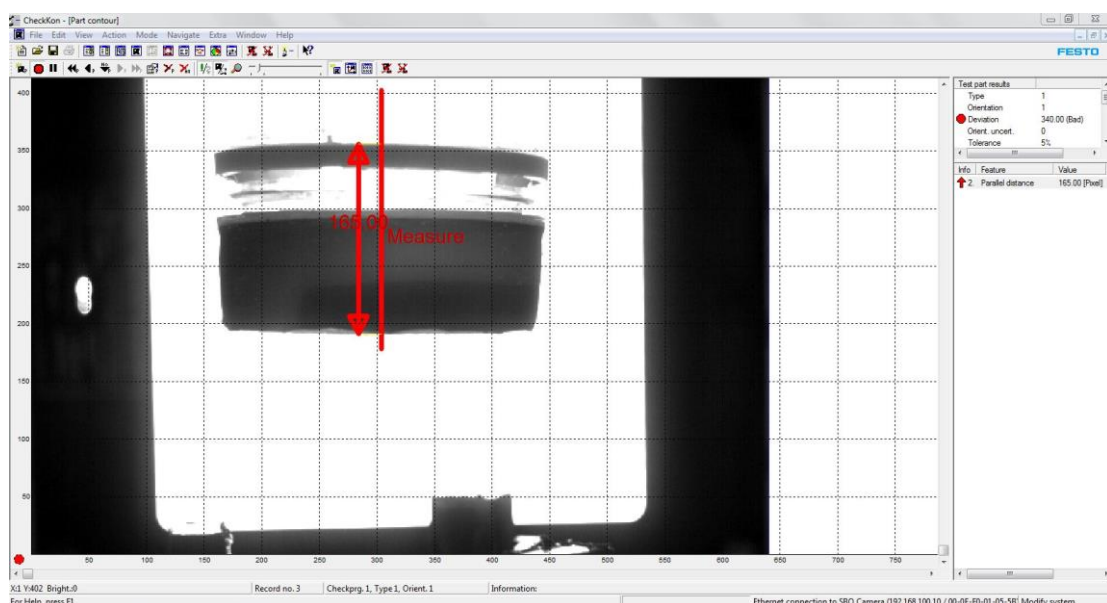


Figura 6. 50: Pezzo BAD

Il comando di trigger per l'acquisizione dell'immagine è stato gestito attraverso il programma stilato ad hoc in ambiente CoDeSys.

In ultima analisi, al fine di comprendere tutto il processo che vi è a monte, dalla parte hardware alla parte software, si può analizzare nel seguente flow chart la logica che vi è dietro ad un controllo di visione.

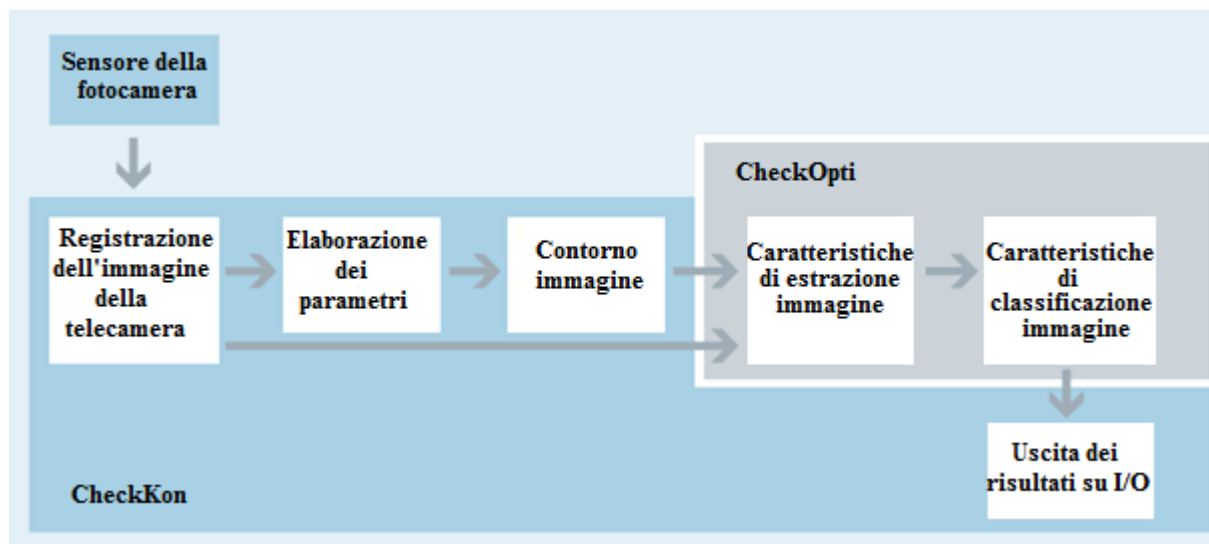


Figura 6. 51: Flow Chart acquisizione immagine

Per verificare l'affidabilità del robot nel tempo si è fatto lavorare il sistema in modo continuato, quello che si è potuto riscontrare che in un'ora sono state registrate 360 avvitature, quindi una media di un'avvitatura ogni 10 sec. Dalle prove si è ottenuto che in tre ore di lavoro continuato la percentuale di GOOD è stata nettamente superiore rispetto ai BAD, bensì il 98% delle avvitature hanno dato un feedback positivo. Tale responso ha permesso di affermare che il robot di avvitatura è stato progettato rispettando la regola dell'arte.

6.8 Programmazione HMI (Human Machine Interface)

L'interfaccia uomo-macchina o nel gergo anglosassone Human Machine Interface, fa riferimento allo strato che separa un essere umano che sta utilizzando una macchina dalla macchina stessa.

Le interfacce uomo-macchina, possibili grazie ai touch panel FED, permettono la semplice gestione di funzioni di automazione a livello di campo e si distinguono per le caratteristiche di funzionalità e integrazione. Per la gestione di assi singoli o multipli, nell'automazione di processo, il Front End Display FED rappresenta la soluzione ideale, la sua grafica risulta essere semplice per la massima flessibilità nella rappresentazione di processi, dati e comandi, questa semplicità di progettazione dei dialoghi uomo-macchina è possibile grazie all'utilizzo del software di programmazione FED Designer.



Il display Touch screen, come quello utilizzato nel progetto risulta essere il FED-501 ha una dimensione di visualizzazione di 5,6”.

Queste unità FED rappresentano una valida alternativa all'unità operativa manuale della CPX e ai display integrati. Come sistema Client/Server, il terminale riceve i dati dai Webserver collegati e li rappresenta mediante la funzione integrata del Browser.

A pagina seguente è riportato il touch panel utilizzato nel sistema di movimentazione (Fig.6.52), con le sue caratteristiche tecniche (Tab.32).



Figura 6. 52: FED 501

Nella tabella 32, sono stati riportati i dati tecnici più importanti.

Display	LCD monocromatico
Dimensione visualizzazione	5,6"
Risoluzione display	1/4 VGA, 320x240 Pixel
Interfaccia Ethernet	Opzionale, 10 MBd

Tabella 32: Dati tecnici FED 501

Il motivo per il quale è stato inserito tale dispositivo nella stazione di avvitatura, è perché mediante la programmazione di comandi di avvio e di stop, si è cercato di rendere la gestione di tale sistema più semplice e veloce.

Un eventuale operatore per poter mettere in funzione l'impianto non ha bisogno di un particolare addestramento, ovviamente se tale dispositivo non venisse montato il sistema partirebbe solo se l'operatore avviasse il programma scritto i CoDeSys, in tale situazione, è chiaro che l'operatore deve essere addestrato in maniera diversa dal caso precedente.



Nella fase di installazione il touch panel necessita: di un'alimentazione a 24 V DC, la quale è stata prelevata dal modulo elettronico di uscita della CPX e di un cavo Ethernet, il quale è stato collegato dal FED allo switch, presente all'interno dell'impianto.

L'interfaccia Ethernet rende possibile la comunicazione tra FED e PC e grazie all'utilizzo del software Festo FED designer si è programmato il dispositivo e successivamente caricato il programma di funzionamento nel touch panel.

Dopo aver effettuato l'installazione si è passati all'inserimento del componente all'interno della sottorete LAN assegnandoli un indirizzo IP mediante l'FFT, questo ha fatto in modo che il FED potesse essere il quinto slave del robot, come è possibile notare dalla Fig.6.53.

Device name	IP Address	Device type	MAC	Firmware
ROTAZIONE	192.168.100.3	CMMP-AS-M3	00:0E:F0:0C:02:FB	4.0.1501.1.4
ASSEY	192.168.100.2	CMMP-AS-M0	00:0E:F0:1C:01:31	4.0.1501.1.3
CPX-CEC	192.168.100.4	CPX-CEC-M1	00:0E:F0:0A:C4:E3	1.3.10.0.1672
UniOP HW060	192.168.100.5	FED	00:30:D8:01:9A:53	UniOP 5.66A

Figura 6. 53: Assegnazione indirizzo IP FED

Dopo aver introdotto il FED all'interno della sottorete desiderata, lo step successivo è stato quello di assegnare in CoDeSys, delle Global Variables relative ai comandi e agli stati che si vogliono inserire nel programma.

Le variabili globali che sono state assegnate sono le seguenti:

VAR_GLOBAL

(*COMANDI*)

cmd_start: **BOOL**; (*comando di start*)

cmd_stop: **BOOL**; (*comando di stop*)

(*STATI*)

st_start: **BOOL**; (*stato di start*)

st_stop: **BOOL**; (*stato di stop*)

END_VAR

Con le stesse è stato possibile redigere le righe di codice sotto riportate, con la quale si è riusciti ad effettuare lo start e lo stop dell'Handling in qualsiasi momento in cui l'operatore lo desidera.

```
300:IF cmd_start THEN                                (*sequenza del programma che permette al FED*)
    i:=u;                                           (*di utilizzare la funzione di start e stop*)
    st_start:=TRUE; (*questa sequenza permette di fermarsi e di riavviarsi dal punto*)
```




```

st_stop:=FALSE;
END_IF

```

(*in cui si era fermato*)

END_CASE

```

IF cmd_stop THEN
  IF st_start THEN
    st_start:=FALSE;
    st_stop:=TRUE;
    u:=i;
    i:=300;
  END_IF
END_IF

```

(*se il comando stop è presente *)

(*se lo stato dello start è presente*)

(*allora stato di start deve spegnersi *)

(*e lo stato di stop deve accendersi *)

(*vai al passo 300 e ripeti il ciclo *)

Scritto il codice in CoDeSys, si passa alla progettazione e alla programmazione delle schermate mediante il software FED designer. I pulsanti che sono stati inseriti permettono di portare l'operatore a visionare la pagina successiva o a eseguire un comando si start o stop. La prima schermata, è stata pensata come introduzione al lavoro ed è munita di un pulsante Push the Button che pigiandolo consente il passaggio alla seconda schermata.



Figura 6. 54: Prima schermata FED

La seconda schermata consiste in un menù, che come è possibile visionare qui di seguito, consente attraverso tre pulsanti di andare direttamente nella schermata di interesse. Il primo pulsante mi riporta alla terza schermata che mi consente di effettuare l'avvio e lo stop del sistema di movimentazione, mentre il secondo e terzo pulsante forniscono informazioni in millimetri sul posizionamento degli assi durante la movimento.

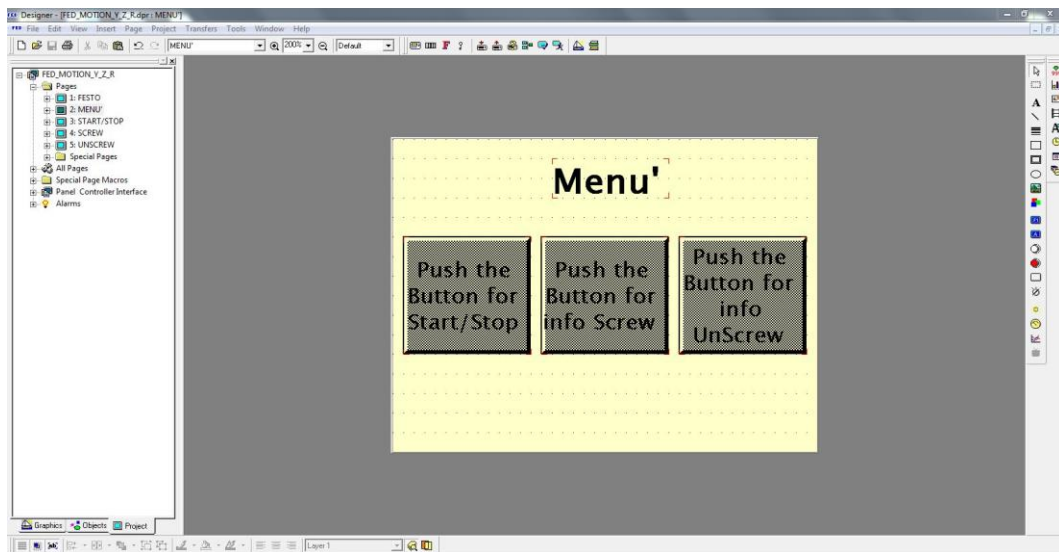


Figura 6. 55: Seconda schermata FED

Per quanto riguarda la terza schermata, sono presenti i pulsanti di start e stop che consentono, applicando una leggera pressione sul Touchscreen, di avviare le righe di codice scritte in precedenza mediante una procedura di richiamo delle variabili globali.

La schermata in questione è la seguente:

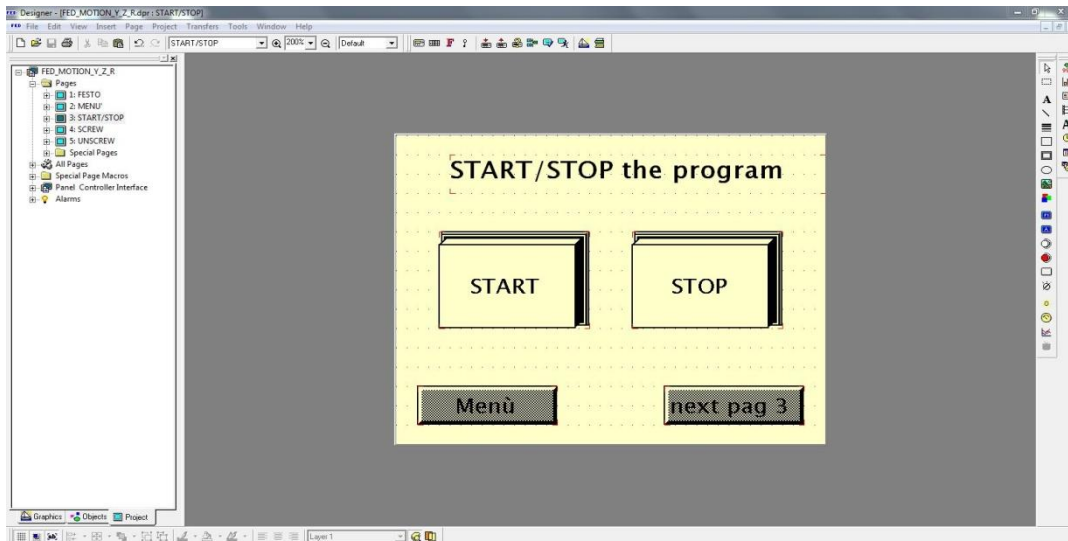


Figura 6. 56: Terza schermata FED

Entrando più nel dettaglio, prendendo in esempio il pulsante di start, per poter richiamare le variabili di stato del programma scritto in CoDeSys, è stato necessario assegnare a ciascun pulsante un'iscrizione di comando `Parameters.cmd_start`, il quale consente nel momento in cui viene premuto il pulsante, di richiamare tale variabile in CoDeSys e far partire in maniera ciclica il programma. Infine per informare l'operatore che il sistema è in movimento, viene assegnato allo stesso pulsante uno stato luminoso mediante l'iscrizione `Parameters.st_start`.



Questa segnalazione risulterà avere la sua massima utilità nel momento in cui il FED dovesse essere ubicato in una posizione lontana rispetto al sistema di movimentazione, in tal caso l'operatore capirà, attraverso questo sistema di illuminazione, che l'impianto è in marcia.

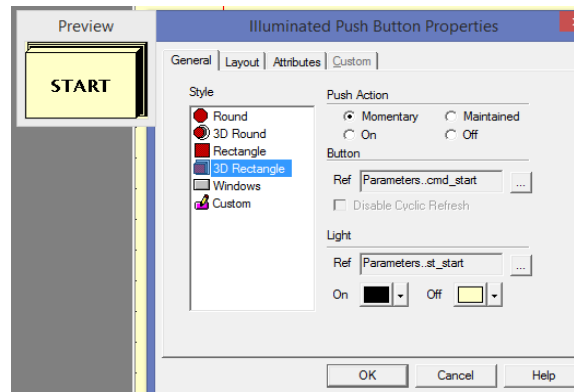


Figura 6. 57: Pulsante di Start retroilluminato

Una volta ultimato il programma, mediante l'icona Transfer è stato possibile selezionare Download e caricare tale programma nel dispositivo. Questo ha permesso di disconnettere il PC e operare con il solo utilizzo del FED, in modo facile sicuro e veloce.

A tal punto per comprendere come effettivamente è stato stilato il programma in CoDeSys per il corretto funzionamento dell'intero sistema, si rimanda la lettura al capitolo 7.

Capitolo 7

PROGRAMMAZIONE DEL PLC IN AMBIENTE

CoDeSys

L'ambiente di sviluppo Codesys (Controlled Development System) permette di implementare automi per il controllo logico utilizzando uno dei linguaggi definiti dalla normativa IEC 61131-3.

Il tool di sviluppo viene utilizzato per due tipologie di applicazioni:

- Per programmare ed eseguire su PC controllori per macchine automatiche, per queste applicazioni Codesys funziona come compilatore di programmi a norma IEC 61131-3, generando un programma eseguibile per l'ambiente di esecuzione real time CoDeSys SP RTE.
- Per programmare sistemi di controllo industriali (come i PLC), per queste applicazioni il costruttore di PLC acquista il programma Codesys con integrato il compilatore e un'interfaccia personalizzata per quello specifico PLC.

Una volta generato il codice di controllo, Codesys integra nel suo ambiente una modalità di funzionamento chiamata Simulation mode, che permette di eseguire il programma sviluppato senza avere né l'ambiente real time, né un vero e proprio PLC.

E' possibile creare una propria interfaccia grafica per interagire con il codice di controllo dove è possibile monitorare in real time il comportamento dell'impianto.

Nel seguente capitolo si andrà a spiegare in linea generale le modalità con la quale è stato possibile configurare il PLC Festo utilizzato, come si è ragionato per poter stilare il programma a hoc per la movimentazione degli assi della stazione di avvitatura e come è stato possibile realizzare la camma elettrica che ha permesso di effettuare l'avvitatura e la svitatura del tappo in questione. Inoltre passo dopo passo si andranno a spiegare le procedure utilizzate per raggiungere l'obiettivo desiderato, cioè stilare un programma che possa rispettare i posizionamenti, velocità e accelerazioni desiderate.

7.1 Definizioni e richiami della norma IEC61131-3

Lo standard IEC 61131-3 è la terza parte di una norma più generale quale la IEC 61131, che fornisce una standardizzazione dei PLC:

IEC 61131-1 Definizione del dispositivo PLC.

IEC 61131-2 Architettura hardware e software dei PLC.



IEC 61131-3 Linguaggi di programmazione per implementare i controlli di sequenze sui PLC.

IEC 61131-4 Linee guida per l'utente.

IEC 61131-5 Descrizione dei servizi di messaggistica.

IEC 61131-6 Comunicazione tramite bus di campo (Fieldbus).

IEC 61131-7 Programmazione di controllo a logica sfumata.

IEC 61131-8 Linee guida per l'applicazione e l'implementazione di linguaggi di programmazione.

Lo standard IEC 1131-3 fornisce una definizione dei linguaggi di programmazione per i controllori a logica programmabile, allo scopo di far evolvere verso una normalizzazione di tali linguaggi. Per la medesima ragione si sono definite una serie di caratteristiche comuni a tutti i linguaggi, relative in particolar modo alla sintassi di dichiarazione di variabili.

7.2 Linguaggi di programmazione

Un aspetto dei controllori industriali tradizionalmente ostile per il progettista è la difformità dei linguaggi di programmazione. Per questo la norma ha inteso disciplinare quest'aspetto definendo cinque linguaggi standard dalle caratteristiche differenti, in grado di coprire tutte le necessità nello sviluppo di un programma di controllo. I linguaggi definiti nella norma IEC 61131-3 sono:

- **Instruction List (IL):** Linguaggio testuale di basso livello, altamente utilizzato per piccole applicazioni o per ottimizzare parti di un'applicazione.
- **Sequential Function Chart (SFC):** E' un linguaggio grafico estremamente espressivo. E' molto usato in quanto permette di partizionare in una sequenza di stati consecutivi l'esecuzione dell'applicativo.
- **Structured Text (ST):** E' un linguaggio testuale strutturato di alto livello, simile al Pascal e al C, creato appositamente per la programmazione automatizzata di processi. Viene generalmente usato per implementare complesse procedure non facilmente esprimibili attraverso linguaggi grafici.
- **Ladder Diagram (LD):** Linguaggio grafico che implementa una logica booleana servendosi di schemi elettrici.
- **Function Block Diagram (FBD):** E' un linguaggio grafico, basato sull'interpretazione del comportamento del sistema in termini di flusso dei segnali tra gli elementi del processo (analogia con il diagramma dei flussi di segnali all'interno di un circuito elettronico).

Il linguaggio di programmazione che è stato utilizzato per stilare il programma di movimentazione assi è Structured Text, mentre la logica grafica che vi è dietro ST risulta essere rappresentata in CEC, con la quale si vanno a richiamare una serie di blocchi nelle rispettive librerie Soft Motion. Quanto appena detto può essere visto nei paragrafi successivi.



7.3 Ambiente CoDeSys: Struttura e programmazione

Una volta installato il tool di sviluppo si può vedere come esso presenti più programmi al suo interno, il principale è Codesys V2.3 all'interno del quale è possibile sviluppare e simulare il codice per il controllo di sistemi industriali secondo la norma IEC 61131-3. Il pacchetto comprende anche:

- il programma Configuration che serve per configurare i server.
- l'interfaccia ENI che permette di connettere l'ambiente di programmazione CoDeSys a un database esterno, in modo che i dati possano essere eventualmente condivisi in più progetti o programmi, come è stato visto precedentemente con i programmi FESTO.
- il programma CoDeSys SP RTE è utilizzabile per esecuzioni in real time .
- il sistema run time HMI per le esecuzioni di visualizzazioni grafiche create in ambiente CoDeSys.

Nel tool di sviluppo con il termine Progetto s'intendono tutti gli oggetti necessari per la stesura del programma da caricare nel PLC, gli oggetti sono: POU (Program Organization Unit), tipi di dato definiti dall'utente, la parte di visualizzazione, risorse e librerie. Ciascuna POU consiste di una parte di dichiarazione e da una parte centrale scritta secondo uno dei linguaggi previsti dalla norma IEC, per poter utilizzare questi linguaggi è però necessario caricare la libreria standard.lib nel progetto; una POU può chiamare un'altra POU ma non è ammessa ricorsione.

Seguendo passo dopo passo, appena si è lanciato il programma di default la nuova POU risulta essere un Program in linguaggio CFC con nome PLC_PRG, se non verranno cambiate le impostazioni nella configurazione del progetto nella Task configuration l'unica POU eseguita automaticamente dal sistema sarà proprio il Program col nome PLC_PRG, tutte le altre POU saranno eseguite solo se richiamate esplicitamente.

La schermata di CoDeSys si presenta divisa in due parti, nella parte destra viene visualizzata la finestra collegata all'elemento selezionato; nella parte sinistra viene visualizzato il Browser di progetto, costituito da quattro sotto schermate che sono selezionabili cliccandoci sopra nella parte in basso a sinistra, come sarà possibile visionare nelle prossime Figure. I quattro oggetti che compongono il browser di progetto sono:

- POU: elenco delle unità di programma (Program Organization Unit), distinte come specificato dalla norma IEC 61131-3 in Program (PRG), Function(FC) e Function Blocks(FB), vedi la Fig.7.1

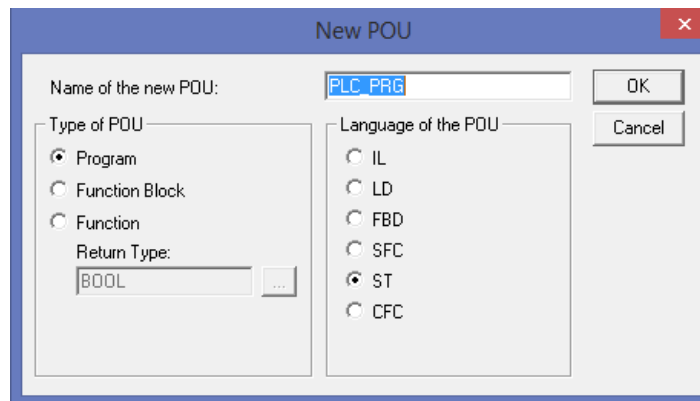


Figura 7. 1: POU

- Data types: elenco dei tipi di dato definiti dall'utente.
- Visualizations: elenco dei pannelli grafici di visualizzazione.
- Resource: elenco dei menù di configurazione degli elementi comuni del progetto come variabili globali, tasks di esecuzione, librerie, configurazione del sistema, PLC Target, vedi Fig.7.2.

In qualsiasi momento è possibile selezionare una delle quattro finestre che compongono il browser di progetto. In POU è presente tutto l'elenco dei programmi presenti nel progetto, se si vuole aggiungere una nuova unità basta cliccare su POU e selezionare Add object, così è possibile selezionare in che linguaggio scrivere il nuovo programma. Nel caso del robot di avvitatura, si è scritto inizialmente un programma in CFC chiamato PLC_PRG e successivamente si è aggiunto un secondo programma chiamato Motion Control in ST. CoDeSys offre anche la possibilità di convertire un programma scritto in un linguaggio in un altro linguaggio, questo è possibile cliccando sulla POU e selezionando Convert object, apparirà una finestra dove si selezionerà il linguaggio in cui convertire il programma ed il nuovo nome; la POU PLC_PRG una volta definito il linguaggio non può essere convertita.

Per utilizzare i linguaggi standard per scrivere i programmi, bisogna caricare le librerie che supportano questi linguaggi, per inserirle bisogna andare nella finestra Resource e selezionare cliccando due volte Library Manager. Nella parte destra compare una schermata simile alla schermata principale di CoDeSys, ma che mostra l'elenco delle POU programmate che si possono inserire nel progetto (timer, contatori, registri, ecc.) mostrando sia le dichiarazioni delle variabili sia l'aspetto grafico dell'oggetto visibile quando s'inserisce durante la programmazione nei linguaggi LD e FBD. Per inserire delle nuove librerie bisogna cliccare col tasto destro nella sotto finestra in alto dove è presente l'elenco delle librerie, e selezionando Additional Library è possibile inserire ulteriori librerie nel progetto scegliendo un file con estensione .LIB. Il progetto per lo sviluppo di un sistema di controllo all'interno di CoDeSys può essere pensato diviso in due programmi principali, uno è il programma che si occupa del controllo logico scritto in CEC mentre il secondo programma viene scritto in



linguaggio strutturato. Le librerie che sono state implementate nel progetto considerato sin ora sono delle library MOTION.

I due programmi sviluppati dovranno interagire tra loro, quindi le variabili dovranno essere definite globali, le uniche variabili locali saranno quelle che vengono utilizzate soltanto all'interno di un programma e che non devono leggere o scrivere sugli ingressi/uscite del sistema. L'unico programma che viene eseguito di default è quello chiamato PLC_PRG, bisogna quindi configurare il sistema in modo che esegua entrambi i programmi. Per fare questo bisogna modificare il progetto andando a selezionare la finestra Resources e selezionando l'opzione Task configuration, cliccandoci sopra due volte, e poi cliccando col tasto destro su Task configuration quello nella parte destra dello schermo, non sul browser di progetto. Una volta selezionato il comando Append Task e definito un nuovo task, chiamato Main come nella Figura 7.2, bisogna configurare gli attributi del task e inserire da qui tutti i programmi che si vogliono eseguire su quel task attraverso il comando Append program call.

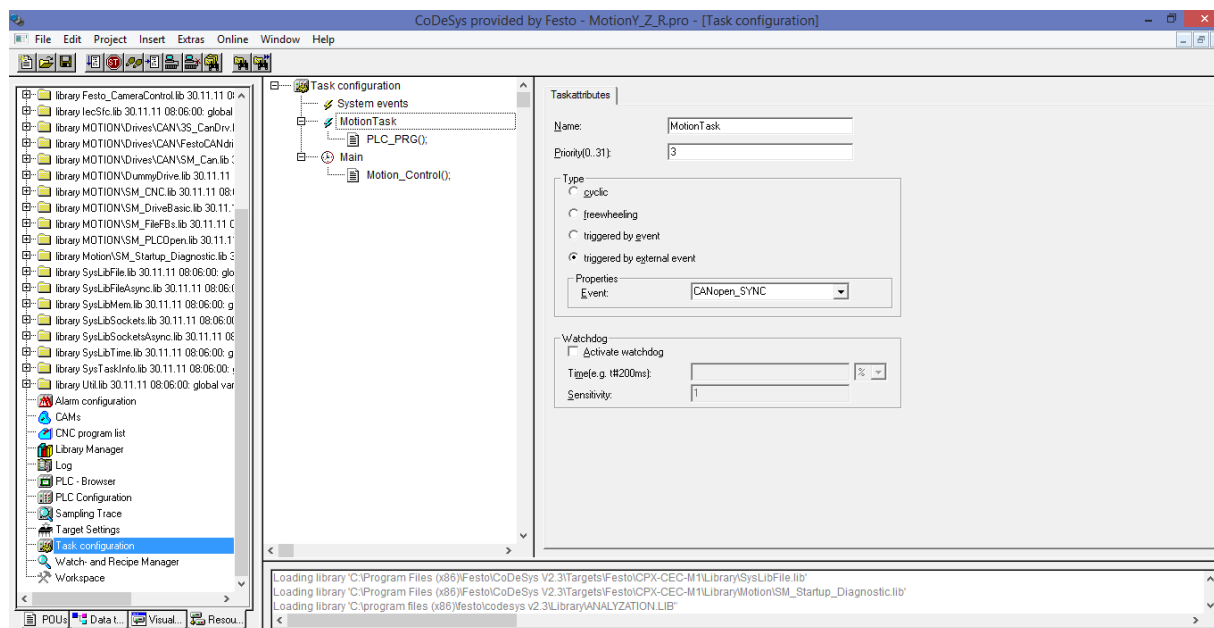


Figura 7. 2: Task Configuration

7.3.1 Linguaggio di programmazione CFC

Il linguaggio CFC (Continuous Function Chart) è un linguaggio introdotto da CoDeSys ma non è presente nella norma IEC 61131-3. Questo linguaggio può essere definito anche come FreeFBD, infatti è analogo al linguaggio FBD della norma, ma permette di inserire liberamente i vari blocchi in qualsiasi punto dell'editor. Questa proprietà permette di creare diagrammi più complessi e di inserire anche delle retroazioni in maniera diretta.

Nel diagramma si possono inserire tutti i tipi di blocchi già esistenti nel linguaggio FBD e anche tutti i blocchi che sono creati dall'utente insieme a input, output, return, commenti e didascalie. Le linee di connessione tra gli input e gli output dei vari blocchi sono disegnate



automaticamente trascinando il mouse. sarà sempre disegnata la connessione più corta possibile tenendo conto delle connessioni già disegnate, dei blocchi già inseriti e degli spazi liberi presenti.

7.3.2 CFC movimentazione assi

Nella stazione di avvitatura è stato fatto un programma in CEC chiamato PLC_PRG, nella quale sono stati richiamati diversi blocchi funzionali tra l'MC_Power, all'MC_Home, all'MC_MoveAbsolute.

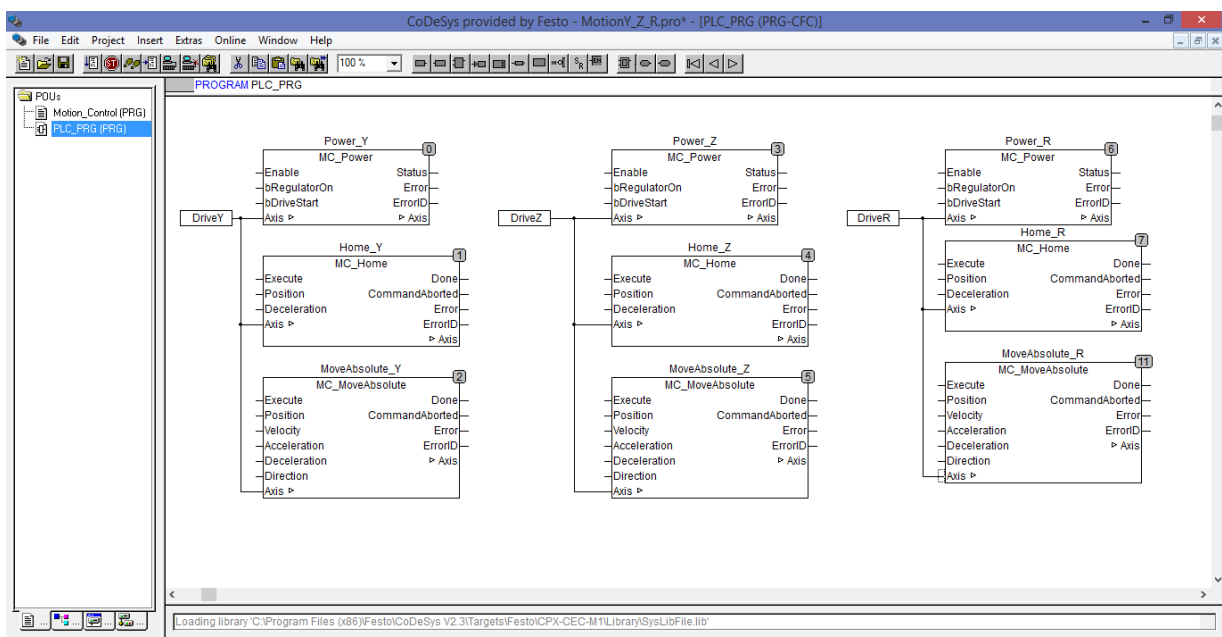


Figura 7. 3: CEC in CoDeSys

Come è possibile notare dalla Figura 7.3, per ogni singolo asse Y,Z e R sono stati aggiunti tre blocchi richiamati dalla libreria Motion, i quali hanno compiti differenti.

Il primo blocco inserito è MC_Power, il quale è stato inserito per portare l'alimentazione ai vari motori che movimentano i vari assi, di seguito riporto tale blocco:

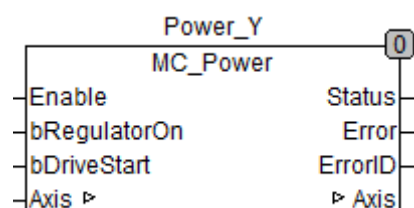


Figura 7. 4: MC_Power



Questo blocco funzione, è parte della libreria SM_PLCOpen.lib, controlla l'ON/OFF della potenza e lo stato dei freni del convertitore.

Come è possibile notare dalla figura ci sono diversi Input e Output da gestire.

Enable : BOOL (Default: FALSE) → Finché questa variabile è TRUE, il blocco è attivo

bRegulatorOn : BOOL (Default: FALSE) → ON/OFF di regolazione.

bDriveStart : BOOL (Default: FALSE) → Si applica per rilasciare il freno nel drive.

In-/Output (VAR_IN_OUT) del blocco funzione:

Axis: AXIS_REF → Qui la struttura è passata, è stata compilata l'interfaccia dell'azionamento con i dati dell'asse.

Le uscite del blocco funzione:

Status: BOOL (Default: FALSO) → Indica se l'unità è attualmente TRUE o FALSE.

Error: BOOL (Default: FALSO) → TRUE indica un errore nel blocco funzionale.

ErrorID: INT → numero di errore

Il secondo blocco inserito è MC_Home, il quale è stato inserito per effettuare l'Homing, bensì ogni qual volta l'impianto venisse spento nella fase di avvio i vari assi dovranno trovare un punto di riferimento dimensionale, dove nel caso in questione era 0,0. Da questo punto di riferimento attraverso la scrittura del programma in ST si fornisce agli assi l'informazione di quanto devono spostarsi tenendo come riferimento l'homing. Di seguito riporto tale blocco:

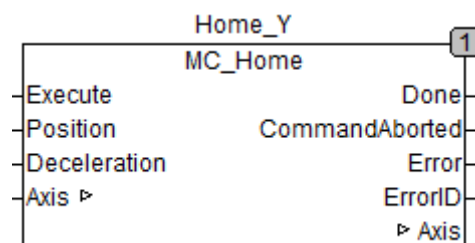


Figura 7. 5: MC_Home

Una volta che il blocco restituirà Done uguale a TRUE allora sapremo che l'Homing è stato effettuato con successo. Gli ingressi del blocco funzione:

Execute: BOOL (Default: FALSO) → In un fronte di salita su questa variabile sarà avviato il movimento del disco.

Posizione: REAL → Posizione assoluta dell'unità quando viene rilevato il segnale di riferimento.

Le uscite del blocco funzione

Done: BOOL (Default: FALSO) → Se TRUE, l'homing è stato terminato e l'unità è in stato di fermo.

CommandAborted: BOOL (Default: FALSO) → Questa variabile diventa TRUE se il



comando viene interrotto da un altro.

Errore: BOOL (Default: FALSO) → Questa variabile diventa TRUE quando si è verificato un errore nel blocco funzionale.

ErrorID: INT → numero di errore

L'ultimo blocco utilizzato risulta essere il responsabile della vera e propria movimentazione degli assi e cioè MC_MoveAbsolute, come è possibile notare nella Figura seguente.

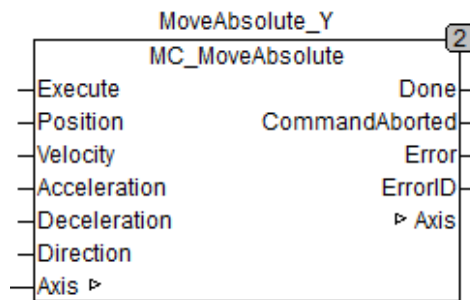


Figura 7. 6: MC_MoveAbsolute

Questo blocco funzione, è parte della libreria SM_PLCOpen.lib, il compito è quello di spostare l'asse in una posizione assoluta secondo i valori di velocità, accelerazione e decelerazione definiti. In-/Output (VAR_IN_OUT) del blocco funzione:

Axis: AXIS_REF → l'interfaccia azionamento (Drive_Basic.lib).

Ingressi del blocco funzione:

Execute: BOOL (Default: FALSO) → In un fronte di salita su questa variabile il modulo inizierà il movimento.

Posizione: REAL → Obiettivo posizione per il movimento.

Velocity: REAL → Valore della velocità di destinazione (non necessariamente da raggiungere)

Accelerazione: REAL → Accelerazione desiderata (aumentando l'energia del motore)

Decelerazione: REAL → Decelerazione desiderata (diminuzione di energia del motore)

nDirection: MC_Direction (Default: più breve) → Questa fornisce la direzione desiderata; rilevante solo per gli assi.

Le uscite del blocco funzione:

Done: BOOL (Default: FALSO) → Questa variabile diventa TRUE appena raggiunta la posizione comandata.

CommandAborted: BOOL (Default: FALSO) → Questa variabile diventa TRUE appena il movimento comandato è interrotto.

Errore: BOOL (Default: FALSO) → Questa variabile diventa TRUE quando si è verificato un errore nel blocco funzionale.

ErrorID: INT → numero di errore.



7.3.3 CFC Camma elettrica

Sempre mediante la programmazione in CFC è stato possibile inserire dei blocchi logici importati dalla libreria Motion.lib, per la costruzione della camma elettrica, la quale vede un master che risulta essere Drive Z e uno slave, che insegue costantemente il master che risulta essere il Drive R. Sono stati utilizzati diversi blocchi con funzioni differenti, tra cui la CamTable, il CamIn e il CamOut, che successivamente spiegheremo in questo paragrafo. Di seguito lo schema logico della camma in CFC.

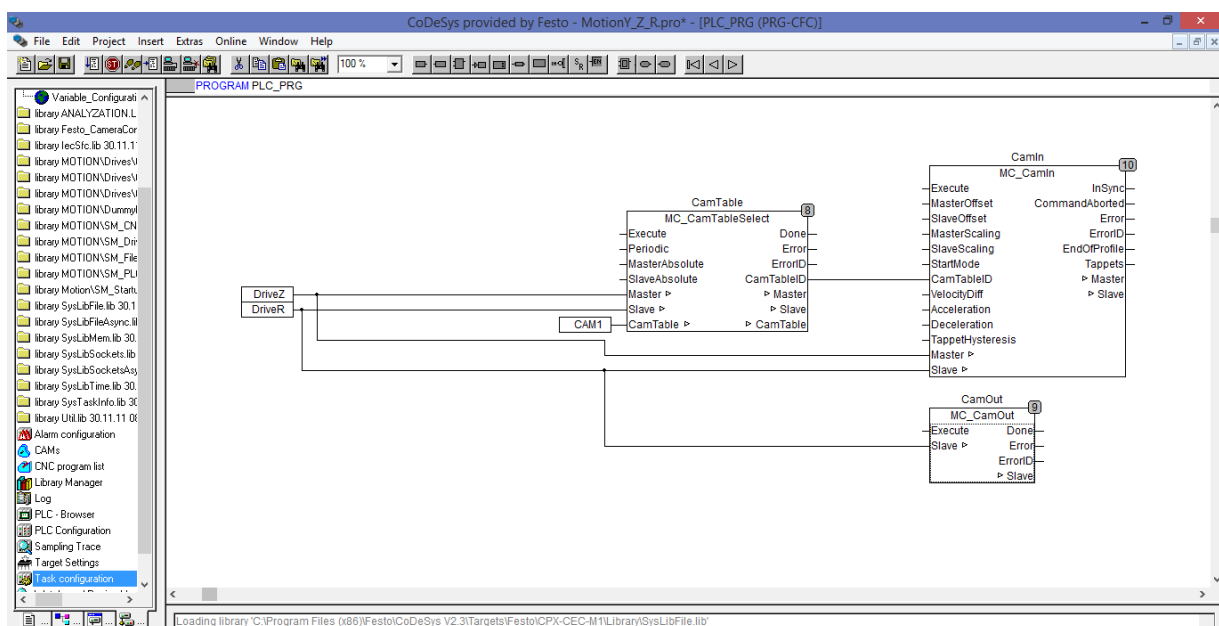


Figura 7.7: Camma elettrica in CFC

A tal punto vengono elencati i maggiori responsabili per la realizzazione della camma elettrica. Dalla libreria SM_PLCOpen.lib sono state importate i tre blocchi funzione visibili nella Figura 7.7, l'MC_CamTableSelect, l'MC_CamIn e l'MC_CamOut.

Con la CamTableSelect è possibile selezionare una CAM, determinare gli assi master e gli assi slave ed effettuare a essi alcune pre-impostazioni. L'oggetto CamTableID che è disponibile come uscita, in seguito sarà trasmesso al MC_CamIn modulo CAM. L'asse master può essere virtuale, ciò significa che può non esistere fisicamente. Se la variabile bRegulatorOn è TRUE, saranno utilizzati i valori di riferimento dell'asse master, altrimenti i valori reali. La CAM può essere creata nell'editor CAM integrato nel CoDeSys mediante il "Softmotion CAM-Editor".

Le variabili MasterAbsolute e SlaveAbsolute devono fare riferimento agli spostamenti assoluti degli assi da movimentare.

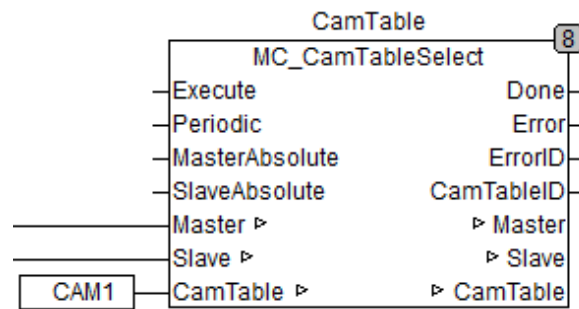


Figura 7. 8: MC_CamTableSelect

In-/Outputs (VAR_IN_OUT) del modulo:

Master: **AXIS_REF** → asse master.

Slave: **AXIS_REF** → asse slave.

CamTable: **MC_CAM_REF** → Descrizione della CAM

Ingressi del modulo:

Execute: **BOOL** (Default: FALSO) → Al fronte di salita del modulo TRUE, sceglie una nuova CAM.

Periodico: **BOOL** (Default: VERO) → periodico CAM / non-periodica.

MasterAbsolute: **BOOL** (Default: VERO) → CAM si riferisce alla posizione assoluta con riferimento alla posizione dell'Execute di CamIn.

SlaveAbsolute: **BOOL** (Default: VERO) → CAM si riferisce alla posizione assoluta con riferimento alla posizione dell'Execute di CamIn.

Le uscite del modulo:

Done: **BOOL** (Default: FALSO) → TRUE indica che la distanza desiderata è stata raggiunta

Errore: **BOOL** (Default: FALSO) → TRUE indica che si è verificato un errore nel blocco funzionale.

ErrorID: **SMC_Error (INT)** → numero di errore.

CAMTableID: **MC_CAM_ID** → Serve come input per l'ingresso all'MC_CamIn.

Il secondo blocco che andiamo a considerare è MC_CamIn, fornito dal SM_PLCOpen.lib libreria, con esso è possibile realizzare una CAM che è stata selezionata da MC_CamTableSelect.

Per un corretto collegamento logico, l'uscita CamTableID dell'MC_CamTableSelect va portata all'ingresso CamTableID dell'MC_CamIn. Mentre DriveZ e DriveR andranno collegati rispettivamente al Master e allo Slave, come è possibile notare dalla Fig.7.7.

L'MC_CamIn ha come scopo primario quello di attivare la Camma elettrica quando lo si desidera, ovviamente tutte queste funzione vengono richiamate in modo preciso nel codice scritto in linguaggio strutturato. Nella Fig.7.9 è stato riportato il blocco funzionale succitato.

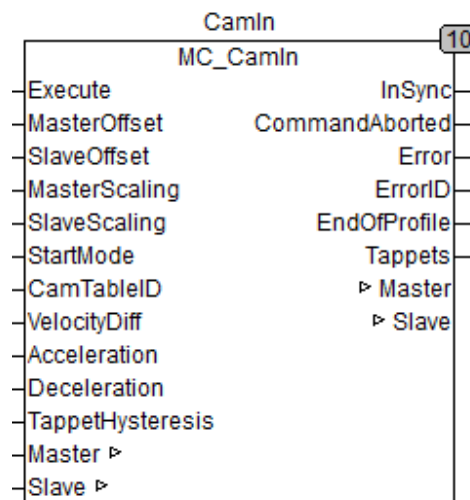


Figura 7. 9: MC_CamIn

In-/Outputs (VAR_IN_OUT) del modulo:

Master : AXIS_REF → Asse Master

Slave: AXIS_REF → asse Slave

Ingressi del modulo:

Execute: BOOL (Default: FALSO) → Quando è TRUE inizia il movimento

MasterOffset: LREAL (Default: 0) → Offset aggiuntivo sulla posizione master

SlaveOffset: LREAL (Default: 0) → offset aggiuntivo sulla posizione slave

StartMode: MC_StartMode (Default : assoluto) → Avvio della camma CAM dalla posizione assoluta.

CamTableID: MC_CAM_ID → Uscita di MC_CamTableSelect

Velocity, Acceleration, Deceleration: LREAL(Default:0) → velocità addizionale, accelerazione, decelerazione

TappetHysteresis: LREAL (Default: 0) → Larghezza della banda del ciclo di isteresi.

Le uscite del modulo:

InSync: BOOL (Default: FALSO)

TRUE indica che il movimento sia sulla CAM

CommandAborted: BOOL (Default: FALSO) → Il movimento è iniziato ma è stato interrotto da un altro blocco funzione

Errore: BOOL (Default: FALSO) → TRUE indica un errore nel blocco funzionale

ErrorID: SMC_Error (INT) → numero di errore

EndOfProfile: BOOL → Indica la fine di una CAM.

Infine abbiamo il blocco funzionale MC_CamOut, il cui scopo principale è quello di disattivare la funzione CAM1 quando lo si desidera, per gestire tale blocco verranno richiamate particolari istruzioni all'interno del codice. Nel CamOut, come è possibile notare dalla Figura 7.7, viene collegato solo il DriveR allo Slave, questo permette di dire che una



volta che viene dato il comando Execute per attivare il CamOut e quindi disattivare la CAM1, viene restituito un Done a TRUE che comunica l'avvenuto sgancio dello Slave dal Master e quindi la disconnessione della Camma dal sistema di movimentazione, di seguito è riportato il blocco funzionale:

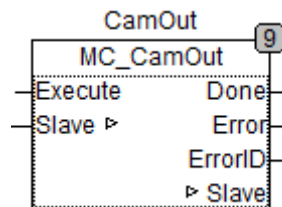


Figura 7. 10: MC_CamOut

Sin ora è stata fatta una spiegazione doverosa sui vari blocchi funzionali, Com'è possibile notare dalla Fig.7.7, in uno degli ingressi della CamTable è presente una costante chiamata CAM1, questa fornisce al sistema il profilo di movimentazione della camma. Per disegnare tale profilo, bisognerebbe andare in Resources e cliccare due volte l'icona CAMs, a tal punto bisogna creare la camma di interesse che nel caso in questione è CAM1 e settare i parametri di camma dalla seguente schermata:

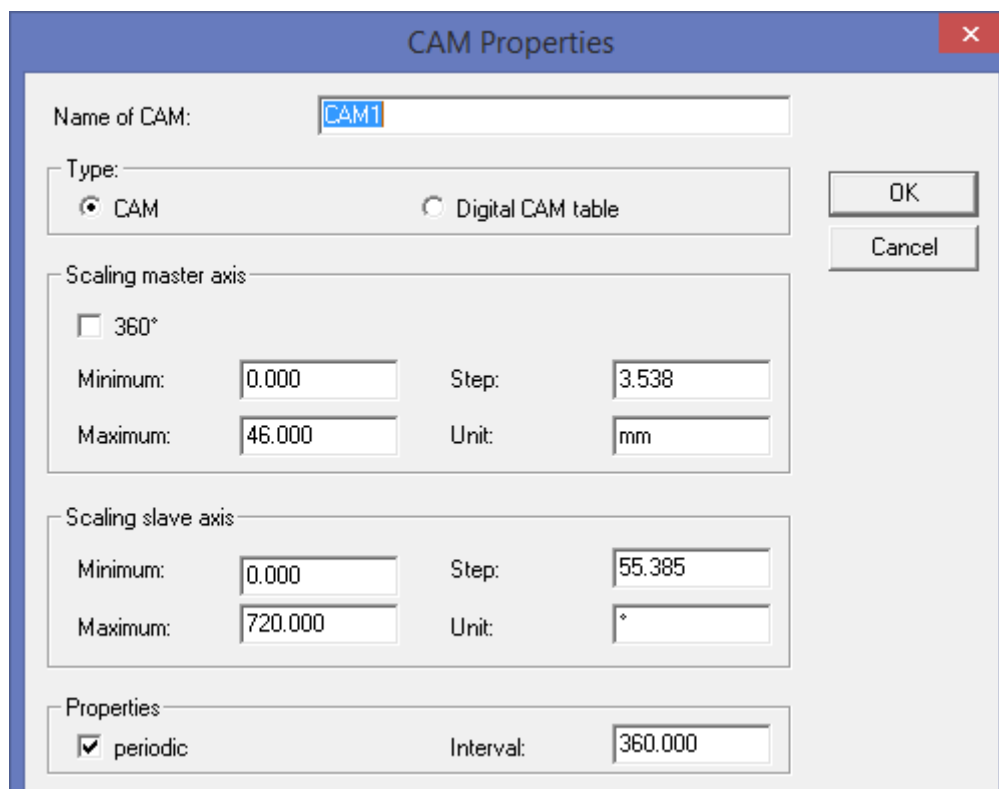


Figura 7. 11: CAM Properties

Da tale figura si può notare come è stata settata la camma, andando a parametrare sia il master sia lo slave. Il successivo step risulta essere quello di dover disegnare il profilo di camma,



considerando che la camma mi permette il movimento contemporaneo della discesa e della rotazione, simulando in pratica il movimento di una mano che si presta a chiudere un tappo di bottiglia.

La camma è stata inserita nel punto $Z=5$ e $Y=280$, la prima parte del profilo di camma fino a 35mm rimarrà a zero, quindi significa che effettivamente la camma è pronta per scendere e avvitare ma essendo il profilo a zero fino alla suddetta quota si noterà solo la discesa dell'asse Z con la rotazione ferma, da 35mm a 46mm ci sarà la vera e propria fase di avvitatura.

Com'è possibile notare dalla Fig.7.9 da 35mm lo slave seguirà il master per quanto riguarda l'avanzamento, mentre la semiparabola concava determinerà il numero di giri da effettuare per concludere l'avvitatura del tappo, che in tal caso espresso in gradi risulterà eseguire 720° .

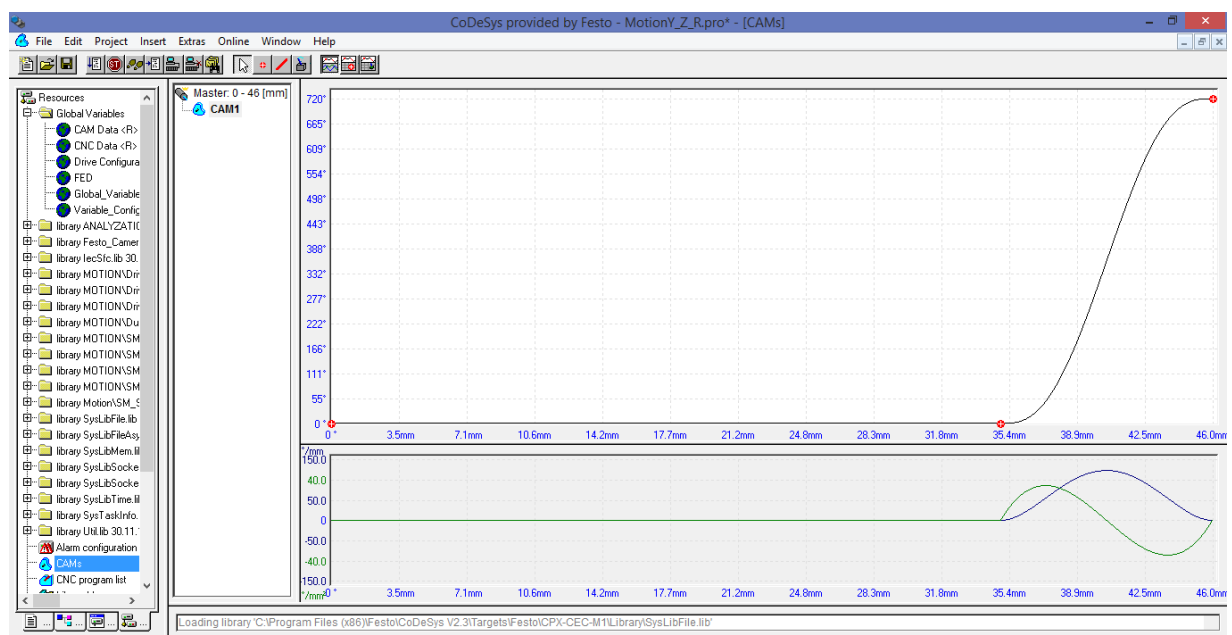


Figura 7. 12: Profilo di Camma CAM1

Una volta effettuata l'avvitatura mediante il profilo di camma, si è riscontrata una difficoltà rilevante. Dato che il sistema in questione essendo dimostrativo, è stato pensato di eseguire non solo l'avvitatura ma anche la svitatura, allora, quello che si è pensato inizialmente era quella di creare una nuova camma CAM2 che funzionasse in modo inverso. Bensì, la camma doveva essere concettualmente attivata nella fase di salita e non di discesa, quindi dal punto $Z=46$ e $Y=280$, fino a $Z=5$. Si è riscontrata un'impossibilità computazionale, poiché non era possibile disegnare un profilo di camma inverso che andasse da 0° a -720° , compiendo una rotazione antioraria.

Dopo diversi tentativi effettuati per trovare la strada corretta, si è cercata di percorrere la strada più semplice andando a considerare sempre lo stesso profilo di camma, ma attivandola in punti diversi, mediante il programma in ST.

Nella fase di avvitatura come già detto la camma, era attivata a $Z=5$ e disattivata a $Z=46$, mentre nella fase di svitatura esattamente l'opposto, attivata a $Z=46$ e disattivata a $Z=5$



mediante le funzioni CamIn e CamOut, che ritroveremo nella scrittura del codice. Così facendo si è riscontrato che pur mantenendo la stessa camma, attivandola in punti diversi la lettura del profilo avveniva, per l'avvitatura da sinistra verso destra ma per la svitatura da destra verso sinistra, vedi Fig.7.12.

Nella medesima figura, oltre al profilo di camma che è possibile disegnare in base alle proprie esigenze, vi è un calcolo dell'andamento grafico della velocità e dell'accelerazione a cui sarà soggetta la camma elettrica.

7.4 Editor visualizzatore grafico

Terminato il programma in CFC, attraverso la Visualizations del programma CoDeSys è possibile inserire delle schermate che permettono di osservare in tempo reale cosa avviene nei blocchi funzione descritti nei paragrafi precedenti, mentre il codice è in run e quindi l'handling si sta muovendo.

La finestra sarà divisa in due parti, nella parte destra è presente lo spazio per collocare le schermate grafiche, mentre nella parte sinistra è presente il browser di progetto dove è posta la lista delle POU.

Per la creazione di una schermata grafica, si utilizza una procedura semplice e veloce, che può essere estesa a tutte le finestre successive. Si apre la parte sulla Visualizations nel browser CoDeSys e nella parte sinistra con il tasto destro del mouse si seleziona Add Object, a tal punto si dà il nome alla finestra dentro la quale si inseriranno le schermate grafiche. A tal punto sulla parte destra attraverso gli opportuni strumenti si andrà a rappresentare un rettangolo vuoto sul quale cliccando due volte su di esso permetterà l'apertura di una finestra che consentirà di associare un blocco funzione a quel preciso rettangolo. La schermata sotto riportata, estratta a titolo d'esempio dal progetto della stazione di avvitatura, ha il compito di chiarire le idee su come sia possibile associare il blocco funzione ad un rettangolo.

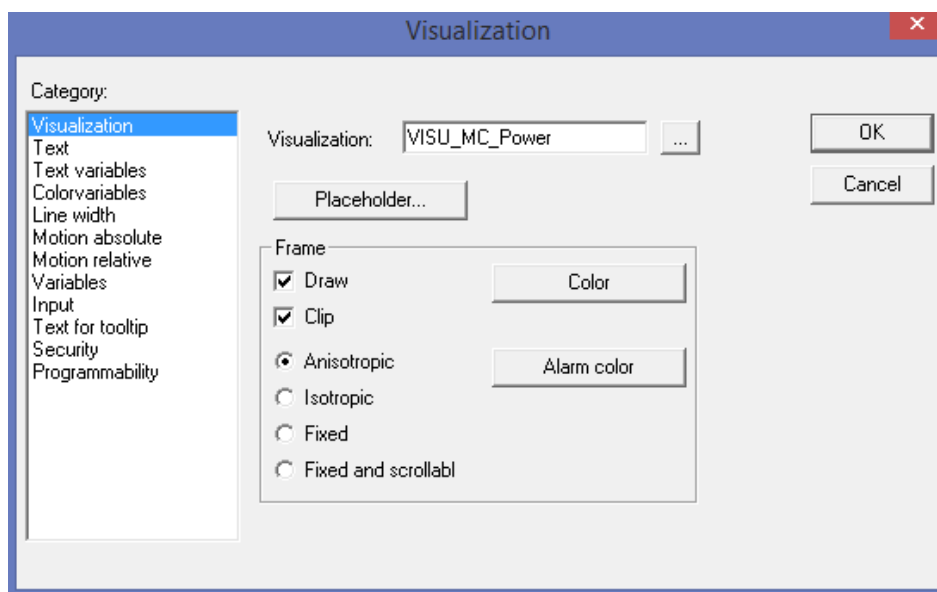


Figura 7. 13: Assegnazione Visualizations all'MC_Power



Facendo riferimento alla Fig. 7.13 è stato possibile associare al rettangolo rappresentato il blocco funzione MC_Power e con esso sarà possibile visualizzare i vari stati.

Di seguito inserisco la schermata completa del programma motion, creato ad hoc per il sistema di avvitatura in fase di movimentazione.

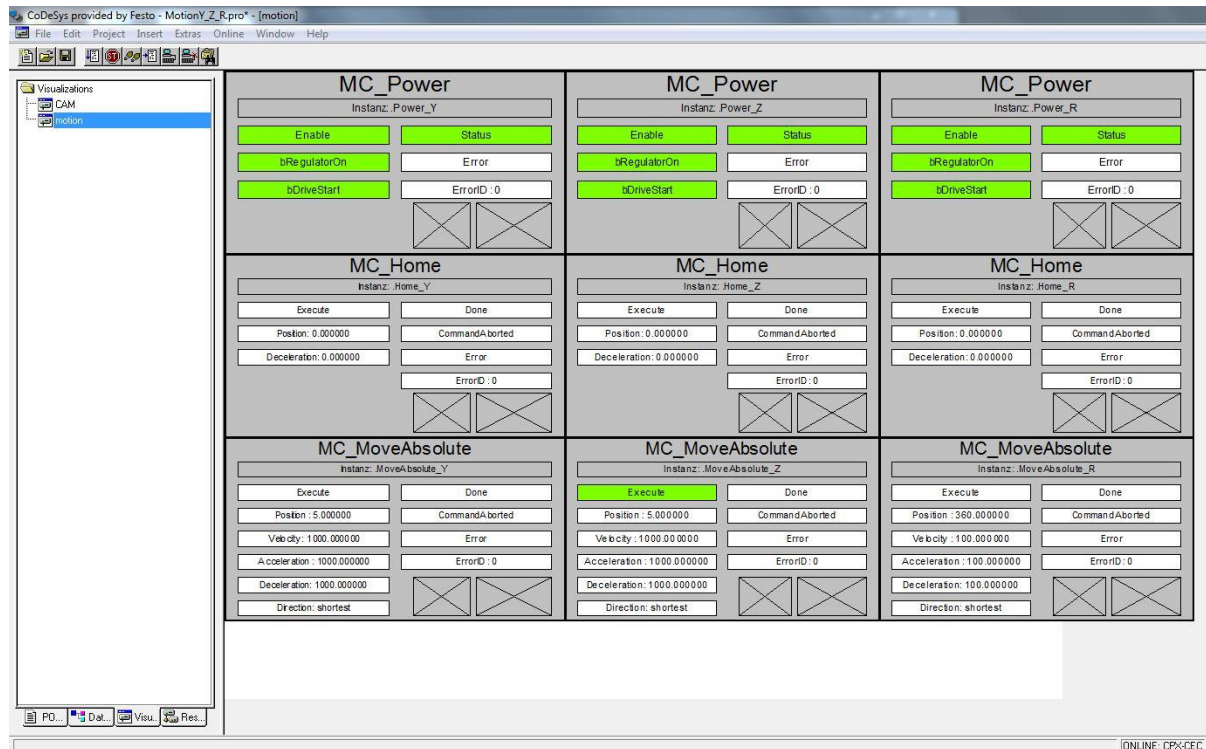


Figura 7. 14: Schermata completa Visu

Dalla figura sopra riportata si evince che tutti i motori e quindi gli assi sono abilitati per il movimento, in quanto vi è la presenza dell'alimentazione. Tale informazione ci viene data dai primi tre blocchi MC_Power che si riferiscono rispettivamente all'asse Y, Z, R.

Inoltre il pulsante verde Execute dell'MC_MoveAbsolute ci fornisce l'informazione che l'asse Z risulta essere in movimento, appena si illuminerà il Done del medesimo blocco allora l'informazione che ci restituirà e che l'asse Z ha concluso la movimentazione impostata dal codice scritto in linguaggio strutturato.

Come è possibile notare sono presenti tutte le schermate grafiche con tutti gli ingressi e le uscite, descritte in precedenza per i blocchi funzione nel linguaggio di programmazione CFC.

Inoltre queste schermate non sono schermate di sola visualizzazione ma è possibile anche forzare alcuni ingressi come l'Enable o l'Execute, andandoci a cliccare sopra con il puntatore del mouse.

L'ultima precisazione che va fatta è che, il sistema prima di effettuare qualsiasi movimento in fase di accensione dell'impianto esegue la procedura di Homing, bensì tutti gli assi si portano alla posizione $Z=0$ e $Y=0$.



Infine la stessa procedura è stata utilizzata per creare la finestra di visualizzazione e monitoraggio della Camma Elettrica, al fine di fornirci l'informazione dell'inserimento e del disinserimento del CAM1 nel sistema di movimentazione. Tale schermata è possibile visionarla dalla Figura 7.15.

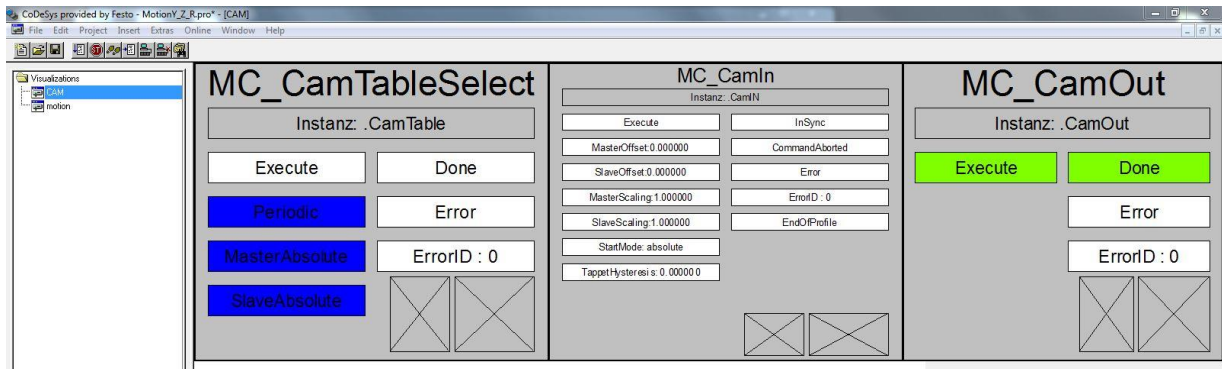


Figura 7. 15: Visualizations Camma Elettrica

La seguente schermata mostra la presenza dei blocchi funzione importati dalla libreria Motion nel linguaggio di programmazione CFC, a partire dall'MC_CamTableSelect, all'MC_CamIn e per concludere all'MC_CamOut.

Tale schermata ci informa che il Master e lo Slave sono attivi e che in questo preciso instante l'asse Z ha eseguito il CamOut e sta restituendo l'informazione, attraverso l'illuminazione del Done, dell'avvenuta uscita della Camma. Lo screenshot dello schermo è stato fatto in fase di esecuzione, il motivo per il quale si ha sia l'Execute che il Done accesi e che la fase del CamOut risulta essere molto veloce, quindi si è fotografato l'istante in cui sono accesi entrambi, ma effettivamente dovrebbe essere acceso o uno o l'altro.

7.5 Scrittura del Codice in CoDeSys per il Motion

Effettuata la parametrizzazione dei componenti in FCT, vedi capitolo 6, si è passati alla programmazione logica in CoDeSys attraverso i blocchi funzionali importati dalle librerie motion in CFC, come spiegato nei paragrafi precedenti.

Inseriti i blocchi funzionali nel programma PLC_PRG, si è aggiunta la parte inerente alla visualizzazione interattiva dei blocchi appena citati al fine di comprendere e monitorare i vari stati del sistema, dalla potenza, all'homing, alla movimentazione e infine al monitoraggio della camma elettronica.

Per poter scrivere il codice bisogna andare nella sezione della POU e cliccando il tasto destro del mouse è stato selezionato Add Object, così facendo è stato possibile selezionare il codice che si è voluto scrivere e selezionare il tipo di linguaggio di programmazione da utilizzare, che nel caso in questione risulta essere, come già accennato in precedenza, **Structured Text (ST)** che è un linguaggio di programmazione strutturato. Per poter scrivere tale codice, la logica che è stata seguita è quella di ricreare mentalmente tutte le procedure step by step che servono per



arrivare al fine voluto, cioè avere un corretto profilo di motion che mi consentirà di avvitare e svitare il tappo di bottiglia. Prima di iniziare a scrivere il codice si è studiato nel dettaglio il profilo di movimentazione con i vari passi che gli assi dovranno compiere durante il loro movimento. Di seguito si cercherà di spiegare passo dopo passo le varie movimentazione che dovranno compiere gli assi, si veda la Fig.7.16:



Figura 7. 16: Ciclo di Avvitatura e Svitatura

1. Fatto l'Homing, la prima movimentazione sarà quella in cui l'asse Z si porterà dalla posizione $Z=5\text{mm}$ alla posizione $Z=280\text{mm}$, l'asse Y rimarrà nella posizione $Y=5\text{mm}$, in questa prima fase le griffe della pinza saranno aperte al fine di ospitare, nel passo successivo il tappo.
2. Arrivati alla posizione $Z=280\text{mm}$ e $Y=5\text{mm}$, si dovrà comandare l'elettrovalvola mediante l'uscita della CPX, l'operando che determina la chiusura o l'apertura del pezzo risulta essere $\%QX0.0$ BOOL, il quale è stato rinominato presa_pezzo, quindi ogni qual volta all'interno del codice si richiamerà tale istruzione, si andrà ad agire sulla pinza. Tale istruzione si trova all'interno della sezione Resources in PLC Configuration (vedi Fig. 7.17).

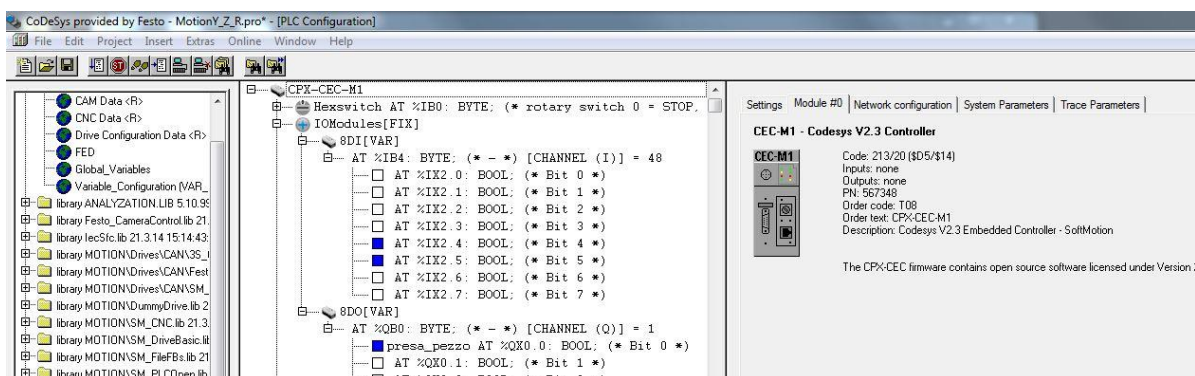


Figura 7. 17: presa_pezzo PLC Configuration

3. Una volta preso il tappo l'asse Z dovrà tornare nella posizione $Z=5$ con $Y=5$.



4. A tal punto gli assi dovranno avvicinarsi alla bottiglia, per poterlo fare dovranno raggiungere i seguenti posizionamenti, $Z=5$ e $Y=320$. In tale posizione mi ritrovo la pinza sopra la bottiglia.
5. In $Z=5$ e $Y=320$, si è inserita la camma elettrica, dove si è pensato di farla scendere senza rotazione fino a $Z=35$ mm, distanza che permette al tappo di essere appena sopra il bordo superiore del collo della bottiglia. Da 35mm a 46mm si segue il profilo di camma CAM1 descritto in precedenza, facendo in modo che in 11mm venga effettuata una rotazione di 720° bensì di 2 giri con un avanzamento di 11mm.
6. Conclusa l'avvitatura, in $Z=46$ e $Y=320$ si è dato il comando di apertura delle griffe della pinza.
7. Si è portato l'asse Z in posizione $Z=5$ e $Y=320$.
8. Ripristino della posizione di partenza $Z=5$ e $Y=5$, da qui inizia la fase di svitatura.
9. Ritorno alla posizione $Z=5$ e $Y=320$.
10. In questo passo si va con l'asse Z alla posizione $Z=46$ dove si andranno a chiudere le griffe della pinza, e si attiverà il CamIn cioè la camma.
11. Attivata la camma, il master e lo slave seguiranno il suo profilo in modo inverso, effettuando la vera e propria svitatura del tappo.
12. Si ritornerà alla posizione $Z=5$ e $Y=320$.
13. Si andrà alla posizione $Z=5$ con $Y=5$.
14. Per poi andare a depositare il tappo in $Z=280$ con $Y=5$ effettuando l'apertura delle griffe della pinza
15. Si andrà nella posizione di partenza in $Z=5$ e $Y=5$, e si ripeterà il ciclo dal passo 1.

Di seguito si andrà a formalizzare quanto sopra detto nel linguaggio macchina. Il codice per la movimentazione è stato scritto in linguaggio strutturato ST; per la stesura delle righe del codice, si è ragionato andando a considerare quello che si fa nella vita di tutti i giorni, cioè se si decidesse di prendere un pezzo e di spostarlo dalla posizione A alla posizione B, la procedura che è stata seguita è quella di individuare il pezzo, prendere il pezzo, pensare di trasportarlo nella posizione B e trasportarlo effettivamente in B. Nella stesura del codice è stato fatto formalmente questo, all'interno del programma è stato abilitato un particolare asse mediante MC_MoveAbsolute, a esso è stato detto dove andare e nelle righe successive del codice si fa eseguire il movimento. Qui di seguito riporto il codice denominato Motion_Control(PRG) che ha permesso il corretto movimento degli assi per raggiungere il fine desiderato, prima di scrivere il codice sono state stanziate delle variabili locali:

```

PROGRAM Motion_Control
VAR
    Motion_Control: BOOL;
    i: INT;
    PLC_: BOOL;
    u: INT;
END_VAR
Timer(IN:=,PT:=t#1.5s);

```



CASE i OF

0: (*reset di tutte memorie e stato di inizializzazione, in tale passo viene data l'alimentazione a tutti i Driver presenti, successivamente vengono impostate le costanti di velocità e accelerazioni e decelerazioni*)

```
Power_Y.Enable:=FALSE;
Power_Z.Enable:=FALSE;
Power_R.Enable:=FALSE;
```

```
Power_Y.bRegulatorOn:=FALSE;
Power_Z.bRegulatorOn:=FALSE;
Power_R.bRegulatorOn:=FALSE;
```

```
Power_Y.bDriveStart:=FALSE;
Power_Z.bDriveStart:=FALSE;
Power_R.bDriveStart:=FALSE;
```

```
presa_pezzo:=FALSE;
```

```
MoveAbsolute_Y.Acceleration:=1000;           (*inializzo le costanti*)
MoveAbsolute_Z.Acceleration:=1000;
MoveAbsolute_R.Acceleration:=100;
MoveAbsolute_Y.Deceleration:=1000;
MoveAbsolute_Z.Deceleration:=1000;
MoveAbsolute_R.Deceleration:=100;
MoveAbsolute_Y.Velocity:=1000;
MoveAbsolute_Z.Velocity:=1000;
MoveAbsolute_R.Velocity:=100;
```

```
u:=0;
```

```
IF cmd_start THEN           (*queste righe di codice mi consentono di  stoppare e*)
i:=10;                       (*riavviare il sistema in qualsiasi momento*)
st_start:=TRUE;
st_stop:=FALSE;
END_IF
```

10: (*Power con i relativi Enable, permette di abilitare gli ingressi *)

```
Power_Y.Enable:=TRUE;       (*si forniscono le varie abilitazioni di potenza*)
Power_Z.Enable:=TRUE;
Power_R.Enable:=TRUE;
```



```
Power_Y.bRegulatorOn:=TRUE;
Power_Z.bRegulatorOn:=TRUE;
Power_R.bRegulatorOn:=TRUE;
```

```
Power_Y.bDriveStart:=TRUE;
Power_Z.bDriveStart:=TRUE;
Power_R.bDriveStart:=TRUE;
```

(*se vi è l'alimentazione a Y a Z e a R allora si va al passo 20*)

```
IF Power_Y.Status AND Power_Z.Status AND Power_R.Status THEN
    i:=20;
END_IF
```

20: (*homing: consente all'avvio di partire dalla posizione 0,0, viene fatto solo all'accensione dell'impianto*)

```
Home_Y.Execute:=TRUE;
Home_Z.Execute:=TRUE;
Home_R.Execute:=TRUE;
```

```
IF Home_Y.Done AND Home_Z.Done AND Home_R.Done THEN
    Home_Y.Execute:=FALSE;
    Home_Z.Execute:=FALSE;
    Home_R.Execute:=FALSE;
    MoveAbsolute_Y.Position:=5;           (*si vuole che gli assi vadano→ Z=5 e Y=5*)
    MoveAbsolute_Z.Position:=5;
    MoveAbsolute_R.Position:=360;
    i:=30;
END_IF
```

30: (*detto dove devono andare, si consente loro di andare→ Z=5 e Y=5*)

```
MoveAbsolute_Y.Execute:=TRUE;
MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;
MoveAbsolute_R.Execute:=TRUE;
MoveAbsolute_Z.Velocity:=1000;
```

```
IF MoveAbsolute_Y.Done AND MoveAbsolute_Z.Done AND MoveAbsolute_R.Done THEN
    MoveAbsolute_Y.Execute:=FALSE;       (*si disabilitano gli assi*)
    MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;
    MoveAbsolute_R.Execute:=FALSE;
```



```

MoveAbsolute_Z.Position:=280;          (*si vuole andare → Z=280 e Y=5*)
i:=40;
END_IF

```

40: (*in questo step le funzioni principali sono: il CamOut e la presa del pezzo*)

```

MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;         (*si consente di andare → asse Z=280, asse Y=5*)

CamOut.Execute:=FALSE;               (*disabilitazione della camma del secondo ciclo di lavoro*)

IF MoveAbsolute_Z.Done=TRUE THEN
  MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;
  MoveAbsolute_Z.Position:=5;
  presa_pezzo:=TRUE;                 (*si prende il tappo effettuando la chiusura della pinza*)
  i:=50;
END_IF

```

50: (*sposto l'asse Y in direzione della bottiglia*)

```

MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;         (*si consente di andare → asse Z=5, asse Y=5*)

IF MoveAbsolute_Z.Done=TRUE THEN
  MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;
  MoveAbsolute_Y.Position:=320;      (*si dice dove si vuole andare → Z=5 e Y=320*)
  i:=60;
END_IF

```

60: (*Preparazione per la camma riducendo la velocità solo in questo tratto*)

```

MoveAbsolute_Y.Execute:=TRUE;         (*si consente di andare → asse Z=5, asse Y=320*)

IF MoveAbsolute_Y.Done=TRUE THEN
  MoveAbsolute_Y.Execute:=FALSE;
  MoveAbsolute_Z.Position:=46;       (*si dice dove deve andare → asse Z=46, Y=320 *)
  MoveAbsolute_Z.Velocity:=20;      (*velocità di Vz=20 mm/s*)
  i:=70;
END_IF

```

70: (*si abilita la CamTable per poter utilizzare il profilo di Camma voluto nella fase di avvitatura*)

```

CamTable.Execute:=TRUE;

```




```
IF CamTable.Done THEN
  CamTable.Execute:=FALSE;
  i:=80;
END_IF
```

80: (*si abilita il CamIn*)

```
CamIn.Execute:=TRUE;
```

```
IF CamIn.InSync THEN
  CamIn.Execute:=FALSE;
  i:=90;
END_IF
```

90: (*fatta l'avvitatura esco dalla camma e reimposto la velocità iniziale*)

```
MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;      (*si consente di andare → asse Z=49, asse
Y=320*)
```

```
IF MoveAbsolute_Z.Done=TRUE THEN
  MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;
  MoveAbsolute_Z.Position:=5;      (*dico dove deve andare → asse Z=5, Y=320*)
  MoveAbsolute_Z.Velocity:=1000;   (* velocità di Vz=1000 mm/s*)
  CamOut.Execute:=TRUE;
  i:=100;
END_IF
```

100: (*quando sono uscito dalla camma, per qualche millesimo di secondo ci si ritrova con l'asse Y in direzione della bottiglia, la smart camera in direzione del tappo e le griffe fuori dall'ingombro, in questo preciso istante è stato dato il trigger alla camera per scattare la foto e fornire l'informazione sulla qualità della bottiglia*)

```
presa_pezzo:=FALSE;      (*lascio il tappo effettuando l'apertura della pinza*)
i:=110;                  (*FACCIO LA FOTO*)
```

110: (*impostazione del timer*)

```
IF NOT MoveAbsolute_Z.Execute THEN
  Timer.IN:=TRUE;
END_IF
```



```

IF Timer.Q THEN
  MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;      (*si consente di andare → asse Z=5, Y=320*)
  Timer.IN:=FALSE;
END_IF

```

```

IF MoveAbsolute_Z.Done=TRUE THEN
  MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;
  CamTable.Execute:=FALSE;          (*si disabilita la camma*)
  CamIn.Execute:=FALSE;
  MoveAbsolute_Y.Position:=5;       (*si dice dove deve andare → asse Z=5, Y=5*)
  TRIGGER:=TRUE;                   (*si effettua il trigger della camera*)
  i:=120;
END_IF

```

120: (*si disabilita il trigger della camera e si impostano altre movimentazioni*)

```

MoveAbsolute_Y.Execute:=TRUE;      (*si consente di andare → asse Z=5, asse Y=5*)
TRIGGER:=FALSE;

```

```

IF MoveAbsolute_Y.Done=TRUE THEN
  MoveAbsolute_Y.Execute:=FALSE;
  MoveAbsolute_Y.Position:=320;    (*si dice dove andare → asse Z=5, Y=320*)
  i:=130;
END_IF

```

130: (*linee di codice legate al timer*)

```

MoveAbsolute_Y.Execute:=TRUE;      (*si consente di andare → asse Z=5, Y=320*)

```

```

IF NOT MoveAbsolute_Z.Execute THEN (*attivo timer*)

```

```

  Timer.IN:=TRUE;

```

```

END_IF

```

```

IF Timer.Q THEN

```

```

  MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;

```

```

  Timer.IN:=FALSE;

```

```

END_IF

```

```

IF MoveAbsolute_Y.Done THEN

```

```

  MoveAbsolute_Y.Execute:=FALSE;

```

```

  presa_pezzo:=FALSE;

```

```

  MoveAbsolute_Z.Position:=46;

```

```

  (*si dice dove andare → asse Z=49, Y=320*)

```

```

  MoveAbsolute_Z.Velocity:=1000;

```

```

  (*velocità Vz=1000 mm/s*)

```



```
i:=140;  
END_IF
```

140: (*settaggio della velocità*)

```
MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;           (*si consente di andare → asse Z=46, Y=320*)  
  
IF MoveAbsolute_Z.Done THEN  
  MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;  
  MoveAbsolute_Z.Position:=5;           (*si dice dove deve andare → asse Z=5, Y=320*)  
  MoveAbsolute_Z.Velocity:=20;         (*velocità Vz=20 mm/s*)  
  i:=150;  
END_IF
```

150: (*si abilita la Camma per poter utilizzare il profilo di Camma voluto nella fase di svitatura*)

```
CamTable.Execute:=TRUE;  
IF Camtable.Done THEN  
  CamTable.Execute:=FALSE;  
  i:=160;  
END_IF
```

160: (*istruzioni per il CamIn nella fase di svitatura*)

```
CamIn.Execute:=TRUE;  
IF CamIn.InSync THEN  
  CamIn.Execute:=FALSE;  
  i:=170;  
END_IF
```

170: (*si prende il tappo effettuando la chiusura della pinza*)

```
presa_pezzo:=TRUE;  
CamOut.Execute:=FALSE;  
i:=180;
```

180: (*si consente al sistema di andare → asse Z=5, asse Y=320, velocità Vz=20 mm/s*)

```
MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;  
  
IF MoveAbsolute_Z.Done THEN  
  MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;
```



```
MoveAbsolute_Y.Position:=5;      (*si dice dove deve andare → asse Z=5, Y=5,*)  
MoveAbsolute_Y.Velocity:=1000;   (*velocità Vz=1000 mm/s*)
```

```
CamOut.Execute:=TRUE;  
i:=190;  
END_IF
```

190: (*si consente al sistema di andare → asse Z=5, asse Y=5, velocità Vz=20 mm/s*)

```
MoveAbsolute_Y.Execute:=TRUE;  
  
IF MoveAbsolute_Y.Done THEN  
  MoveAbsolute_Y.Execute:=FALSE;  
  
  CamTable.Execute:=FALSE;  
  CamIn.Execute:=FALSE;  
  CamOut.Execute:=FALSE;
```

```
MoveAbsolute_Z.Position:=280;    (*si dice dove deve andare → asse Z=280, Y=5*)  
MoveAbsolute_Z.Velocity:=1000;  
i:=200;  
END_IF
```

200: (*si consente al sistema di andare → asse Z=280, asse Y=5, velocità Vz=20 mm/s*)

```
MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;  
  
IF MoveAbsolute_Z.Done THEN  
  MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;  
  presa_pezzo:=FALSE;  
  MoveAbsolute_Z.Position:=5;    (*si dice dove deve andare → asse Z=5, Y=5*)  
  MoveAbsolute_Z.Velocity:=1000; (*velocità Vz=1000 mm/s*)  
  i:=210;  
END_IF
```

210: (*si consente al sistema di andare → asse Z=5, asse Y=5, velocità Vz=1000 mm/s*)

```
MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE;  
IF MoveAbsolute_Z.Done=TRUE THEN  
  MoveAbsolute_Z.Execute:=FALSE;
```



```
IF NOT MoveAbsolute_Z.Execute THEN (*si attiva il timer*)
  Timer.IN:=TRUE;
END_IF
```

```
IF Timer.Q THEN
  MoveAbsolute_Z.Execute:=TRUE; (*si dice dove deve andare→asse Z=5, Y=320*)
  Timer.IN:=FALSE;
END_IF
```

```
MoveAbsolute_Z.Position:=5; (*si dice dove deve andare→ asse Z=5, Y=5*)
MoveAbsolute_Y.Position:=5;
i:=30; (*vado al passo 30 ripetendo il ciclo*)
END_IF
```

300: (*Istruzione che permette al touch panel di utilizzare la funzione di start e stop*)

```
IF cmd_start THEN
  i:=u;
  st_start:=TRUE;
(*questa sequenza permette di fermarsi e di riavviarsi dal punto in cui si era fermato*)
  st_stop:=FALSE;
END_IF
```

```
END_CASE
(*questa sequenza permette di fermarsi e di riavviarsi dal punto in cui si era fermato*)
IF cmd_stop THEN
  IF st_start THEN
    st_start:=FALSE;
    st_stop:=TRUE;
    u:=i;
    i:=300;
  END_IF
END_IF
```

Ultimato il codice, è stata effettuata l'ultima verifica sui collegamenti e sulla comunicazione, di seguito è stato riportato lo schema completo della stazione di avvitatura (Fig.7.18).

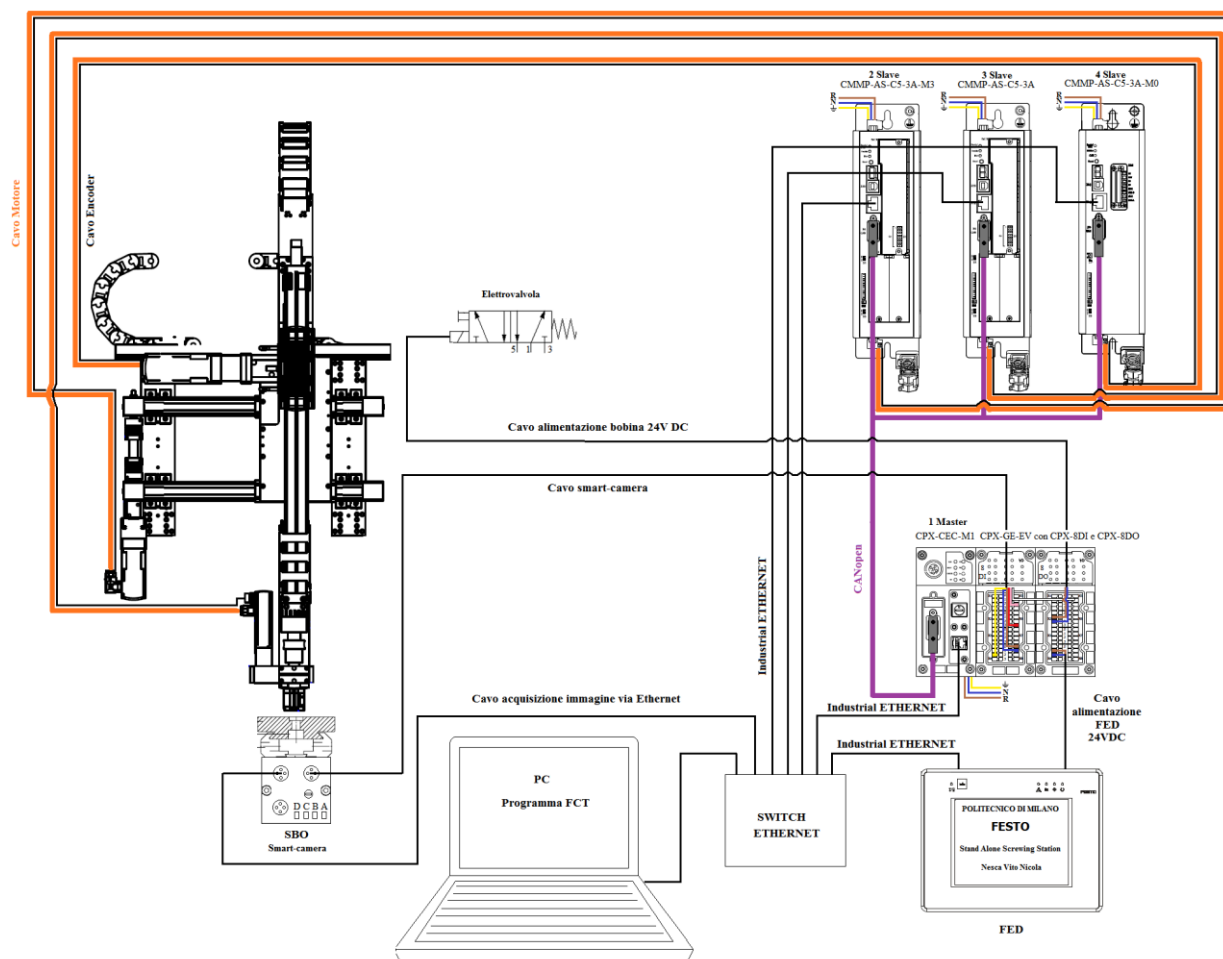


Figura 7. 18: Schema di collegamento completo

Una volta scritto il codice in base alle esigenze di progetto, è stata fatta una prova sull'affidabilità del sistema in marcia continuativa, per vedere il numero di bottiglie che venivano avvitate nel tempo. Lasciandolo in marcia per tre ore si è riscontrato che ogni ora vi erano 360 avviture cioè 6 al minuto, quindi in tre ore venivano effettuate 1080 avviture. Si è riscontrato che le avviture che hanno dato un feedback negativo sono state circa 11, quindi in tre ore si è avuto circa il 5% delle avviture non andate a buon fine.

Effettuata questa verifica legata più che altro alla produzione, si è passati alla verifica degli andamenti in real time degli assi durante la movimentazione. I profili motion di tali andamenti sono stati valutati teoricamente dal paragrafo 6.3.1 al 6.3.3. Per verificare che i profili di motion reali siano accettabili rispetto a quelli teorici, è stato utilizzato l'FCT, nella quale vi è una sezione chiamata Trace Data che permette di estrarre i profili in tempo reale. Prendendo in esempio l'asse Z, si effettua un benchmarking tra il profilo teorico e quello reale.

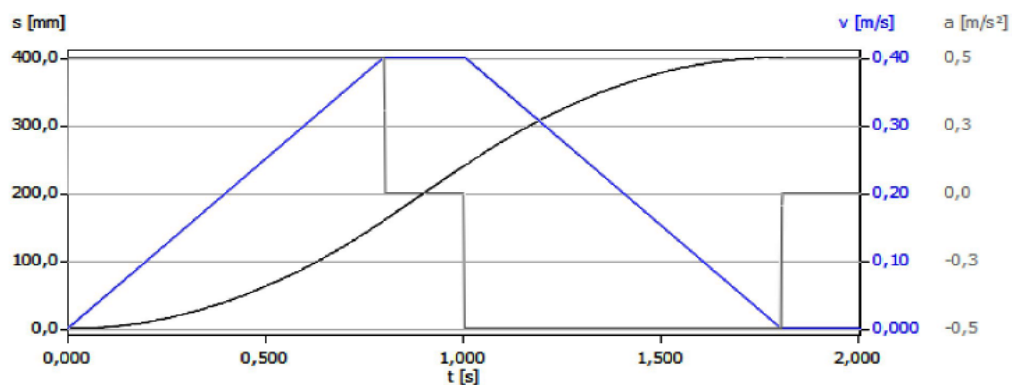


Figura 7. 19: Diagramma teorico Motion Profile Asse Z

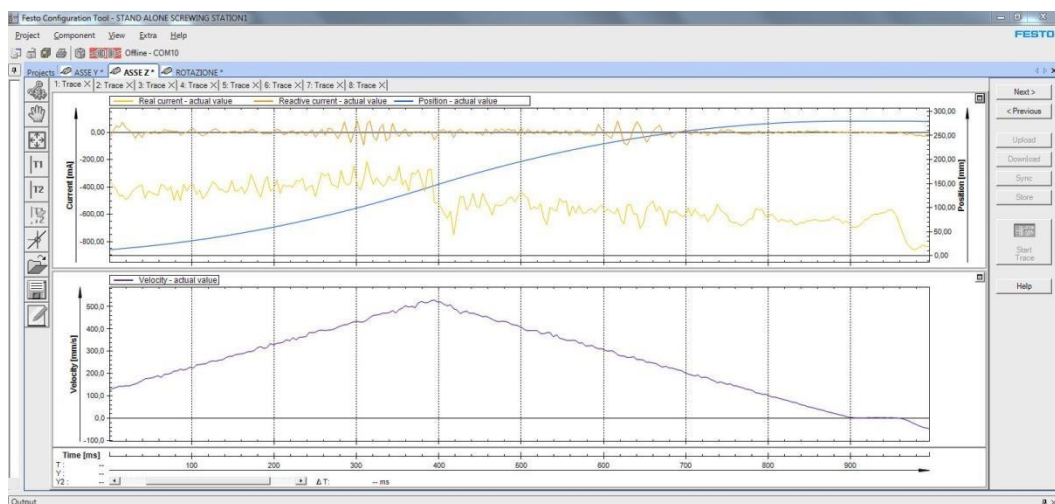


Figura 7. 20: Diagramma Motion Profile in Real-Time Asse Z

Infine, come è possibile notare la velocità reale è a forma triangolare, mentre nel profilo teorico è trapezoidale, questo perché si sarebbe dovuto utilizzare un tempo ciclo più lungo, in modo da non far entrare in gioco i limiti di velocità.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Come è stato largamente discusso nel seguente elaborato, lo sviluppo di apparecchiature automatiche in qualsiasi processo produttivo, risulta essere essenziale al fine di ottenere dei risultati certi e sicuri. A tal proposito il mondo dell'industrial control and automation di Festo SpA, ha cercato di fornire i mezzi e le competenze adeguate per ottenere delle customers solution soddisfacenti e altamente tecnologiche. Questo è stato possibile grazie alla continua evoluzione ingegneristica di azionamenti elettrici, assi elettrici e motori elettrici.

In tal elaborato è stato preso in esame la costruzione di un robot di avvitatura stand-alone, per raggiungere tale fine, è stato pianificato un lavoro iniziale, che descrivesse dettagliatamente le fasi di processo da seguire step by step. Successivamente è stato formalizzato un progetto che è andato sviluppandosi e affinandosi in corso d'opera.

Ultimata la progettazione e il dimensionamento delle apparecchiature è stato possibile realizzare il sistema concretamente, andando ad assemblare e cablare elettricamente i vari componenti.

Lo step che ha richiesto un'attenzione particolare è stato quello inerente allo scambio di informazione fra i vari dispositivi e quello relativo alla stesura del programma di movimentazione in Structured Text in ambiente CoDeSys.

Tale robot di avvitatura nasce dall'idea di costruire un sistema puramente elettrico per il capping industriale. Andando ad analizzare la presenza di macchinari per l'avvitatura industriale, è stato possibile notare che la maggior parte delle aziende utilizzano sistemi di avvitatura prettamente meccanici. Da qui è nata l'idea di costruire un qualcosa, che potesse essere veloce, preciso e affidabile nel tempo; si è cercato inoltre, di progettare un sistema che potesse essere altamente versatile e modulare in base alle esigenze dell'end-user. Sotto tali basi si è formalizzato il progetto cercando di dimensionare e scegliere le apparecchiature e dispositivi che potessero rispondere alle esigenze volute.

Mediante il dimensionamento teorico degli assi e lo studio della cinematica e dinamica del sistema, è stato possibile determinare gli azionamenti, gli assi, e i motori da utilizzare; è chiaro che per avere una maggiore certezza, si è preferito effettuare una verifica incrociata con PositioningDrives, il quale ha confermato la scelta fatta teoricamente.

In PositioningDrives, sono stati redatti i report per i tre profili di movimentazione assi lungo le tre direzioni; tali report hanno permesso di visualizzare teoricamente i profili di velocità, di accelerazioni e di decelerazione, in base agli azionamenti, assi e motori scelti. Ricavati i profili teorici è stato possibile compararli ai profili reali ottenuti in real time mediante FCT. Quello che è stato possibile riscontrare è che i profili di movimentazione erano identici, a meno dell'andamento grafico leggermente oscillante dovuto alla non idealità del sistema. Si è notata inoltre, una leggera differenza tra i profili di velocità teorici e quelli reali, poiché il primo è di



forma triangolare, il secondo trapezoidale. Tale diversità è facilmente spiegabile, come noto il trapezio geometricamente è ricavabile da un triangolo con un vertice troncato, allora quello che se n'è dedotto e che a causa dei ridotti tempi di movimentazione non è stato possibile il completamento dell'intera curva. Il sistema non riusciva, a raggiungere la velocità impostata, in quanto la traiettoria da percorrere commisurata al tempo in cui quella traiettoria doveva essere percorsa, era troppo corta. Ecco perché le due traiettorie risultano essere di andamento diverso, se invece avessimo scelto un asse orizzontale più lungo, il motion profile sarebbe stato uguale, perché ci sarebbe stato il tempo per raggiungere le velocità desiderate e le inerzie del sistema non avrebbero inciso particolarmente sulla movimentazione degli assi.

Inoltre, è stato scrupolosamente verificato, che la scelta della pinza pneumatica per la presa del pezzo fosse idonea per quel tipo di applicazione, infatti è stato fatto un dimensionamento di massima per la pinza da scegliere, andando a considerare le varie inerzie del sistema, gli attriti in gioco, i materiali utilizzati, le masse presenti ma soprattutto le varie forze sviluppate sulle varie dita durante la movimentazione orizzontale e verticale degli assi. Fatto questo dimensionamento si sono ricavate le forze in Newton agenti sul corpo della pinza e grazie a esse si è potuto scegliere la pinza adeguata. Tale scelta è stata perfettamente coerente con il risultato ottenuto da una seconda verifica svolta mediante un simulatore della Festo.

Una volta assemblato il sistema si sono parametrati i vari azionamenti in FCT e si è passati alla verifica del corretto trasferimento dati. Successivamente è stato stilato il programma ad hoc in CoDeSys andando a realizzare le varie movimentazioni servendosi della libreria Soft Motion. Grazie a tale libreria è stato possibile realizzare la camma elettronica nella fase di avvitatura e di svitatura, impostando l'asse Z come Master e la rotazione come Slave.

La camma elettronica è realizzabile attraverso due metodologie:

1. Soft Motion con CoDeSys
2. Interpolation Mode con FCT

La camma realizzata mediante la prima metodologia presenta lo svantaggio, che per essere settata necessita di CoDeSys e quindi la conoscenza di un linguaggio di programmazione accurato; mentre il vantaggio, risulta essere quello che una volta programmata per modificarla bastano pochi passi procedurali.

Anche la camma realizzata mediante FCT presenta uno svantaggio, causato dal caricamento ripetuto del progetto negli azionamenti, ogni qualvolta vengono modificati dei parametri, questo rende la procedura pesante e di lenta gestione; mentre il vantaggio, è riferito alla non necessità di conoscere alcun linguaggio di programmazione.

Inoltre, è stato installato un sistema vision che ha permesso il controllo di qualità sull'avvitatura del tappo, fornendo un feedback di GOOD o BAD. Dalle prove effettuate si è ottenuto che in tre ore di lavoro continuativo la percentuale di GOOD è stata nettamente superiore rispetto ai BAD, bensì il 98% delle avviture hanno dato GOOD. Tale responso ha permesso di affermare che il robot di avvitatura è stato progettato rispettando la regola dell'arte.



Come precedentemente detto, si è cercato di rendere il sistema altamente versatile e modulare per eventuali e possibili sviluppi futuri, nel senso che, tale robot potrebbe essere usato non solo nel capping del food&beverage, ma anche in altri settori industriali. Tutto questo è reso possibile andando a modificare l'attacco della pinza, così facendo sarà possibile avvitare un bullone su di una piastra al posto che un tappo su di una bottiglia.

Infine potrebbero essere attuate ulteriori modifiche volte allo studio di sviluppi futuri, tra cui:

1. Scegliere i tre azionamenti che gestiscono rispettivamente i tre movimenti, uguali tra loro come CMMP-AS-C5-M3, quest'ultimo avendo lo slot, ha la possibilità di utilizzare altri protocolli come: Profibus, ProfiNET, EtherCAT etc.
2. Utilizzare un protocollo di comunicazione diverso dal CANopen, ad esempio Profibus o ProfiNET.
3. Sostituire al posto dell'asse a cinghia DGE che gestisce la movimentazione orizzontale, un asse tecnologicamente più avanzato come EGC.
4. Archiviare le immagini catturate dal sistema vision e fare una media statistica sulla quantità di BAD e GOOD. Con tale sistema è possibile capire la qualità del lotto di produzione e quanto scarto si è avuto.
5. Aggiungere un asse X che permetta la gestione della profondità.

Questi risultano essere i macro sviluppi futuri che tale progetto potrebbe avere per poter essere migliorato e per fornire a in tutti i settori industriali un robot tecnologicamente avanzato.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Khov, J. Regnier, J. Faucher, *Detection of turn short circuit fault in stator of PMSM by on-line parameter estimation*. 19th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy, 2008.
- [2] J. R. J. F. M. Khov, *On-Line Parameter Estimation of PMSM in Open Loop and Closed Loop*, Australia: Churchill, Victoria, 2009.
- [3] M. S. D. Acampa, A. Del Pizzo, D. Iannuzzi, I. Spina, *Predictive control technique of single inverter dual motor AC-brushless drives*, Vilamoura, Portogallo: ICEM, 2008.
- [4] M.Mauri, F.Castelli Dezza, *Tecniche di Modulazione*, 19 Aprile 2012.
- [5] Ned Mohan, Tore M.Undeland, William P.Robbins, *Elettronica di potenza*, Milano: Ulrico Hoepli, 2009.
- [6] Noguchia, Toshihiko, *Trends of Permanent-magnet Synchronous Machine Driver*.Transaction on electrical and electronic engineering, IEEJ Trans, 2007.
- [7] Perticaroli, F., *Sistemi Elettrici per i Trasporti*, Ambrosiana.
- [8] A. Del Pizzo, *Azionamenti elettrici VOL. I E II*, Litografia Libero Nicola.
- [9] Jussi Puranen, *Induction Motor Versus PMSM in motion control application*, June 2006.
- [10] D. Schroder, *Elektische Antriebe*, Berlin/Heidelberg, 2000.
- [11] E. Seefried, *Elektrische Maschinen und Antriebstechnik*, Vieweg Verlag, Braunschweig, 2001.
- [12] Denkendorf: Thomas Häckel Jose Leonett, Stefan Hesse, *Dizionario della tecnica di azionamento elettrico*, 73770 Denkendorf: Thomas Häckel Jose Leonett, 2004.
- [13] H. Stolting, *Handbuch Elektrischer Kleinantriebe*, Fachbuchverlang Leipzig im Hanser Verlag, 2002.
- [14] T. M. W. Soong, *Field-Weakening, Performance of Brushless Synchronous AC Motor Drives*, 1994.
- [15] M. E. Haque, L. Zhong and M. F. Rahman. Haque, *Improved Trajectory Control for an Interior Permanent*.



- [16] A. Del Pizzo, G.Vitale, *Magneti Permanenti negli Azionamenti Elettrici*, Litografia Libero Nicola.
- [17] A. Del Pizzo, I.Spina, U.Shafer, *A parameter estimation method for on-line failure detection in permanent magnet AC-brushless motors having current-dependent parameters*, Bologna, Italia: SDEMPED, (2011).
- [18] A. Coccia, «*Analisi e caratterizzazione di architetture per sistemi di trazione polintensione con convertitori multilivello e propulsione sincrona a magneti permanenti*».
- [19] Francesco Correggiari, *Costruzione e progetto di macchine elettriche*, Cisalpino-Goliardica, Sesta Edizione II Ristampa.
- [20] D. Bidart, M. Pietrzak-David, P. Maussion, e M. Fadel. Mono inverter dual parallel PMSM - structure and control strategy, IEEE 10-13, Nov 2008.
- [21] E. Pagano, I. Marongiu, *Le Macchine Elettriche*.
- [22] G. Gatto, I. Marongiu, A. Serpi, A. Perfetto, *Permanent Magnet Ac Motor Drives Controlled by Predictive Algorithm*, Bologna, Italy: SPRTS, 2005.
- [23] Helmuth Meixner, Rudolf Kobler, *EINFÜHRUNG IN DIE PNEUMATIK*, Esslingen: Festo Didatic GmbH & Co., seconda edizione Ottobre 1999.
- [24] IEEE, «*Magnet Synchronous Motor Drive With Extended Operating*,» 2010.
- [25] Dezza, Francesco Castelli, «AC Brushless,» in *Azionamenti Elettrici*, 2010.
- [26] A.Del Pizzo, D.Ianuzzi, I.Spina, *High Performance Control Technique for Unbalanced operation of Single-VSI Dual-PM Brushless Motor Drives*, Bari, Italia: ISIE, 2010.
- [27] Olaf Pfeiffer, Andrew Ayre e Christian Keydel, *Embedded Networking With Can and CANopen*, 5 novembre. 2013.
- [28] GmbH *CANopen Library User Manual V4.4 port GmbH*, marzo 2006.
- [29] Paolo Bolzern, Riccardo Scattolini, Nicola Schiavoni, *Fondamenti di controlli automatici*, Terza edizione, McGraw-Hill. Gennaio 2008.
- [30] Cesare Mario Arturi, *Elettromagnetismo applicato e metodi di calcolo*, Progetto Leonardo, Febbraio 2012.
- [31] Vito Carrescia, *Fondamenti di SICUREZZA ELETTRICA*, edizione TNE, Settembre 2009.
- [32] Charles E. Spurgeon e Joann Zimmerman, *Ethernet: The Definitive Guide*, 3 April 2014