



Università degli Studi di Ferrara

**DOTTORATO DI RICERCA IN  
" SCIENZE DELL'INGEGNERIA "**

**CICLO XXVII**

Coordinatore Prof. Stefano Trillo

***"Sviluppo di soluzioni innovative per l'alimentazione  
sincrona di macchine confezionatrici ad alte prestazioni"***

Settore Scientifico Disciplinare ING-INF/04

**Dottorando**

Dott. Fakhir Ahmad

(firma)

**Tutore**

Prof. Bonfé Marcello

(firma)

**Anno 2012/2014**

***"Tesi di Dottorato in Alto Apprendistato, svolta con  
supporto della Regione Emilia-Romagna presso  
CT PACK Srl, con Tutore Aziendale L'ing. Bruno Alberti"***

***Dedicata alla mia famiglia .....***  
***e alla mia ragazza Greta .....***

# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>4</b>
<b>CAPITOLO 1</b>	
<b>FLOWPACK.....</b>	<b>6</b>
1.1 Definizione .....	6
1.2 Struttura generale della macchina .....	7
1.3 Principio di funzionamento Flowpack.....	8
1.3.1 Catena saltarelli .....	9
1.3.2 Gruppo Portabobine.....	9
1.3.3 Cella di carico .....	11
1.3.4 Gruppo Traino e Saldatura longitudinale .....	13
1.3.5 Gruppo di saldatura e taglio trasversale .....	14
1.3.6 Nastro di smaltimento prodotto finito.....	16
1.3.7 Scarti e il suo principio di funzionamento .....	17
1.4 Diagramma di flusso della confezionatrice.....	19
1.5 Allarmi.....	24
<b>CAPITOLO 2</b>	
<b>APLC (AUTOMATED PHASING LAUNCHING CONVEYOR) .....</b>	<b>25</b>
2.1 Struttura generale della macchina .....	25
2.2 Fasatori.....	25
2.2.1 Applicazione della correzione di fase (Fasatori) .....	28
2.3 Approaching (Bilanciamento Polmone).....	31
2.3.1 Applicazione della correzione di fase (Approaching) .....	32
2.4 Tappa Buchi (Nastri A e B) .....	33
2.4.1 Principi di funzionamento.....	33
2.5 Stati di Funzionamento APLC.....	36
2.6 Problematiche della flowpack e i nastri Fasatori APLC.....	37

## **CAPITOLO 3**

<b>MOTORI LINEARI.....</b>	<b>39</b>
3.1 Definizione e tipologie.....	39
3.2 Struttura dei motori lineari.....	46
3.3 Tipologie di motori lineari.....	49
3.3.1 Motori passo.....	50
3.3.2 Motori asincroni.....	52
3.3.3 Motori sincroni.....	53
3.3.4 Confronto tra tipologie di motori lineari.....	55
3.4 Categoria dei motori lineari.....	56
3.4.1 Motori Ironcore.....	56
3.4.2 Motori Ironless.....	58
3.4.3 Motori tubolari.....	60
3.5 PANORAMICA DI MERCATO DEI MOTORI LINEARI.....	61
3.5.1 Miglioramento delle prestazioni.....	61
3.5.2 L'evoluzione dei materiali magnetici.....	65
3.5.3 I limiti dei motori lineari.....	68

## **CAPITOLO 4**

<b>NUOVA TECNOLOGIA: IL SISTEMA ITRAK.....</b>	<b>70</b>
4.1 Struttura generale del sistema.....	70
4.2 Il principio di funzionamento.....	75
4.3 Pannello di controllo.....	76
4.4 Caratteristiche del sistema ITRAK.....	78

## **CAPITOLO 5**

<b>APPLICAZIONI SVILUPPATE.....</b>	<b>80</b>
5.1 Il PLC utilizzato.....	80
5.1.1 Disposizione hardware.....	81
5.1.2 Il software utilizzato.....	83
5.1.3 Comando di movimento su ITRAK.....	84
5.2 Inserimento di ITRAK nella Flowpack.....	86
5.3 Logica di controllo per flowpack con ITRAK.....	88
5.3.1 Accensione.....	88

5.3.2 Riposizionamento .....	90
5.3.3 Run .....	95
5.3.4 Emergenza ed errore .....	104
5.4 Simulazione della logica di controllo con Excel.....	107
5.4.1 Emulatore del PLC.....	107
5.4.2 Connessione tra Emulatore e RSLogix 5000 .....	109
5.4.3 Protocollo di comunicazione DDE.....	110
5.4.4 Come creare una comunicazione tra Excel e PLC .....	110
5.4.5 Interfaccia in ambiente Excel .....	112
<b>CAPITOLO 6</b>	
<b>RISULTATI SPERIMENTALI .....</b>	<b>117</b>
6.1 Analisi dell'errore di inseguimento .....	117
6.2 Errore di inseguimento nei tratti lineare e curvilineo .....	118
6.3 Analisi sul ciclo Flowpack .....	122
6.4 Prove di sincronismo col film .....	128
6.4.1 Mantenimento della posizione nel tempo .....	131
6.5 Conclusioni .....	134
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>135</b>

## INTRODUZIONE

La presente ricerca è il frutto di un periodo di tre anni di lavoro aziendale e analisi sperimentale dedicato allo studio di una nuova tecnologia introdotta nel campo degli azionamenti lineari. L'azienda ospitante che ha concesso la possibilità di svolgere l'esperienza lavorativa è CT PACK s.r.l. con sede a Fossalta in provincia di Ferrara. CT PACK è stata fondata nel 1996 con l'obiettivo di creare un'azienda di riferimento nel settore del confezionamento di articoli alimentari. La nuova società è il risultato dell'integrazione dell'esperienza offerta da tre ditte esistenti, leader a livello mondiale. La prima componente è rappresentata da Mopa, specialista per sistemi di alimentazione e allineamento prodotti. Otem, la seconda del gruppo, è pioniere in confezionatrici orizzontali ad alte prestazioni. Infine, Vortex Systems è esperta in sistemi robotizzati per la manipolazione e l'inscatolamento di diverse tipologie di prodotti ad alta velocità. Alla base degli obiettivi industriali e delle strategie di CT PACK, c'è la combinazione delle migliori soluzioni italiane nei campi sopra menzionati offrendo sul mercato linee di confezionamento totalmente integrate, disegnate e costruite da un unico team, dalle molteplici abilità ed esperienze. In un mercato attuale fortemente competitivo, CT PACK risponde progettando, costruendo e installando linee di confezionamento altamente automatizzate e fortemente innovative nel più esclusivo mondo del Packaging. Per questa ragione, i dipartimenti di Ricerca & Sviluppo mantengono vivo l'interesse di lavorare a stretto contatto con la facoltà di Ingegneria dell'Università di Ferrara. Tra i diversi settori di produzione all'interno dell'azienda, si è deciso di approfondire il ramo riguardante le macchine di tipo flowpack, le quali sono ormai uno standard di produzione largamente utilizzato da gran parte delle aziende appartenenti a questo settore. Gli ambiti di impiego che più comunemente utilizzano tali architetture sono, ad esempio, quello dei biscotti, merendine, crackers, barrette, tavolette, cioccolatini, dolciumi, saponi. Un prodotto in arrivo dalla linea di produzione prosegue il proprio percorso attraverso questo tipo di sistema per essere impacchettato nell'apposito involucro di destinazione. Analizzando le più comuni architetture flowpack e il campo dell'automazione industriale in generale, è semplice notare che la maggior parte dei movimenti di macchina vengono realizzati mediante l'utilizzo di motori elettrici. Sin dalla comparsa delle prime macchine impiegate in questo settore, la grande maggioranza degli attuatori utilizzati è di tipo rotativo. È lecito affermare che, sfruttando la propria struttura, si possono ottenere facilmente movimenti rotazionali. Non è invece possibile dire lo stesso per gli spostamenti lineari. Un tradizionale motore rotativo necessita di un riduttore e di una trasmissione meccanica per la trasformazione del moto rotatorio in moto lineare. Tali meccanismi aumentano il numero di elementi della catena cinematica comportando maggiore complessità ed ingombro, introducendo attriti e giochi meccanici nelle superfici a contatto che comportano perdite di potenza e, di conseguenza, di rendimento energetico. Anche dal punto di vista della dinamica

del sistema si hanno delle limitazioni. Ad alte accelerazioni, infatti, la potenza fornita al motore viene quasi tutta consumata dallo stesso e dalla trasmissione. Inoltre, più la dinamica è elevata, più gli effetti delle inerzie in gioco incidono sui membri della catena cinematica aumentando l'usura e, di conseguenza, aumentano i problemi di precisione, di posizionamento e di manutenzione. Tenendo presente che la maggior parte dei moti da realizzare all'interno di un automatismo industriale sono di tipo lineare, risulta immediata l'importanza di poter avere a disposizione un attuatore che opera direttamente in tale modo. Tali motivazioni hanno sensibilmente stimolato CT PACK ad intraprendere uno studio e ricerca nell'ambito dei suddetti azionamenti cercando, ove possibile, l'individuazione di valide soluzioni innovative alle proprie configurazioni sfruttando l'utilizzo delle novità tecnologiche. In particolare, l'argomento trattato riguarda un prototipo di ultima generazione nell'ambito degli azionamenti lineari, recentemente introdotto sul mercato da Jacobs Automation, una azienda statunitense con sede a Erlanger nello stato del Kentucky. Il prodotto in esame, denominato con l'acronimo *iTRAK (the intelligent trak system)*, consiste in una tecnologia brevettata che consente il controllo indipendente di più motori a propulsione magnetica su percorsi rettilinei e curvilinei. L'obiettivo di questa ricerca riguarda quindi la verifica delle prestazioni di iTRAK e l'eventuale individuazione di una soluzione alternativa all'interno di un sistema flowpack sfruttando l'enorme potenziale di sviluppo e la flessibilità introdotte da tale prodotto innovativo.

I primi due capitoli descrivono le confezionatrici comunemente utilizzate con nastri rifasatori, e le loro problematiche

Nel terzo capitolo si riporta l'analisi teorica eseguita sulle differenti tipologie di motori. In particolare, verranno approfonditi i tipi di motori lineari esistenti ed i relativi principi di funzionamento e un'analisi del crescente impiego di questi motori lineari nel mercato e degli aspetti migliorativi che ne comporta un appropriato uso in ambito industriale.

Il quarto capitolo è dedicato allo studio delle caratteristiche e del principio di funzionamento di ITRAK.

Il quinto capitolo riporta la descrizione dell'hardware e del software utilizzato per il nuovo prototipo in esame

Infine, verranno riportate l'insieme delle prove sperimentali eseguite per verificare l'affidabilità e le prestazioni della macchina Jacobs e le relative conclusioni in merito alle indagini sperimentate.



# CAPITOLO 1

## FLOWPACK

### 1.1 Definizione

La prima macchina automatica analizzata viene comunemente detta flowpack. Essa adotta il nome dal tipo di confezionamento che va ad attuare sul prodotto. La confezione flowpack è una delle tipologie di packaging più utilizzata nel settore. Garantisce un'elevata ermeticità dei prodotti, permettendo il mantenimento del contenuto della confezione isolato dall'ambiente esterno, esaltandone l'aspetto esteriore del prodotto massimizzandone la qualità e l'estetica. È, in genere, utilizzata per il confezionamento di prodotti dolciari, alimentari, articoli tecnici, cosmetici ecc. Le confezioni in flowpack adottano un tipo di imballo in materiale plastico confezionato con l'ausilio di una macchina confezionatrice in orizzontale. Si riporta, in figura 1, uno schematico della struttura di una architettura flowpack comunemente utilizzata.

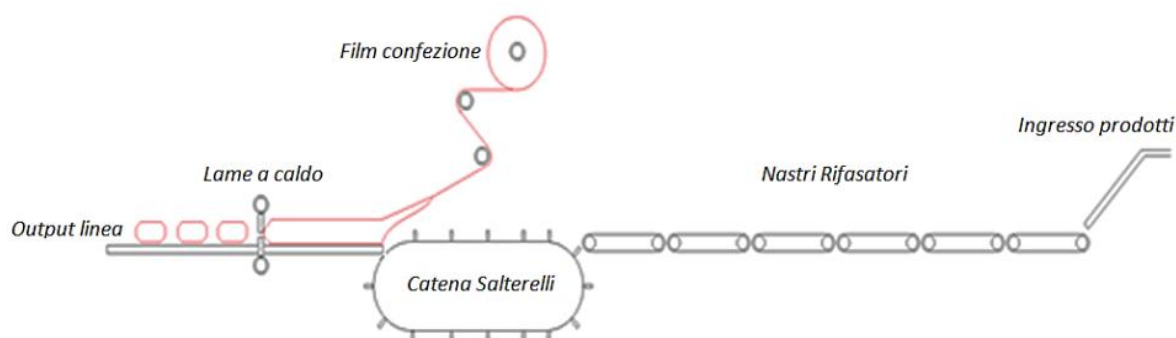


Figura 1

I prodotti pronti per essere confezionati giungono generalmente in modo asincrono da uno scivolo posto a monte della linea di produzione. Solitamente è possibile considerare l'arrivo dei prodotti in blocchi periodici composti da una decina di elementi ciascuno. All'interno di ogni blocco, i prodotti sono disposti in modo aleatorio risultando perciò distanziati tra loro in modo casuale.

Dallo scivolo d'ingresso i prodotti giungono su una serie di nastri di trasporto detti nastri rifasatori i quali hanno il compito fondamentale di distanziare in modo opportuno i prodotti per essere poi ceduti alla catena salterelli. La catena salterelli è composta da piccoli "denti" che spingono l'elemento da confezionare dalla zona dei nastri rifasatori alla zona di inserimento nella pellicola che costituirà la confezione finale. La catena deve essere sincronizzata perfettamente con il film di confezionamento in modo da ottenere il prodotto finale calibrato con eventuali loghi di produzione e descrizioni del contenuto dell'oggetto. Il film inizialmente si trova sotto forma di rotolo continuo. Durante il processo di sviluppo viene srotolato e le

parti esterne sono indirizzate entro due guide fisse in modo da ottenerne una curvatura. Successivamente le estremità del film vengono incollate facendo assumere all'involucro una forma tubolare. Quando il prodotto entra in contatto con il film in forma tubolare, viene ceduto dalla catena e trascinato in avanti per attrito dalla pellicola. Delle lame a caldo rotanti provvedono a tagliare il film alla quota opportuna ottenendo così i prodotti in serie nelle loro rispettive confezioni. Per fornire un esempio individuabile nella vita quotidiana, vengono dette flowpack le classiche confezioni che troviamo nelle Brioches, nei panini confezionati singolarmente, nelle barrette di cioccolata etc. È riportato un esempio in figura 2.



**Figura 2**

## **1.2 Struttura generale della macchina**

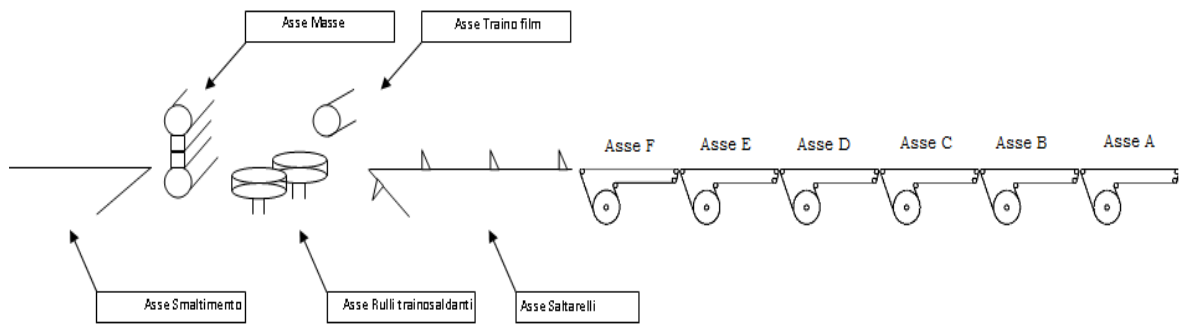
Possiamo immaginare la confezionatrice composta da diversi gruppi funzionali:

1. gruppo caricamento saltarelli
2. gruppo portabobine
3. gruppo introduzione film
4. gruppo saldatura longitudinale
5. gruppo saldatura e taglio trasversale
6. Nastro di smaltimento prodotti in uscita
7. Sei Nastri rifasatori (A,B,C,D,E e F)

I nastri rifasatori sono chiamati APLC (Automated Phasing Launching Conveyor).

I gruppi sono dotati di motorizzazione, ossia di "asse elettrico". Possiamo individuare i seguenti assi:

- asse saltarelli
- asse traino film
- asse rulli trainosaldanti
- asse masse
- asse smaltimento
- assi rifasatori



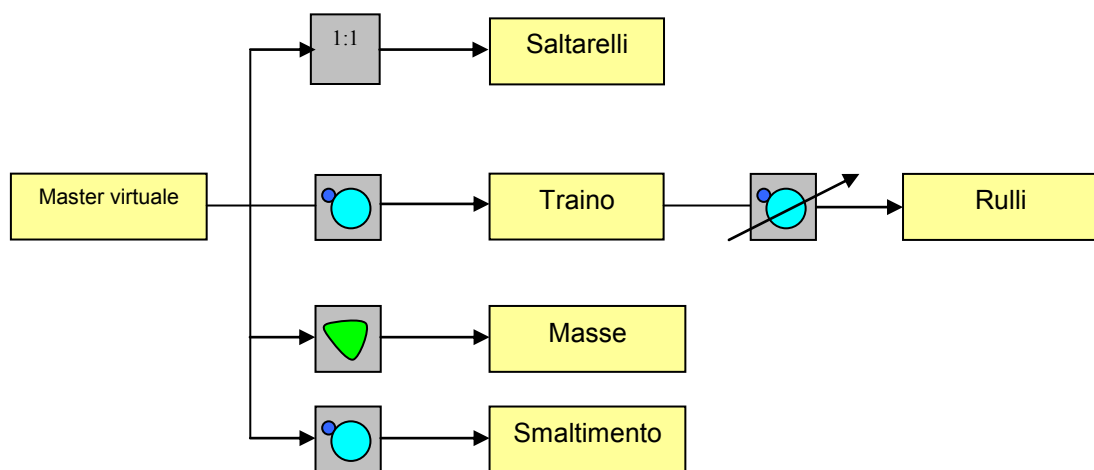
**Figura 3**

### 1.3 Principio di funzionamento Flowpack

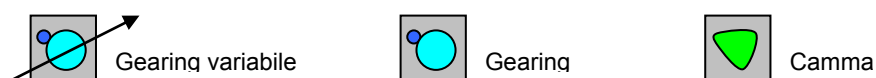
I vari assi sono legati fra loro da rapporti di riduzione elettronici, “gearing”, o “camme elettroniche” e questa cosa gli consente di muoversi in modo sincronismo. Il master di tutto il sistema è rappresentato dall’asse saltarelli, ad esso si riferiscono direttamente gli assi:

- traino film: legato tramite gearing
- masse: legato tramite una camma elettronica
- smaltimento: legato tramite gearing

L’asse rulli traino saldanti è invece slave dell’asse traino film; assieme i gruppi portabobine e saldatura longitudinale assolvono al compito di trainare e regolare la tensione del materiale d’incarto “film”. Come vedremo in seguito, il legame che li unisce è di tipo gearing ma con rapporto di riduzione variabile, funzione della tensione del film.



Legenda:



**Figura 4**

### 1.3.1 Catena saltarelli

#### Generalità

È il sistema di trasporto dei prodotti nell'incarto. È costituito da una catena su cui vengono montati elementi verticali detti "Saltarelli" che hanno il compito di spingere il prodotto fin dentro l'incarto.

Il passo fra un saltarello e l'altro,  $P_s$ , è un numero intero di maglie della catena da ½ pollice.

La catena a sua volta viene trascinata da una corona dentata con numero di denti opportuno  $Z$ .

Meccanicamente il sistema può essere descritto come in figura 5.

Supponendo di esprimere il movimento del master in gradi, un movimento di  $360^\circ$  master corrisponde ad un prodotto ossia a  $P_s$  mm (passo saltarelli)

#### Dati meccanici

Il moto viene trasportato alla catena tramite un riduttore  $R_s$  e una trasmissione a cinghia  $K$  al termine della quale è posta la corona dentata  $Z$  che trascina la catena.

Di seguito si riporta in figura 5, uno schematico dei dati meccanici del sistema.

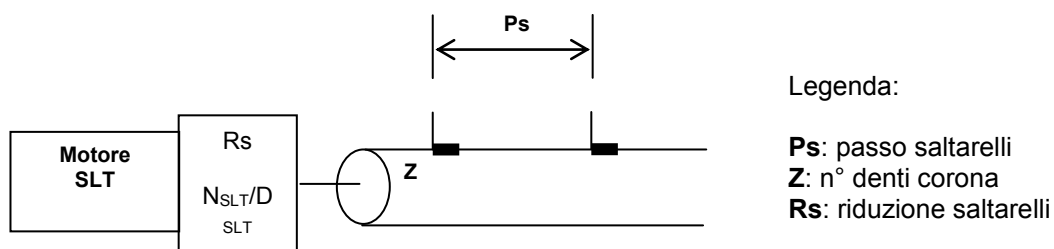


Figura 5

### 1.3.2 Gruppo Portabobine

#### Generalità

Il gruppo portabobine oltre a sorreggere fisicamente le bobine del film assolve anche ai seguenti compiti:

- Svolgere il film con tensione costante, congiuntamente al gruppo traino e saldatura longitudinale
- Rilevare la rottura del film
- Rilevare la tacca posta sul film e se necessario correggere la posizione della stampa
- Guidare il film nel convogliatore

Il rullo Traino è slave dell'asse saltarelli ed è legato ad esso da un gearing elettronico il cui rapporto viene così definito:

per ogni  $360^\circ$  di movimento master, corrispondenti ad un prodotto, l'asse traino deve sviluppare  $P_t$  mm (passo di taglio) di film.

Al movimento normale dell'asse si vanno a sovrapporre le correzioni in accelerazione o in frenata legate all'azione di centratura stampa.

### Composizione

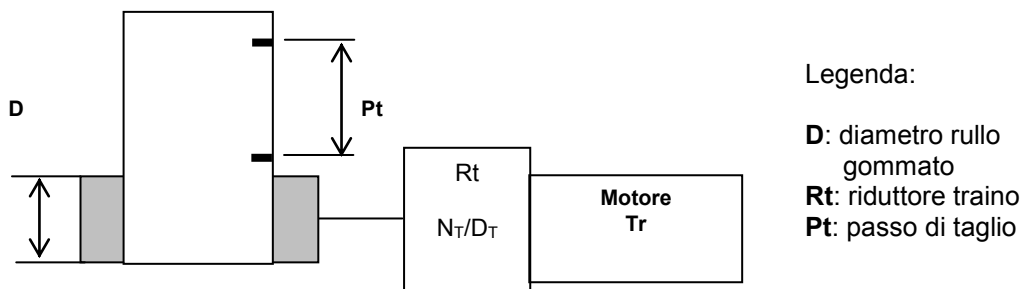
Il gruppo portabobine è composto dai seguenti gruppi vendibili:

- Motore traino
- Cella di carico + rottura film
- Cambia bobina
- Freno portabobine
- Fotocellula lettura tacca
- Centratura aspi

### Dati meccanici

Il moto viene trasportato al rullo traino tramite un riduttore **Rt** e se necessario una trasmissione **K**.

Di seguito si riporta in figura 6, uno schematico dei dati meccanici del sistema.



**Figura 6**

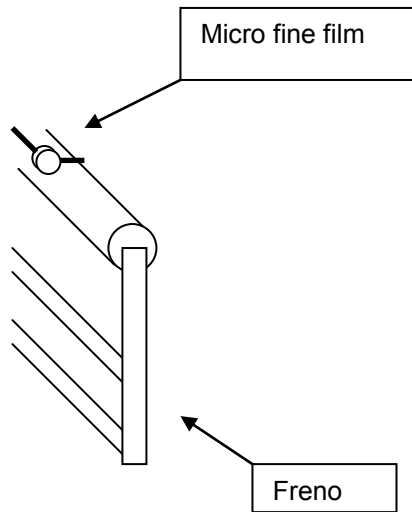
### Cambia bobina automatico

Con segnale alto del microswitch fine film viene innescato il processo di cambio automatico della bobina:

Dopo un ritardo parametrizzabile in numero di pacchetti, differente da bobina sinistra a bobina destra, si alza la camma cambio bobina. L'uscita della camma sollecita l'elettrovalvola del rullo giunta bobina che si chiude ed unisce i due lembi di film.

La giunzione, se previsto, deve avvenire in tacca (le due tacche si devono sovrapporre) a tal fine la fase d'inizio della camma deve essere parametrizzabile con riferimento all'asse Traino film. L'uscita della camma deve restare alta fissa, per

un periodo quantificabile in numero di pacchetti, parametrizzabile da pannello. I pacchetti che si vengono a creare devono essere scartati, perché sono buste unite in uscita (Buste anomale non tagliate bene).



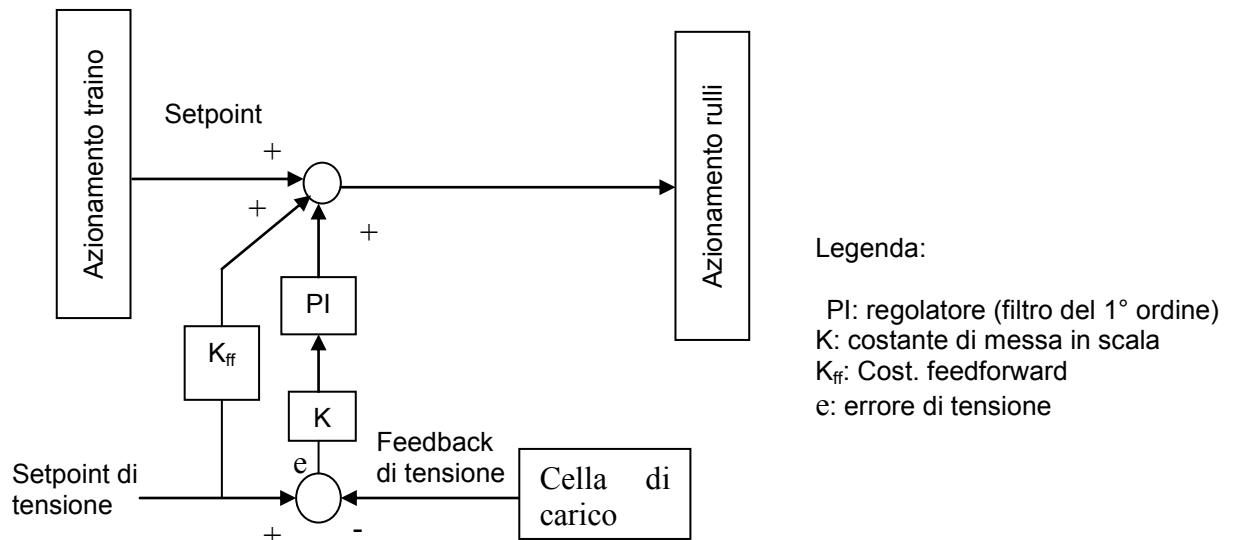
**Figura 7**

### 1.3.3 Cella di carico

Fornisce in uscita un segnale fra 0-10V per una escursione della tensione del film compresa fra 0-20 Kg. Il principio di funzionamento prevede di aumentare o diminuire la quantità di film svolto dai rulli trainosaldanti rispetto al traino film, in modo da regolare la tensione del film.

Per ottenere questo risultato si possono percorrere diverse vie:

- aumentare il setpoint di velocità dell'asse rulli rispetto al traino
- variare il rapporto di riduzione fra master (traino) e slave (rulli).



Legenda:

- PI: regolatore (filtro del 1° ordine)
- K: costante di messa in scala
- $K_{ff}$ : Cost. feedforward
- e: errore di tensione

**Figura 8**

### Osservazione 1:

K viene inglobato nel coefficiente proporzionale del regolatore.

Il controllo deve essere in velocità o posizione, assolutamente non in coppia perché come è facile intuire in caso di rottura film l'asse rulli andrebbe in "fuga":

$K_{ff}$  sostituisce l'azione derivativa aumentando la dinamica di risposta del sistema.

Un escursione del stepoint di tensione da 0-100% corrisponde ad un tiro da 0-4Kg

### Osservazione 2:

La scelta dell'asse traino come master del sistema di trascinamento e controllo del tiro film è giustificata da due precise ragioni:

- a. la presenza della cella di carico
- b. dall'ipotesi iniziale che tra traino e film non vi è slittamento

Questa ipotesi si basa sul fatto che tra rullo gommato e contrasto può essere impiegata una pressione grande a piacere tale da eliminare gli slittamenti, pur preservando l'integrità del film. Viceversa fra i rulli, può essere più utile al fine di avere una bella saldatura, avere la possibilità di regolare a piacere la pressione di chiusura. Ovviamente ciò non ci consente di dire con sicurezza che lo slittamento fra rulli e film è nullo.

Ragioniamo dunque per assurdo e supponiamo che i rulli siano master ed il traino slave.

In caso di slittamento del film fra i rulli si ha una diminuzione della tensione del film, la cella rileva tale diminuzione e l'unica cosa che può fare è rallentare il traino (o accelerare i rulli, ma il risultato è lo stesso) con la conseguenza di accentuare questo slittamento; inoltre la quantità di film svolto non è assolutamente deterministica. Il sistema è dunque instabile e dunque non funzionale.

### **CENTRATURA ASPI:**

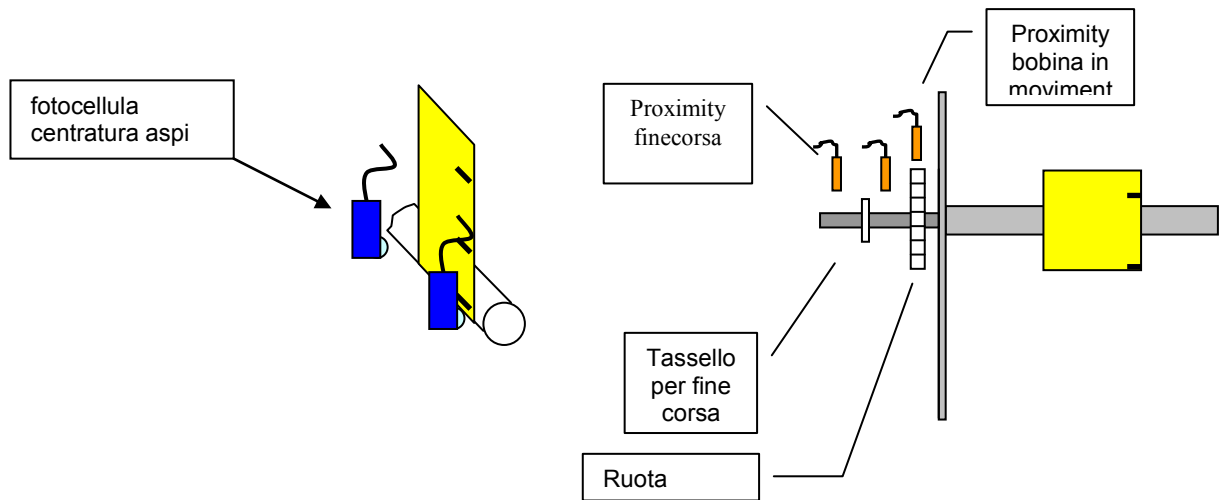
Questo dispositivo ha il compito di mantenere centrati i due lembi inferiori della saldatura; le due fotocellule rilevano gli sbandamenti del film, sulla base di tale informazione viene azionato un servomotore, che analogamente a quanto farebbe l'operatore manualmente, va ad agire sulla posizione dell'aspo riportando il film perfettamente in asse. L'azione di correzione è limitata da due finecorsa di prossimità. In totale il dispositivo si avvale di tre proximity:

- Due rilevano il finecorsa superiore ed inferiore in modo da non eccedere nella correzione; se ciò dovesse accadere viene emesso un allarme che arresta la macchina prima che il film fuoriesca.
- Il terzo viene posizionato su una ruota dentata e serve a discriminare quale delle due bobine è in movimento.

### **NOTA:**

Gli sbandamenti del film vengono rilevati in prossimità della fotocellula lettura tacca, mentre la correzione avviene sulla bobina, è quindi evidente che prima di vedere i risultati di tale correzione e prima di procedere con la successiva dovremo attendere

un certo tempo (espresso in numero parametrizzabile di pacchetti) in modo da non innescare oscillazioni



**Figura 9**

### **1.3.4 Gruppo Traino e Saldatura longitudinale**

#### Generalità

Questo gruppo, congiuntamente a quello portabobine ha il compito di trainare il film all'interno del convogliatore mantenendo la tensione del materiale d'incarto costante. Oltre a ciò si occupa di effettuare la saldatura in senso longitudinale della busta. L'asse rulli è slave dell'asse tarino ed è legato a quest'ultimo tramite un gearing variabile. Il rapporto di riduzione viene aggiornato in tempo reale in modo da mantenere costante il "tiro del film". L'informazione sulla tensione, opportunamente elaborata, arriva dalla cella di carico.

Teoricamente per ogni 360° di movimento master, corrispondenti ad un prodotto, l'asse rulli, così come quello traino film, dovrebbe sviluppare Pt mm (passo di taglio) di film. Ciò non è vero in senso assoluto a causa dell'elasticità del film e degli slittamenti. Ecco perché l'esigenza di modulare la velocità dell'asse rulli rispetto al traino. Del gruppo fanno inoltre parte le seguenti funzionalità:

- Regolazione della temperatura rulli nel caso i adottati saldante a caldo.
- Gestione dell'apertura dei rulli caldi e freddi.
- Rilevamento delle buste vuote.
- Rilevamento dei prodotti fuori fase nel tunnel.
- Rilevamento ed arresto della macchina in caso di prodotti sui saltarelli.



### Composizione

Il gruppo rulli è composto dai seguenti gruppi:

- Motore rulli.
- Preriscaldatore.
- Termoregolazione seconda coppia rulli caldi.
- Termoregolazione terza coppia rulli caldi.
- Apertura rulli freddi.
- Lettura vuoti.

### Dati meccanici

Il moto viene trasmesso al rullo traino tramite un riduttore **Rrl** e la trasmissione **K** esiste poi una trasmissione fissa **Kc= 1:2**.

Di seguito si riporta in figura 10, uno schematico dei dati meccanici del sistema.



Figura 10

### **1.3.5 Gruppo di saldatura e taglio trasversale**

#### Generalità

Questo gruppo ha il compito di saldare e tagliare l'incarto separando i pacchetti. Nel caso più semplice delle "masse rotanti" semplici, abbiamo due lame che distano  $R_p$  mm dall'asse di rotazione. Le traiettorie descritte dalle due lame sono dunque due circonferenze di raggio  $R_p$  che si toccano in un sol punto, il "punto di taglio"; in tale punto la velocità istantanea delle lame è diretta nella stessa direzione della velocità del film, ossia orizzontalmente, ed il suo modulo deve essere pari alla velocità del film stesso. Questo significa che se fosse verificata l'uguaglianza:

$$Pt = 2 \cdot \pi \cdot Rp$$

ossia lo sviluppo delle masse è esattamente pari al passo di taglio, le masse potrebbero muoversi a velocità costante e compiere un giro ogni  $360^\circ$  saltarelli. Come è facile immaginare questo capita assai di rado e nel caso di macchine multiformato non si verifica mai.

Risulta necessario legare l'asse masse all'asse saltarelli seguendo un profilo di camma che soddisfi al vincolo:

- Velocità di taglio = Velocità del film

Per masse semplici la traiettoria che lega saltarelli e masse è una semplice senoide.

Gli N+1 punti della tabella di camma possono essere determinati con il seguente algoritmo:

```
for i=2 to N-1
    MasterCamTable[i]=theta //Angolo Master
    SlaveCamTable[i]=theta+arcsin(k*sin(theta*2*pi/360))*360/2/pi //Angolo Slave
    theta=theta+10
    i=i+1
end for i
MasterCamTable[N]= TableCam1[2]+ 360 //ultimo punto master = primo punto master +360°
SlaveCamTable[N]= TableCam1[2]+ 360 //ultimo punto slave = primo punto slave +360°
```

Per garantire il raccordo tra il punto iniziale e finale della tabella sia master sia di quella slave calcolo i punti d'ingresso e uscita dalla camma.

Ingresso:

```
MasterCamTable[1]= MasterCamTable [2]- ( MasterCamTable [N]- MasterCamTable [N-1])
SlaveCamTable[1]= SlaveCamTable [2]- ( SlaveCamTable [N]- SlaveCamTable [N-1])
```

Uscita:

```
MasterCamTable [N+1] = MasterCamTable[N]+ ( MasterCamTable [2]- MasterCamTable [1])
SlaveCamTable [N+1] = SlaveCamTable [N]+ ( SlaveCamTable [2]- SlaveCamTable [1])
```

### Composizione

Il gruppo saldatura e taglio trasversale è composto dai seguenti gruppi vendibili:

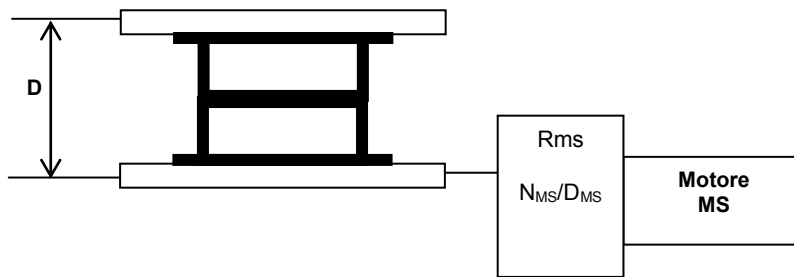
- Motore masse
- Termoregolazione masse superiori
- Termoregolazione masse inferiori

### Dati meccanici

Il moto viene trasmesso alle masse tramite una coppia di trasmissioni **K1** e **K2**.

Le masse possono avere una o più coppie di coltelli questo al fine di limitare le velocità (e dunque il numero di giri motore) durante il ciclo di funzionamento. Il numero di masse **No** è dunque un dato fondamentale per la parametrizzazione della macchina.

Di seguito si riporta in figura 11, uno schematico dei dati meccanici del sistema.



Legenda

**D:** diametro masse  
**No:** numero masse  
**Rms:** rapporto di riduzione masse

Figura 11

### 1.3.6 Nastro di smaltimento prodotto finito

#### Generalità

A questo gruppo è riservato il compito di portare fuori il prodotto confezionato dalla macchina e di espellere gli scarti

#### Composizione

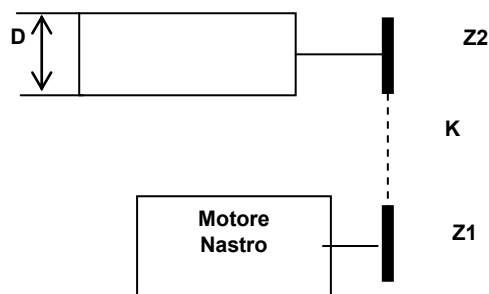
Il gruppo saldatura e taglio trasversale è composto dai seguenti gruppi vendibili:

- Motore smaltimento
- Controllo buste unite

#### Dati meccanici

Il nastro è trascinato da un rullo gommato di diametro **D** che viene mosso dal motore tramite una trasmissione **K**.

Di seguito si riporta in figura 12, uno schematico dei dati meccanici del sistema.



Legenda:

**D:** diametro rullo traino nastro  
**K:** trasmissione

Figura 12

### 1.3.7 Scarti e il suo principio di funzionamento

#### Controllo buste unite in uscita

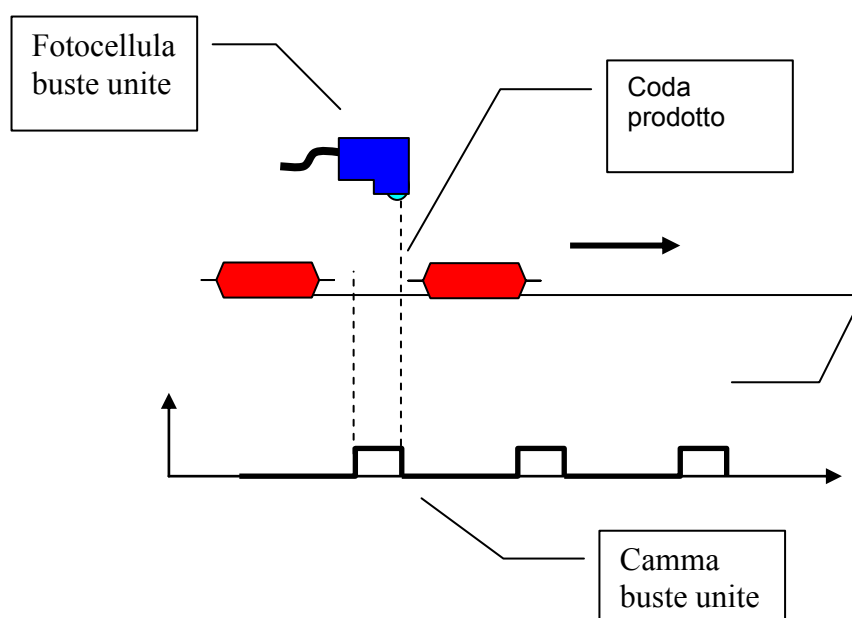
Ci troviamo in presenza di buste unite quando:

- le masse non riescono a tagliare correttamente e dunque a dividere nettamente le buste
- viene azionato il comando manuale rulli per svuotare il tunnel dai prodotti

Per rilevare questo tipo di scarti ci avvaliamo di una fotocellula mascherata da una apposita camma elettronica.

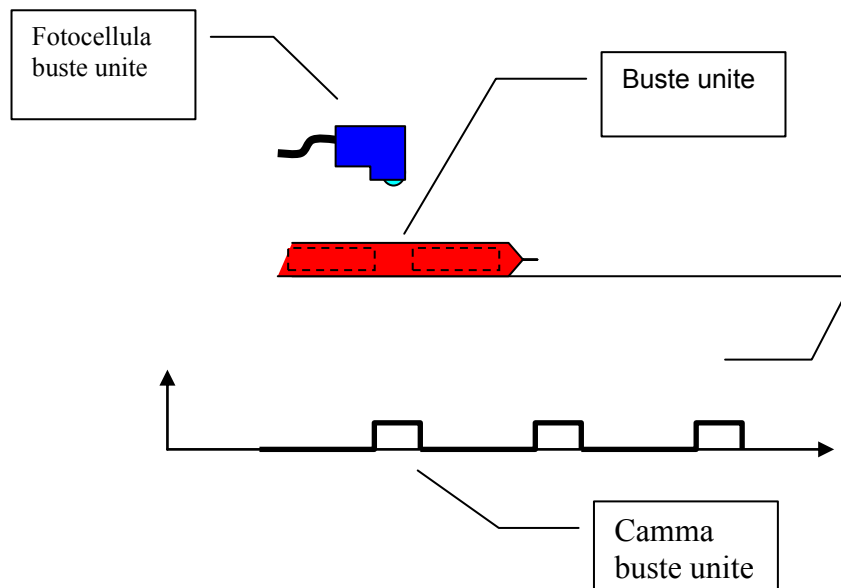
La camma buste unite deve avere le seguenti caratteristiche:

- fase di inizio parametrizzabile da pannello; l'uscita della camma deve salire appena la coda del prodotto è uscita dall'ottica della fotocellula



**Figura 13**

- fase di discesa funzione della velocità del nastro di smaltimento; la camma deve scendere prima dell'arrivo della testa del prodotto successivo
- Sul valore alto dell'uscita della camma viene testato l'ingresso della fotocellula:
  0. Buste separate
  1. Buste unite da scartare



**Figura 14**

### SOFFIO ESPULSIONE SCARTI

Il tappeto di smaltimento è dotato di un soffio che scarta le buste anomale. Distinguiamo le seguenti tipologie di scarti:

1. buste vuote
2. buste unite in uscita (Buste anomale non tagliate bene)
3. buste con film doppio (conseguenza del cambio bobina automatico)
4. buste con stampa fuori tolleranza

Per essere sicuri che il soffio colpisca la busta perfettamente al centro introduciamo una camma che attiva l'elettrovalvola del soffio prodotti anomali. Tale camma deve essere parametrizzabile in:

- fase di inizio, espressa in gradi master
- ampiezza d'intervento
- Per ognuna di queste tipologie di scarto viene predisposto uno shift register che crea un ritardo parametrizzabile da pannello, espresso in numero di pacchetti, fra l'istante di rilevazione del prodotto anomalo e quello in cui transita di fronte all'ugello del soffio di scarto.
- L'uscita dei quattro shift register viene messa in OR logico e va a controllare l'elettrovalvola che gestisce il soffio fungendo da enable.
- Il valore dell'OR logico funge da enable per il soffio:
  0. pacchetto buono, l'uscita resta bassa; nessun soffio
  1. pacchetto da scartare, l'uscita copia la camma

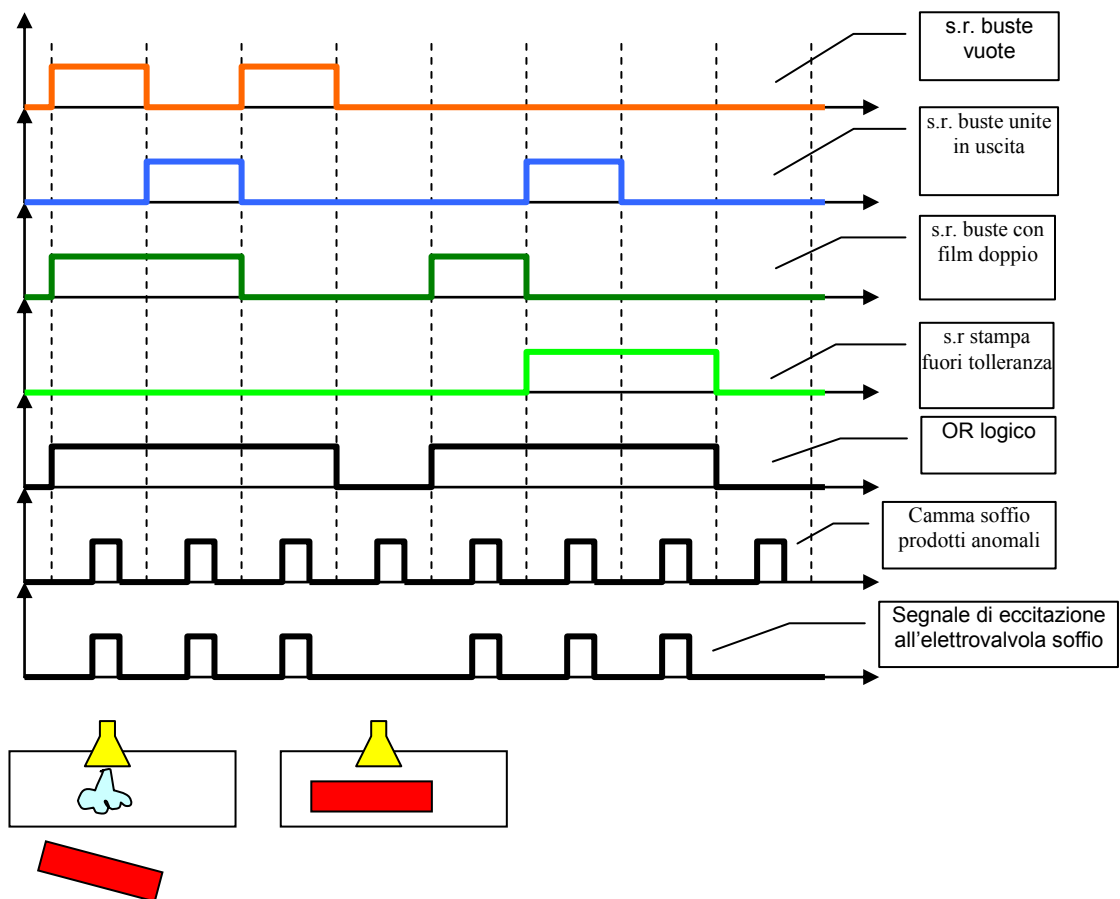


Figura 15

#### 1.4 Diagramma di flusso della confezionatrice

Il funzionamento della confezionatrice può essere descritto tramite l'utilizzo di un diagramma di flusso. Le transizioni da uno stato all'altro sono comandate dal succedersi dei segnali di comando provenienti dai vari organi della macchina o dai tasti di controllo.

Il diagramma presenta due livelli di annidamento; dal primo livello si possono intuire le transizioni attraverso le varie fasi funzionali. Al secondo livello viene lasciato il compito di entrare più in dettaglio nelle varie situazioni funzionali.

##### SITUAZIONI FUNZIONALI CONFEZIONATRICE:

1. Accensione
2. Rifasamento
3. Movimento manuale motori
4. Avanti / Indietro masse
5. Marcia manuale film
6. Marcia automatica
7. Marcia manuale

8. Marcia ad impulsi
9. Arresto in fase
10. Cambio Automatico Bobina (C.A.B.)

## DESCRIZIONE DELLE FUNZIONI MACCHINA

### 1. Accensione

Stato nel quale ci si trova all'accensione della macchina, viene eseguito una sola volta durante tutto il ciclo di funzionamento "normale" della confezionatrice; in questo stato viene eseguita l'inizializzazione della confezionatrice.

In questo stato gli azionamenti sono senza potenza.

### 2. Rifasamento

Il rifasamento può aver luogo solo dopo che tutti gli allarmi sono stati eliminati od acquisiti e la potenza ripristinata, grazie alla pressione del tasto di "Reset".

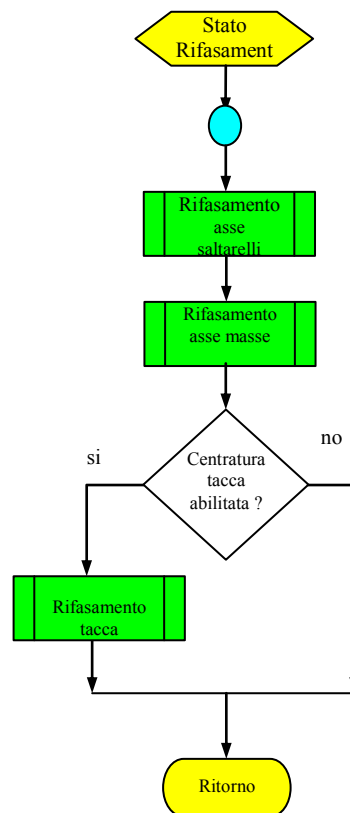


Figura 16

Premendo il tasto di "Marcia / Rifasamento" si comanda l'inizio della procedura di rifasamento. L'azzeramento avviene prendendo come riferimento il segnale proveniente dagli appositi proximity disposti su catena saltarelli, masse e guardando tramite fotocellula la posizione dell'eventuale tacca sul film.

Il rifasamento è una procedura indispensabile prima di poter passare alle operazioni di "Marcia Automatica" o "Marcia a Impulsi"

Esistono d'altra parte una serie di funzioni che possono essere eseguite anche in assenza della fase reciproca fra i vari assi:

- Marcia manuale motori
- Marcia manuale film

### 3. Marcia automatica

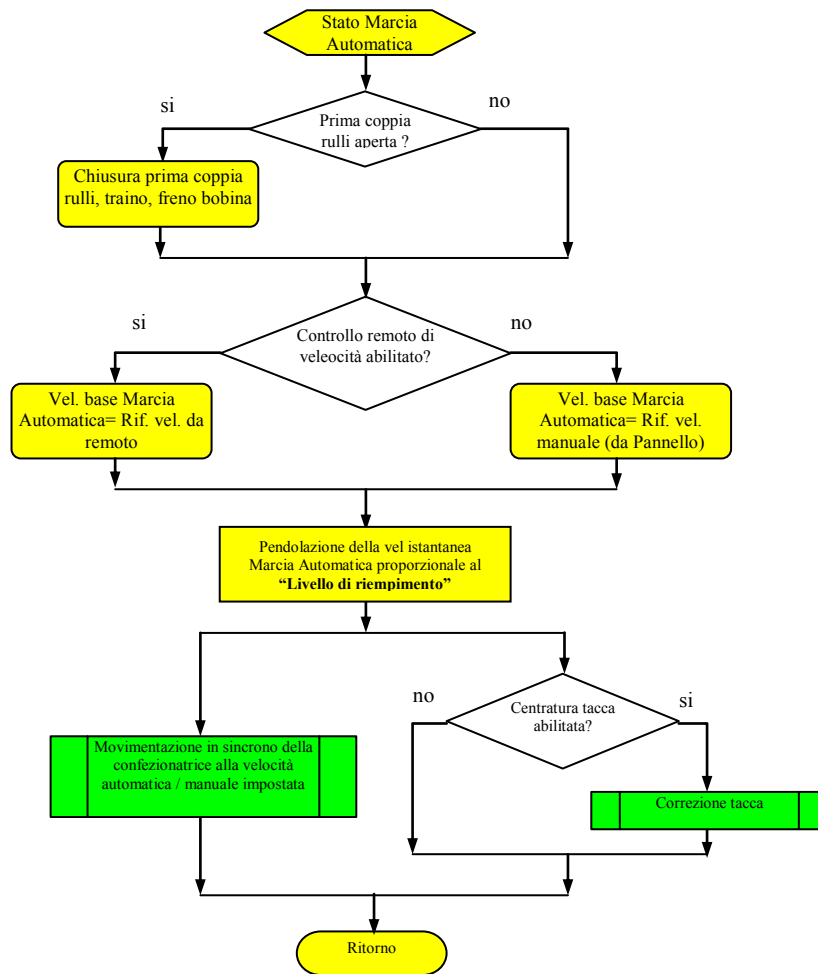
Le condizioni per passare allo stato di "*marcia automatica*" sono le seguenti:

- assenza di allarmi
- macchina rifasata

Una volta verificate queste condizioni, premendo il tasto "Marcia / Rifasamento" si passa allo stato di "marcia automatica".

Nel caso in cui la 1<sup>a</sup> coppia rulli sia aperta viene chiusa automaticamente. La confezionatrice resta ferma "pronta in attesa di prodotto" fino a quando il dispositivo di caricamento non trasmette il segnale di "consenso remoto alla marcia da sistema di caricamento" (o "Minimo polmone"); questo segnale notifica che il dispositivo di caricamento è sufficientemente pieno di prodotto per garantire la marcia regolare della confezionatrice. Sotto queste condizioni la confezionatrice parte con la rampa impostata da pannello e si mette in marcia pendolando fra "velocità minima" e "massima" a seconda del valore dei segnali di "Livello di riempimento". La velocità nominale di riferimento, intorno alla quale si pendola, dipende dal segnale analogico di "Controllo remoto di velocità". Nel caso in cui, da pannello, si decida di ignorare tale controllo la velocità di marcia automatica è pari al valore parametrizzato da pannello "Velocità Automatica". Durante la "marcia automatica" sono presi in considerazione tutti gli allarmi, e se la centratura tacca è abilitata si effettuano le dovute correzioni. Se durante la marcia una delle due bobine termina si attiva il "Cambio automatico Bobina". Nel caso in cui il "consenso remoto alla marcia da sistema di caricamento" venga a mancare la confezionatrice si "arresta in fase", ritornando allo stato "pronta in attesa di prodotto".





**Figura 17**

L'arresto in fase definitivo della confezionatrice, con conseguente ritorno allo stato "pronto per *marcia richiesta utente*", si ha nel caso in cui venga premuto il tasto di "Arresto" oppure venga a mancare il "consenso remoto da linea a valle".

#### 4. Arresto in fase

Il pulsante "Arresto" provoca l'arresto della macchina in posizione di masse aperte con la rampa impostata da pannello.

La fermata richiede un ciclo di calcolo e decelerazione; la traiettoria che porta alla fermata a masse aperte è infatti funzione della velocità di produzione e della rampa di decelerazione. In pratica la posizione di apertura si trova al termine della decelerazione, variando l'istante di inizio della decelerazione stessa.

L'"Arresto in fase" è ottenuto anche a seguito della caduta dei segnali di consenso remoto; se viene a mancare il "consenso remoto alla marcia da sistema di caricamento" la confezionatrice si arresta in fase, la situazione di "marcia automatica" resta comunque attiva in attesa di un nuovo "consenso remoto alla marcia da sistema di caricamento".

Se invece a cadere è il "consenso remoto da linea a valle" la confezionatrice effettua un arresto in fase per uscire quindi definitivamente dallo stato di "marcia

automatica”; per ritornarvi è necessario premere nuovamente il tasto di “Marcia / Rifasamento”.

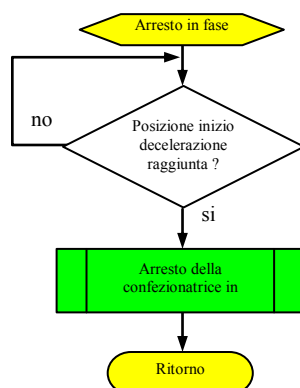


Figura 18

### 5. Cambio Automatico Bobina (C.A.B.)

Con macchina in “marcia automatica”, “manuale”, “manuale film” o “ad impulsi” appena i sensori rilevano l’assenza di almeno una delle due bobine si attiva il “cambio automatico bobina”.

L’assenza della bobina è segnalato dalla luce azzurra sulla colonnina luminosa e dal tasto “apertura / chiusura freno porta bobine” illuminato.

Dopo un numero parametrizzabile di pacchetti, diverso per le due bobine, dalla caduta del sensore, il rullo giunta bobine si chiude portando a stretto contatto i due lembi di film. Il rullo resta chiuso per un numero di pacchetti parametrizzabile da pannello operatore, per ognuno di questi pacchetti viene caricato un “uno” all’interno dello shift register che gestisce lo scarto dei prodotti avvolti con film doppio. Il cambio termina a tutti gli effetti alla riapertura del rullo giunta bobine.

Durante la fase di cambio la confezionatrice si porta alla “velocità cambio bobina” parametrizzabile da pannello; ciò avviene solo se tale velocità è minore di quella attuale di marcia.

Per aprire il freno ed introdurre la nuova bobina occorre premere il tasto “apertura / chiusura freno porta bobine”; il tasto continua a restare acceso in modo da segnalare la mancanza di una delle due bobine.

Durante questa fase, ossia con freno aperto, il C.A.B. viene inibito in modo da non pregiudicare la sicurezza dell’operatore.

Al termine delle operazioni di sostituzione della bobina premendo nuovamente il tasto “apertura / chiusura freno porta bobine” il freno si chiude automaticamente, la lampada azzurra della colonnina luminosa ed il tasto si spengono ed il C.A.B. viene riabilitato.

## 1.5 Allarmi

Tutte le transizioni da uno stato all'altro e le azioni intraprese all'interno delle varie procedure possono essere eseguite **solo e soltanto** in assenza di allarmi bloccanti. In presenza di allarmi l'esecuzione deve essere interrotta ed occorre gestire convenientemente gli stessi.

Gli allarmi vengono distinti in:

- Bloccanti, **Fault**: sono allarmi che causano l'arresto della macchina in quanto ne compromettono la funzionalità.
- Non bloccanti, **Warning**: devono essere segnalati in modo che l'operatore possa provvedere adeguatamente alla risoluzione della causa che ha scatenato il warning.

La normalità viene ripristinata eliminando la causa dell'allarme ed eseguendo le apposite procedure:

A. **Fault**: la presenza di un fault arresta la macchina, una volta rimossa la causa del fault la macchina deve ripartire con la semplice pressione del tasto di marcia che:

- Consente il ripristino della potenza se era stata tagliata
- Resetta l'allarme
- Elimina tutti i messaggi di errore dal pannello operativo

B. **Warning**: la macchina resta nello stato corrente e continua a lavorare, una volta rimossa la causa del Warning esso sparisce automaticamente:

- L'allarme viene resettato
- L'indicazione di errore sul pannello operativo scompare automaticamente

C. **Emergenza**: l'emergenza si comporta come una Fault e non richiede azzeramento.

## CAPITOLO 2

### APLC (AUTOMATED PHASING LAUNCHING CONVEYOR)

#### 2.1 Struttura generale della macchina

L'APLC è composto da 3 differenti sezioni:

- 2 nastri fasatori di diversa lunghezza
- 2 nastri di approaching
- 2 nastri tappa buchi
- di seguito verranno approfondite le varie funzioni delle differenti sezioni.

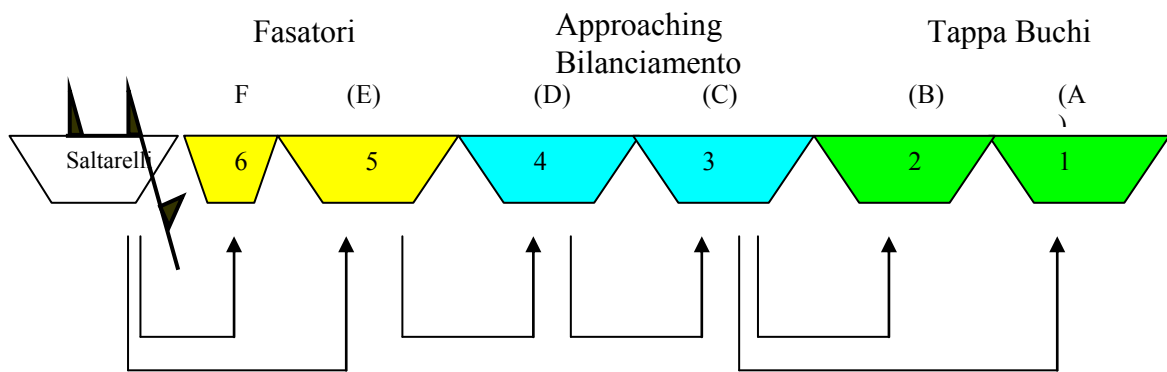


Figura 19

#### 2.2 Fasatori

Il compito dei fasatori è quello di assicurare che il prodotto entri nella catena saltarelli perfettamente posizionato fra un saltarello e l'altro. L'azione di fasatura viene assolta dai nastri 5, 6 (F,E secondo la vecchia nomenclatura) in asse elettrico con il master (asse saltarelli). L'esigenza di avere due fasatori nasce dal desiderio di avere azioni correttive di fasatura più morbide. Di fatto la correzione massima del nastro 5 (E) viene limitata a valori inferiori ai  $\pm 180^\circ$  (circa  $\pm 100^\circ$ ) ciò significa che questo nastro da solo non sarebbe in grado di recuperare al 100% la fase del prodotto, cosa che non ci preoccupa in quanto lo sfasamento residuo verrà recuperato dal nastrino 6 (F).

### Lunghezza Nastri:

Il nastro 6 ha una lunghezza pari a:

- **Lungh. Nastro 6  $\approx$  1.5\*Lunghezza prodotto**

La lunghezza del nastro 5 è vincolata meno rigidamente:

- **Lungh. Nastro 5  $\gg$  2\*Lunghezza prodotto**

Questi vincoli sono giustificati dalle funzioni assolte dai due nastri.

Tramite procedura di taratura si determina, per i due nastri, quella che potremmo chiamare la "fase naturale del prodotto", ossia la fase che il master deve possedere quando i prodotti si presentano sotto le fotocellule, affinché senza alcuna azione di compensazione, essi entrino in fase (ossia fra un saltarello e l'altro) sulla catena saltarelli.

Eventuali discrepanze fra la fase master, rilevata dal fronte di salita della FTC e la fase naturale danno origine ad azioni di compensazione messe in atto dal controllo assi.

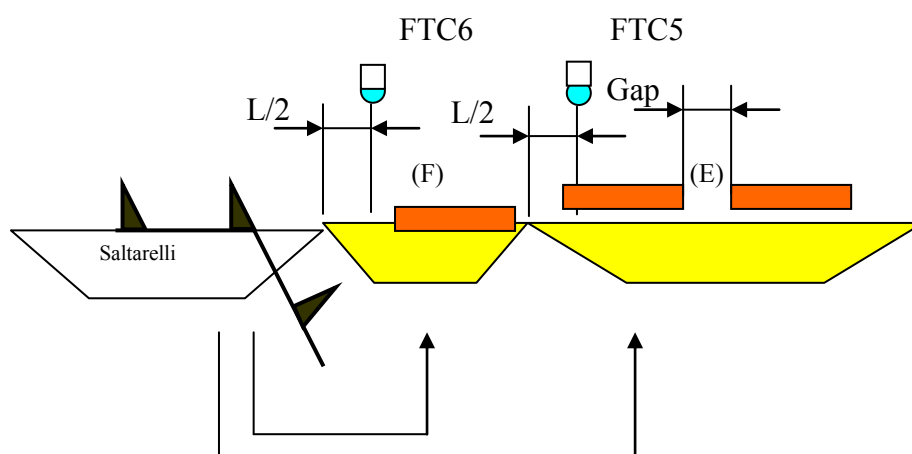
L'azione di controllo può essere esercitata per due differenti periodi o lunghezze a seconda di come si presentano i prodotti sul nastro 5:

1. separati da un gap costante
2. addossati gli uni agli altri.

Sotto l'ipotesi che il nastro 5 perda il controllo del prodotto quando esso si trova per più di metà sul nastro 6 questo ci consente di dire che lo spazio che abbiamo per intervenire è pari a:

Distanza FTC da bordo nastro + Lunghezza prodotto/2

Prima situazione: (prodotto separato da gap)



**Figura 20**

Nel caso 1 la posizione ideale della fotocellula è ad una distanza almeno pari a "Lunghezza prodotto/2" dalla fine del tappeto. Riusciamo così a correggere errori di fase pari alla lunghezza prodotto e dunque saremmo teoricamente in grado di correggere ogni tipo di sfasamento (ragionando in gradi  $0^\circ < \text{Errore} < 359^\circ$ ). Inoltre, se riuscissimo a tenere costante il gap fra un prodotto e l'altro, una volta fasato il primo anche tutti gli altri risulterebbero automaticamente fasati. Si tratta ovviamente di un compito estremamente arduo, funzione di moltissimi parametri (grip del nastro, tipologia del prodotto ecc.), tanto che per avere una maggiore uniformità negli arrivi dello stesso si opta per la soluzione esposta al punto 2, ossia si accostano i prodotti gli uni agli altri.

Seconda situazione: (prodotto accostato)

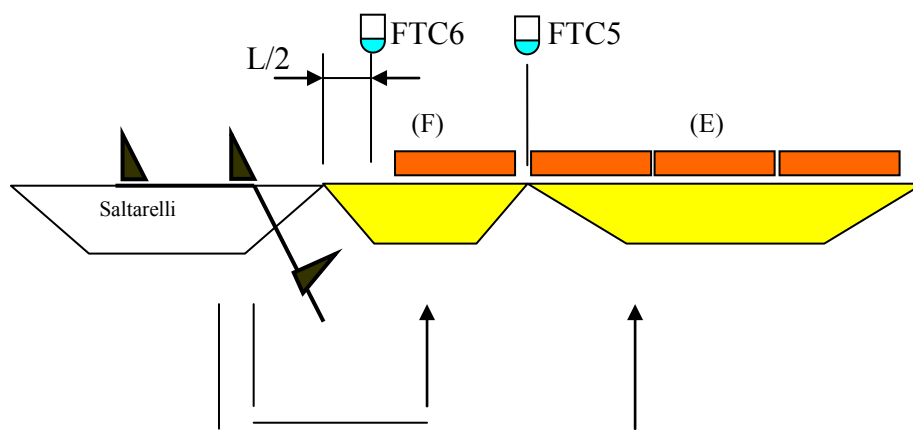


Figura 21

Questa via ovviamente è percorribile solo con prodotti che tollerino questo trattamento e che dunque non si rovinino o si appiccichino in caso di contatto troppo ravvicinato, o come spesso avviene di spinte.

L'ideale sarebbe accostare il più possibile i prodotti senza arrivare ad un contatto.

Un altro grosso inconveniente di questa soluzione consiste nella rilevazione del fronte di prodotto da parte della fotocellula che vede una schiera compatta. Per risolvere questo inconveniente la FTC viene posta a cavallo dei due nastri, imponendo al nastro 6 una velocità maggiore di quella del nastro 5, riusciamo a generare un gap sufficiente da permettere alla FTC di poter distinguere i prodotti. Purtroppo la distanza sulla quale possiamo intervenire, ossia correggere, si riduce a " $\frac{1}{2}$  lunghezza di prodotto" ciò significa che possiamo recuperare ritardi/anticipi non superiori a " $\frac{1}{2}$  lunghezza di prodotto" (ragionando in gradi  $0^\circ < \text{Errore} < 179^\circ$ ) dunque in presenza di errori superiori non si può fare altro che saltare un prodotto creando un vuoto nella produzione.

### Velocità dei nastri:

I nastri fasatori hanno una velocità ben precisa legata alla loro forma fisica e alla disposizione dei prodotti sulla loro superficie.

Nastrino 6 (F): deve trasportare non più di un prodotto per volta dunque la sua velocità in mm/ciclo è pari alla sua lunghezza che a sua volta è circa uguale al passo della catena saltarelli.

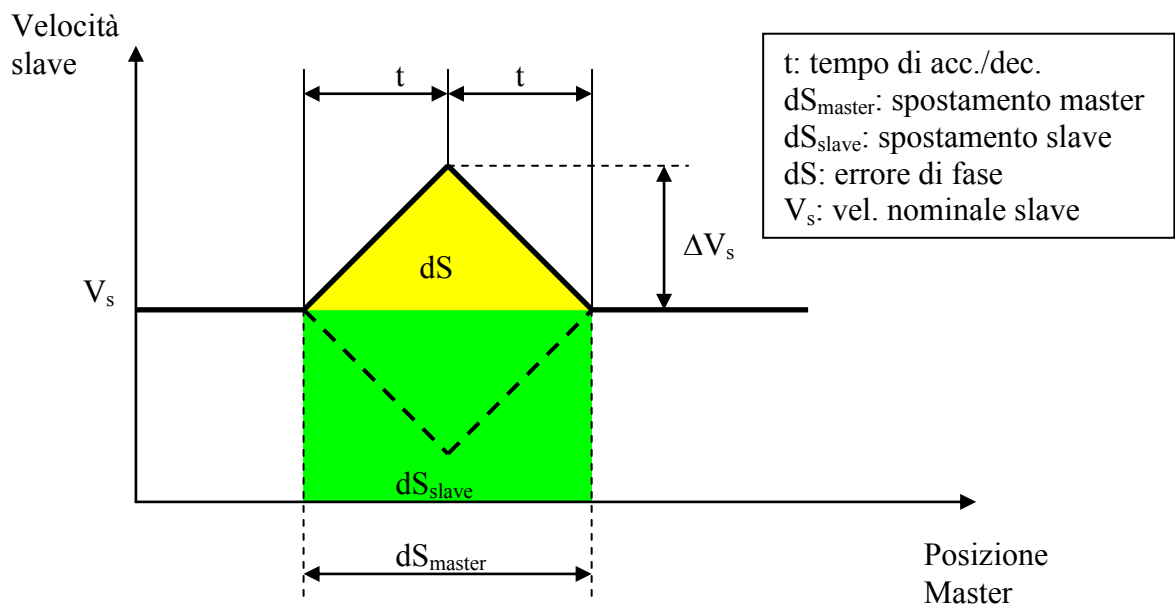
$$\text{Velocità N6} = \text{Lunghezza Nastro 6 [mm/ciclo]}$$

Nastrino 5 (E): occorre distinguere fra il caso con e senza gap.

1. Con gap: Velocità N5= Lunghezza Prodotto + Gap [mm/ciclo]
2. Senza gap: Velocità N5= Lunghezza Prodotto [mm/ciclo]

### **2.2.1 Applicazione della correzione di fase (Fasatori)**

L'azione corretttrice consiste nell'imprimere una accelerazione/decelerazione allo slave tale da modificare il suo profilo di velocità come in figura.



**Figura 22**

Il master si muove a velocità costante  $V_m$ , quindi a parità di tempo  $T$  percorre sempre lo stesso spazio. Lo slave invece viene accelerato o decelerato a seconda che sia in ritardo o in anticipo rispetto alla sua fase naturale, ciò significa che nel medesimo tempo  $T$  percorrerà dei tratti più lunghi o più brevi rispetto a quelli che avrebbe percorso a velocità nominale  $V_s$  (velocità che è vincolata a quella del master da un rapporto di riduzione). Ciò gli consente di recuperare il gap che lo divide dalla fase naturale. Lo spazio  $dS$  recuperato dallo slave è esattamente uguale all'integrale del profilo di velocità ossia all'area del triangolo di base  $2t$ , ed altezza  $\Delta V_s$ . La scelta di un profilo di correzione triangolare, e non trapezoidale per

esempio, nasce dalla volontà di minimizzare le acc./dec. a scapito di una velocità massima superiore. Come già visto a seconda della disposizione delle FTC ho due differenti distanze sulle quali "spalmare" la mia correzione, in entrambi i casi la cosa più furba da farsi è utilizzare tutto lo spazio a disposizione in modo da ottenere una correzione la più morbida possibile.

Questo risultato si ottiene scegliendo di volta in volta un tempo (o tratto di percorso master) adeguato sul quale distribuire la correzione, ricavato, ameno di rapporti di riduzione, dalla risoluzione del sistema:

$$\begin{cases} dS = \frac{2t}{2} \Delta V_s \\ dS_{master} = 2tV_m \\ dS_{slave} = \int_0^{2t} V_s(t)dt = \Delta V_s t + 2tV_s = \frac{L}{2} + Dist.FTC \end{cases}$$

dS: errore da recuperare

dS<sub>master</sub>: spazio percorso dal master durante l'azione correttiva.

dS<sub>slave</sub>: spazio totale percorso dallo slave durante l'azione correttiva, è la somma delle aree gialla e verde, sottese dal triangolo.

L: lunghezza prodotto.

Dist.FTC: distanza FTC fine tappeto.

V<sub>m</sub>: velocità master.

V<sub>s</sub>: velocità slave.

ΔV<sub>s</sub>: incremento velocità slave.

### NOTA:

Al motion come parametri vengono passati, lo spazio master sul quale implementare la correzione dS<sub>master</sub>, lo spazio slave da recuperare dS e l'accelerazione ossia il profilo di velocità con la quale implementare la correzione.

Consideriamo due casi di recupero:

#### 1. Recupero del 90%:

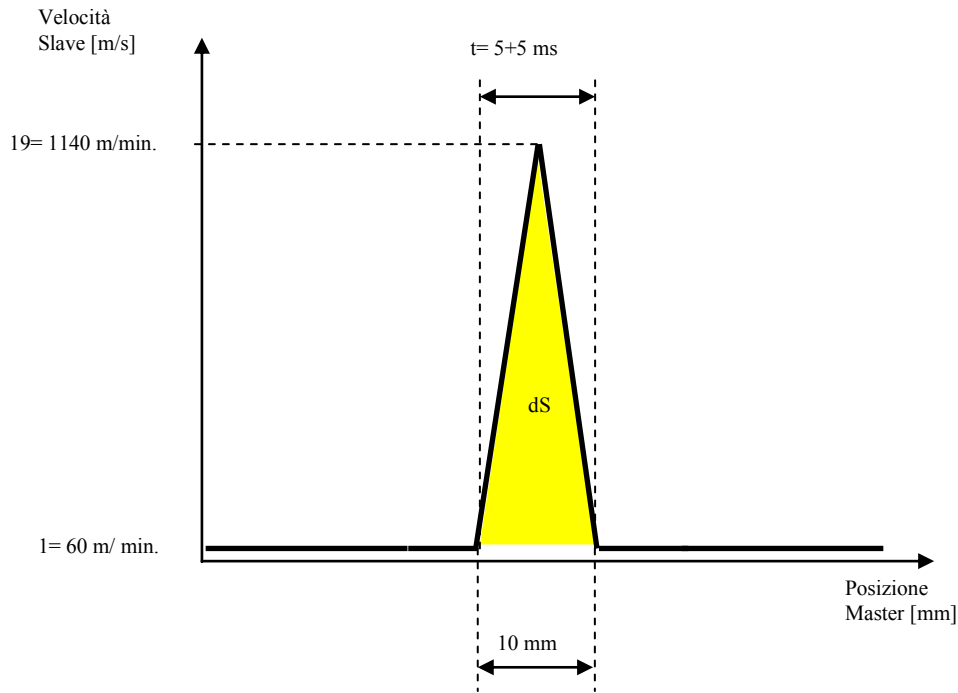
Ipotesi:

- V<sub>m</sub> = V<sub>s</sub> = 60 m/min. = 1 m/sec
- Lunghezza prodotto L = 100 mm = 0,1m
- errore da recuperare dS = 90% L = 90 mm = 0,09m
- Dist. FTC bordonastro = ½ L = 50 mm = 0,05 m



Sotto queste ipotesi, risolvendo il sistema otteniamo:

- Tempo di acc./dec.:  $t = 5 \text{ ms}$
- Spazio master su cui "spalmare" la correzione:  $dS_m = 10 \text{ mm}$
- Incremento di velocità slave:  $\Delta V_s = 18 \text{ m/s} = 1080 \text{ m/min.}$



**Figura 23**

## 2. Recupero del 50%:

Ipotesi:

- $V_m = V_s = 60 \text{ m/min.} = 1 \text{ m/sec}$
- Lunghezza prodotto  $L = 100 \text{ mm} = 0,1 \text{ m}$
- errore da recuperare  $dS = 50 \% L = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$
- Dist. FTC bordonastro =  $\frac{1}{2} L = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$

Sotto queste ipotesi, risolvendo il sistema otteniamo:

- Tempo di acc./dec.:  $t = 25 \text{ ms}$
- Spazio master su cui "spalmare" la correzione:  $dS_m = 50 \text{ mm}$
- Incremento di velocità slave:  $\Delta V_s = 2 \text{ m/s} = 120 \text{ m/min.}$

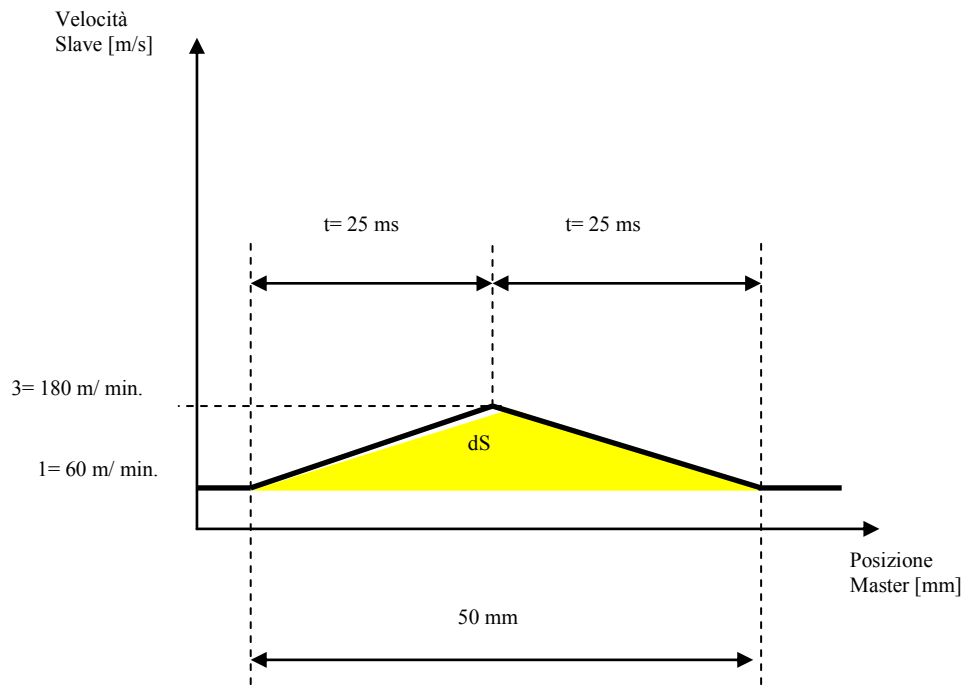


Figura 24

### 2.3 Approaching (Bilanciamento Polmone)

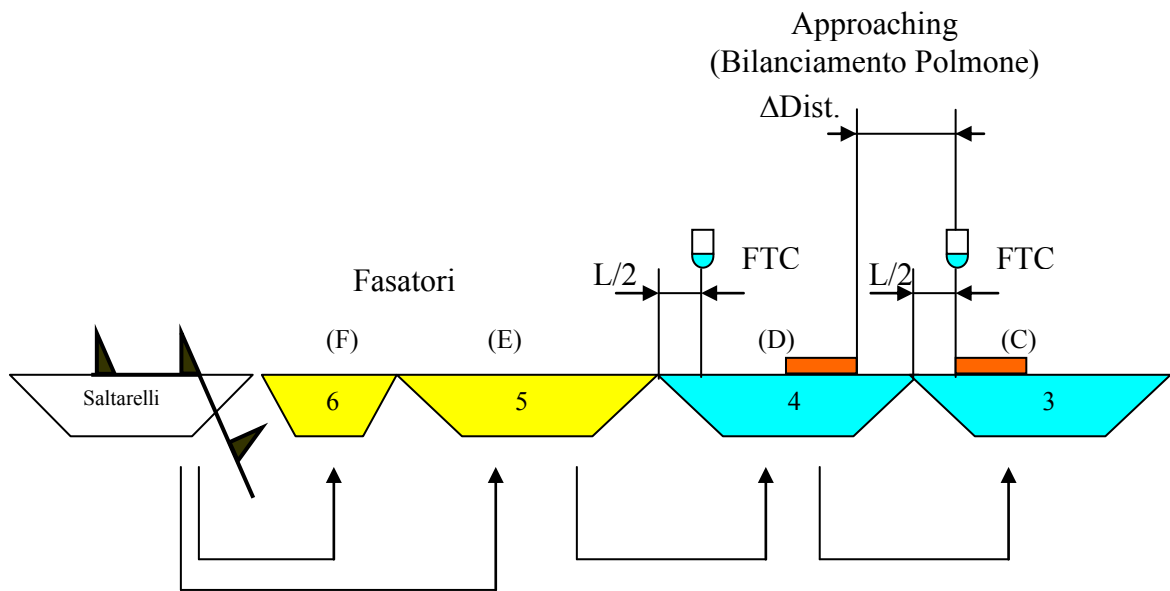


Figura 25

L: lunghezza prodotto

$\Delta Dist.$ : distanza fra i fronti di discesa e salita di due prodotti consecutivi

La fase di Approaching o “bilanciamento polmone” ha il compito di equidistanziare perfettamente tutti i prodotti in modo da porli sul nastro 5 (E) perfettamente accostati o separati da un gap costante. Si tratta di una azione correttiva “fine” commisurata alla effettiva distanza misurata fra il fronte di discesa del prodotto precedente ed il fronte di salita del prodotto presente sotto la FTC 3 o 4.

### **2.3.1 Applicazione della correzione di fase (Approaching)**

Il prodotto viene corretto se e solo se il gap rilevato differisce da quello teorico che si voleva imporre fra i due prodotti consecutivi. In realtà le cose sono un po’ più complicate se i tappeti vanno a velocità differenti come spesso accade. Occorre tenere conto di tale differenza di velocità in quanto contribuisce naturalmente a richiudere o riaprire i gap fra i prodotti (“contributo di richiusura naturale”).

Per determinare l’effettiva distanza alla quale si troveranno i due prodotti una volta giunti sul nastro a valle, occorre sottrarre allo spazio, rilevato dalla FTC, il contributo di richiusura naturale:

Esempio: passaggio dal nastro 3 al nastro 4

$$\begin{aligned} \text{gap}_{\text{reale}}(\text{n.4}) &= \text{Distanza fra i fronti (FTC 3)} - \text{Contributo di richiusura naturale} \\ &= \Delta\text{Dist. (FTC 3)} - [\text{vel. (n.3)} - \text{vel. (n.4)}] * (\Delta\text{Dist. (FTC3)} + \text{lungh. prodotto}) / \text{vel. (n.3)} \end{aligned}$$

Una volta determinato il gap reale sul nastro a valle e dato il gap ideale che si vuole imporre siamo in grado di determinare l’azione correttiva da imprimere al fine di distanziare i prodotti esattamente del gap ideale:

$$dS(\text{n.3}) = \text{gap}_{\text{reale}}(\text{n.4}) - \text{gap}_{\text{ideale}}(\text{n.4})$$

L’azione correttiva viene applicata con la stessa metodologia già vista per la fasatura, ossia profilo di velocità triangolare ed azione correttiva “*spalmata*” su un tratto di spostamento master il più lungo possibile, al fine di addolcire il tutto.

Sotto le ipotesi già formulate per la fasatura, ossia che il prodotto rimane di proprietà di un tappeto fino a che non è per più di metà lunghezza sull’altro, con le FTC a ½ lunghezza prodotto dal confine del nastro sono in grado di recuperare idealmente un prodotto

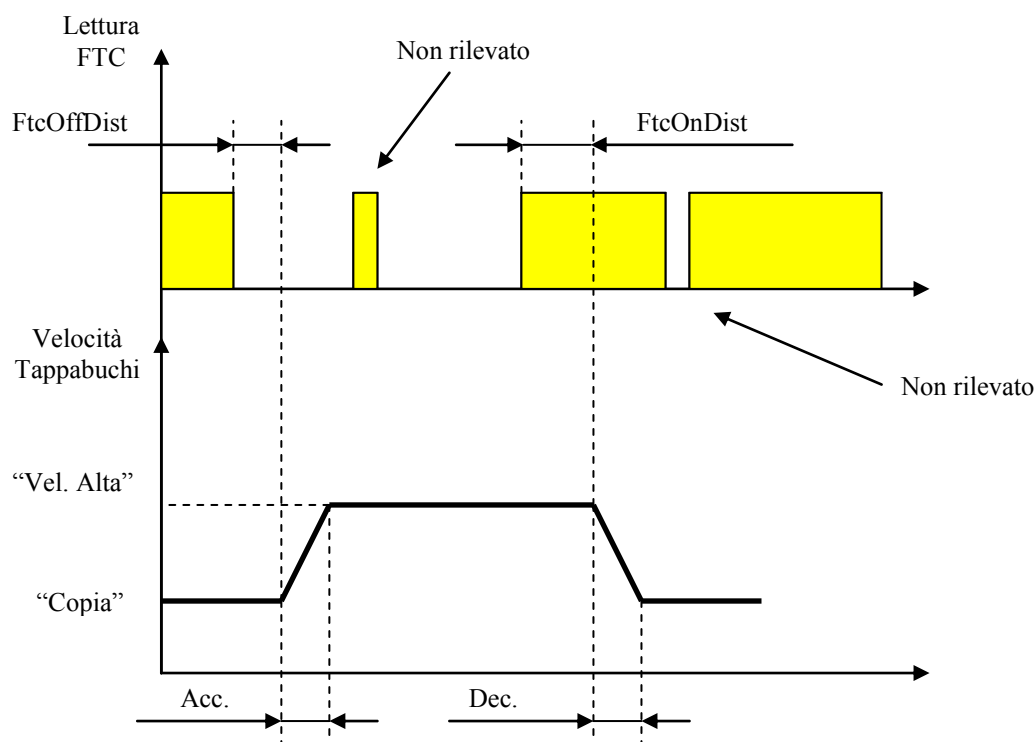


Nella filosofia attuale il nastro 1 e 2 (A e B) sono entrambi slave dell'asse 3 (C), questo limita la possibile richiusura fra i nastri 1 e 2 quando sono entrambi in velocità alta.

La naturale evoluzione è quella di rendere il nastro 2 slave del 3 ed il nastro 1 slave del 2, in modo da ottimizzare le richiusure anche quando entrambi sono in velocità alta, ovviamente al prezzo di velocità alte maggiori.

Più in dettaglio il passaggio da velocità alta alla copia del master avviene se e solo se la FTC rimane oscurata per un tratto di spazio maggiore di un valore parametrizzabile da pannello; stessa cosa per andare da situazione di copia a velocità alta, la transizione si ha se e solo se la FTC rimane libera per più di un tratto di spazio parametrizzabile.

Il cambio di velocità avviene con una rampa di acc./dec. parametrizzabile da pannello operatore. Il profilo di velocità del nastro TB è dunque tipicamente trapezoidale.



**Figura 28**

FtcOnDist: spazio a FTC impegnata necessario per la commutazione in "copia"  
 FtcOffDist: spazio a FTC libera necessario per la commutazione in "velocità alta"

Le rampe possono essere più o meno accentuate a seconda della morbidezza e della velocità che si vuole imprimere alle variazioni di velocità. Variazioni non troppo brusche sono auspicabili per ridurre gli slittamenti, d'altra parte rampe morbide significano, in fase di frenata un periodo più lungo durante il quale si è a velocità maggiore rispetto al master a valle, ciò può generare spinte fra i prodotti.

Una alternativa empirica per aiutare ad evitare le spinte è quella di spostare un po' più a monte le FTC che teoricamente andrebbero a bordo nastro, questa soluzione si rende necessaria anche nel caso in cui il motore non sia in grado di inseguire le dinamiche richieste (acc./dec. troppo elevate) facendoci incappare nel problema di cui sopra ossia le spinte.

Viceversa una FTC un po' più a valle aiuta a richiudere un po' di più i buchi fra i prodotti sul nastro successivo.

È bene dunque che le FTC siano libere di muoversi a monte e a valle della fine dei nastri 1 e 2 (A e B).

Situazione peggiore; i prodotti arrivano distanziati della stessa lunghezza del tappeto tappabuchi:

Ipotesi:

- Vel. nastro 3 (D):  $V_{\text{copia}} = 60 \text{ m/min.} = 1000 \text{ mm/sec}$
- Vel. alta nastro 2 (C):  $V_{\text{alta}} = 1.5 * V_{\text{copia}} = 90 \text{ m/min.} = 1500 \text{ mm/sec}$
- Lunghezza nastro:  $L_n = 0,5 \text{ m} = 500 \text{ mm}$
- Dist. FTC bordonastro = 0 mm
- Acc./Dec.:  $a = 1500 \text{ mm/s}^2$

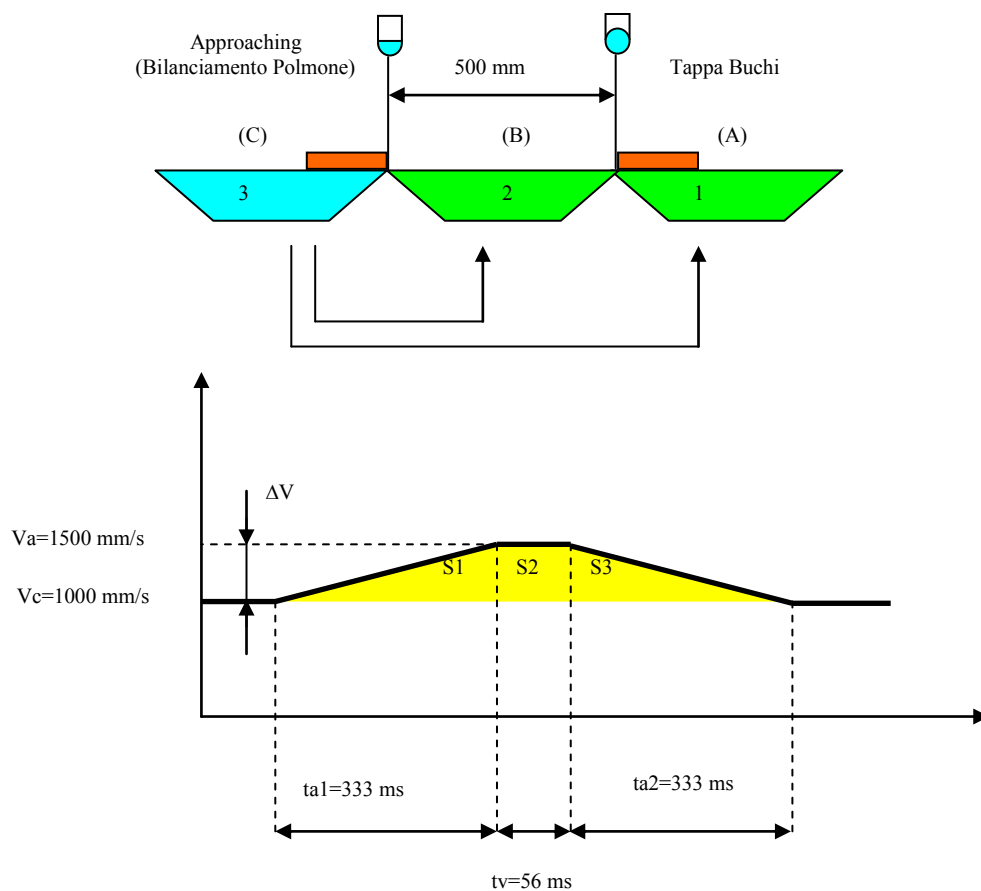


Figura 29

$$\begin{cases} t_a = \frac{V_a - V_c}{a} \\ \frac{1}{2}at_a^2 + V_c t_a + V_a t_v = Ln \end{cases}$$

Da cui:

- Tempo di accelerazione  $t_a = 333 \text{ ms}$
- Tempo di decelerazione  $t_v = 50 \text{ ms}$
- Spazio percorso in fase di acc./dec.  $S1=S3 = (\Delta V * t_{a1})/2 = 83 \text{ mm}$
- Spazio percorso a vel. alta  $S2 = \Delta V * t_v = 28 \text{ mm}$
- Spazio Teorico recuperato dal TB  $S1+S2+S3 = 194 \text{ mm}$
- Spazio Reale recuperato dal TB  $S1+S2+1/2L = 161 \text{ mm}$

Già durante il periodo  $t_{a1}+t_v$  il prodotto a percorso l'intera lunghezza del tappeto, lo spazio percorso nel tempo  $t_{a2}$  viene impiegato per portarsi a vel. di copia, in teoria è un effetto indesiderato, specie se è fonte di spinte fra i prodotti, ma all'atto pratico, può aiutare la richiusura dei gap.

Và inoltre sottolineato che se:

$$S3 > \frac{1}{2} L$$

il terzo contributo va ridotto a  $\frac{1}{2} L$  in quanto oltre tale valore di spazio il prodotto è divenuto di proprietà del successivo nastro a valle e dunque il nastro di monte non potrà far altro che patinarvi sotto per i restanti:

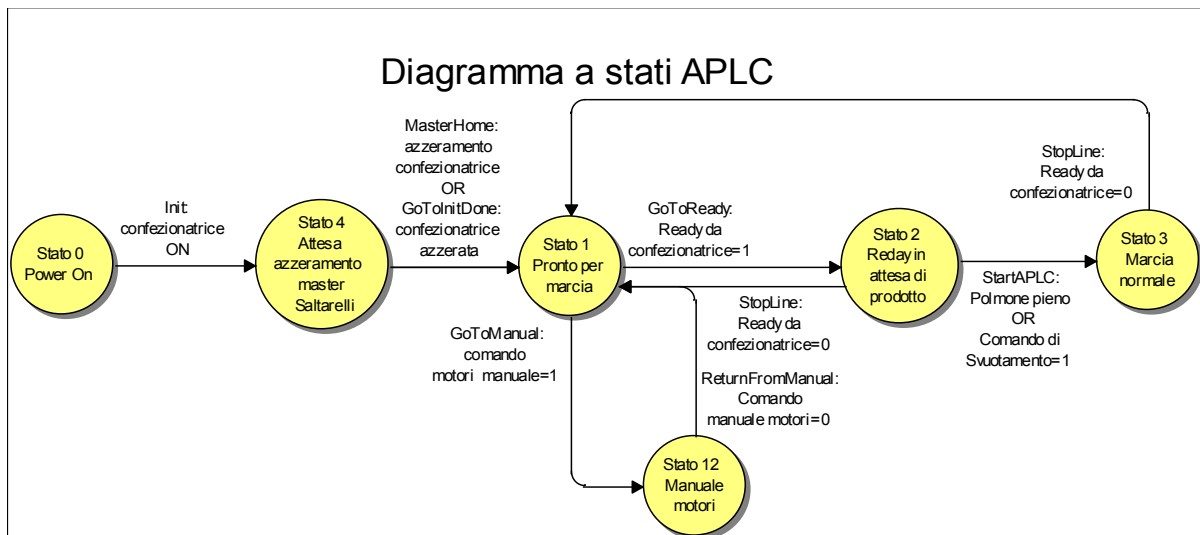
$$S3 - \frac{1}{2} L \text{ millimetri}$$

Risulta intuitivo che più alte sono le velocità in gioco minore è la capacità di richiusura del tappa buchi, a parità di lunghezza del nastro.

Infatti per poter aumentarne la richiusura occorrerebbe aumentare le accelerazioni e la velocità alta con il rischio di pattinamento.

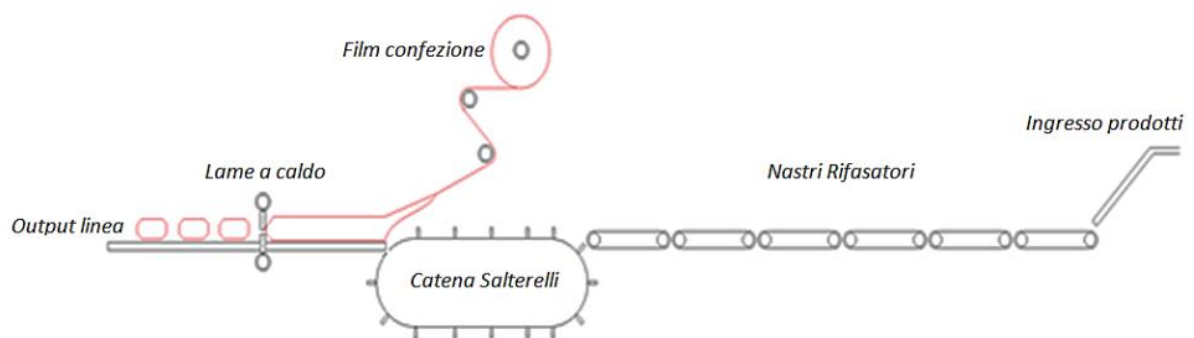
## 2.5 Stati di Funzionamento APLC

Il funzionamento dei nastri rifasatori può essere descritto tramite il diagramma di flusso della figura 30. Si può notare che Le transizioni da uno stato all'altro sono comandate dallo stato della confezionatrice.



**Figura 30**

## 2.6 Problematiche della flowpack e i nastri Fasatori APLC



**Figura 31**

- **Struttura meccanica occupa uno spazio elevato**

Come Si può notare nella figura 31 una macchina confezionatrice con nastri fasatori APLC occupa uno spazio elevato; può infatti arrivare ad una lunghezza minima di 6/7 metri. A prescindere comunque dallo spazio elevato che occupa, si può dire che è una macchina complessa la quale utilizza anche undici assi(motori). La progettazione elettronica è molto complessa e richiede un tempo di azione molto prolungato.

- **Velocità limitata**

La massima velocità a cui può arrivare tale macchina, avendo dei nastri fasatori, è molto limitata, si parla infatti di uno standard di 500 prodotti al minuto tenendo sempre conto della lunghezza del prodotto stesso. Il movimento del prodotto su tali nastri può determinare degli slittamenti dei prodotti stessi, quando la velocità di



produzione arriva al massimo livello e ciò è dovuto dalla forza d'inerzia del prodotto.

- **Cambio Formato complesso**

Un altro importante limite di queste macchine è la complessità di realizzare un cambio formato da poter adattare ad altri tipi di prodotti. Nel caso in cui si volesse cambiare il formato bisognerebbe cambiare meccanicamente il passo saltarello nella catena principale e spostare le fotocellule dei nastri fasatori, un lavoro molto complesso e dispendioso che viene altrimenti garantito dal prototipo della macchina di nuova generazione descritta nei paragrafi successivi.

- **Problematiche con prodotti teneri**

Bisogna inoltre affrontare le difficoltà derivanti dall'accelerazione e decelerazione dei nastri che provocano importanti deformazioni ai prodotti stessi, cambiandone quindi l'aspetto desiderato. L'intento sarebbe quello di non far strisciare i prodotti sui nastri e di non farli grippare sui nastri.

- **Manutenzione e assistenza**

La macchina flowpack standard appena descritta richiede frequenti manutenzioni e assistenza meccanica alle diverse sue componenti; ad esempio i nastri fasatori si consumano dopo un periodo limitato di tempo e questo richiede una costante sostituzione degli stessi dovendo quindi sostenere anche elevati costi di manutenzione.

## CAPITOLO 3

### MOTORI LINEARI

Il seguente capitolo è dedicato interamente al richiamo teorico delle tipologie di funzionamento con cui viene suddiviso il campo dei motori elettrici. Come annunciato nella parte introduttiva, considerando che la maggior parte dei moti da realizzare all'interno di un automatismo industriale sono di tipo lineare, il richiamo teorico sarà concentrato principalmente all'analisi dei tipi di azionamenti lineari che la letteratura scientifica propone. Infine, grazie al loro maggiore impiego in campo industriale e al richiamo del principio di funzionamento all'interno del terzo capitolo, verranno approfonditi ulteriormente i motori lineari di tipo sincrono.

#### 3.1 Definizione e tipologie

Si può pensare di ottenere un motore lineare partendo da un motore rotante. Si consideri allora la struttura di base di un classico attuatore rotativo come mostrato in figura 31. Il termine motore elettrico definisce una macchina in cui la potenza di ingresso è di tipo elettrico e quella di uscita è di tipo meccanico, assumendo la funzione di attuatore. Come mostrato in figura, è possibile distinguere gli elementi che lo compongono i quali prendono il nome di rotore e statore. Questi membri, messi in relazione tra loro secondo gli appositi principi fisici, permettono la rotazione dell'asse del motore. In commercio esistono diversi generi di architetture, di cui la divisione classica è tra motori in corrente continua (CC) e in corrente alternata (CA).

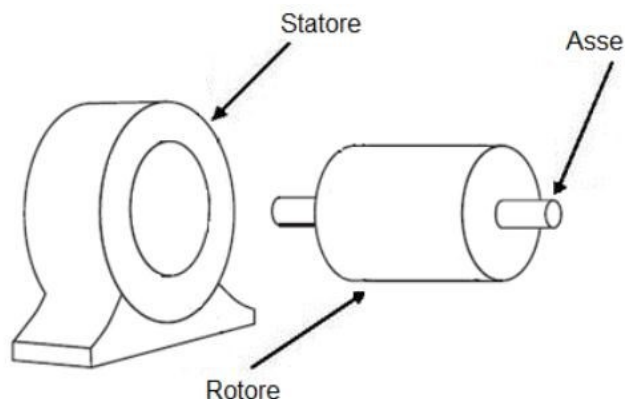
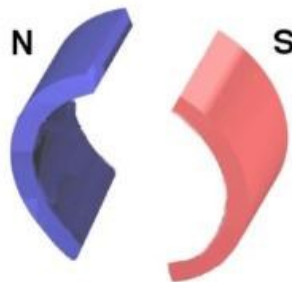


Figura 31

- **Tipologie di statore**

Lo statore, in una macchina avente elementi in movimento, è l'insieme delle parti fisse. In base alla tipologia di motore, può essere costituito generalmente a magneti permanenti oppure da avvolgimenti.

La prima tipologia di statore, è caratterizzata per l'appunto da magneti permanenti situati nella parte fissa della macchina elettrica. I magneti possono essere di vario tipo a seconda delle prestazioni desiderate, della robustezza e al tipo di ambiente a cui sono sottoposti. Lo statore a magneti permanenti è usato solitamente all'interno dei motori in corrente continua. Ne è riportato un esempio in figura 32.



**Figura 32**

Il secondo tipo di statore è detto Avvolto. Questo sistema è sfruttato dai motori in corrente alternata, dai motori universali, dal motore brushless e dal motore passo-passo. Questo tipo di architettura presenta delle zone concave ricavate all'interno della struttura nelle quali vengono disposti dei conduttori di rame isolati tra loro. Gli avvolgimenti, percorsi in modo opportuno da corrente a seconda della fase di cui fanno parte, creano un campo magnetico. Le zone in cui vengono inseriti i conduttori vengono dette cave statoriche le quali sono uniformemente distribuite sulle superfici affacciate al traferro e generalmente composte da lamierini ferromagnetici isolati fra di loro. Le dimensioni dei lamierini sono direttamente dipendenti da quanto lo statore viene interessato da flussi magnetici variabili nel tempo; più la variazione di flusso magnetico risulterà elevata, minore sarà lo spessore dei lamierini. Ciò è motivato dal fatto che la variazione di flusso nei materiali ferromagnetici provoca la comparsa di correnti senza impieghi utili chiamate correnti parassite o correnti di Foucault le quali, circolando all'interno del materiale, provocano una perdita di potenza inutile. Separando allora il materiale ferromagnetico in sottili strati isolati tra loro, si riduce il percorso di circolazione delle correnti e di conseguenza la perdita di potenza. Un'altra origine di perdita di potenza nel materiale ferromagnetico che costituisce le cave è la così detta perdita per isteresi. È dovuta alla magnetizzazione non lineare del materiale. Utilizzando il ferro-silicio è possibile ridurre l'area del ciclo di isteresi e le conseguenti perdite per isteresi. Un altro parametro su cui è possibile agire riguarda il numero di cave e quindi di matasse accolte: maggiore saranno le matasse e minore sarà la vibrazione dell'albero motore, questo perché si avrà un passaggio più morbido tra un campo magnetico di una fase elettrica a un campo

magnetico della fase elettrica successiva. In figura 33 si riporta un esempio di statore avvolto.

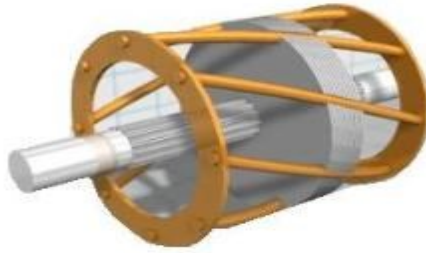


**Figura 33**

- **Tipologie di rotore**

Il rotore in una macchina avente parti in movimento, è l'insieme delle parti rotanti. Come rappresentato in figura 31, è l'elemento che viene inserito all'interno della cavità statorica in posizione perfettamente centrata e coassiale all'asse di rotazione. Il diametro di rotore è tale da realizzare un traferro dell'ordine del millimetro ed ha il compito fondamentale di trasferire all'asse di rotazione il moto rotativo. Analogamente a quanto visto per lo statore, esistono diverse tipologie di rotore in base al tipo di motore elettrico di cui fa parte. Occorre innanzi tutto distinguere la classificazione elettrica di funzionamento a seconda del tipo di alimentazione in corrente alternata o in corrente continua. Per quanto riguarda la prima classificazione, il rotore adotta anche il nome di indotto. Questo è motivato dal fatto che le caratteristiche elettrico magnetiche della parte rotante della macchina sono per l'appunto indotte dalle caratteristiche di funzionamento dello statore senza alcun collegamento fisico sul rotore. Le gamme di rotore più impiegate sono:

Rotore a gabbia di scoiattolo: questo tipo di rotore è caratterizzato dall'essere semplice e robusto ed è utilizzato solitamente nelle macchine asincrone. È costituito da un pacco di lamierini aventi la forma di corona circolare, con un foro interno per il passaggio dell'albero di rotazione. Presenta inoltre delle scanalature esterne dette cave rotoriche per accogliere l'avvolgimento che, in questo caso, si realizza utilizzando delle sbarre di rame o di alluminio pressofuso. Le testate delle sbarre che sporgono dal pacco lamellare vengono direttamente collegate fra loro alle estremità mediante un grosso anello di rame. Il rotore così costruito viene indicato coi nomi di rotore a gabbia di scoiattolo o rotore in corto circuito. Ne viene riportato un esempio in figura 34.



**Figura 34**

Rotore avvolto: è costituito da un pacco di corone circolari di lamiera magnetiche aventi le cave rotoriche nelle quali vengono posizionati i conduttori. I terminali degli avvolgimenti fanno capo a tre anelli coassiali con il rotore sui quali strisciano delle spazzole collegate con dei reostati esterni.

Variando opportunamente la resistenza elettrica del reostato si può agire sulla coppia in modo da disporre di una coppia di spunto massima in fase di avvio del motore. Questo tipo di rotore viene tipicamente utilizzato nel motore asincrono ed è rappresentato un esempio in figura 35.



**Figura 35**

A espansioni polari, questo tipo di rotore viene utilizzato per il motore sincrono o l'alternatore sincrono e le espansioni polari sono ottenute tramite magneti permanenti oppure tramite elettromagneti. Per quanto riguarda la seconda categoria di distinzione, ovvero i motori in corrente continua, possiamo avere essenzialmente due tipologie di rotore:

**A magneti permanenti:** Sistema utilizzato dal motore brushless e dal motore passo-passo in cui il rotore produce un campo magnetico costante prodotto dai magneti. Vengono riportati gli esempi rispettivamente in figura 36 e figura 37.

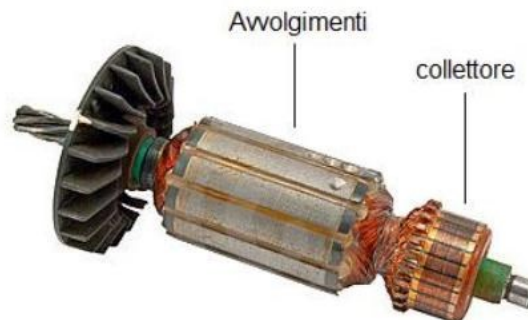


**Figura 36**



**Figura 37**

**Avvolto:** Sistema utilizzato dalla quasi totalità dei motori in corrente continua e dai motori universali. Si hanno diversi avvolgimenti disposti sul rotore e le varie matasse vengono eccitate in un determinato ordine ed istante tramite un collettore a spazzole.



**Figura 38**

- **Principio di funzionamento di un motore elettrico**

Fino ad ora si è parlato degli elementi che compongono la struttura di una macchina elettrica rotante e delle varie tipologie che ne derivano e seconda del tipo di rotore e statore. Occorre ora descrivere il principio di funzionamento che accomuna tutti i motori elettrici per poter poi proseguire verso l'ambiente dei motori lineari.

La prima legge fisica dell'elettromagnetismo che necessita di essere introdotta è la legge di Ampère. Sia  $B$  il campo magnetico misurato in Tesla in base all'unità di misura del SI (sistema internazionale) e sia  $\mu_0$  la costante di permeabilità magnetica. Allora:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 \cdot \sum i$$

La circuitazione del campo magnetico lungo un qualsiasi percorso chiuso è proporzionale alla somma algebrica delle correnti concatenate al percorso. Tradotto in termini più pratici, significa che ogni conduttore percorso da corrente genera un campo magnetico. Si riporta un esempio del concetto nelle figure 39 e 40.

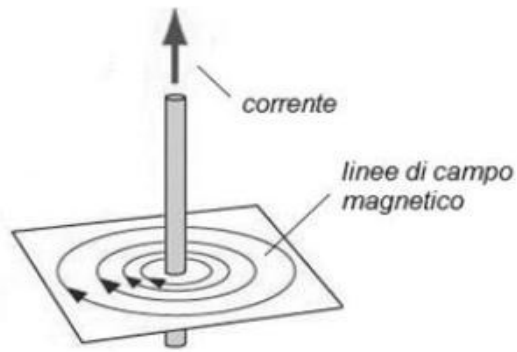


Figura 39

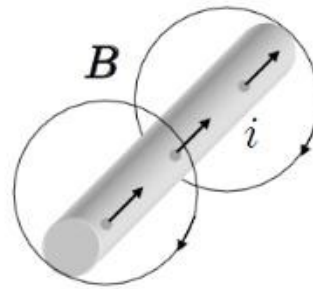
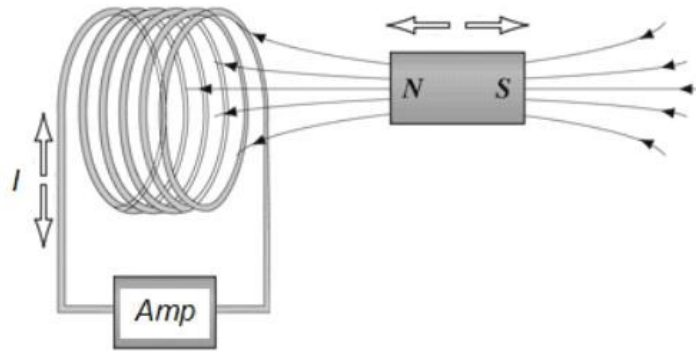


Figura 40

La prossima legge analizzata deriva dai concetti della forza elettromotrice indotta e viene presa come riferimento la figura 41. Se le linee di campo magnetico prodotte da un magnete permanente vanno a tagliare dinamicamente un solenoide, su quest'ultimo si genera corrente. La corrente è più intensa quanto la velocità di taglio è più rapida. Il verso della corrente si inverte quando si inverte il senso del moto del magnete. La corrente si manifesta solo se vi è un moto relativo tra solenoide e magnete. La corrente indotta nel solenoide è dovuta ad una forza elettromotrice indotta la cui causa è la variazione del flusso che si concatena con il circuito indotto. Tale variazione avviene ove si manifestino variazioni di flusso magnetico, variazioni di posizione del solenoide oppure a variazioni di corrente del circuito induttore. La *f.e.m.i* (forza elettromotrice indotta) è maggiore quanto è grande la variazione di flusso e quanto minore è l'intervallo di tempo con cui avviene tale variazione. Per quanto riguarda il verso della *f.e.m.i*, si può osservare che il passaggio della corrente indotta genera a sua volta un campo magnetico. Secondo la legge di conservazione dell'energia, la nuova entità magnetica dovrà contrastare la causa di generazione del fenomeno in esame. Se si avvicina il magnete permanente al solenoide, non può comparire un polo di orientazione opposta altrimenti non servirebbe più esercitare lo sforzo di avvicinamento violando così la legge di conservazione dell'energia. Nella sua forma più intuitiva questa legge afferma che, sebbene l'energia possa essere trasformata e convertita da una forma all'altra, la quantità totale di essa in un sistema isolato non varia nel tempo. Nasce perciò una forza che contrasta il moto del magnete e quindi si manifesta un polo della stessa polarizzazione. Allo stesso modo quando si allontana il magnete, la polarità indotta deve contrastare il moto di allontanamento e si crea così un polo opposto.



**Figura 41**

Per una variazione finita di flusso in un intervallo di tempo  $\Delta t$ , si genera una forza elettromotrice indotta:

$$E_m = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

In cui  $E_m$  è il valore medio della forza elettromotrice indotta nell'intervallo di tempo e  $\Delta\phi$  rappresenta la variazione di flusso. Volendone ottenere il valore istantaneo, è possibile passare al calcolo infinitesimale calcolando la derivata rispetto al tempo del flusso concatenato:

$$f.e.m = -\frac{d\Phi_c}{dt}$$

La relazione appena descritta prende il nome di legge di Faraday. Il segno meno presente nella relazione ha lo scopo di indicare il verso della corrente indotta in una spira. La motivazione è enunciata formalmente facendo riferimento alla legge di Lenz: "la corrente indotta in una spira ha un verso tale da generare un campo magnetico che si oppone alla variazione del campo magnetico che l'ha indotta". La legge di Faraday precedentemente descritta è valida per una spira. Se si desidera espandere il concetto ad un solenoide con  $N$  spire occorre considerare che il flusso concatenato  $\phi_c$  in questo caso sarà costituito da:  $\phi_c = N\phi$ .

In fine, per capire il principio fondamentale del motore elettrico, si consideri una spira percorsa da corrente e immersa in un campo magnetico costante come mostrato in figura 43. Per la legge di Faraday, un conduttore elettrico rettilineo di lunghezza  $L$  percorso da corrente  $I$  immerso in un campo magnetico uniforme  $B$  è sottoposto ad una forza  $F$  pari a:

$$\mathbf{F} = LI \times \mathbf{B}$$



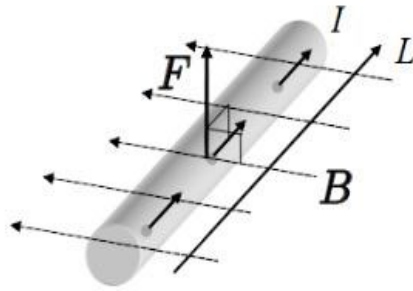


Figura 42

In particolare una spira conduttrice di area A percorsa da corrente  $i$  e immersa in un campo magnetico di intensità  $B$  è sottoposta ad una coppia meccanica come mostrato nelle figure 43 e 44.

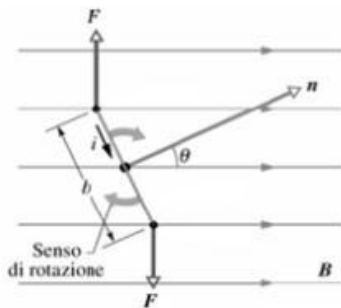


Figura 43

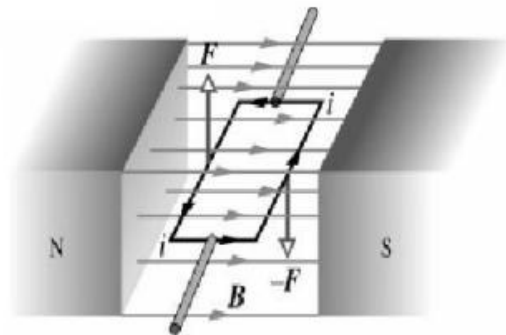


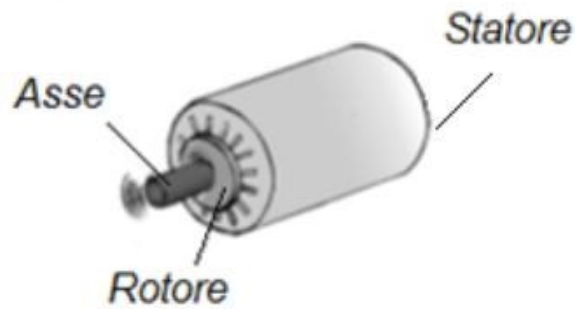
Figura 44

Volendo esprimere la relazione che stabilisce il valore della coppia  $T$  generata dalla spira immersa nel campo magnetico, si ottiene:

$$T = iAB \sin \Theta$$

### 3.2 Struttura dei motori lineari

Un motore lineare è concettualmente simile ad un motore rotante ma con la differenza di essere sviluppato linearmente. In tale struttura il funzionamento del rotore non è più basato sulla rotazione attorno il proprio asse ma bensì effettua spostamenti lineari lungo una direzione. Si può pensare di ottenere un motore lineare partendo da un motore rotante. Idealmente i motori lineari si possono considerare ottenuti "srotolando" su un piano i motori rotativi. Si riconsideri allora la struttura di base di un classico attuatore rotativo come mostrato in figura 45.



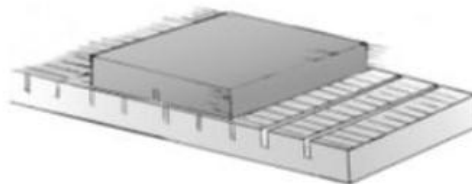
**Figura 45**

Si supponga ora di praticare un taglio che attraversa statore e rotore fino a giungere all'asse di rotazione come mostrato in figura 46.



**Figura 46**

Aprire e srotolare la struttura del motore a partire dalla zona di apertura creata con il taglio immaginando di stendere il tutto su di un piano. Si può notare in figura 47 il procedimento appena descritto.



**Figura 47**

Al termine della fase di apertura sul piano si è ottenuto un motore lineare a partire da un motore rotativo. In figura 48 se ne può osservare il risultato.



**Figura 48**

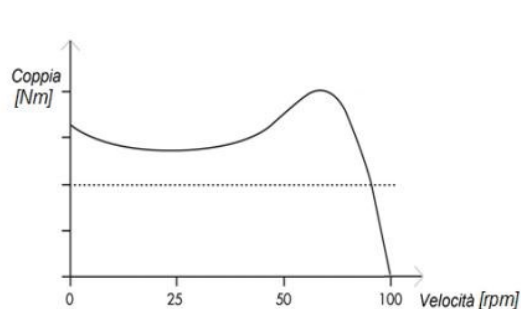
Si è mostrato quindi il processo ideale per ottenere un azionamento lineare a partire da un'architettura rotativa. Per tanto i principi fisici alla base del loro funzionamento sono identici a quelli dei convenzionali motori elettrici. Occorre però considerare gli opportuni accorgimenti relativi ai principali concetti di funzionamento in quanto il moto è evoluto da rotativo a lineare. I motori lineari non considerano la coppia sviluppata all'asse di rotazione ma fanno riferimento alla forza lineare disponibile lungo la direzione di scorrimento.

Motori rotativi	Motori lineari
Coppia [Nm]	Forza [N]
Velocità[rpm]	Velocità [m/sec]

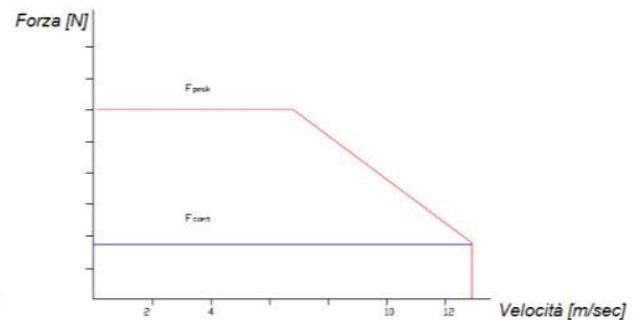
La velocità dei un motore rotativo, essendo su moto circolare, viene considerata in ripetizioni al minuto. Per gli azionamenti lineari si considera una velocità in metri al secondo. Infine le caratteristiche di potenza di un generico motore rotativo vengono analizzate su grafici che riportano l'andamento della coppia disponibile all'asse in funzione della velocità di rotazione. Per un motore lineare si utilizzano invece grafici che mettono in relazione la forza con la velocità lineare.

Motori rotativi	Motori lineari
Curve caratteristiche [Nm e rpm]	Curve caratteristiche [N e m/sec]

In figura 49 e figura 50 vengono rappresentati due esempi di grafici di curve caratteristiche rispettivamente di un motore rotativo e di un motore lineare.

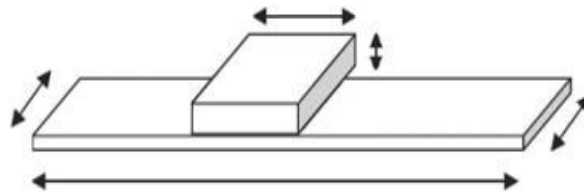


**Figura 49**



**Figura 50**

Altri parametri da tenere in considerazione che differiscono dai motori rotativi sono ad esempio la corsa e l'ingombro. Osservando dall'esterno un motore rotativo in funzione, è possibile notare che la sua struttura è apparentemente statica fatta eccezione per l'asse di rotazione. Per i motori lineari invece occorre considerare che hanno un movimento più ingombrante all'interno dello spazio disponibile dell'applicazione in cui sono inseriti e perciò richiedono maggiore accortezza dal punto di vista della sicurezza di movimento.



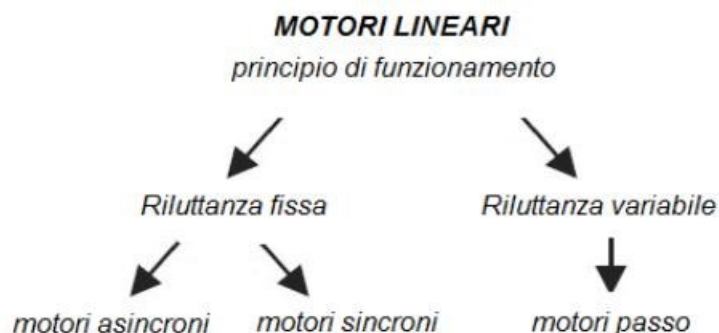
**Figura 51**

### 3.3 Tipologie di motori lineari

Come accennato precedentemente, i motori rotativi sono presenti sul mercato in diverse tipologie. Lo stesso si può affermare per i motori lineari che, basandosi sugli stessi principi di funzionamento delle macchine rotanti, possono essere suddivisi in merito al modo di funzionamento.

In magnetostatica la riluttanza misura l'opposizione di un materiale al transito di un flusso magnetico. Essa è definita come rapporto tra la forza magnetomotrice (f.m.m.) applicata ad un circuito magnetico e il flusso di induzione da essa generato e concatenato con il circuito. La relazione lineare tra forza magnetomotrice e flusso di induzione è detta legge di Hopkinson e costituisce, per i circuiti magnetici, l'analogo della legge di Ohm per i circuiti elettrici; è detta infatti legge di Ohm magnetica dove  $F$  rappresenta la forza magnetomotrice,  $R$  la riluttanza e  $\phi_B$  il flusso dell'induzione magnetica.

$$F = R \phi_B$$



### 3.3.1 Motori passo

I motori lineari passo vengono distinti anche con l'acronimo LSTM (Linear STEpper Motor). Lo statore si presenta con una struttura tipicamente dentata ed in genere costituita da magneti permanenti o da materiale ferromagnetico che, eccitato con opportuni avvolgimenti, crea il campo magnetico di statore. Il movente è composto anch'esso da una struttura dentata ed è formato da materiale ferromagnetico magnetizzato da appositi avvolgimenti delle rispettive fasi rotoriche. Come nei motori passo rotativi, all'eccitazione di ogni fase, il sistema si dispone per offrire alle linee di flusso del campo magnetico la riluttanza minore. In questo modo viene realizzato un moto incrementale composto da piccoli passi (step) alla volta.

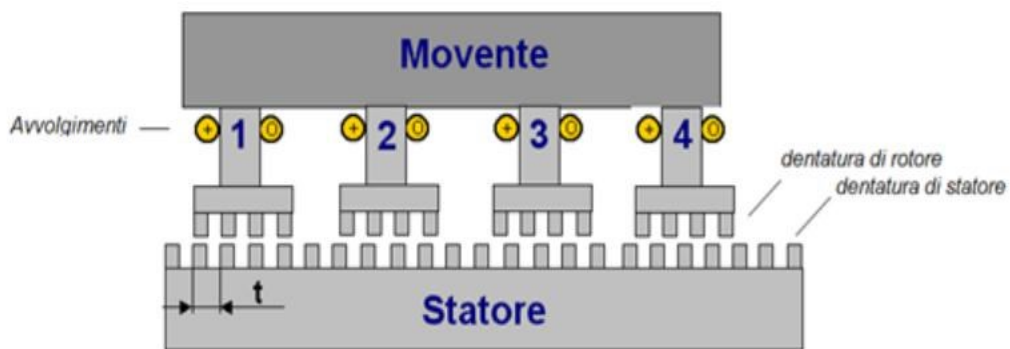


Figura 52

Considerando  $m$  il numero delle fasi negli avvolgimenti del movente e definendo  $t$  come passo di dentatura, è possibile esprimere il passo  $p$  del motore stepper attraverso la relazione:

$$p = t/2m$$

Vediamo ora l'esempio di completamento di un passo da parte del movente del motore. Si consideri figura 53. L'LSTM è in condizione di equilibrio ovvero i campi magnetici di statore e movente sono perfettamente allineati tra loro. In questo caso è alimentata la fase 1.

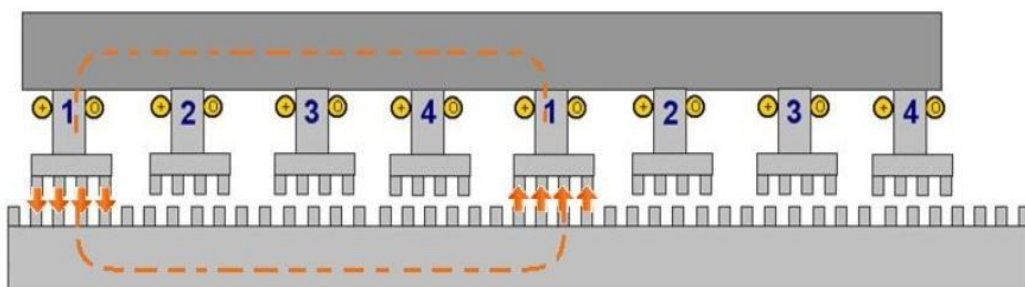


Figura 53

Volendo imprimere uno spostamento verso destra occorre alimentare la fase 2 in modo da sbilanciare l'allineamento dei campi magnetici di movente e statore come mostrato in figura 54.

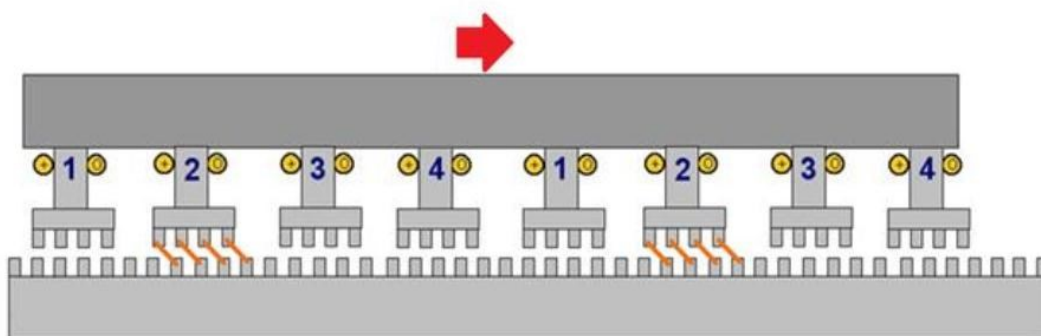


Figura 54

Lo squilibrio dell'allineamento dei campi genera una forza che ha come obiettivo quello di trovare una nuova condizione di equilibrio. Si ottiene allora la dentatura della fase 2 perfettamente in linea con la dentatura di statore come mostrato in figura 55.

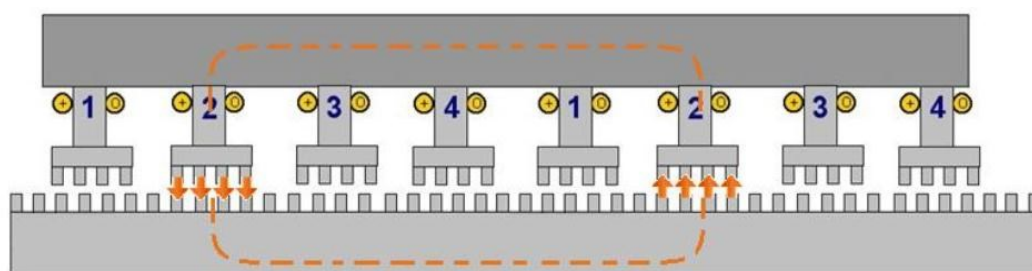


Figura 55

In questo modo il movente ha compiuto un passo. Alimentando in modo opportuno le fasi in sequenza è possibile ottenere un moto lineare lungo la direzione desiderata. I vantaggi principali di questa tecnologia sono essenzialmente legati alla semplicità del controllo. Infatti, a meno che non sia necessario raggiungere livelli di precisione notevoli per cui è necessario disporre di un sistema di retroazione o applicare complesse tecniche di microstepping, i motori passo sono gli unici a poter essere comandati in catena aperta. La logica di comando è tipicamente di tipo digitale. L'azionamento, chiamato a generare semplici onde quadre, risulta poco complesso e costoso. Inoltre, dove si può far a meno del sensore di posizione si evitano i disturbi nel segnale di retroazione rendendo il sistema stabile e robusto. Nonostante questi indubbi pregi i motori a riluttanza variabile hanno gli stessi svantaggi riscontrabili nella versione rotativa: in primo luogo il loro moto è somma di tanti moti incrementali e questo fa sì che il funzionamento risulti rumoroso e non esente da vibrazioni. Inoltre essi ricoprono dei range di velocità ma soprattutto di spinta inferiori a quelli generalmente necessari in applicazioni industriali. Per questo sono impiegati con molto successo quasi esclusivamente in attrezzature da laboratorio e nell'industria medicale.

### 3.3.2 Motori asincroni

Il primo motore a riluttanza fissa che viene presentato è il motore lineare asincrono o motore ad induzione. L'acronimo utilizzato in ambiente tecnico è LIM (Linear Induction Motor). È composto da un movente in materiale ferromagnetico e da uno statore anch'esso di materiale ferromagnetico. In quest'ultimo vengono ricavate delle cave statoriche nelle quali vengono disposti gli avvolgimenti. Se ne riporta un breve schema in figura 56.

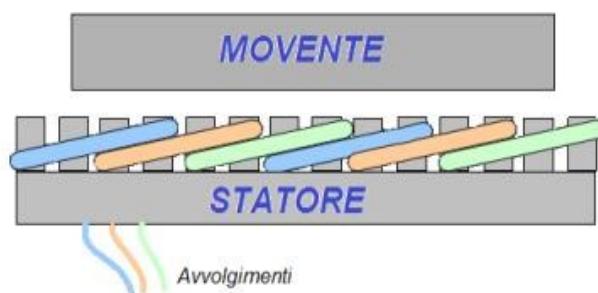


Figura 56

Le fasi dello statore vengono opportunamente eccitate da correnti sinusoidali come mostrato in figura 57.

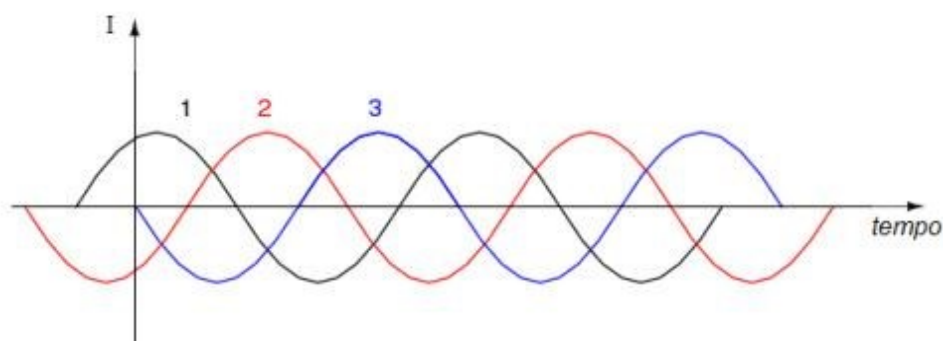
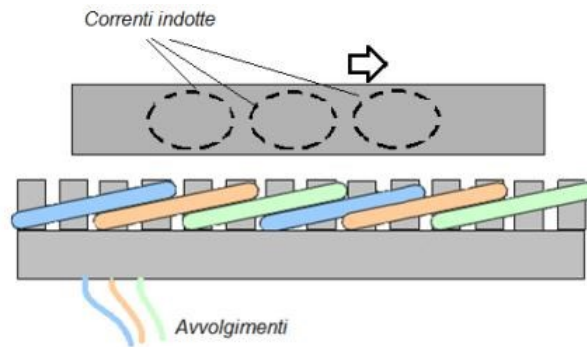


Figura 57

Alimentando lo statore in questo modo, si ha la generazione di un campo magnetico traslante con velocità:

$$V_s = 2FT$$

Dove  $F$  corrisponde alla frequenza di alimentazione (misurata in Hz) e  $T$  rappresenta il semi passo polare (misurato in mm). Il campo magnetico di statore interagisce con il materiale ferromagnetico del movente andandovi a provocare la comparsa di correnti indotte. Infatti, in campo tecnico, il movente prende anche il nome di indotto. Le correnti indotte generano a loro volta un altro campo magnetico che interagisce con quello generato dal primario inseguendolo come mostrato in figura 58.

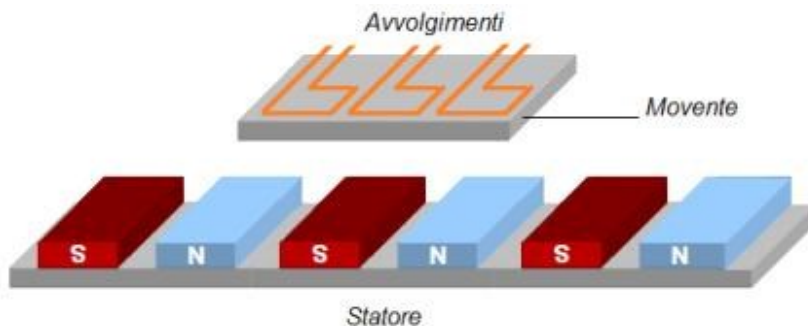


**Figura 58**

A differenza di quello che accade per i motori passo, i motori asincroni sono adatti in applicazioni in cui sono richieste elevate velocità e forti spinte. Inoltre, l'assenza dei costosi magneti permanenti rende economicamente sostenibile anche la realizzazione di lunghe corse. Per questi ed altri motivi legati soprattutto alle prestazioni ed al controllo essi si sono dimostrati ideali in applicazioni di trasporto sia civile che industriale. Per quanto riguarda gli svantaggi, le applicazioni alle macchine automatiche di motori ad induzione sono limitate soprattutto dalla complessità dei sistemi di controllo e alimentazione e dal fatto che essi non danno coppie da fermi a meno che non si utilizzi un controllo di tipo vettoriale. A testimonianza di quanto essi non abbiano trovato fortuna nel campo delle macchine automatiche si può far notare come nei confronti di altre tipologie di motori lineari l'offerta di motori asincroni sia molto limitata.

### **3.3.3 Motori sincroni**

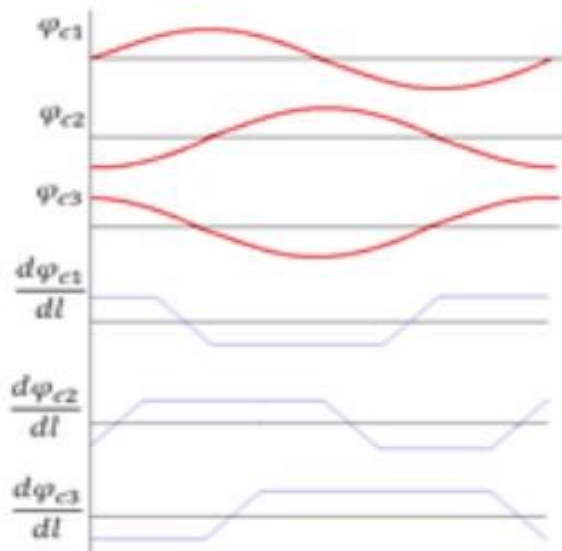
L'altra tipologia di motore a riluttanza non ancora esaminata è il motore sincrono. L'acronimo utilizzato è LSM (linear Synchronous Motor). Lo statore può essere identificato da una pista rettilinea di magneti permanenti polarizzati in modo alternato e disposti in serie. Il movente è costituito invece da degli avvolgimenti trifase opportunamente distribuiti e disposti all'interno di un blocco di materiale ferromagnetico. Un breve schematico di un LSM è mostrato in figura 59.



**Figura 59**



Adottando opportune strategie di costruzione del movente e della disposizione degli avvolgimenti, è possibile concatenare i flussi magnetici di statore con gli avvolgimenti del rotore in un modo utile per il funzionamento. In particolare, è possibile ottenere un andamento quasi lineare della variazione nel tempo dei flussi concatenati come mostrato in figura 60. Ovviamente dal punto di vista matematico, se si applicano le derivate rispetto al tempo dei flussi concatenati, non si ottengono esattamente gli andamenti riportati in figura 60.



**Figura 60**

Ragionando con buona approssimazione e considerando la variazione dei flussi quasi lineare, si può affermare che le derivate risultano caratterizzate sia da profili a tratti costanti e sia a rampe costanti. In questo modo, alimentando in modo opportuno le fasi del movente, è possibile ottenere il moto secondo la seguente relazione:

$$F = \sum_{q=1}^3 I_q \frac{d\varphi_{cq}}{dt}$$

dove  $F$  esprime la spinta del movente,  $I_q$  la corrente della fase  $q$ -esima e l'ultimo termine rappresenta la variazione del flusso concatenato nella rispettiva fase  $q$ . Alternando le fasi ed i segni delle correnti all'interno dei tre avvolgimenti si può ottenere una spinta costante. Per comandare la commutazione è necessario conoscere la posizione del movente rispetto al campo magnetico ed è quindi strettamente necessario un sensore di posizione. Sicuramente i motori sincroni rappresentano la tipologia più affermata per una serie di ragioni. Prima tra tutte la semplicità del sistema di controllo e di alimentazione che essendo del tutto simile ed integrabile con quello dei brushless rotativi, che ormai è da considerarsi uno standard industriale, costituisce sia nell'impiantistica che nell'approccio progettuale un punto di continuità con i sistemi tradizionali. Inoltre i livelli di spinta, di corsa e

l'accuratezza di posizionamento tipici di questa classe di motori corrispondono spesso alle necessità tipiche delle macchine automatiche. Ciò accade anche in termini di ingombro e di implementazione all'interno delle macchine. Le principali note negative di questi dispositivi derivano tutte dalla presenza dei magneti permanenti. Essi, infatti, incidono molto sul costo nell'azionamento, soprattutto quando si devono realizzare lunghe corse. Inoltre, come verrà proposto in seguito, in alcune morfologie costruttive, i magneti causano elevata forza d'attrazione tra il movente e lo statore. Inoltre va evidenziata la necessità di proteggere con gusci o altri accorgimenti la pista di magneti permanenti da polveri ferromagnetiche come accade ad esempio con i trucioli nelle applicazioni sulle macchine utensili.

### 3.3.4 Confronto tra tipologie di motori lineari

Il grafico mostrato in figura 61 ha l'obiettivo di riepilogare le caratteristiche, i pregi ed i difetti dei motori lineari presentati fino a questo punto. Si può notare immediatamente che i motori passo possono essere utilizzati in quelle applicazioni in cui non sono richieste elevate prestazioni in termini di spinta e velocità. Infatti il loro impiego è molto affermato nei settori come la stampa. I motori ad induzione hanno prestazioni elevate in termini di corsa e velocità ma non sono adatti ai campi di utilizzo ove richiesta rapidità e coppia di spunto. Sono molto economici per l'assenza dei magneti permanenti ma, essendo scarsamente impiegati, offrono pochi sviluppi e novità in termini di nuove tecnologie. Se si osserva in fine la classe dei motori LSM è possibile affermare che essi rispondono egregiamente alla maggior parte delle richieste di prestazione di mercato. Per convincersene basti notare quanto sia preponderante, nei confronti delle altre, l'area del quadrato di appartenenza alla classe LSM.

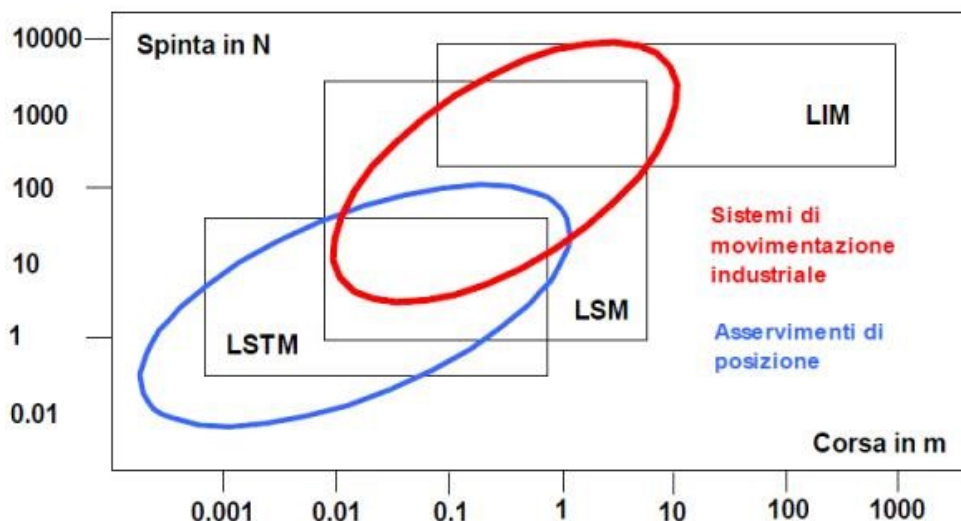


Figura 61

### 3.4 Categoria dei motori lineari

Fino ad ora si sono classificati i motori lineari in base al principio di funzionamento con cui interagiscono movente e parte fissa. Rimanendo nella categoria dei motori sincroni, un'altra fondamentale classificazione di questi azionamenti può essere effettuata analizzando le diverse forme costruttive. Esistono tre tipi diversi di configurazioni:

- Ironcore
- Ironless
- Motori tubolari

#### 3.4.1 Motori Ironcore

I motori ironcore o monolateri sono costituiti da una struttura piatta contenente lo statore del motore e da una parte mobile comunemente denominata "coil", posta superiormente allo statore. Se ne riporta uno schematico in figura 62.

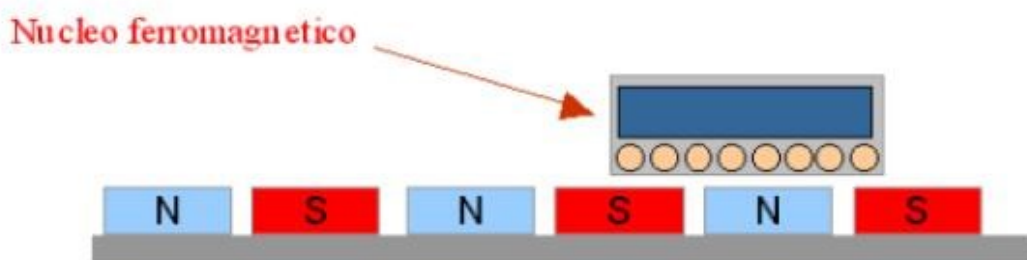


Figura 62

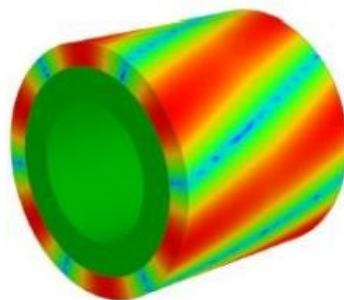
Lo statore è caratterizzato da magneti permanenti a terre rare multipolo a polarità alternata disposti su una placca di acciaio e nichel laminato a freddo ed altamente permeabile al flusso magnetico. Il movente è costituito da avvolgimenti di incapsulati in resina epossidica termicamente conduttiva i quali sono disposti attorno ad un nucleo ferromagnetico di acciaio laminato per concentrare le linee di flusso del flusso magnetico concatenato. Il motore ironcore è capace di sviluppare alti valori di spinta. Più la dimensione del movente è grande, maggiore è il flusso concatenato. È quindi possibile ottenere una maggiore spinta a scapito di una maggiore inerzia dovuta all'aumento della massa in movimento. I vantaggi nell'utilizzare gli ironcore sono:

- avere a disposizione elevati valori di spinta.
- buona capacità di dissipazione del calore degli avvolgimenti dovuti alle caratteristiche di costruzione del motore.
- corsa del motore facilmente espandibile in moduli.

Gli svantaggi nell'utilizzare un azionamento lineare di questo tipo sono:

- elevati valori di spinta comportano una notevole inerzia del movente.
- il nucleo ferromagnetico introduce il problema del cogging.
- la modularità della corsa comporta notevoli costi dovuti ai magneti permanenti.

Il motore ironcore presenta, a causa della sua struttura, un problema chiamato "cogging". Questo fenomeno è dovuto all'anisotropia del nucleo del motore stesso, che tende ad avere dei punti di posizionamento preferenziali rispetto alla banda magnetica dello statore. Nelle macchine rotanti è molto difficile garantire una riluttanza costante al variare della posizione angolare del rotore rispetto allo statore. Quando il rotore di una macchina rotativa a magneti permanenti viene posto in movimento, le piccole variazioni di riluttanza del circuito magnetico provocano un disturbo di coppia periodico chiamato coppia di impuntamento o cogging torque. Il fenomeno è apprezzabile se si fa ruotare a mano un motore a magneti permanenti spento. Si può notare che la rotazione non è omogenea e si avverte una resistenza meccanica "a scatti" mentre si muove il rotore. Specialmente se il motore viaggia a bassa velocità questo fenomeno può risultare dannoso per il corretto pilotaggio del carico all'asse. Analogamente per motori lineari la "cogging torque" si traduce in una "cogging force" cioè in un disturbo periodico sulla spinta del motore. Il fenomeno del cogging viene molto studiato nelle applicazioni "direct drive". Per ridurre effetti indesiderati del "cogging" una possibile soluzione è lo "skewing": i magneti non sono più disposti su generatrici rettilinee del cilindro rotorico ma vengono disposti con un lieve avvitemento longitudinale. Un esempio di skewing applicato ad un rotore di macchina rotativa è riportato in Figura 63.



**Figura 63**

Applicando accorgimenti di questo tipo viene ridotta sensibilmente la variazione di riluttanza nel passaggio tra una zona magnetica e quella adiacente andando a diminuire di conseguenza il ripple di coppia indesiderato. La stessa idea di pensiero può essere applicata alle cave statoriche che, se opportunamente inclinate, possono ridurre la vibrazione introdotta dal cogging. Purtroppo questa perturbazione esterna non è completamente eliminabile e si traduce in un disturbo sulla velocità, rendendo gli ironcore meno adatti a macchine che richiedono

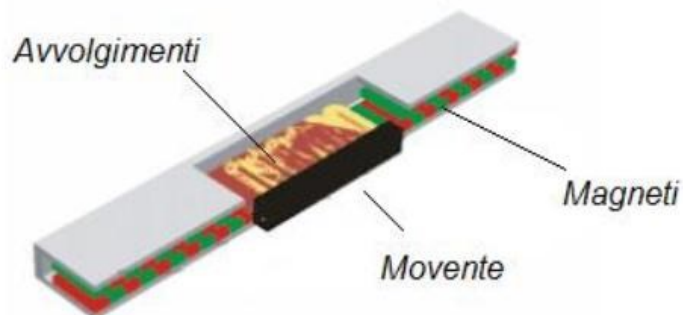
elevata fluidità di movimento, come le macchine per stampa o le macchine di misura. In figura 64 si riporta un esempio di motore ironcore presente sul mercato (kollmorgen).



**Figura 64**

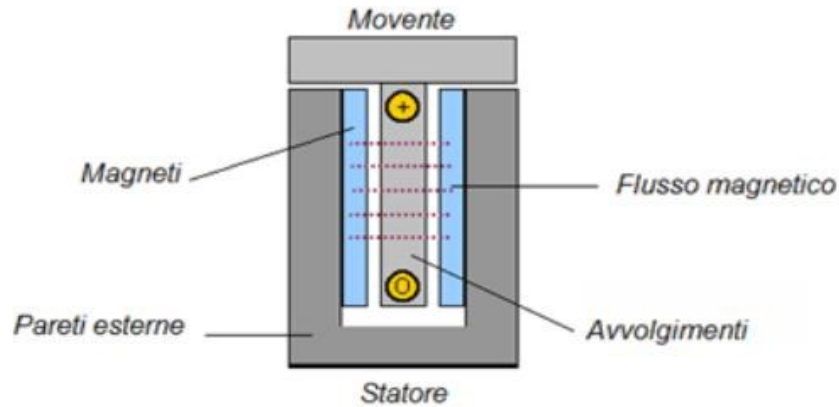
### **3.4.2 Motori Ironless**

I motori ironless o motori bilateri hanno come principale dissomiglianza dai motori monolateri il fatto di avere il movente completamente incernierato all'interno di due piattaforme che costituiscono lo statore. In figura 65 si mostra un motore bilatero con la parte superiore di statore sezionata.



**Figura 65**

In figura 66 viene mostrato lo schematico di una sezione frontale di un ironless. L'avvolgimento è disposto tra due piste perfettamente parallele di magneti permanenti. Con questa disposizione il flusso si concatena quasi totalmente con le spire dell'avvolgimento del rotore lineare.



**Figura 66**

I vantaggi che comporta l'uso di un motore ironless sono:

- Simmetria del campo magnetico di statore.
- Ottimo sfruttamento del flusso magnetico essendovi il movente completamente immerso.
- Non occorre inserire un nucleo ferromagnetico per migliorare le caratteristiche magnetiche del movente.
- Assenza di forze d'attrazione dovute all'assenza del nucleo ferromagnetico.
- Massa ridotta del movente.
- Bassa inerzia permette elevata rapidità dei movimenti.

Gli svantaggi che introduce questo tipo di azionamento sono:

- La struttura è chiusa e comporta difficoltà di smaltimento del calore
- Il calore è dannoso per i magneti permanenti
- Non si raggiungono elevati valori di spinta

Questa categoria di azionamenti lineari viene solitamente utilizzata nelle applicazioni in cui non sono necessari alti valori della spinta ma movimenti rapidi e precisi. Ad esempio utilizzati nei robot Pick and Place e all'interno dei robot cartesiani. In figura 67 viene riportato un esempio reale di motori ironless (directindustry).



**Figura 67**

### 3.4.3 Motori tubolari

I motori cilindrici o tubolari, vengono ricavati pressappoco adottando lo stesso procedimento utilizzato per ottenere i motori ironcore. Partendo da un'architettura rotativa, si dispone inizialmente la struttura in forma lineare per poi assegnare nuovamente una forma cilindrica alla struttura ma orientata in modo differente come mostrato in figura 68.

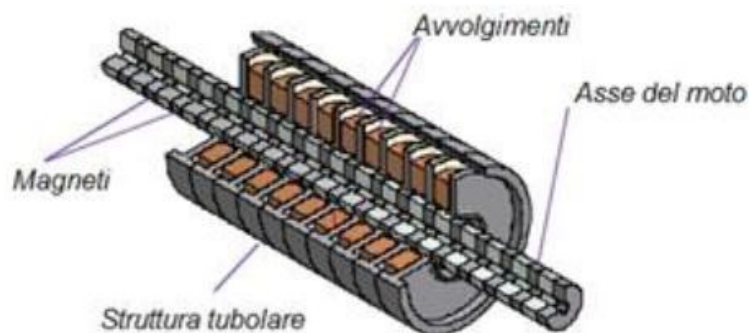


Figura 68

Attorno alla parte magnetica si trova lo statore contenente gli avvolgimenti disposti nelle cave di materiale ferromagnetico che, in questa tecnologia, assume una forma cilindrica. Si può osservare lo schema in figura 69.

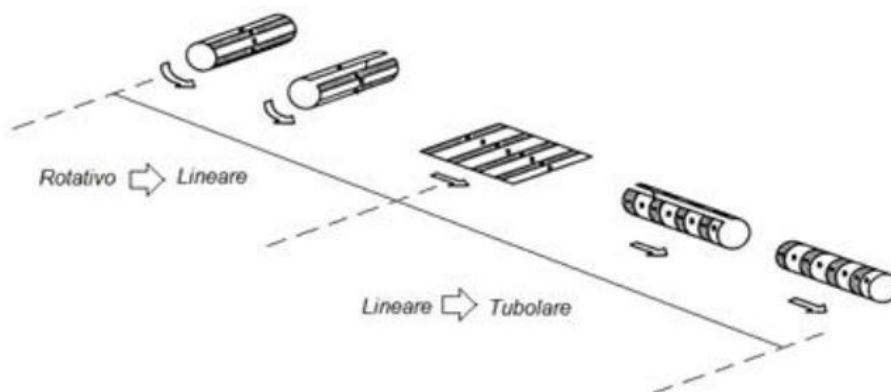


Figura 69

Questo tipo di motore si può utilizzare in due differenti configurazioni. La prima prevede che il movente sia lo stelo contenente i magneti permanenti mentre lo statore sia la parte statica. La particolare morfologia dell'avvolgimento rende naturale l'espulsione del calore prodotto per effetto Joule. Può essere leggermente fastidioso dal punto di vista delle prestazioni al fatto che durante l'escursione la superficie interessata dal flusso magnetico tra magneti e avvolgimento diminuisca facendo diminuire a sua volta la forza che l'azionamento è in grado di sviluppare. Questo fenomeno svantaggioso è chiamato effetto di bordo. Nella seconda configurazione di montaggio, il movente è rappresentato dall'avvolgimento mentre l'albero con i magneti permanenti rappresenta la parte statica. In questa soluzione

è da sottolineare il fatto che, l'averne un avvolgimento traslante ad alta velocità, consenta di espellere calore per convezione forzata. Lo svantaggio però è quello di avere dei cavi in moto con un relativo aumento della massa traslante e un'ulteriore aumento dell'ingombro nella corsa totale dell'azionamento da tenere in considerazione. Un altro problema comune ad entrambe le configurazioni emerge quando aumenta la lunghezza della traiettoria da far compiere al carico. Data la forma del motore ed il movimento compiuto dall'asta, l'unico punto di supporto per questo design è ad una estremità, ciò significa che ci sarà sempre un limite alla lunghezza del moto ottenibile affinché la deflessione dell'asta dovuta alla sua stessa forza peso non causi il contatto tra magneti e statore.

Vantaggi degli azionamenti tubolari:

- Ottimo sfruttamento del flusso magnetico.
- Eccellente comportamento termico e facilità di raffreddamento con ventilazione forzata durante il moto.
- Bassi costi di costruzione dell'avvolgimento.
- Movente relativamente leggero.

Svantaggi:

- Lunghezza della corsa limitata.
- Problemi di deflessione dell'asse del moto.
- Prestazioni non omogenee nel tratto dell'intera corsa dovuta agli effetti di bordo.

### **3.5 PANORAMICA DI MERCATO DEI MOTORI LINEARI**

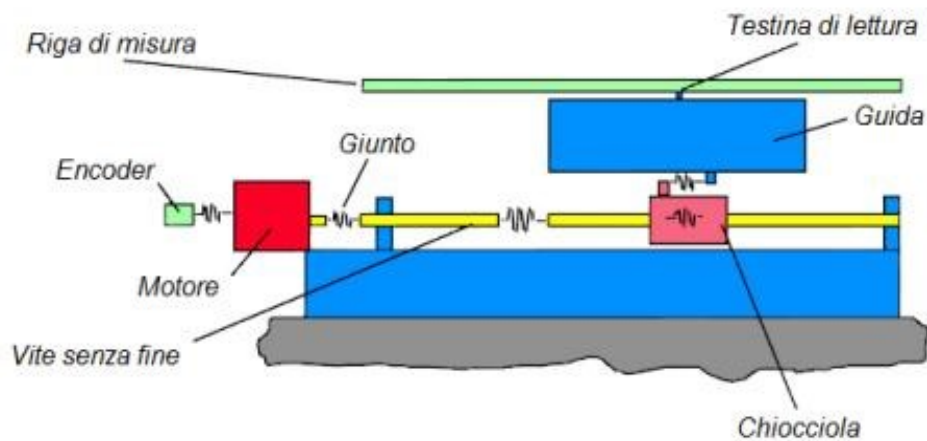
Negli ultimi anni il mercato dei motori elettrici ha evidenziato lo sviluppo della classe dei motori lineari. Tale impulso è stato determinato da diversi fattori come ad esempio la continua innovazione tecnologica e la tendenza ad avere linee di produzione più versatili. In questo capitolo verrà dato uno sguardo alle varie motivazioni che hanno portato negli ultimi anni un trend positivo dell'uso dei motori lineari nei diversi settori applicativi che ne fanno uso.

#### ***3.5.1 Miglioramento delle prestazioni***

In genere, il movimento rettilineo è quasi sempre ottenuto da vari tipi di sistemi lineari convenzionali controllati da servomotori rotanti. Il moto rotatorio viene convertito in movimento rettilineo da ingranaggi, cremagliere o cinghie. Sebbene in passato tali metodi consentissero di realizzare numerose applicazioni senza difficoltà, attualmente tali sistemi risultano spesso inadeguati in termini di dinamica e precisione. I tradizionali moduli ad azionamento lineare con trasmissioni rotanti raggiungevano i loro limiti tecnici negli svariati processi dell'industria già oltre 10



anni fa, non offrendo più la precisione e la velocità necessaria per determinati processi di posizionamento. L'esigenza di una migliore precisione e dinamica nella fabbricazione dei prodotti ha spronato i reparti di ricerca e sviluppo verso nuove strade. La generazione diretta di movimento rettilineo resa possibile dai motori lineari implica la possibilità di fare a meno di elementi di trasmissione quali cinghie o azionamenti a vite senza fine, eliminando così frizione, elasticità e gioco, che insieme ostacolano la creazione di moduli di azionamento con un'altissima precisione di posizionamento e una dinamica superiore. La forza viene applicata direttamente e senza dispersione nel punto preciso in cui svolge più efficacemente la propria funzione. Per analizzare la situazione con termini più pratici, si riporta un confronto di prestazione tra un azionamento lineare ed un azionamento rotativo che sfrutta un sistema a vite senza fine. I dati sono forniti da SIEMENS S.p.a.

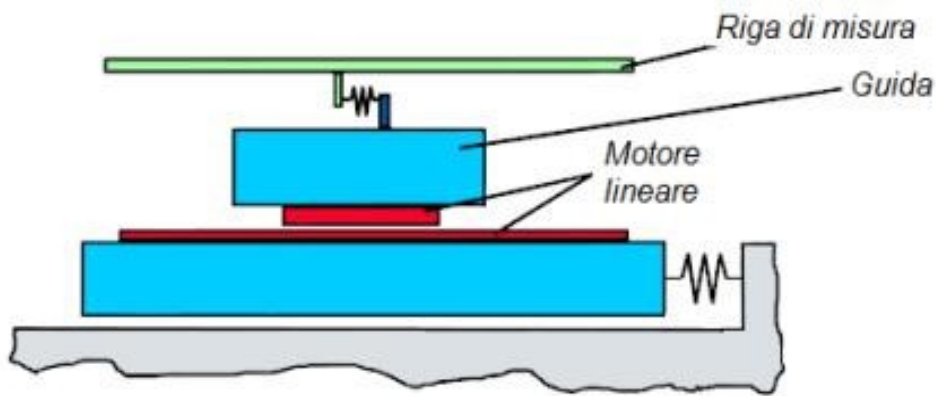


**Figura 70**

Le principali limitazioni di un azionamento in modo indiretto sono:

- Notevole inerzia delle parti meccaniche e quindi ridotte prestazioni dinamiche ottenibili.
- Scarsa rigidità e presenza di giochi.
- Generazione di calore prodotto dagli attriti e dai precarichi, con conseguente caduta del rendimento della catena cinematica e insorgenza di fenomeni di dilatazione termica che si ripercuotono sulla precisione e sulla ripetibilità di lavorazione;
- Velocità massime limitate dalle velocità periferiche limite delle sfere, della chiocciola e degli altri componenti della trasmissione.

Si riporta in figura 71 lo schema della struttura dell'azionamento lineare utilizzato per il confronto.

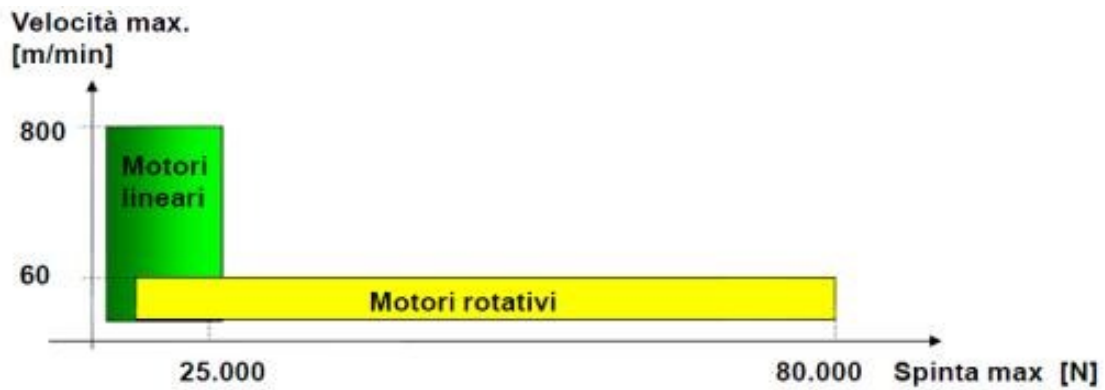


**Figura 71**

Si nota immediatamente che adottando il direct drive vengono eliminate l'elasticità dell'alberino dell'encoder, dell'albero del motore, del giunto di accoppiamento e della vite. Dalle prove eseguite sui due differenti tipi di configurazione, vengono riportati i seguenti dati:

	<b>Motore lineare</b>	<b>Motore rotativo</b>
Accelerazione max	< 360 m/s <sup>2</sup>	< 10 m/s <sup>2</sup>
Velocità max	< 800 m/min	< 60 m/min
Forza	25000 N	80000 N
Errore di posizione max	0,4 µm	5 µm

Si evince quindi che il motore lineare, in questo tipo di applicazione, è in grado di sviluppare prestazioni dinamiche di gran lunga maggiori rispetto al rotativo e un'accuratezza di posizione circa dieci volte superiore. La serie di elementi compresi nella catena cinematica che compone la vite senza fine incidono sicuramente in modo negativo sulla precisione del profilo da seguire e introducono giochi dinamici sull'inversione di moto. Da notare però che, a parità di potenza sviluppata dalle due configurazioni appena viste, il motore lineare è in grado di garantire elevati valori di velocità e rapidità del sistema a discapito di una minore forza disponibile all'asse del moto. Per il motore rotativo invece accade l'esatto contrario come mostrato in figura 72



**Figura 72**

Un altro fattore che nel mercato può favorire la scelta di utilizzare un motore lineare è la maggiore robustezza del sistema che esso riesce a fornire. In una applicazione con motore lineare la rigidità dell'asse è dovuta al solo sistema di controllo. Per valutare la rigidità statica del sistema, il movente viene mantenuto fermo in regolazione e gli vengono applicate delle forze esterne le quali simulano eventuali disturbi più o meno intensi che possono verificarsi in un processo produttivo. Vengono poi misurati gli spostamenti che il movente subisce. La rigidità statica ( $D_{stat}$ ) viene calcolata come rapporto tra la forza applicata ( $F$ ) e lo spostamento risultante ( $\Delta x$ ):

$$D_{stat} = \frac{F}{\Delta x}$$

Per un asse con cinematica convenzionale la rigidità statica può valere 30 N/mm. Lo stesso asse, con motore lineare, può raggiungere una rigidità statica di 350 N/mm. Per aumentare la rigidità statica in un sistema ottenuto con motore rotativo occorre aumentare le masse e di conseguenza l'inerzia andando ad infierire sui valori dinamici del sistema. In un'architettura con motore lineare invece, basta aumentare la risoluzione della misura di posizione. Senza una tecnologia adeguata, un motore lineare rimane isolato e inutile. Grazie all'innalzamento dello standard della moderna tecnologia di controllo di ultima generazione, si è potuto iniziare a sfruttare al meglio le potenzialità introdotte dai motori lineari. Il continuo sviluppo di nuove tecnologie e la rapida evoluzione nella componentistica di dispositivi dedicati hanno inciso pesantemente nella migioria dell'elettronica di potenza e quindi di tutta la branca che riguarda gli azionamenti elettrici per motori. È immediato considerare che, un miglioramento delle tecnologie e del controllo che riguardano il campo dei motori lineari, abbia favorito la realizzazione dei sistemi altamente performanti offerti oggi dal mercato. La combinazione ottimale del motore dinamico e di un controllo di qualità può accrescere anche del 20% il rendimento di sistemi che eseguono ogni ora parecchie migliaia di processi di posizionamento ad alta precisione. Comportando in alcuni casi un risparmio di tempo di decine ms per ogni processo di posizionamento. Basti pensare che, in un ramo dell'automazione come quella dei pick-and-place, il mercato richiede un

aumento annuale minimo della capacità del sistema pari al 5%. L'utilizzo di questa classe di motori può favorire un notevole balzo in avanti. Un altro elemento che sta incidendo nell'orientare la produzione attraverso l'uso di questa tipologie di macchine elettriche è la quasi totale assenza di manutenzione che essi richiedono. Il funzionamento senza contatto implica la totale assenza di attrito, e quindi di usura. Le costose operazioni di manutenzione per le sostituzioni e rettifiche dei componenti, con i conseguenti tempi di fermo, non sono più un problema all'ordine del giorno.

### 3.5.2 L'evoluzione dei materiali magnetici

Il settore dei materiali magnetici è da sempre un ambiente di interesse per quanto riguarda la ricerca e lo sviluppo poiché utilizzato in modo trasversale in molti settori produttivi e nelle apparecchiature elettriche in generale. In particolare, nel corso degli ultimi anni ha evidenziato un interesse sempre maggiore da parte dei produttori che utilizzano i magneti permanenti, dimostrando uno sviluppo in continua crescita promosso dall'incremento delle prestazioni e dall'ottimizzazione delle proprietà in rapporto agli specifici campi di applicazione. I materiali ferromagnetici si possono suddividere in materiali magneticamente morbidi e duri. I primi, possono essere facilmente magnetizzati ma hanno la tendenza a non rimanere in tale stato. I materiali magneticamente "duri", invece, hanno la proprietà di rimanere magnetici. I magneti permanenti sono generalmente costituiti da materiali ferromagnetici duri e descritto da un ciclo di isteresi B-H.

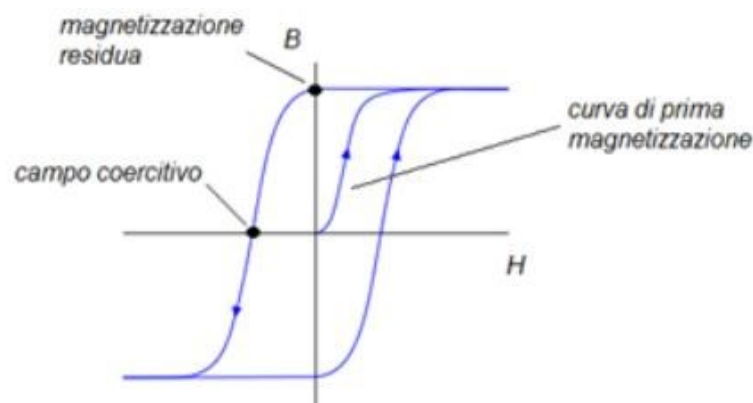
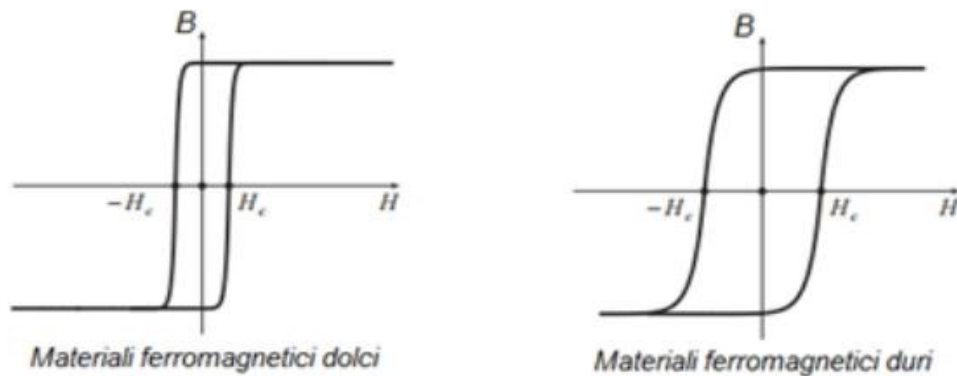


Figura 73

Il ciclo di isteresi rappresenta il diagramma di stato del materiale: la sua forma dipende dalla composizione della sostanza ed in particolare da due elementi che esprimono le proprietà magnetiche del materiale in esame:

- La magnetizzazione residua
- Il campo coercitivo

Con il termine magnetizzazione residua si intende il valore di induzione magnetica  $B$  che il materiale mantiene anche senza la presenza di un campo magnetico esterno. Per annullare la magnetizzazione del materiale bisogna invertire il senso del campo magnetico  $H$  fino al valore  $H_c$ . Tale valore prende il nome di campo coercitivo. Prendendo in considerazione i materiali duri, il ciclo di isteresi presenta larghe dimensioni. Essi sono adatti per la costruzione di magneti permanenti. I materiali dolci, avendo un ciclo di isteresi molto stretto, comportano facilità nel magnetizzarli e smagnetizzarli.

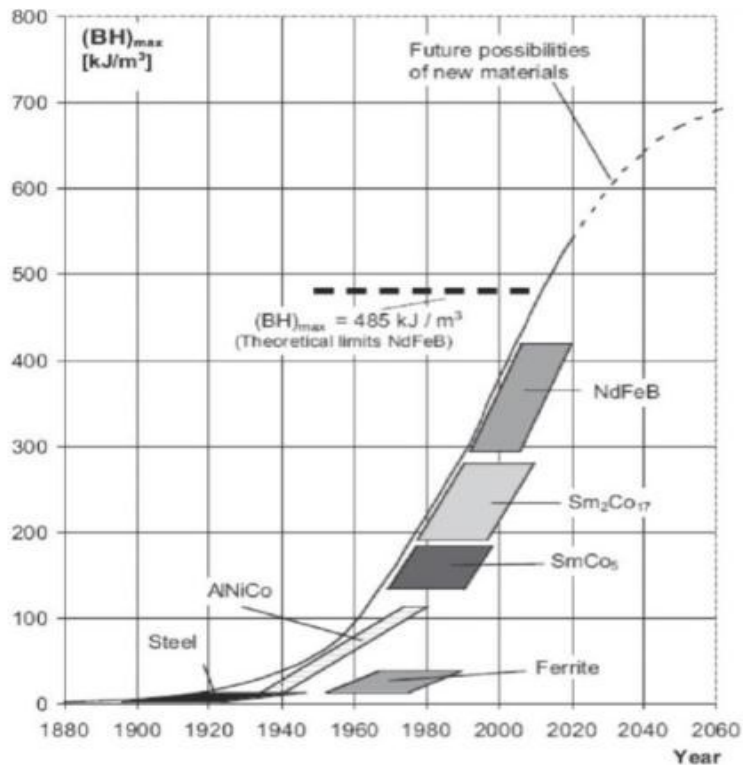


**Figura 74**

La massima energia magnetica per unità di volume è calcolata come:

$$BH_{\max} = B_{\max} \cdot H_{\max}$$

Rappresenta un fattore di qualità per i magneti permanenti. Un alto valore di questa quantità implica che il flusso magnetico richiesto può essere ottenuto con un ridotto volume di materiale, realizzando così un dispositivo più leggero e composto. Genericamente si può affermare che tanto maggiore è il valore di  $BH_{\max}$ , tanto minore potrà essere, a parità di rapporti geometrici, il volume di magnete necessario per una determinata applicazione. La ricerca in questi anni si è concentrata per aumentare il valore del campo coercitivo regolando la composizione della lega e producendo una microstruttura fine. Un'alta induzione residua può essere raggiunta producendo piccoli cristalli e allineandoli perfettamente paralleli per ottenere una migliore anisotropia. In figura viene riportato l'andamento dello sviluppo nel tempo della densità di energia  $BH_{\max}$  a cui gli studi hanno portato e la previsione futura di tale andamento.



**Figura 75**

Le terre rare sono i materiali che servono per produrre magneti permanenti ad elevate prestazioni, in particolare comprendono il samario-cobalto (SmCo) e il neodimio-ferro-boro (NdFeB). Il magnete SmCo è stato il primo magnete commerciale basato su terre rare. Questo magnete si tratta di un composto intermetallico tra la terra rara Samario e il metallo di transizione Cobalto: nato alla fine degli anni 60, non ha avuto successo come l'altro importante magnete in terre rare, il Neodimio Ferro Boro, a causa dell'elevato costo del cobalto e del suo valore strategico. Il samario-cobalto è ancora considerato il materiale più adatto per applicazioni ad alta prestazione. La sua principale caratteristica è l'applicazione ad alte temperature, fino a 350 °C. I magneti in SmCo sono utilizzati in particolare in ambito militare, aerospaziale ed elettromedicale: sono preferiti generalmente quando nei dispositivi sussistono problematiche termiche o di ossidazione. Il SmCo, come già detto, ha proprietà magnetiche generalmente inferiori al NdFeB. La caratteristica più importante è la possibilità che offre nel lavorare a temperature elevate, oltre i 300 °C, e di avere poche perdite delle proprietà magnetiche quando la temperatura aumenta. Il SmCo è il materiale più costoso per i magneti permanenti. I magneti in neodimio ferro boro sono i più potenti magneti permanenti commercializzati oggi, con il massimo prodotto di energia, da 210 kJ/m<sup>3</sup> a 420 kJ/m<sup>3</sup>. Il NdFeB è la terza generazione di magneti permanenti sviluppata nel 1980. È una combinazione di un'elevata rimanenza e coercività e dispone di una vasta gamma di gradi, dimensioni e forme. Con le sue eccellenti caratteristiche magnetiche, abbondanti materie prime e costi relativamente bassi, il NdFeB offre una maggior flessibilità nella sostituzione dei tradizionali materiali per i magneti permanenti. Questa tipologia di magneti

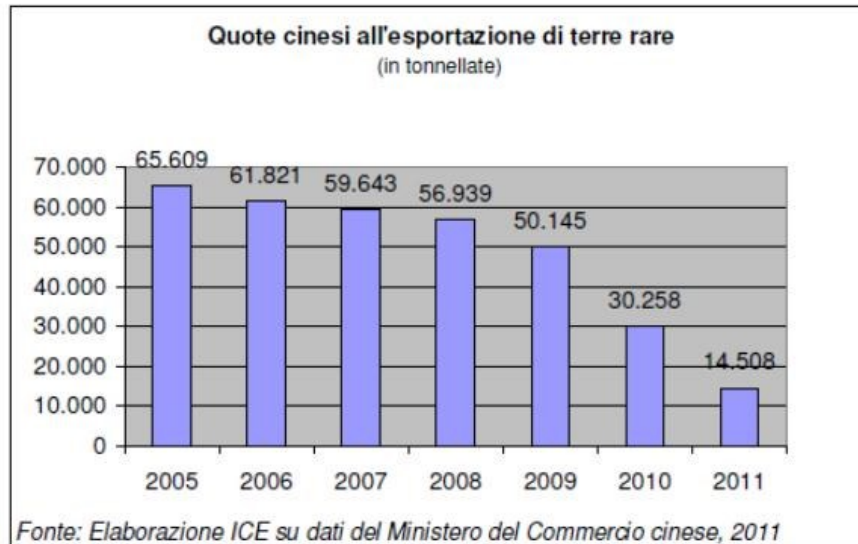
permanenti, nell'ultimo decennio, è stata scelta per svariate applicazioni grazie alle eccellenti proprietà magnetiche e al miglioramento del comportamento in funzione della temperatura: è comunemente usato oltre i 230 °C. In termini di massima densità di energia, esso permette di raggiungere i più alti valori nei magneti che oggi si commercializzano. Rispetto al samario-cobalto, introduce migliori proprietà da un punto di vista meccanico, ma ha una più bassa temperatura di Curie. Questi magneti hanno un grande potenziale per migliorare le prestazioni in rapporto al costo per molte applicazioni. Per questa ragione hanno un maggior impatto sullo sviluppo e sulle applicazioni di apparecchiature a magneti permanenti nel futuro. Questi magneti sono usati nei motori elettrici, attuatori e motori lineari, accoppiamenti magnetici e sensori. Oggi per la produzione su vasta scala i prezzi dei magneti in NdFeB, a seconda del grado, sono circa 55 \$ per kg. Questo è circa il 60-70% del costo dei magneti in SmCo. Assumendo costanti i prezzi delle materie prime, si prevede che con la crescente produzione e con i costi di fabbricazione decrescenti, i prezzi scenderanno.

### ***3.5.3 I limiti dei motori lineari***

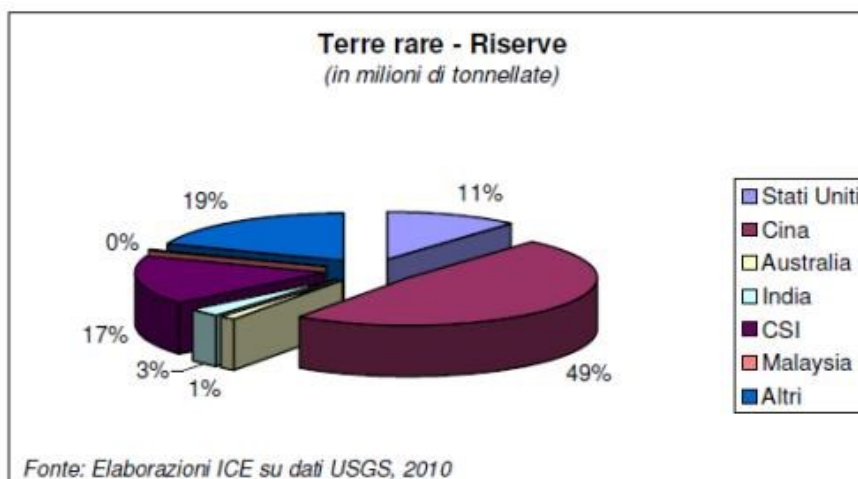
Fino ad ora si è parlato quasi esclusivamente dei vantaggi che i motori lineari riescono a portare nel mondo dell'automazione industriale. Va detto però che i motori lineari sono presenti da parecchio tempo sul mercato ma fino ad ora diverse motivazioni non ne hanno permesso un uso notevole come negli ultimi anni. Come già riportato precedentemente, le spinte dei motori lineari non raggiungono valori elevati. In alcune applicazioni si preferisce ancora l'utilizzo dei motori rotativi in modo tradizionale. Un'altra limitazione è dovuta al fatto che non essendo presente un riduttore di velocità, il motore sente direttamente tutto il carico su di esso. Questo comporta, in alcune applicazioni, a dover dimensionare l'impianto con motori molto più grandi del necessario per poter supportare le sollecitazioni gravose dovute alla diretta connessione del prodotto al movente. Questo comporta quindi un aumento del costo del sistema.

Un altro fattore che ha sempre inciso pesantemente sulla diffusione dei motori lineari nel campo dell'automazione è dovuto all'elevato prezzo che questi dispositivi hanno avuto. Essendo stato un mercato sempre molto ristretto, i costi del loro utilizzo hanno impedito alle aziende di applicare i principi delle economie di scala. Ma grazie all'andamento positivo che gli azionamenti lineari stanno scoprendo negli ultimi periodi è possibile affermare che sta acquistando sempre più quota di mercato. Negli ultimi anni la crescita notata dovrebbe continuare a un ritmo sostenuto e le domande hanno iniziato a recuperare il ritardo con il passato. Inoltre, il prezzo di motori lineari scende con un buon tasso percentuale all'anno, rendendoli sempre più un'alternativa valida ai tradizionali motori rotativi. I costi dei magneti permanenti hanno sempre inciso sui costi dei motori in generale. Purtroppo negli ultimi anni si sono susseguiti una serie di eventi che ne hanno aumentato notevolmente il prezzo. Le terre rare sono recentemente assunte agli onori della cronaca, almeno a partire da quando, nel 2009, il mondo si è

improvvisamente accorto che il 97% della produzione era (ed è tuttora) in mani cinesi. La Cina ha bloccato l'export di terre rare suscitando notevoli preoccupazioni al livello internazionale. La Cina, che soddisfa il 97% del fabbisogno mondiale di terre rare e possiede il 48% delle riserve mondiali.



Nel 2010 ha interrotto per un periodo di tempo le spedizioni in Giappone a causa di un incidente diplomatico. Questo fenomeno è stato direttamente influenzato dalla politica commerciale restrittiva da parte della Cina, che dal 2005 ha cominciato a imporre quote e dazi all'esportazione di terre rare e perfino a minacciarne il blocco totale.



Ciò ha causato un fortissimo aumento dei prezzi, specialmente nel corso degli ultimi anni. A luglio 2010, una tonnellata di terre rare costava in media 14.405 dollari americani (intorno ai 10.000 euro, prezzo CIF), mentre a gennaio dell'anno 2010 il prezzo di riferimento è aumentato fino a raggiungere i 109.036 dollari (circa 70.000 euro).



## CAPITOLO 4

### NUOVA TECNOLOGIA: IL SISTEMA ITRAK

Come precedentemente introdotto, la mia ricerca prevede lo Sviluppo di soluzioni innovative per l'alimentazione sincrona di macchine confezionatrici ad alte prestazioni, ecco l'analisi e lo studio di un prodotto di ultima generazione nel campo degli azionamenti lineari ITRAK. Esso è stato sviluppato ed introdotto di recente sul mercato da Jacobs Automation. Il nuovo prototipo viene chiamato con l'acronimo iTRAK (the intelligent trak system) il quale sta rivoluzionando l'automazione esistente nel campo dei motori lineari sincroni. Questa tecnologia brevettata consente il controllo indipendente di più motori a propulsione magnetica su percorsi rettilinei e curvilinei promettendo così un enorme potenziale di sviluppo e di nuove strade da percorrere nel settore industriale. Il prodotto offre inoltre una flessibilità senza precedenti e notevoli valori di prestazione rispondendo così ai requisiti necessari per servire settori di produzione di maggiore interesse quali la movimentazione dei materiali di imballaggio e assemblaggio automatizzato.

#### 4.1 Struttura generale del sistema

In questo paragrafo vengono descritti gli elementi principali che costituiscono il prototipo in esame. Volendone osservare la struttura, in figura 76 è possibile notare le caratteristiche di struttura di ITRAK mentre in figura 77 è riportato uno schematico che rappresenta sinteticamente gli elementi che compongono il sistema.

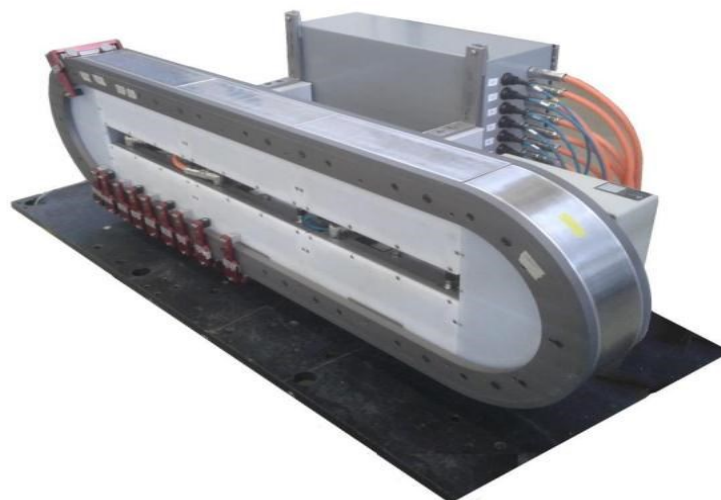
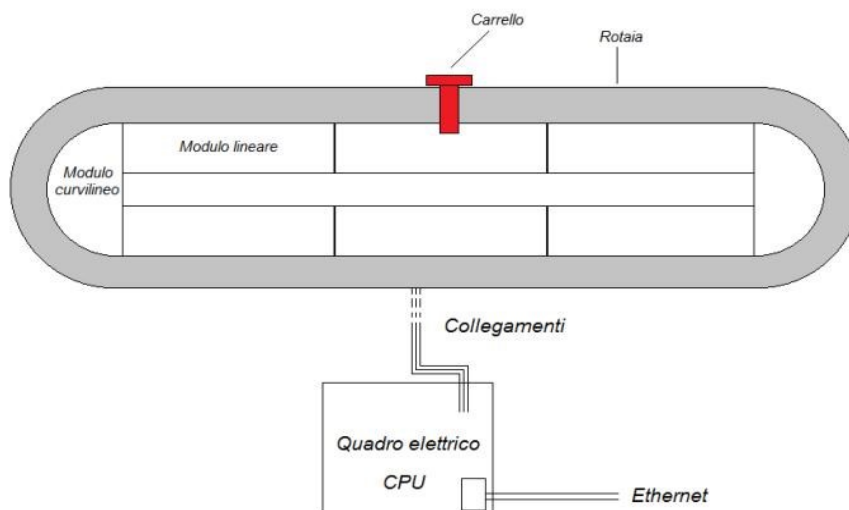


Figura 76



**Figura 77**

Analizzando la composizione della macchina è possibile individuare:

Porta ethernet. La comunicazione dei comandi motion e tutte le informazioni dello stato di funzionamento di ITRAK sono gestite interamente attraverso questa porta fisica. Se ne riporta un'immagine in figura 78.



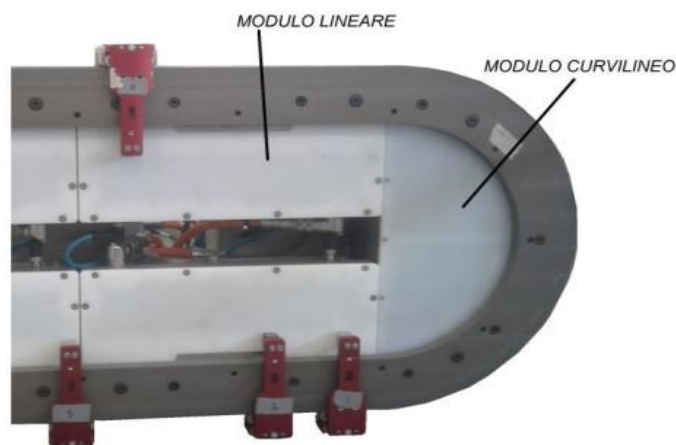
**Figura 78**

Quadro elettrico. Vi sono racchiusi tutti i dispositivi elettrici di potenza, di protezione e tutti gli elementi di logica interna della macchina. All'esterno del quadro sono posizionati inoltre un interruttore di emergenza, l'interruttore generale e delle luci di segnalazione dello stato elettrico di ITRAK.



**Figura 79**

I moduli. I blocchi modulari si differenziano a seconda della loro posizione all'interno della macchina. Possono essere di tipo lineare o curvilineo. La differenza tra i due tipi di configurazione sta principalmente nella diversa disposizione dei componenti a causa della diversa gestione dello spazio operativo. Un'altra differenza significativa è che la prestazione del sistema nei moduli curvilinei è peggiore rispetto a quella disponibile negli elementi lineari. Per giustificare ciò si può sottolineare che i moduli curvilinei sono stati pensati da Jacobs Automation principalmente come elementi di transito dei carrelli dalla zona lineare superiore a quella inferiore e viceversa.



**Figura 80**

I collegamenti. La comunicazione tra il quadro elettrico di controllo ed i vari moduli che compongono la struttura della macchina avviene tramite appositi cavi di collegamento. Come per la grande maggioranza dei dispositivi industriali, i cavi si suddividono in base al ruolo che rivestono nel funzionamento. Troviamo infatti i cavi che si occupano dello scambio delle informazioni di comando e di controllo (colore verde scuro) e i cavi che si occupano della trasmissione della potenza elettrica (colore arancio). In figura 81 è riportata la disposizione dei cavi all'esterno del quadro elettrico. Sono presenti diverse coppie di cavi ovviamente ciascuna rispettivamente per il modulo assegnato.



**Figura 81**

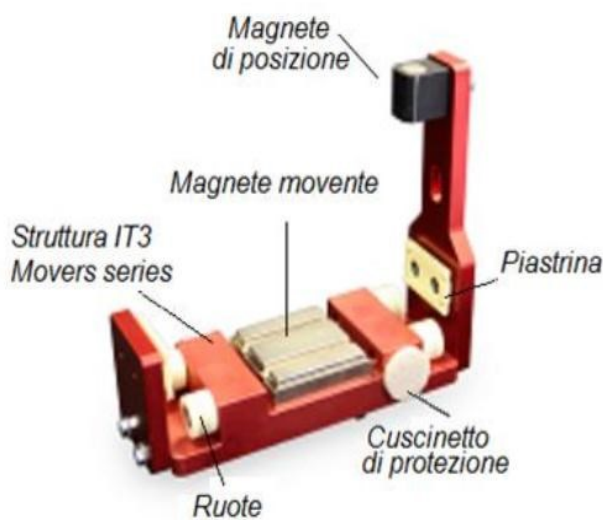


**Figura 82**

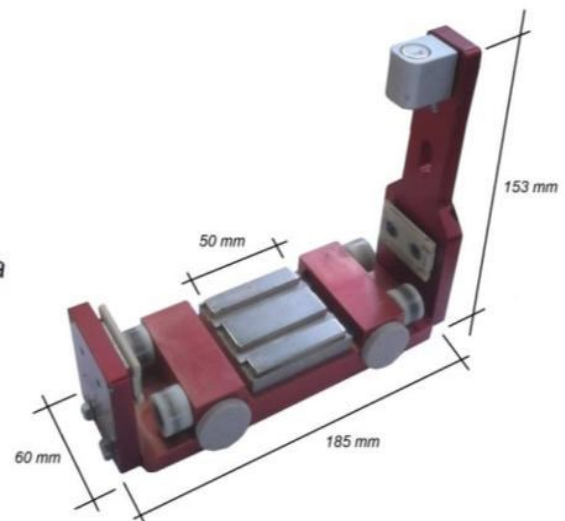
In figura 82 è possibile notare come viene effettuata la disposizione di una coppia di cavi per il controllo e di potenza in un modulo.

### • Il carrello

Come già introdotto, itrak può ospitare diverse decine di movers e ad ognuno di essi comandare lo spostamento sulla rotaia in modo indipendente. In figura 83 è possibile trovare una descrizione degli elementi principali che costituiscono il carrello mentre in figura 84 se ne riportano le dimensioni fisiche.



**Figura 83**



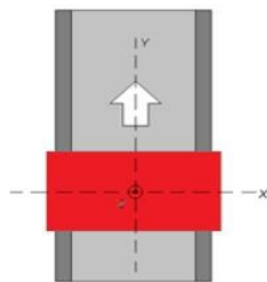
**Figura 84**

Ogni carrello presenta:

- La struttura portante IT3 Movers Series la quale è l'elemento principale su cui è formato il carrello.
- I magneti permanenti del movente che costituiscono la parte magnetica interessata nel principio di funzionamento di un motore lineare. Sono posizionati tre magneti di polarizzazione alternata. Sono utilizzati magneti a terre rare di tipo neodimio ferro boro.
- Il magnete di posizione usato per comunicare, agli appositi sensori, la posizione di ogni carrello all'interno della macchina. Anche in questo caso il tipo di magnete utilizzato è di tipo neodimio ferro boro.
- Le ruote che tengono sollevato il mover dalla rotaia e ne facilitano il movimento su di essa.
- Cuscinetto di protezione utilizzato per attenuare l'intensità di un eventuale urto tra due movers sulla rotaia.
- Piastrina d'attrito che mantiene allineato il mover durante gli spostamenti lungo la rotaia.

- **La rotaia**

La rotaia è l'elemento su cui scorre il carrello ed è la parte più esterna che compone i moduli di ITRAK. È costituita da due parti simmetriche laterali in alluminio sulle quali si appoggiano le ruote del carrello in condizioni stazionarie e durante il movimento. Inoltre, nella parte laterale ortogonale all'asse di spostamento del carrello, la rotaia viene interessata dall'attrito della piastrina stabilizzante la cui funzione è impedire movimenti indesiderati del carrello durante il moto. In particolare, come mostrato in figura 85, vengono impediti eventuali spostamenti lungo l'asse x ed eventuali rotazioni attorno all'asse z in base al sistema di riferimento adottato. In figura 86 sono riportate le dimensioni fisiche della rotaia.



**Figura 85**



**Figura 86**

La parte centrale della rotaia è composta esternamente da acciaio mentre al suo interno sono presenti gli avvolgimenti che il sistema usa per interagire con il campo magnetico prodotto dai magneti del carrello e di produrne il moto. All'interno degli avvolgimenti è presente un nucleo ferromagnetico per migliorare le prestazioni del campo magnetico prodotto che in figura 87 viene omesso.



**Figura 87**

Ogni spira ha un diametro di 50 mm e sia i conduttori che i lamierini di materiale ferromagnetico che compongono il nucleo sono isolati tramite resina epossidica. La resina epossidica può avere problemi di fusione e degradamento del materiale nel caso in cui negli avvolgimenti circoli una corrente troppo elevata la quale comporta un eccessivo calore dovuto all'effetto Joule.

## 4.2 Il principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di iTRAK è basato sull'utilizzo di motori lineari sincroni LSM. A differenza di quanto visto nel capitolo 1, il motore sincrono utilizzato ha invertito i ruoli di statore e rotore. Infatti viene utilizzata la configurazione vantaggiosa in cui sono i magneti permanenti ad essere in moto. Uno schema di tale configurazione nota come "Moving Magnet Linear Motor", è riportato nella figura 88

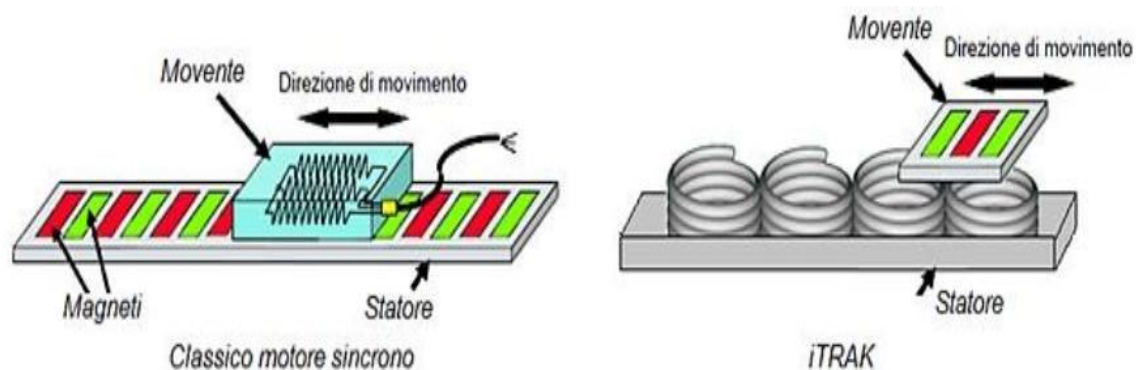


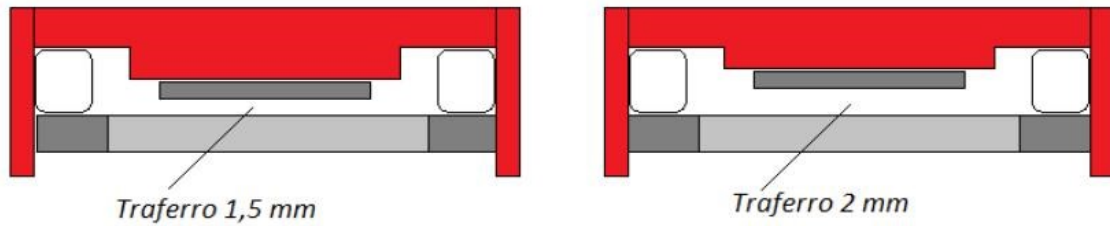
Figura 88

Il principio di funzionamento è dunque il medesimo ma cambiano solamente i ruoli di movente e dello statore. È possibile introdurre un'ulteriore considerazione sulla struttura del motore lineare che costituisce il sistema in esame. Il punto su cui vale la pena soffermarsi è la questione della dimensione del traferro ovvero lo spazio d'aria che separa due parti di materiale ferromagnetico. In particolare il traferro in esame in questa situazione è la distanza presente tra i magneti del movente e la superficie in acciaio della rotaia.



Figura 89

In questa macchina il range di traferro consentito può andare da un valore minimo di 1.5 mm fino ad un valore massimo di 2 mm.

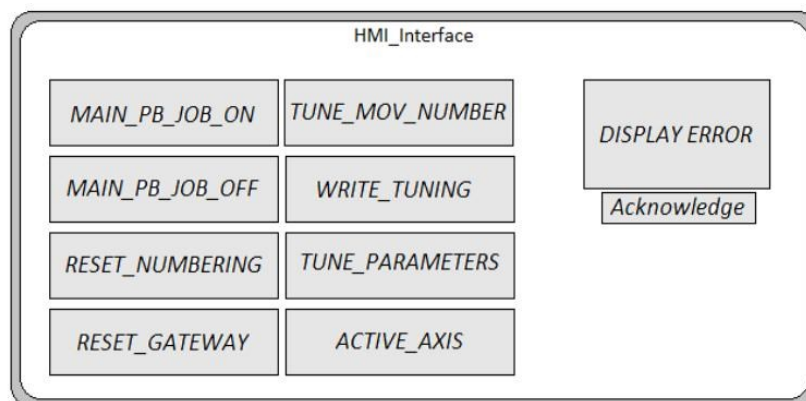


**Figura 90**

Le prestazioni cambiano se il valore del gap di aria tra le superfici cambia. Utilizzare un valore di traferro basso comporta un miglioramento dal punto di vista della spinta sviluppabile dal motore lungo l'asse del moto ma comporta come svantaggio il fatto di aumentare il disturbo causato dal cogging (già visto nel capitolo 1). Al contrario, se si utilizza uno spazio più elevato, si risente meno l'influenza del ripple di coppia introdotto dal cogging ma si ha, di conseguenza, perdita di prestazione in termini di forza. Il valore di traferro consigliato da Jacobs Automation è pari a 1,75 mm.

### 4.3 Pannello di controllo

Il sistema fornito da Jacobs Automation, dal punto di vista hardware, si presenta pronto per essere utilizzato dall'utente senza la necessità di montaggio di elementi esterni aggiuntivi. Invece, dal punto di vista della logica di controllo, il sistema non è autonomo. Come si analizzerà nel capitolo 4, la gestione dei comandi viene effettuata da un apposito controllore esterno. In questo paragrafo si ha l'obiettivo di descrivere brevemente i comandi base per il corretto funzionamento della macchina che possono essere considerati separatamente dalla gestione della logica di controllo. Tali comandi si presentano all'utilizzatore del sistema in un eventuale pannello di controllo HMI (Human Machine Interface). Per semplicità, in seguito si rappresenta una rappresentazione dell'interfaccia dei comandi che si vogliono descrivere.



**Figura 91**



**MAIN\_PB\_JOB\_ON:** presupponendo di aver alimentato ed implementato correttamente il sistema ITRAK, questo comando fornisce la coppia agli opportuni assi in funzione. Questo tipo di comando sarà descritto nel dettaglio all'interno del capitolo 4 durante la procedura di accensione della logica di controllo del sistema Flowpack.

**MAIN\_PB\_JOB\_OFF:** è utilizzato per comunicare il comando di esclusione di coppia agli azionamenti che controllano i carrelli del sistema. Viene generalmente utilizzato come ultimo comando durante la procedura di spegnimento del sistema in condizioni normali. Ovviamente è possibile togliere coppia agli assi in eventuali condizioni di emergenza sia attraverso l'apposito fungo di emergenza che la macchina predispone (figura 79), sia via software utilizzando l'apposita procedura che si esaminerà in seguito nel capitolo 4.

**ACTIVE\_AXIS:** parametro utilizzato per comunicare al sistema il numero di assi attivi che le schede di controllo devono attendersi all'avvio della macchina. In poche parole rappresenta il numero di carrelli presenti nel sistema.

**RESET\_NUMBERING:** all'accensione, il sistema esegue l'assegnamento di un identificativo per ogni carrello dichiarato attraverso il parametro ACTIVE\_AXIS. La gestione degli identificativi viene assegnata in modo standard come mostrato in figura 92. Il mover più vicino al riferimento 0, calcolando la distanza in senso antiorario, ottiene il numero 0 di identificazione. Come si analizzerà in seguito nel capitolo 5, tale identificativo verrà adoperato per la relazione tra il mover e il motore all'interno della logica di controllo per la movimentazione del carrello. Per quanto riguarda i restanti elementi, l'assegnamento degli identificativi viene eseguita in modo analogo. I numeri di identificazione vengono assegnati in modo crescente a partire dal riferimento in senso antiorario. In particolare il comando RESET\_NUMBERING viene utilizzato per effettuare una nuova numerazione dei movers nel sistema. Per esempio, tale comando può essere necessario nel caso in cui si desideri incrementare o diminuire il numero di carrelli fisicamente presenti. Dopo aver dichiarato il nuovo numero di assi attivi, è necessario quindi effettuare un reset degli identificativi per avere la corretta corrispondenza numerica tra gli elementi posizionati sulla rotaia e i motori utilizzati nella logica di controllo.

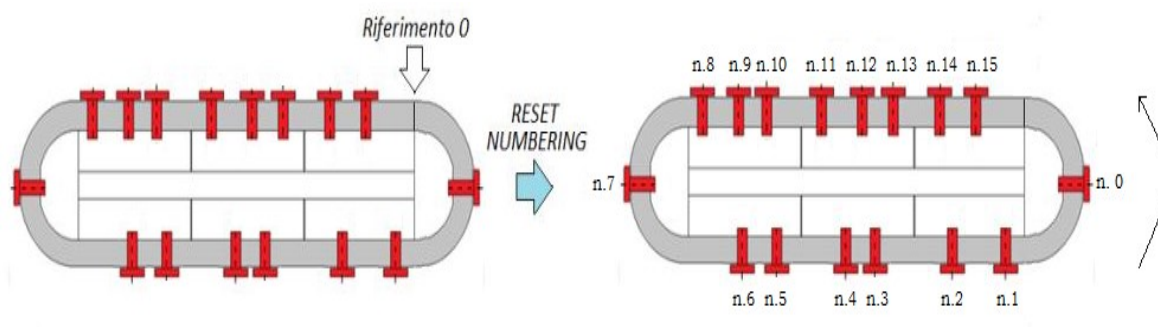


Figura 92



**RESET\_GATEWAY:** come precedentemente mostrato nella descrizione della struttura di ITRAK, il sistema è dotato di porta ethernet per la comunicazione con il controllore. Questo comando è utilizzato per effettuare un'operazione di reset sul gateway che si occupa della gestione software delle comunicazioni attraverso tale porta.

**TUNE\_PARAMETERS:** questa voce rappresenta l'insieme dei parametri di tuning utilizzati dai controllori PID degli azionamenti elettrici presenti all'interno del quadro elettrico per il controllo in retroazione dei motori.

**TUNE\_MOV\_NUMBER:** il sistema mette a disposizione la possibilità di effettuare il tuning dei parametri sui singoli motori lineari. Tale elemento rappresenta l'identificativo del motore sul quale si desidera effettuare la regolazione dei parametri. Lasciando vuoto tale parametro, il sistema considera la regolazione dei parametri su tutti i motori presenti.

**WRITE\_TUNING:** questo comando è utilizzato per effettuare l'effettiva trasmissione dei parametri di tuning decisi in ambito di regolazione.

**DISPLAY ERROR:** questo elemento rappresenta un display con il quale il sistema comunica all'utente il tipo di errore o di malfunzionamento eventualmente presente nel sistema. Può comunicare, ad esempio, un'avvenuta collisione tra carrelli, il surriscaldamento termico di un modulo, la non corretta alimentazione di un modulo, la non corrispondenza fisica degli identificativi dei motori, ecc.

**ACKNOWLEDGE:** nel caso di un errore o di un malfunzionamento, il sistema si ferma e comunica all'utente la motivazione del blocco attraverso il display. Prima di poter effettuare un nuovo comando di messa in coppia dei motori (main\_pb\_job\_on), il sistema richiede all'utente di aver appreso il tipo di errore avvenuto. Per fare ciò, l'utente deve utilizzare il comando ACKNOWLEDGE per comunicare ad ITRAK di aver recepito l'informazione.

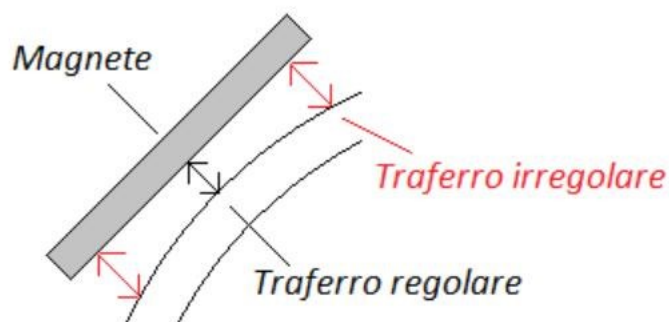
#### **4.4 Caratteristiche del sistema ITRAK**

- **Modularità**

Questo prototipo ha la possibilità di modularità dal punto di vista della lunghezza del sistema grazie alla gestione della separazione in blocchi standard dei moduli che li compongono. Si ha, di conseguenza, la medesima possibilità di incrementare o diminuire il numero di movers operativi sulla rotaia nei limiti fisici dichiarati dai costruttori.

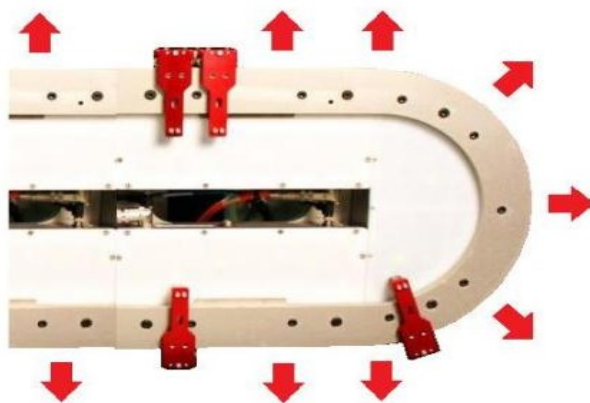
- **Disposizione del traferro**

Ogni carrello di ITRAK presenta un andamento del traferro di tipo tangenziale punto per punto nella zona curvilinea. Questa caratteristica comporta piccole irregolarità nella dimensione del traferro come mostrato in figura 93. Tali irregolarità possono tradursi in una mancata generazione a pieno della coppia e il generarsi di piccole oscillazioni dovute alla non perfetta interazione tra campo magnetico di magnete e di statore.



**Figura 93**

In figura 94 si riporta la disposizione del traferro, La freccia in colore rosso indica la direzione del campo magnetico di statore.



**Figura 94**



**Figura 95**

il sistema ITRAK presenta un "singolo traferro" ovvero una sola zona di interazione tra il campo magnetico di statore e di rotore come mostrato in figura 95. Richiamando quando visto nel capitolo 3, in particolare a riguardo delle tipologie di costruzione dei motori LSM perciò è possibile associare il motore di ITRAK ad un tipo Ironcore.

## CAPITOLO 5

### APPLICAZIONI SVILUPPATE

In questo capitolo si porta l'attenzione alle applicazioni sviluppate utilizzando ITRAK. Ci si concentra sull'analisi e sullo studio di una confezionatrice di nuova generazione usando il sistema ITRAK. L'obiettivo è quello di identificare una valida alternativa al processo produttivo, sfruttando le grosse potenzialità che il sistema di Jacobs Automation mette a disposizione. Si riportano il tipo di PLC utilizzato per la programmazione e la comunicazione con ITRAK. In seguito, una breve descrizione di un'interfaccia di simulazione, prodotta utilizzando il Programma Excel e Factory talk, utilizzata per la fase di progettazione del nuovo prototipo. Infine, le applicazioni nel dettaglio.

#### 5.1 Il PLC utilizzato

In campo industriale, in genere, si utilizza uno speciale elaboratore concepito per risolvere i problemi di controllo e automazione. Il plc (controllore logico programmabile o (Programmable Logic Controller) è un controllore per industria specializzato nella gestione o controllo dei processi industriali. Il PLC esegue un programma ed elabora i segnali digitali ed analogici provenienti da sensori e diretti agli attuatori presenti in un impianto industriale. Un PLC è un oggetto hardware componibile. La caratteristica principale è la sua robustezza estrema; normalmente il PLC è posto in quadri elettrici in ambienti rumorosi, soggetti a molte interferenze elettriche, con temperature elevate o con grande umidità. In certi casi il PLC è in funzione 24 ore su 24, per 365 giorni all'anno, su impianti che non possono fermarsi mai. La struttura del PLC viene adattata in base al processo da automatizzare. Durante la progettazione del sistema di controllo, vengono scelte le schede adatte alle grandezze elettriche in gioco. Le varie schede vengono quindi inserite sul BUS o rack del PLC. Un PLC è composto da un alimentatore, dalla CPU e da un certo numero di schede di ingressi e uscite sia analogiche che digitali. Se il PLC opera in rete con altri PLC, sono necessarie delle schede di comunicazione adatte al protocollo di rete già implementato sugli altri PLC. Nel caso di operazioni di movimentazione, come nel campo della robotica, il PLC ospita delle schede di controllo assi, cioè delle schede molto veloci e sofisticate che permettono di gestire spostamenti e posizionamento. Si impiegano ove sia necessario controllare il movimento di un organo meccanico tramite un motore elettrico. Alcune schede presentano un funzionamento particolarmente semplice permettendo di fissare una quota di consegna che l'asse deve raggiungere e un ingresso per il feedback di posizione. Permettono inoltre

grandissima flessibilità e la possibilità di emulare diversi profili. Richiedono generalmente un modulo di potenza esterno (azionamento) per il comando effettivo del motore. Il PLC per eseguire i compiti di controllore deve essere programmato. La programmazione del PLC è effettuata normalmente con un PC sul quale un software dedicato permette di creare programmi da scaricare nella memoria della CPU del PLC. La normativa IEC 1131-3 del 1993 ha standardizzato 5 linguaggi di programmazione, di cui 3 grafici e 2 testuali.

Linguaggi grafici:

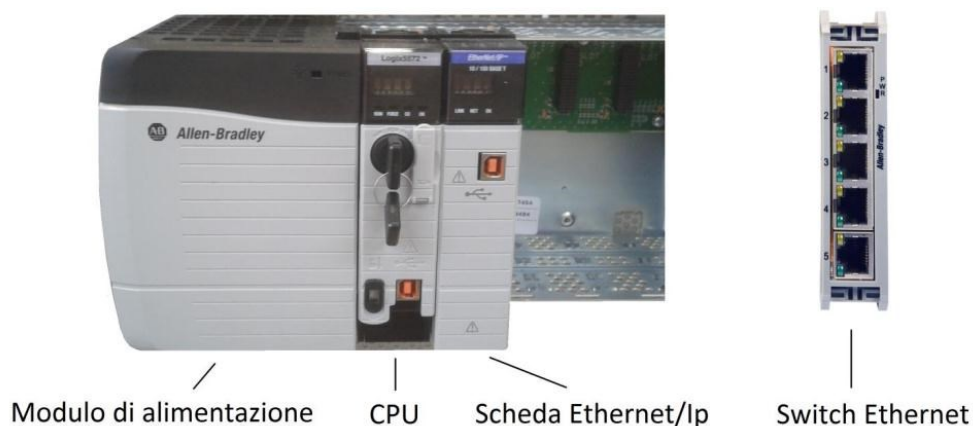
- Ladder diagram (LD o KOP) detto Linguaggio a contatti, è rimasto il più usato fino a pochi anni fa. Il programmatore semplicemente utilizza simboli che vengono disposti come veri e propri schemi elettrici nel software di programmazione.
- Sequential function chart (SFC) Tale linguaggio permette di implementare facilmente una macchina (o automa) a stati finiti.
- Function Block Diagram (FBD o FUP) detto Diagramma a blocchi funzionali - Analogo ai diagrammi circuitali.

Linguaggi testuali:

- Instruction List (IL o AWL) detto Lista di
- Structured Text (ST) detto Testo strutturato, è un Linguaggio di alto livello simile al codice c

### **5.1.1 Disposizione hardware**

Tutta la progettazione della logica di controllo delle diverse applicazioni studiate è sviluppata in ambiente di programmazione Rockwell Automation. L'hardware utilizzato per interagire con il sistema ITRAK è riportato in figura 96.



**Figura 96**

## CPU

La CPU utilizzata è appartenente alla serie Allen-Bradley ControlLogix 5570 Series la quale fa parte di una delle migliori offerte di prestazione e potenza di calcolo disponibili sul mercato. In particolare si è utilizzato un ControlLogix 5572.

## SCHEDA ETHERNET/IP

Come precedentemente descritto, nella comune struttura del plc vengono utilizzate delle apposite schede per i comandi motion chiamate schede controllo assi. Ma, come accennato nel capitolo 3, il controllo e la comunicazione del sistema ITRAK con il plc esterno avvengono tramite protocollo ethernet. Si è reso quindi necessario utilizzare una scheda ethernet appositamente dedicata ai comandi motion. EtherNet/IP è la stessa rete Ethernet di comune utilizzo quotidiano. Al suo interno, però, predispone un protocollo orientato al controllo robusto ed in tempo reale di reti per il movimento motion drive ad elevate velocità. Questo prodotto permette la comunicazione ed il controllo di un numero notevole di assi in movimento in modo sicuro e preciso grazie al modulo di comunicazione CIP Sync.

CIP Sync fornisce un meccanismo per sincronizzare il clock di riferimento tra i controller, i dispositivi I/O e l'hardware speciale che necessita di sincronizzazione delle tempistiche. La rete Ethernet/Ip è l'unica che sopporta il sincronismo con CIP Sync il quale fornisce le capacità di svolgere le funzioni di controllo assi attraverso la rete EtherNet/Ip. Un sistema CIP Sync può avere molti dispositivi contenenti dei clock con capacità di assumere il ruolo di clock di riferimento (detto master clock). I potenziali master clock del sistema negoziano automaticamente tra loro quale sia il migliore da tenere come riferimento. Questa selezione, chiamata *Best Master Clock Algorithm*, cicla continuamente nel sistema. La scelta di un clock Master dipende dai requisiti di sistema. CIP Sync fornisce anche un riferimento comune per gli azionamenti degli assi di tutta l'organizzazione hardware. Questo permette al controller di richiedere agli assi il raggiungimento di una posizione predefinita in un di tempo di riferimento noto. CIP Sync fornisce quindi un punto di riferimento unico per gli azionamenti, la schede di rete ed il controller. Una volta stabilito per tutti i dispositivi il concetto di tempo comune, è relativamente semplice per il pianificatore del moto degli assi distribuire le posizioni di destinazione in base al tempo. Il Controllo del movimento è basato su un evento temporale. Le parti di software che si occupano del motion vengono chiamate per l'appunto task ad evento. Una consegna precisa dei pacchetti non è strettamente necessaria ma lo è, invece, avere un riferimento che indichi a che istante di tempo è stato considerato quel preciso comando di motion. I pacchetti di dati contengono tra le varie informazioni di motion, un indicatore preciso del riferimento del clock detto `time_stamp`.

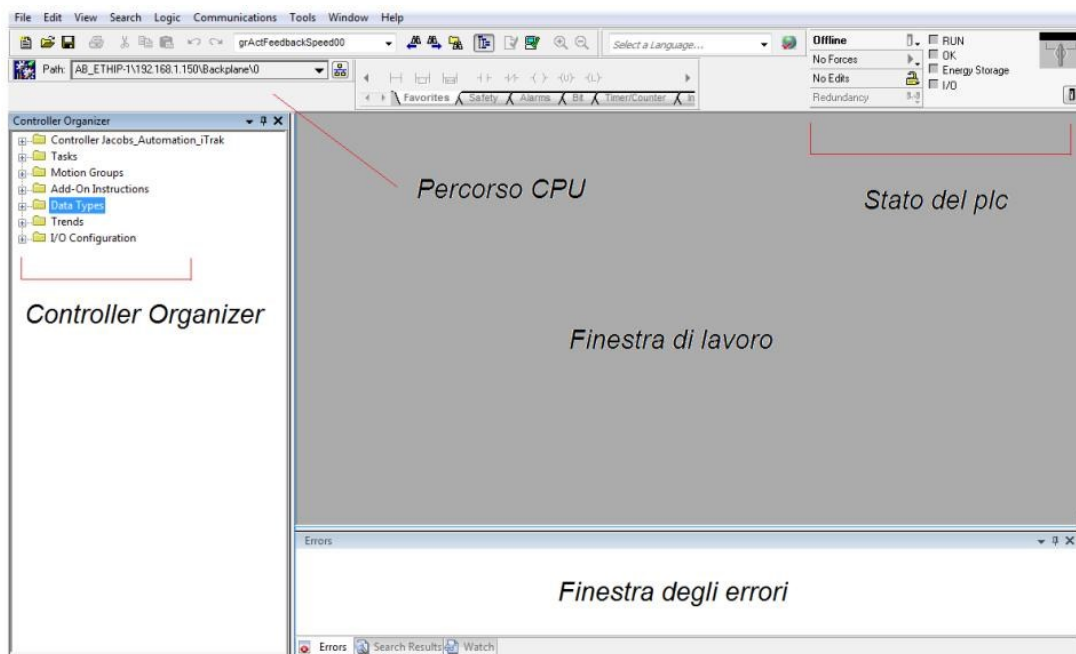
*pacchetto di informazioni trasmesse*



Ad ogni nuovo ciclo, un pacchetto dati include nuovi valori di posizione basati sull'effettivo valore di posizione campionato all'inizio del ciclo. Se un pacchetto è in ritardo per il ciclo successivo, il time\_stamp del blocco informazioni viene utilizzato per compensare il ritardo.

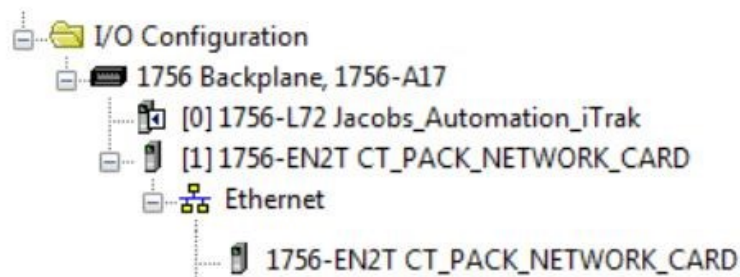
### **5.1.2 Il software utilizzato**

In ambiente di programmazione Rockwell Automation, Il software utilizzato è RSLOGIX 5000. La versione 20 del software RSLogix 5000 offre le alte prestazioni di un sistema di controllo integrato per i costruttori di macchine, system integrator e utenti finali alla ricerca di una infrastruttura di controllo unico con un unico ambiente di sviluppo facilmente scalabile in base ai requisiti delle applicazioni. Inoltre, in aggiunta all'inserimento di nuove funzionalità destinate alla semplificazione dei comandi relativi ai movimenti, la versione 20 permette di utilizzare le funzionalità di motion integrate nella scheda di rete precedentemente descritta. L'ambiente di programmazione rslogix5000 mette a disposizione dell'utente la seguente interfaccia:



Il controller organizer è il fulcro della gestione della programmazione in ambiente Rockwell. Contiene:

- *Controller tags*: Le variabili globali del sistema.
- *Tasks*: le tasks sono, in sostanza, i “compiti” di controllo che il plc deve eseguire. Esistono diversi tipi di task a seconda del tipo di esecuzione. Possono essere task ad esecuzione continua, periodica o ad evento. Ogni task può contenere diversi programmi. Ogni programma contiene variabili locali, una routine principale ed eventuali sotto routine. Il codice di programmazione è contenuto nelle routine.
- *Motion group*: contiene la descrizione hardware di tutti gli assi di movimento del sistema. Ne esistono ovviamente di vari tipi. In queste applicazioni si farà riferimento in particolare agli assi virtuali.
- *I/O configuration*: descrive la configurazione degli input e degli output del sistema. Il backplane rappresenta il bus di comunicazione interno del plc sul quale sono posizionati la cpu nella posizione 0 e la scheda ethernet di comunicazione con l'ITRAK.



La finestra di lavoro permette di intervenire sul codice situato nelle routine delle varie tasks. I tipi di linguaggio utilizzati per la programmazione della logica di controllo sono:

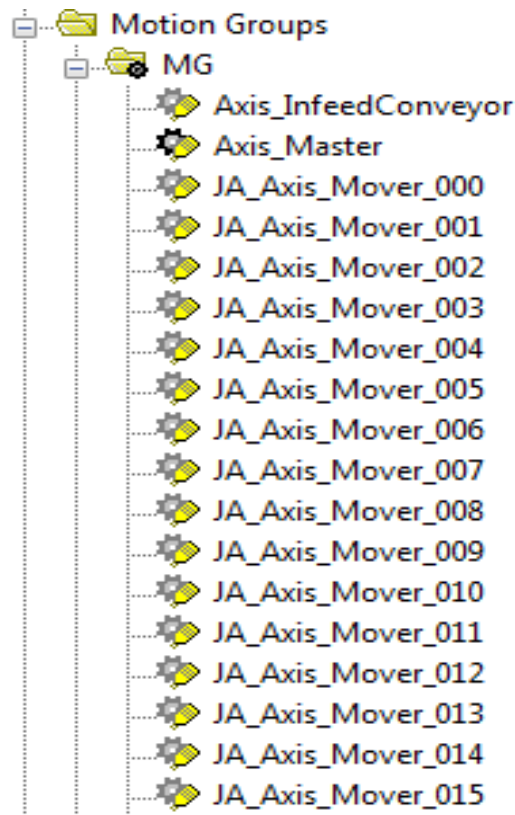
- Ladder (linguaggio grafico)
- ST (linguaggio strutturato)

### 5.1.3 Comando di movimento su ITRAK

In un ambiente di programmazione che utilizza un normale motore elettrico, è necessario utilizzare un azionamento elettrico per trasferire i comandi motion dal plc all'asse vero e proprio. Un'ulteriore passo è definire l'azionamento utilizzato nella descrizione hardware del plc.

Utilizzando ITRAK, invece, non è necessario definire dei drivers poiché i comandi motion vengono trasmessi attraverso la scheda EtherNet/Ip verso il gateway interno della macchina. In Rslogix, ogni carrello presente su ITRAK viene rappresentato come un asse di tipo virtuale. Un oggetto asse virtuale è un asse

con la piena funzionalità di un asse di movimento, ma non è associato ad alcun dispositivo fisico. Nella task relativa al motion group vengono descritti gli assi virtuali utilizzati per i carrelli presenti sul sistema come riportato in seguito:



Un parametro da tenere in considerazione nella descrizione del motion group è la frequenza con cui vengono inviati i valori di movimentazione ai vari assi. Questo periodo prende il nome di Coarse Update Period. Il plc non si occupa di comandare direttamente i motori in termini di parametri elettrici di corrente ma ha il compito di trasmettere agli azionamenti i valori di posizione che essi devono fare raggiungere ai motori di loro competenza. Il coarse update period rappresenta, quindi, il periodo con cui vengono trasmesse le informazioni di movimento dal plc all'azionamento. Gli assi virtuali rappresentanti i carrelli e la struttura dati contenente le informazioni necessarie, vengono passati alla macchina attraverso l'uso di un ADD-ON Instruction proprietaria di Jacobs Automation come riportato in figura 97.





Figura 97

In figura 98 si riporta il numero di carrelli usati nell'applicazione. Abbiamo usato 16 carrelli indipendenti, e questo numero viene scelto per riferimento al target di velocità che vorremo raggiungere (1000 Prodotti al minuto).



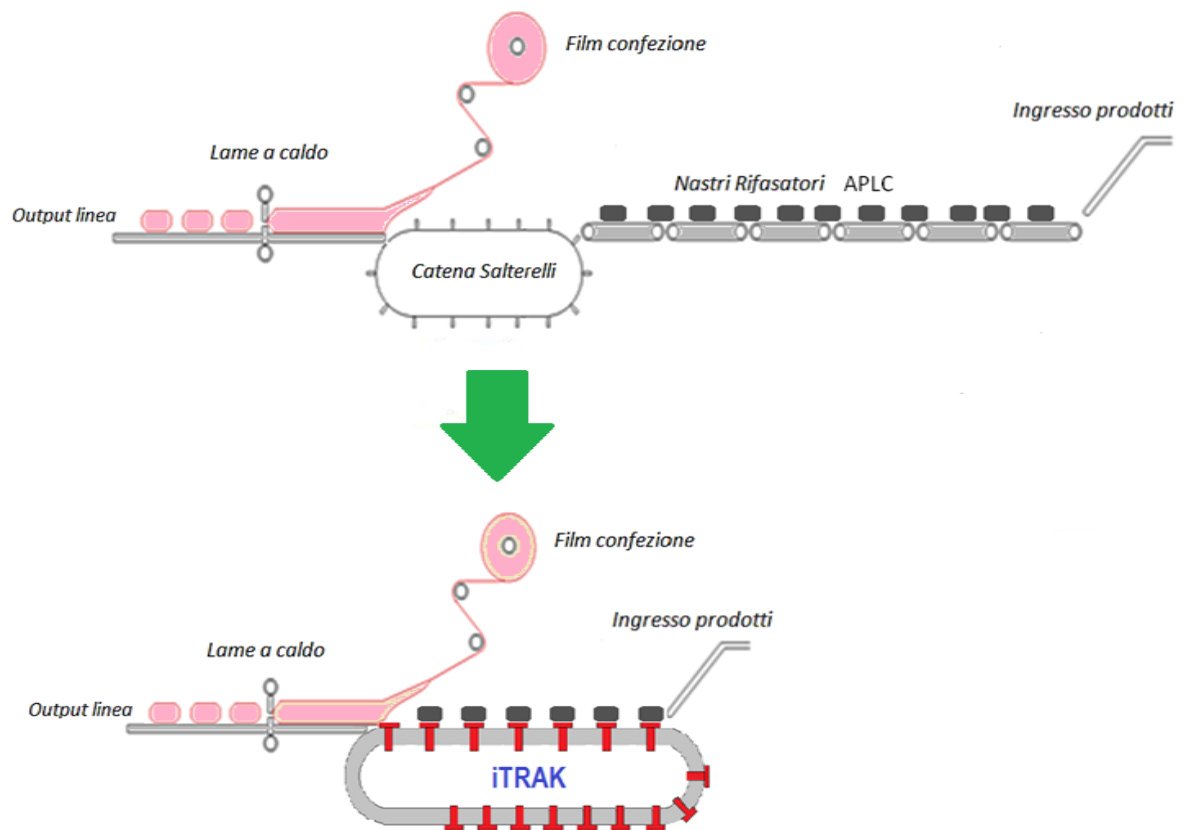
Figura 98

## 5.2 Inserimento di ITRAK nella Flowpack

Come descritto precedentemente, una parte delicata del processo di produzione di una flowpack riguarda la serie dei nastri rifasatori. Il loro compito è quello di ricevere i prodotti che arrivano in modo casuale e posizionarli in maniera tale da essere inseriti correttamente nella catena salterelli.

La gestione attuale prevede l'uso di opportune rapide accelerazioni e decelerazioni applicate singolarmente ad ogni nastro richiedendo di conseguenza

una logica di controllo assai complessa e poco versatile nel caso in cui si desideri cambiare il formato del prodotto e altre Problematiche sono state descritte nel capitolo 2. La soluzione alternativa proposta è di sostituire la serie dei nastri rifasatori e la catena saltarelli con il sistema ITRAK. In particolare ogni prodotto che arriva in ingresso viene consegnato ad un carrello e ogni carrello consegna il prodotto al film per essere confezionato. Ne viene visualizzata la rappresentazione schematica in figura 99.



**Figura 99**

Vi sono diverse motivazioni che hanno spronato CT PACK ad effettuare un percorso di ricerca e sviluppo nella direzione di un eventuale utilizzo del prodotto fornito da Jacobs Automation:

- la logica di controllo utilizzata per la gestione delle distanze degli elementi presenti sui nastri rifasatori è molto complessa.
- L'utilizzo dei nastri comporta limiti fisici in termini di accelerazioni applicabili al tipo prodotto in produzione. Poiché le correzioni di fase vengono applicate opportunamente con rapide accelerazioni dei singoli nastri, occorre tenere in considerazione le forze di inerzia che si generano nelle varie correzioni le quali possono causare eventuali effetti di scivolamento del prodotto sul nastro.

- Sono presenti limiti di versatilità a causa delle diverse dimensioni fisiche di ingombro e delle diverse masse presenti sui nastri in base al tipo di formato dell'oggetto in produzione.
- Ogni nastro è generalmente delle dimensioni di 1 metro. La parte dei nastri rifasatori è composta normalmente da 6 elementi in serie. La Sostituzione dei nastri significherebbe, inoltre, la riduzione di ingombro dell'intera catena di produzione.
- Sfruttando l'indipendenza dei carrelli è possibile pensare ad una soluzione alternativa nella fasatura dei prodotti a differenza dei nastri rifasatori che devono considerare la presenza di più elementi su un nastro e, di conseguenza, tenerne conto nella correzione di posizione.
- Sfruttando l'indipendenza dei carrelli è possibile pensare ad una soluzione alternativa di sostituire la presenza della catena saltarelli che non fa altro di consegnare il prodotto al film per essere confezionato.

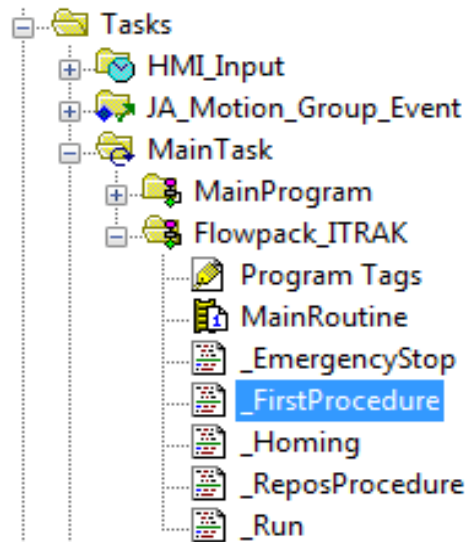
### **5.3 Logica di controllo per flowpack con ITRAK**

Per una corretta stesura della logica di programmazione si è utilizzato il concetto della macchina a stati. Si è deciso di suddividere l'intera gestione nei seguenti stati di funzionamento:

- Accensione
- Riposizionamento
- Standby
- Run
- Emergenza
- Errore

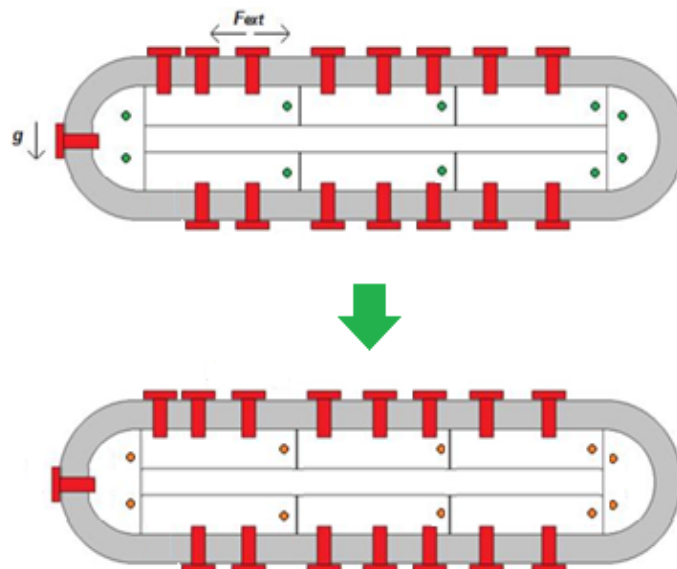
#### **5.3.1 Accensione**

È lo stato che si occupa della procedura di accensione del sistema ITRAK. Si provvede alla corretta inizializzazione interna della macchina andando ad interagire con la task periodica HMI\_Inputs la quale simula di fatto un eventuale pannello hmi (human machine interface). Si provvede a predisporre la corretta assegnazione dei carrelli agli assi virtuali presenti nel motion group e a fornire la coppia a tali assi. Si inizializzano inoltre tutti i parametri della logica di controllo attraverso la sub-routine FirstProcedure.



**Figura 100**

Prima della procedura di accensione, ovvero in presenza della sola tensione di alimentazione del sistema, i led di segnalazione dei moduli lineari e curvilinei emettono un colore verde per indicare che sono correttamente alimentati. In questa situazione ogni carrello è privo di una qualsiasi forma di controllo e di conseguenza sono soggetti ad eventuali forze esterne agenti dall'ambiente operativo in cui sono inseriti. Una volta terminata correttamente la procedura di accensione, gli assi risultano in coppia e, di conseguenza, mantengono la posizione assegnata. In questa condizione, le luci di segnalazione assumono un colore arancione come mostrato in figura 101.



**Figura 101**

### 5.3.2 Riposizionamento

Questo stato, dopo la corretta procedura di accensione, si occupa di disporre i carrelli in modo opportuno per poter procedere con lo svolgimento di un processo flowpack. L'organizzazione interna è basata analogamente secondo il concetto di macchina a stati. Inizialmente, occorre individuare il carrello più vicino alla posizione definita come zona di carico ovvero la posizione in un cui un carrello attende l'arrivo di un prodotto del input. Viene eseguita una scansione delle distanze assolute dalla zona di carico di tutti i carrelli. Per convenzione si è assunto che il movimento di ogni carrello possa avvenire solamente in senso antiorario. Di conseguenza, viene scelto l'elemento che ha distanza minore percorribile in senso antiorario. In figura 102 si evince un esempio del concetto appena enunciato. È immediato notare che la distanza del carrello A è inferiore rispetto la distanza del carrello G. Ma, quest'ultimo, secondo il principio della convenzione adottata, sarà l'elemento candidato come mover più prossimo alla zona di carico prestabilita.

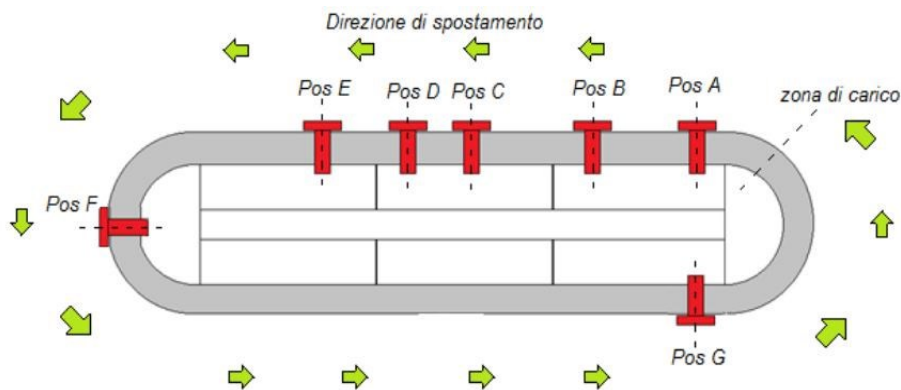


Figura 102

In seguito si riporta una parte di codice in linguaggio ST utilizzato per la procedura di riposizionamento.

```
for x:=0 to num_mover_attivi-1 by 1 do
case x of

0:best_mover_dist (CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
CARICO,JA_Axis_Mover_000,x, lunghezza_modulo);
1:best_mover_dist (CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
CARICO,JA_Axis_Mover_001,x, lunghezza_modulo);
2:best_mover_dist (CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
CARICO,JA_Axis_Mover_002,x, lunghezza_modulo);
3:best_mover_dist (CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
CARICO,JA_Axis_Mover_003,x, lunghezza_modulo);
4:best_mover_dist (CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
CARICO,JA_Axis_Mover_004,x, lunghezza_modulo);
5:best_mover_dist (CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
CARICO,JA_Axis_Mover_005,x, lunghezza_modulo);
```

```

6:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_006,x, lunghezza_modulo);
7:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_007,x, lunghezza_modulo);
8:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_008,x, lunghezza_modulo);
9:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_009,x, lunghezza_modulo);
10:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_010,x, lunghezza_modulo);
11:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_011,x, lunghezza_modulo);
12:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_012,x, lunghezza_modulo);
13:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_013,x, lunghezza_modulo);
14:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_014,x, lunghezza_modulo);
15:best_mover_dist(CalcoloMovDiRiferimento[x],best_dist,best_mover,quota_
    CARICO,JA_Axis_Mover_015,x, lunghezza_modulo);

end_case;
end_for;

```

Best\_mover\_dist è una ADD-ON instruction. È di fatto una funzione creabile dall'utente alla quale vengono passati i parametri di interesse. Al suo interno è svolto semplicemente il calcolo di distanza tra zona di carico e posizione del carrello in esame. Al termine del ciclo for si ottiene il carrello candidato, il cui numero di identificazione è registrato nella variabile intera best\_mover. In seguito, si provvede ad agganciare elettronicamente il best\_mover con tutti gli altri carrelli utilizzando l'apposito comando MAG. Il Motion Axis Gear (MAG) fornisce una trasmissione elettronica tra due assi in una direzione determinata e con un rapporto di trasmissione specifico. In questo caso il rapporto di trasmissione è unitario.

```

for m:=0 to num_mover_attivi-1 by 1 do
case m of

0:if(m <> best_mover) then
    mag(JA_Axis_Mover_000,JA_Axis_Mover_015,mov_gear[0],0,1,1,1,0
        ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
1:if(m <> best_mover) then
    mag(JA_Axis_Mover_001,JA_Axis_Mover_000,mov_gear[1],0,1,1,1,0
        ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
2:if(m <> best_mover) then
    mag(JA_Axis_Mover_002,JA_Axis_Mover_001,mov_gear[2],0,1,1,1,0
        ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
3:if(m <> best_mover) then
    mag(JA_Axis_Mover_003,JA_Axis_Mover_002,mov_gear[3],0,1,1,1,0
        ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
4:if(m <> best_mover) then
    mag(JA_Axis_Mover_004,JA_Axis_Mover_003,mov_gear[4],0,1,1,1,0
        ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;

```

```

5:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_005,JA_Axis_Mover_004,mov_gear[5],0,1,1,1,0
    ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
6:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_006,JA_Axis_Mover_005,mov_gear[6],0,1,1,1,0
    ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
7:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_007,JA_Axis_Mover_006,mov_gear[7],0,1,1,1,0
    ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
8:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_008,JA_Axis_Mover_007,mov_gear[8],0,1,1,1,0
    ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
9:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_009,JA_Axis_Mover_008,mov_gear[9],0,1,1,1,0
    ,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
10:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_010,JA_Axis_Mover_011,mov_gear[10],0,1,1,1,
    0,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
11:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_011,JA_Axis_Mover_012,mov_gear[11],0,1,1,1,
    0,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
12:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_012,JA_Axis_Mover_013,mov_gear[12],0,1,1,1,
    0,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
13:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_013,JA_Axis_Mover_014,mov_gear[13],0,1,1,1,
    0,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
14:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_014,JA_Axis_Mover_015,mov_gear[14],0,1,1,1,
    0,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
15:if(m <> best_mover)then
    mag(JA_Axis_Mover_015,JA_Axis_Mover_000,mov_gear[15],0,1,1,1,
    0,0,1,mag_accel_rate,0); end_if;
end_case;
end_for;

```

Terminati correttamente i gear, si comanda il movimento del best mover nella posizione di carico utilizzando un comando MAM. Motion Axis Move (MAM) è una motion instruction utilizzata per impostare la rotazione di un asse in una posizione specifica con la possibilità di definire i parametri di accelerazione, decelerazione, velocità, jerk e profilo di traiettoria.

```

for m:=0 to num_mover_attivi-1 by 1 do
case m of
0: if(m = best_mover)then
    mam(JA_Axis_Mover_000,mov_mam[0],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_acce
    l_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0
    ,0,0,0,0); end_if;
1: if(m = best_mover)then
    mam(JA_Axis_Mover_001,mov_mam[1],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_acce
    l_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0
    ,0,0,0,0); end_if;
2: if(m = best_mover)then
    mam(JA_Axis_Mover_002,mov_mam[2],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_acce
    l_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0

```

```

,0,0,0,0); end_if;
3: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_003,mov_mam[3],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
4: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_004,mov_mam[4],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
5: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_005,mov_mam[5],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
6: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_006,mov_mam[6],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
7: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_007,mov_mam[7],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
8: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_008,mov_mam[8],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
9: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_009,mov_mam[9],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
10: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_010,mov_mam[10],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
11: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_011,mov_mam[11],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
12: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_012,mov_mam[12],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
13: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_013,mov_mam[13],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
14: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_014,mov_mam[14],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;
15: if(m = best_mover) then
  mam(JA_Axis_Mover_015,mov_mam[15],3,quota_CARICO,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0,0); end_if;

```



```

    0,0,0,0,0); end_if;
end_case;
end_for;

```

Applicando un comando di spostamento al best mover, vengono spostati di conseguenza anche gli altri carrelli poiché sono in gear con esso.

Terminato lo spostamento del best mover, si provvedono a posizionare tutti gli altri carrelli ad una distanza prestabilita ed ottimale per il servizio. Tale distanza è chiamata distanza di accodamento al carico. Questa funzione è eseguita da un apposita ADD-On instruction creata (denominata recupero distanza).

```

for m:=0 to num_mover_attivi-1 by 1 do
case m of

0: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_000,JA_Axis_Mover_
015,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[0]); end_if;
1: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_001,JA_Axis_Mover_
000,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[1]); end_if;
2: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_002,JA_Axis_Mover_
001,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[2]); end_if;
3: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_003,JA_Axis_Mover_
002,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[3]); end_if;
4: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_004,JA_Axis_Mover_
003,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[4]); end_if;
5: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_005,JA_Axis_Mover_
004,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[5]); end_if;
6: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_006,JA_Axis_Mover_
005,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[6]); end_if;
7: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_007,JA_Axis_Mover_
006,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[7]); end_if;
8: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_008,JA_Axis_Mover_
007,DSP,alfa,lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rat
e,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[8]); end_if;
9: if( ( m <> best_mover) )then
    recupero_distanza(recupDistAccod[m],JA_Axis_Mover_009,JA_Axis_Mover_

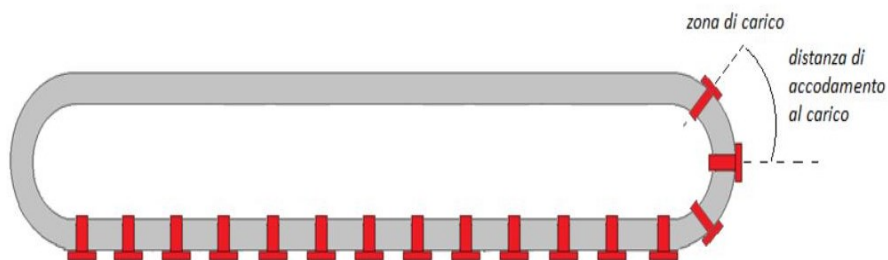
```

```

008,DSP,alfa, lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rate,
mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[9]); end_if;
10: if( ( m <> best_mover) ) then
recupero_distanza (recupDistAccod[m], JA_Axis_Mover_010, JA_Axis_Mover_
009,DSP,alfa, lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rate,
mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[10]); end_if;
11: if( ( m <> best_mover) ) then
recupero_distanza (recupDistAccod[m], JA_Axis_Mover_011, JA_Axis_Mover_
010,DSP,alfa, lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rate,
mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[11]); end_if;
12: if( ( m <> best_mover) ) then
recupero_distanza (recupDistAccod[m], JA_Axis_Mover_012, JA_Axis_Mover_
011,DSP,alfa, lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rate,
mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[12]); end_if;
13: if( ( m <> best_mover) ) then
recupero_distanza (recupDistAccod[m], JA_Axis_Mover_013, JA_Axis_Mover_
012,DSP,alfa, lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rate,
mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[13]); end_if;
14: if( ( m <> best_mover) ) then
recupero_distanza (recupDistAccod[m], JA_Axis_Mover_014, JA_Axis_Mover_
013,DSP,alfa, lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rate,
mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[14]); end_if;
15: if( ( m <> best_mover) ) then
recupero_distanza (recupDistAccod[m], JA_Axis_Mover_015, JA_Axis_Mover_
014,DSP,alfa, lunghezza_modulo,mam_speed,mam_accel_rate,mam_decel_rate,
mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,mam_pc[15]); end_if;
end_case;
end_for;

```

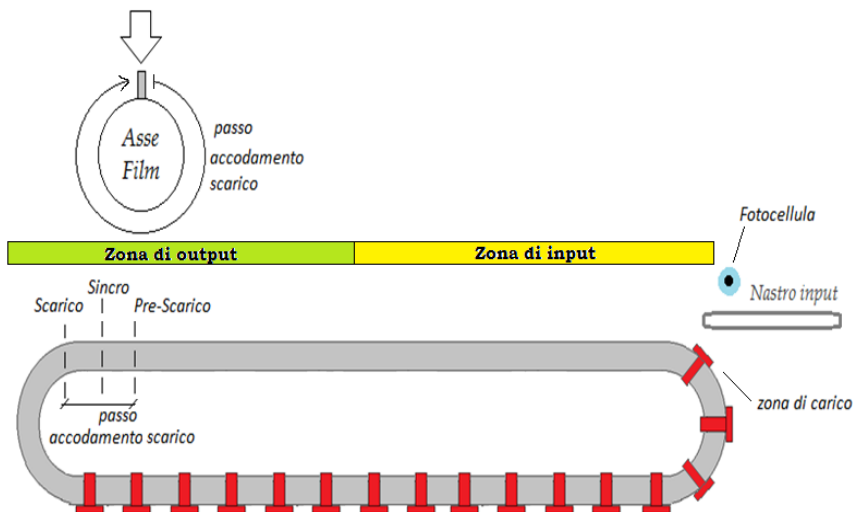
Terminato anche questo ultimo stato, è possibile considerare i carrelli di ITRAK riposizionati correttamente pronti per il servizio come mostrato in figura 103.



**Figura 103**

### 5.3.3 Run

Questo stato rappresenta il funzionamento vero e proprio di ITRAK nel processo produttivo flowpack. Ad ogni carrello è associata una propria macchina a stati la quale è descritta all'interno di una ADD-ON instruction, appositamente creata, chiamata Flowpack\_run\_mover. Prima di procedere con la descrizione dettagliata degli stati di funzionamento di ogni carrello, occorre accennare una breve descrizione di come sono state suddivise le zone operative della macchina. Si prenda in esame la figura 104.

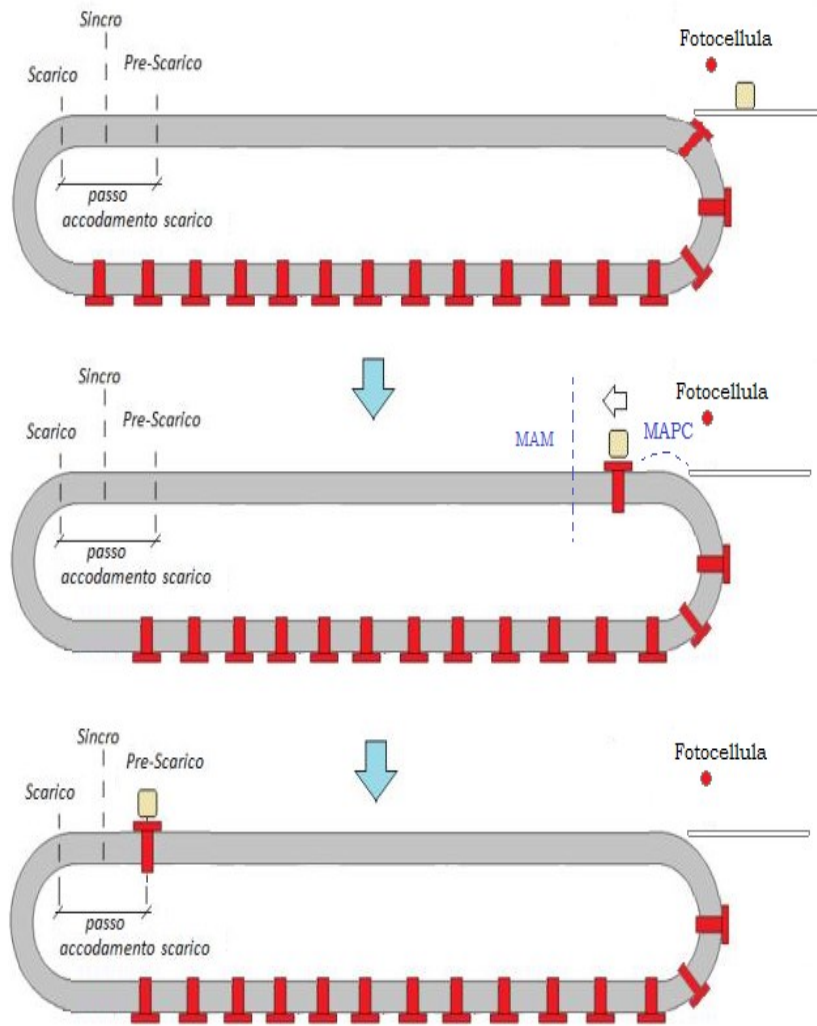


**Figura 104**

Essendo inserita in una linea di produzione composta da più elementi, ITRAK presenta una zona di input ed una zona di output. Sono rappresentate rispettivamente dalla zona di carico, in cui un carrello attende l'arrivo del prodotto in modo casuale, e dalla zona di scarico dove il carrello cede il prodotto al film. La distanza tra la zona di scarico e la zona di pre-scarico è pari ad un passo di taglio da effettuare per confezionare il prodotto nudo. Essendo fondamentale il sincronismo tra il carrello ed il film nella zona di scarico, viene stabilito un controllo di sincronizzazione che viene effettuato al punto denominato sincro. Il ritorno del carrello dalla zona di scarico alla zona di carico viene gestito in modo vettoriale. La coda di attesa per la zona di input è suddivisa secondo un array di posizioni di dimensione pari al numero di movers presenti nel sistema. Ogni carrello, una volta terminato il proprio compito nella zona di scarico, viene indirizzato presso la posizione libera più vicina alla zona di carico. Descritte le zone fondamentali del sistema, è possibile ora passare alla descrizione degli stati di funzionamento utilizzati nel ciclo produttivo in esame. Si riporta un riepilogo delle caratteristiche funzionali più significative.

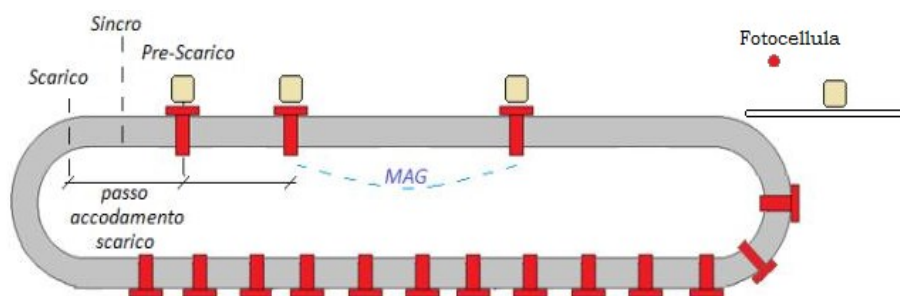
**Carico:** il carrello pronto a ricevere il prodotto rimane in attesa fino a che la variabile fotocellula, mostra un fronte di salita indicando l'arrivo di un prodotto. Il carrello deve prendere il prodotto nella fase giusta e poi deve scegliere il modo con cui andare alla zona di pre scarico. Nella zona di input il carrello è lo slave del nastro d'ingresso ch'è considerato il master. Appena il carrello supera la zona di input il master diventa un asse virtuale che muove il film e tutto il resto della flowpack.

- Se è il primo carrello in coda, esegue una camma per prendere il prodotto nella posizione giusta praticamente appena la fotocellula cambia stato all'arrivo del prodotto, viene lanciato un comando MAPC, poi di seguito esegue un comando MAM per portare il carrello alla zona di pre scarico, Figura 105



**Figura 105**

Se è presente un altro carrello, esegue un comando di accodamento. L'accodamento viene fatto eseguendo un comando MAG (gear) al carrello che lo precede. Figura 106



**Figura 106**

```

//carico attesa prodotto
if(ftcl)then
  ftcl:=0;
  //scegli modo di spostamento
  if((not presenzaPRE_SCArico)and stato_mov_ip1>560)then //vai allo scarico
    mam(mover_i,mam_mov_i,3,quotaPRE_SCArico,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,
    mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0);
    presenzaPRE_SCArico:=1;
    stato:=515; //vai a libera zona di carico
  else // accodamento al mover che mi precede
    mag(mover_i,mover_ip1,mov_gear,0,1,1,1,0,0,0,mag_accel_rate,0);
    gear_cond_i:=1;
    stato:=530;//vai a calcolo e recupero distanza
  end_if;
end_if;

```

Ogni carrello, indipendentemente dal modo con cui abbandona la zona di carico, ad una sufficiente distanza da tale zona, deve segnalare di avere liberato il proprio ingombro al carrello che lo segue. In questo modo, un altro mover può rendersi disponibile a ricevere l'arrivo di un nuovo prodotto dall'ingresso. Inoltre, viene decrementato il buffer che tiene conto del numero di carrelli in coda(buff\_carico) in modo da aggiornare il vettore delle posizioni q-esime occupate dai carrelli in coda verso la zona di carico.

```

//controllo e libera zona di carico
//un mover che lascia il carico deve comunicare che libera la zona di carico
//deve tenere conto del suo ingombro (alfa)
//se la sua posizione prima della fine del modulo (<4000)
if((mover_i.ActualPosition < lunghezza_modulo) and (mover_i.ActualPosition >
(quotaCarico + alfa_mover+DELTA)))then
  presenzaCarico:=0;
  //aggiorna buffer carico
  buff_carico:= buff_carico -1;
  stato:=520;
//se la sua posizione ha superato il modulo
elsif ((mover_i.ActualPosition>0 and (mover_i.ActualPosition < 1200)) then
  presenzaCarico:=0;
  //aggiorna buffer carico
  buff_carico:= buff_carico -1;
  stato:=520;
end_if;

```

**Accodamento:** il carrello che deve accodarsi al carrello che lo precede. Si rende necessario calcolare la distanza che deve recuperare per porsi ad un passo di accodamento prestabilito. Come prima cosa, si attende la fine del comando di gear (gearinglockstatus = 1). Successivamente si calcola la distanza dal carrello che lo precede. Se la distanza è diversa dal passo di accodamento prestabilito, si utilizza un comando MAM di tipo incrementale per recuperare la distanza. Figura 107

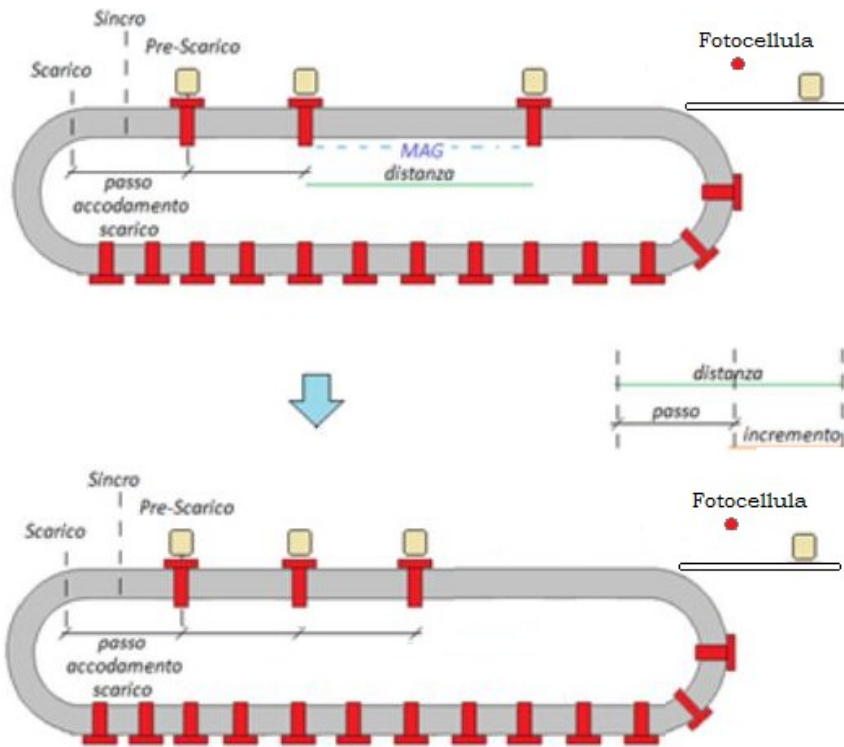


Figura 107

```

// controllo: calcolo distanza e recupero posizione
if(mover_i.GearingLockStatus)then //attesa fine clutch
  //calcolo distanza
  if((mover_ip1.ActualPosition) - (mover_i.ActualPosition) < 0)then
    dist_i_ip1:=(mover_ip1.ActualPosition) - (mover_i.ActualPosition)
    + lunghezza_modulo;
  else
    dist_i_ip1:=(mover_ip1.ActualPosition) - (mover_i.ActualPosition);
  end_if;

  if((dist_i_ip1 <> passo_accod_scarico) )then //se diverso allora correggi
    if(dist_i_ip1 > passo_accod_scarico) then
      incremento:= (dist_i_ip1 - passo_accod_scarico);
      mam(mover_i,mam_mov_i,1,incremento,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0);
      //recupero distanza
      //se la distanza è minore del passo, il mover deve arretrare quando si
      //trova ad una distanza opportuna
    elsif ( dist_i_ip1 < passo_accod_scarico and
      (mover_i.ActualPosition>(quotaCarico+passo_accod_scarico)) )then
      incremento:= (dist_i_ip1 - passo_accod_scarico);
      mam(mover_i,mam_mov_i,1,incremento,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,SCurve,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0);
      //recupero distanza
    end_if;
  end_if;
  stato:=535; //libera zona di carico
end_if;

```

**pre scarico:** Il carrello, dopo aver arrivato nella zona suddetta, esegue un comando di gear con l'asse virtuale del film che muove tutto il resto della flowpack. Inoltre, viene aggiornato un buffer che indica quanti carrelli sono presenti in coda pronti per essere portati alla zona di scarico. Si passa poi allo stato in zona pre-scarico. Figura 108

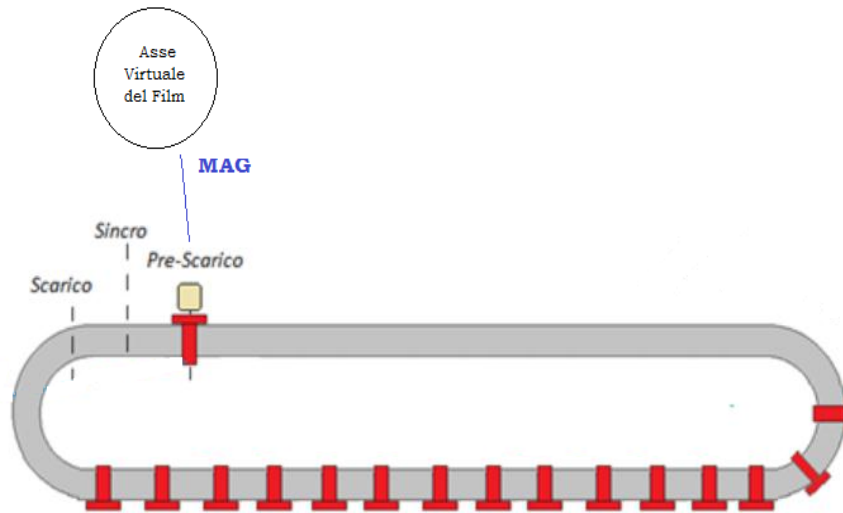
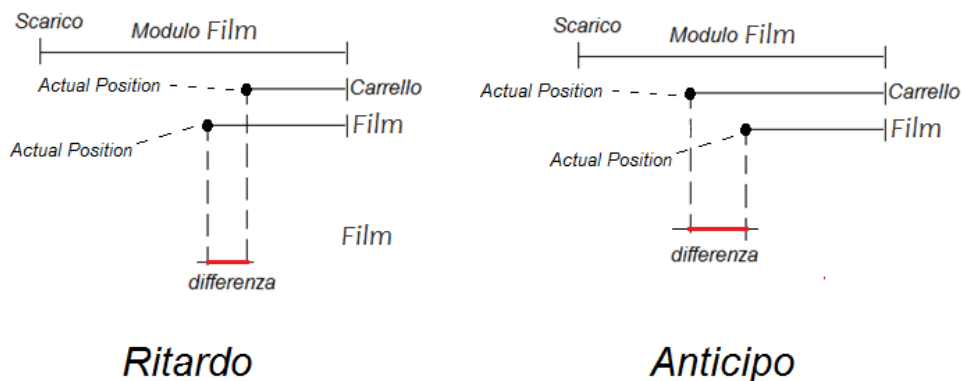


Figura 108

**Zona sincronizzazione:** in questa zona viene eseguito il controllo di fasatura tra il film e la posizione del carrello. Per il calcolo dell'operazione di fasatura si esegue il seguente principio di funzionamento:



Il modulo film rappresenta la lunghezza del passo di taglio da effettuare per confezionare il prodotto. Si osserva quindi l'ActualPosition del film e ne si fa la differenza con la posizione del carrello all'interno del modulo film. La differenza, che può essere sia positiva che negativa a seconda di un ritardo o di un anticipo da parte del carrello, viene utilizzata per la correzione di fase attraverso un comando MAM di tipo incrementale.

```

//PRE_SCARICO e controllo sincronizzazione
if( (mover_i.ActualPosition- alfa_mover/2 > quota_controllo_sincro) then
//controllo sincronizzazione fase con il virtuale del film
correz:=( (quotaSCArico - mover_i.ActualPosition) - (lung_h_mod_mot_film -
motore_film.ActualPosition) );
//recupero distanza o freno
mam(mover_i,mam_correz_fase_i,1,correz,mam_speed_fase,0,mam_accel_fase,0,ma
m_decel_fase,0,SCurve,mam_jerk_fase,mam_jerk_fase,0,0,0,0,0,0);
presenzaPRE_SCArico:=0;
//libera buffer
buffer_scarico:=buffer_scarico -1;
stato:=560;//vai a libera zona scarico
end_if;

```

**Zona di scarico:** questa zona rappresenta il punto in cui un carrello passa il prodotto al film. In questo punto, inoltre, viene sganciato il gear tra il carrello in esame e il carrello che segue andando a creare una nuova funzione di gear tra quest'ultimo e l'asse virtuale del film Figura 109.

```

//libera scarico e scambio gear
if( (mover_i.ActualPosition >= quotaSCArico) ) then
//scambio del gear di im1
mag(mover_im1,motore_film,mov_gear,0,1,1,1,0,0,Disabled,mag_accel_rate,0);
//scambio gear al volo e aggiorno il gear state
gear_cond_im1:=0;
stato:=570;
end_if;

```

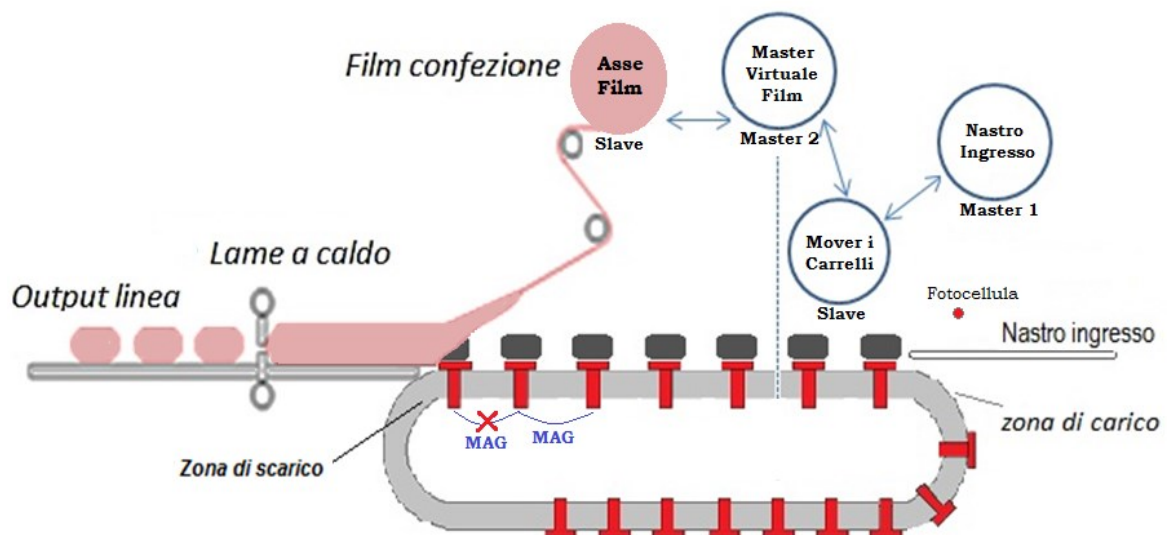


Figura 109

**Zona di fine scarico:** il mover che ha appena ceduto il prodotto, è ancora in relazione di gear con l'asse virtuale del film seguendone perciò tutti i movimenti. Occorre quindi eliminare la relazione di trasmissione elettronica tra i due utilizzando la motion instruction MAS (motion axis stop). È necessario inoltre riportare il carrello in coda per il servizio nella zona di carico. Come



precedentemente accennato, la gestione della coda è prevista in modo vettoriale. La variabile `buff_carico` tiene conto del numero di carrelli presenti in coda. Viene perciò eseguito un comando di movimento diretto (MAM) alla posizione assoluta che rappresenta l'elemento del vettore di coda libero per ospitare il mover in arrivo. Infine viene aggiornato il contatore dei carrelli in coda.

```
//quota fine scarico --> scegli modo di andare al carico
if((mover_i.ActualPosition >= quota_fine_scarico))then
  //devo liberare immediatamente la zona di scarico
  //faccio un mam indirizzata alla prima quota di buffer_carico libera
  if(buff_carico>0)then
    mam(mover_i,mam_mov_i,3,quote[buff_carico+1]
      ,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_decel_rate,0,Trapezoidal,mam_accel_jerk,
      mam_decel_jerk,0,1,Programmed,0,0,0,0);
    //mas del gear
    mas(mover_i,stop_gear_i,3,No,0,Unitspersec2,No,0,%ofTime);
    //aggiorna buffer carico
    buff_carico:= buff_carico +1;
    stato:=571;//vai ad attesa mam.pc
  else // se la zona di carico è vuota
    mam(mover_i,mam_mov_i,3,quote[buff_carico],mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam_de
      cel_rate,0,Trapezoidal,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,1,Programmed,0,0,0,0);
    //mas
    mas(mover_i,stop_gear_i,3,No,0,Unitspersec2,No,0,%ofTime);
    //aggiorna buffer carico
    buff_carico:= buff_carico +1;
    stato:=620; //controllo raggiungi quota carico
  end_if;
end_if;
```

**Zona di aggancio in carico:** in questa zona, raggiunta la posizione indicizzata, un carrello deve agganciarsi a chi lo precede nella zona di carico. Viene quindi eseguito un comando di gear. Nel caso in cui la zona di carico sia sprovvista di carrelli, si provvederà a raggiungerla immediatamente andando nello stato apposito.

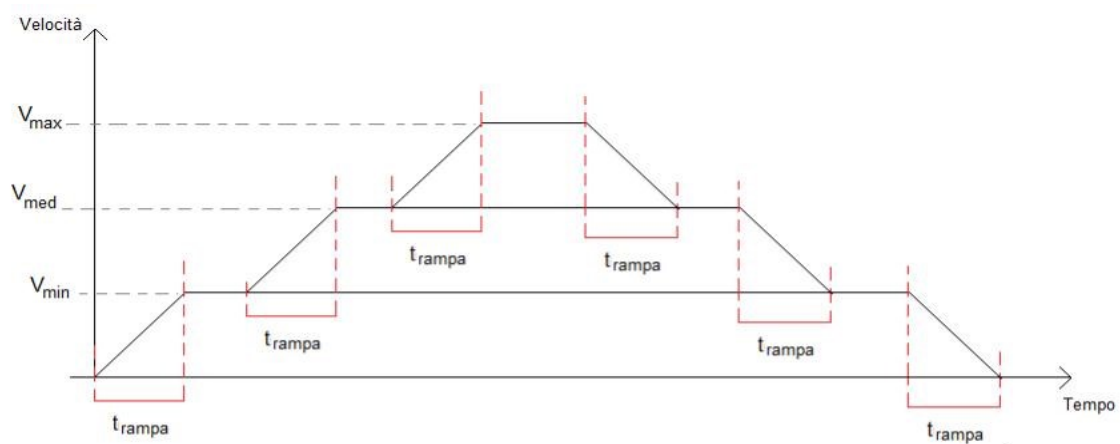
```
//attesa pc
if(mam_mov_i.PC)then
  //se mov_ip1 non è in carico fai gear
  if((stato_mov_ip1 <> 500) and (stato_mov_ip1 >= 571) and
    (stato_mov_ip1 < 625) )then
    mag(mover_i,mover_ip1,mov_gear,0,1,1,1,0,0,Enabled,mag_accel_rate,0); //accodamento
    gear_cond_i:=1;
    //vai a recupero distanza
    stato:=595;
  else //vai ad attesa zona carico libera
    stato:=615;
  end_if;
end_if;
```

**Accodamento al carico:** in questa fase, un carrello si accoda al mover che lo precede portandosi ad una distanza prestabilita denominata passo di accodamento al carico.

```
//calcolo distanza e recupero
if(mover_i.GearingLockStatus or (stato_mov_ip1 >= 500
and stato_mov_ip1 < 550) )then
  if((mover_ip1.ActualPosition - alfa_mover/2) -
(mover_i.ActualPosition + alfa_mover/2) < 0) then
    dist_i_ip1:=(mover_ip1.ActualPosition - alfa_mover/2) -
(mover_i.ActualPosition + alfa_mover/2) + lunghezza_modulo;
  else
    dist_i_ip1:=(mover_ip1.ActualPosition - alfa_mover/2) -
(mover_i.ActualPosition + alfa_mover/2);
  end_if;

  if( (dist_i_ip1 <> passo_accod_carico))then
    incremento:= (dist_i_ip1 - passo_accod_carico);
    mam(mover_i,mam_mov_i,1,incremento,mam_speed,0,mam_accel_rate,0,mam
_decel_rate,0,Trapezoidal,mam_accel_jerk,mam_decel_jerk,0,0,0,0,0,0
,0); //recupero distanza
    stato:=610; //attesa stop gear
  end_if;
end_if;
```

**Il motor\_film:** Per convenzione sono utilizzate tre velocità di funzionamento della macchina, adoperate in base al numero di carrelli in coda nella zona di pre-scarico. Inoltre, è possibile impostare il tempo di rampa con cui si raggiunge la velocità minima a partire dallo stato di motore fermo e nel passaggio tra le relative velocità. In figura 110 è riportato un grafico che raffigura il concetto appena descritto.



**Figura 110**

### 5.3.4 Emergenza ed errore

In questo paragrafo si ha l'obiettivo di descrivere come vengono gestite le diverse situazioni di errore che il sistema può presentare durante la normale esecuzione del ciclo. Lo stato di emergenza viene messo a disposizione dell'utente per simulare un eventuale fungo di emergenza con il quale è possibile arrestare immediatamente il funzionamento di ITRAK attraverso gli opportuni comandi di stop (MAS) su tutti gli assi in funzione nel sistema. Terminato l'arresto, si porta la macchina in uno stato di errore.

**Il controllo anti collisione:** L'anti collisione è un programma che ha lo scopo di evitare uno o più crash tra i carrelli di ITRAK durante la loro movimentazione. Il programma è situato all'interno della task ad evento relativa al motion group per permettere una frequente esecuzione del controllo. Questo significa che ad ogni ciclo di aggiornamento del motion group, la task ad evento viene eseguita.



Principio di funzionamento: si definisce collisione tra due movers quando la posizione comandata di uno è tale da causare lo scontro delle estremità dei due carrelli in esame. Si adotti come esempio il mover A ed il mover B disposti come in figura 110:

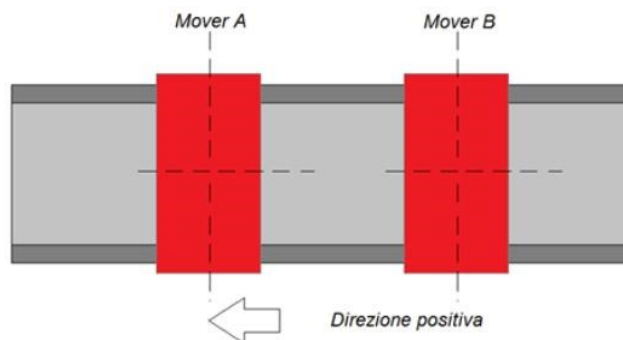


Figura 110

Una situazione di collisione può avvenire se:

- la posizione comandata del mover B è superiore alla posizione attuale del mover A
- la posizione comandata del mover B inferiore alla posizione attuale del mover A ma molto vicina comportando il contatto tra le estremità dei carrelli.

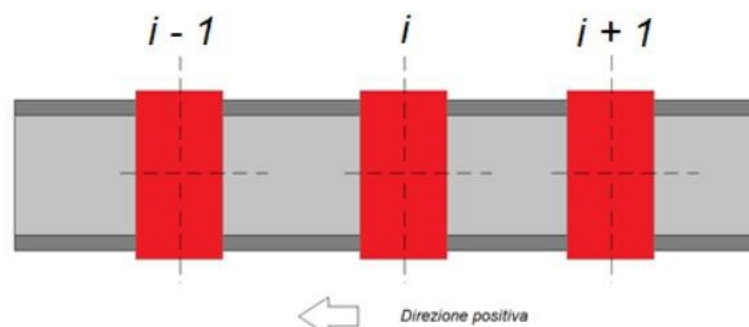
Si considera allora per ogni mover:

- ActualPosition: è la posizione riportata dall'asse virtuale nel sistema. Sul carrello corrisponde alla linea di mezzzeria verticale passante per il centro.
- Alfa: è un parametro che rappresenta l'ingombro del carrello lungo la direzione di movimento.

Ad ogni attivazione della task periodica, si vanno a campionare tutte le posizioni dei carrelli memorizzandole in modo indicizzato. La posizioni vanno lette dal valore di actual position all'interno della struttura dell'asse virtuale. Si passa poi al controllo delle distanze. Sono state adottate le seguenti convenzioni:

- Tutti i carrelli si possono muovere solamente in direzione positiva
- Ogni carrello osserva la distanza dal carrello che lo precede all'interno del modulo secondo la direzione positiva adottata.
- Si è deciso di adottare un parametro (DELTA) che rappresenti la minima distanza consentita tra le estremità di due carrelli. È una soglia oltre la quale scatta un allarme.

Come descritto precedentemente, una corretta accensione della macchina comporta che ogni carrello  $i$ -esimo sia preceduto dal  $i-1$  e seguito dal mover  $i+1$  come in figura 111:



**Figura 111**

```
//Controllo
for scans:=0 to num_mover_attivi-1 by 1 do
  if (Movers_ActualPositions[scans] < Movers_ActualPositions[scans-1]) then
    if (((Movers_ActualPositions[scans-1]-alfa/2)-
      (Movers_ActualPositions[scans]+alfa/2) < DELTA) then

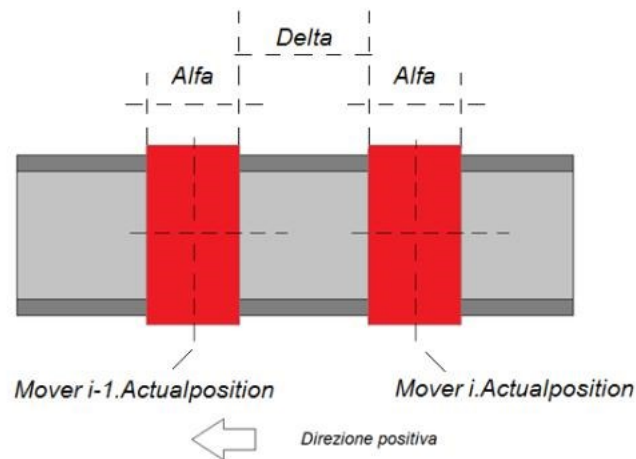
      Allarme_virtuali[scans]:=1;
    else
      Allarme_virtuali[scans]:=0;
    end_if;
  end_if;
```

```

else //pos scans > pos scans-1
    if (((lunghezza_modulo-Movers_ActualPositions[scans]+alfa/2)+
(Movers_ActualPositions[scans-1]-alfa/2)) < DELTA) then
        Allarme_virtuali[scans]:=1;
    else
        Allarme_virtuali[scans]:=0;
    end_if;
end_if;
end_for;

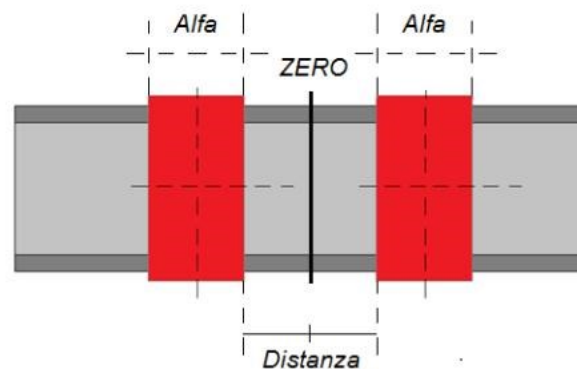
```

Il ciclo for permette il controllo su ogni carrello in modo sequenziale. Nella prima parte di codice viene considerata la distanza assoluta tra le estremità dei due moduli che, nel caso sia inferiore a delta, viene segnalato un allarme. L'allarme è costituito da un vettore indicizzato in modo da poter discriminare tra quali carrelli è avvenuta la violazione della soglia di sicurezza.



**Figura 112**

Nella seconda parte di codice si pone attenzione al salto di modulo ovvero quando i due mover su cui viene fatta l'analisi di posizione sono in prossimità della quota di 4000 mm. Se uno dei due oltrepassa la quota di fine modulo, la propria posizione ricomincia dalla quota di zero. Occorre aggiungere la lunghezza\_modulo (ovvero la lunghezza totale di ITRAK pari a 4000 mm) per considerare correttamente una distanza assoluta.



**Figura 113**

Delta è un parametro modificabile a piacimento dall'utente. In questa esperienza si è solitamente utilizzato un delta di 20 mm. In caso di attivazione di un flag di allarme, si fermano tutti gli assi in movimento nel sistema con la massima decelerazione utilizzando l'apposita motion instruction MAS. Dopo aver fermato tutti i carrelli, la macchina a stati del sistema viene portata in stato di errore, aspettando l'intervento dell'utente.

## **5.4 Simulazione della logica di controllo con Excel**

Nei paragrafi precedenti si è descritto il codice costituente la logica di controllo sviluppata per il sistema di produzione analizzato. Per lo sviluppo del codice non si è fatto alcun riferimento a soluzioni già presenti all'interno dell'azienda riguardante il sistema in esame. Bensì si è deciso di partire da un ambiente di programmazione libero da ogni punto di riferimento con altri sistemi di produzione ed eventuali vincoli di strutturazione aziendale. Si è resa necessaria quindi la possibilità di verificare costantemente l'effettiva funzionalità del codice e della corretta gestione delle macchine a stati presenti nel programma. Ho deciso di simulare il comportamento del sistema in esame in modo da poter validare l'effettiva correttezza del codice di controllo sviluppato. La soluzione è stata quella di utilizzare un emulatore fornito da Rockwell Automation per simulare la presenza di un controllore logico programmabile. Per quanto riguarda l'interfaccia grafica di ITRAK, lo strumento finale utilizzato è Microsoft Excel. Nel seguente paragrafo vengono descritti il protocollo e gli elementi impiegati per la comunicazione del plc con l'interfaccia, la gestione interna della rappresentazione e alcuni screenshot di simulazione.

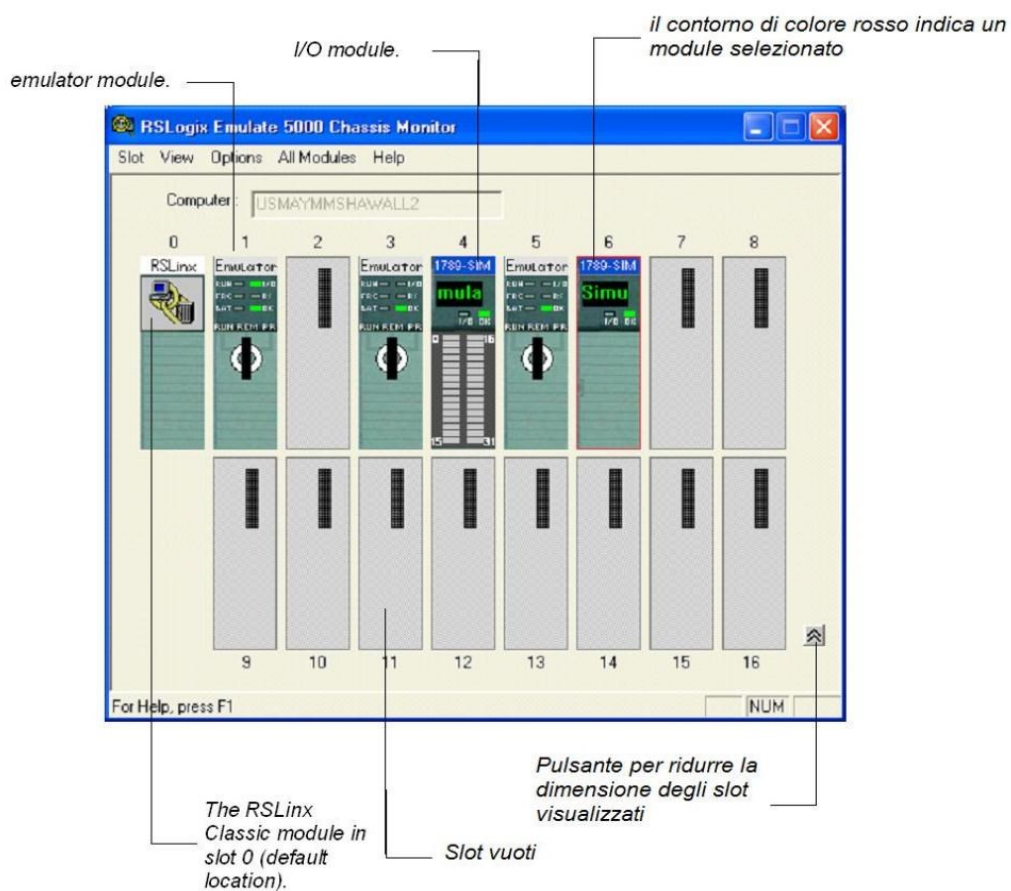
### **5.4.1 Emulatore del PLC**

Il tipo di emulatore fornito da Rockwell Automation utilizzato in questa sede è RSLogix Emulate 5000. È un prodotto software che emula il comportamento della famiglia dei controllori Logix5000. L'emulatore permette di sperimentare ed eseguire il debug dei programmi in un ambiente sicuro, controllato, senza investire risorse in controllori fisici e moduli I/O. Inoltre, RSLogix Emulate 5000 consente di testare le applicazioni HMI (Human Interface Machine) senza l'utilizzo di un controller reale. Le caratteristiche dell'emulatore possono essere programmate dall'utente accedendo sia sul computer in cui è installato, sia in remoto attraverso un apposito tool fornito dalla medesima casa produttrice di software (RSLinx Gateway Classic). Sono presenti due componenti di RSLogix Emulate 5000:

- Chassis Monitor, un'applicazione software che consente di configurare i moduli di emulazione.
- moduli di emulazione simulano il comportamento dei controllori Logix5000

e dei moduli I/O.

I moduli di emulazione vengono eseguiti sul calcolatore come se fossero servizi di Windows. Lo Chassis Monitor funge da interfaccia ai moduli di emulazione, consentendo di creare e configurare le istanze dei moduli. RSLogix Emulate 5000 simula la maggior parte dei comportamenti dei controllori Logix5000. Vi sono ovviamente delle eccezioni da tenere in considerazione durante l'uso dell'emulatore. Fondamentale per la creazione dell'interfaccia di simulazione, è la possibilità di utilizzare il protocollo di comunicazione DDE/OPC. Come si può notare dalle caratteristiche, è possibile utilizzare tale funzionalità la quale verrà descritta nel paragrafo seguente. In figura 114 si riporta un esempio di interfaccia dell'emulatore utilizzato.



**Figura 114**

I moduli risiedono negli "slot" dello Chassis Monitor in modo simile a quanto avrebbero in uno chassis fisico. Il modulo di RSLinx Classic rappresenta un modulo di comunicazione per lo chassis. Per impostazione predefinita, il modulo di RSLinx Classic risiede nello slot 0, ma è possibile specificare una posizione alternativa a piacimento.

## 5.4.2 Connessione tra Emulatore e RSLogix 5000

Creare un collegamento tra RSLogix Emulate 5000 e RSLogix 5000 richiede di apportare alcune modifiche al progetto di logica sviluppato:

- In RSLinx Classic, creare un driver dedicato e specificare un numero di slot per l'emulatore come mostrato in figura 115.

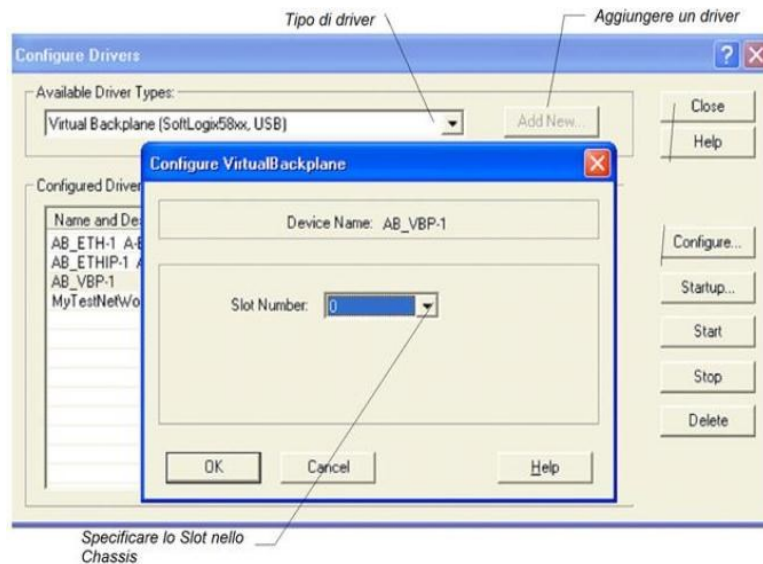


Figura 115

- In RSLogix 5000, configurare l'utilizzo del driver dell'emulatore. Figura 116

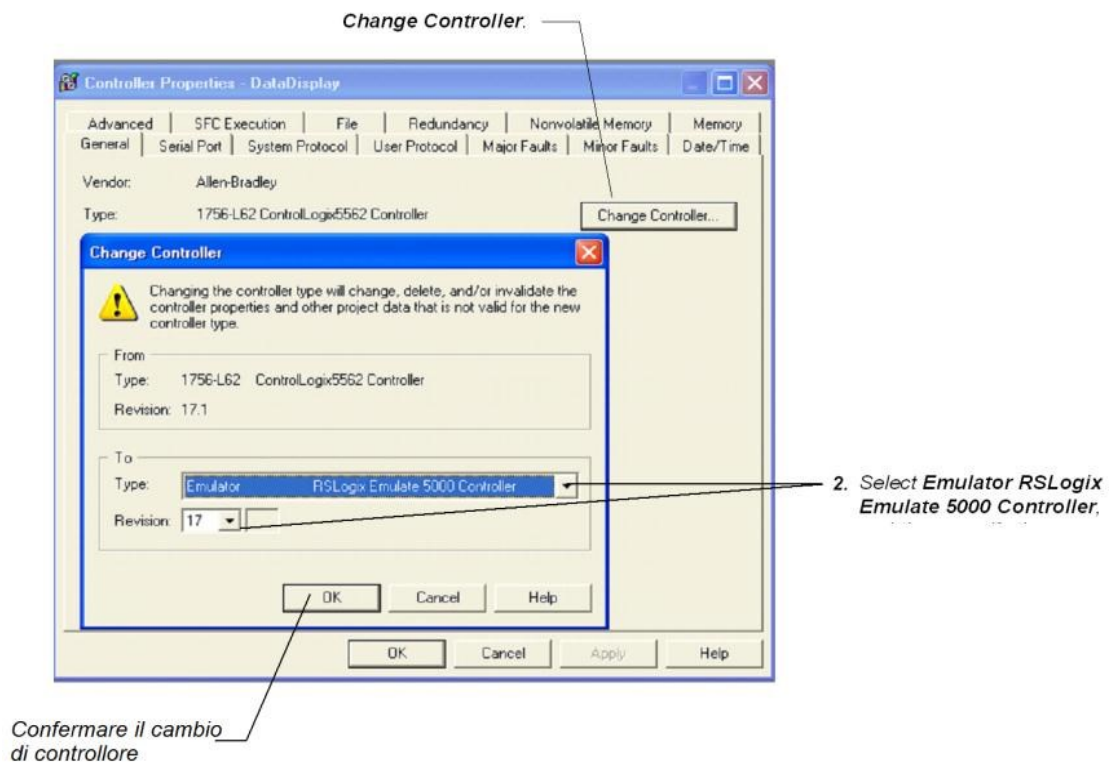
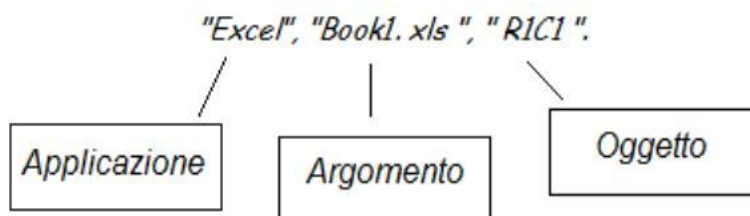


Figura 116



### 5.4.3 Protocollo di comunicazione DDE

In campo ingegneristico, a volte si presenta la necessità di importare i dati di un processo in esecuzione all'interno di un altro computer. In questo caso è necessario accedere ai dati delle posizioni dei vari assi virtuali di movimentazione utilizzati e trasportarli ad un altro programma che ne fornisca una rappresentazione grafica del sistema in esecuzione. Lo strumento finale utilizzato per l'interfaccia grafica di ITRAK è Microsoft Excel. I dati contenuti nei registri del PLC possono essere importati in Excel utilizzando lo strumento Dynamic Data Exchange (DDE). Dynamic Data Exchange è stato introdotto nel 1987 con il rilascio di Windows 2.0 come metodo di comunicazione tra processi fornendo ad un programma la possibilità di comunicare o controllare un altro programma. Questo modo di comunicazione è stato superato da nuove tecnologie ma l'eredità di DDE è ancora utilizzata in diversi luoghi all'interno di Windows. La funzione principale di DDE è quella di consentire alle applicazioni di Windows di condividere i dati. Per esempio, una cella in Microsoft Excel potrebbe essere collegata ad un valore in un'altra applicazione e, quando il valore viene modificato, è automaticamente aggiornato nel foglio Excel. La comunicazione dei dati è stata istituita con un semplice modello, a tre segmenti. Ogni programma viene riconosciuto dal protocollo DDE con il nominativo "applicazione". Ogni applicazione può organizzare ulteriori informazioni da parte di gruppi noti chiamati "argomento". Ogni argomento può servire singoli dati come "oggetto". Per esempio, se un utente volesse estrarre un valore da Microsoft Excel contenuto in un foglio chiamato "Book1.xls" nella cella con coordinate nella prima riga e nella prima colonna, l'applicazione sarebbe:



### 5.4.4 Come creare una comunicazione tra Excel e PLC

Il protocollo DDE funziona come una conversazione tra due persone. Gli interessati rappresentano le diverse applicazioni in esecuzione in ambiente Windows mentre i dati che si vogliono condividere rappresentano di che cosa stanno parlando. Occorre quindi una gestione della comunicazione tra i due interlocutori e questo viene eseguito basandosi sul sistema client/server.

- Un server DDE è un programma che ha accesso ai dati in esame ed è in grado di fornire tali dati ad un altro programma windows che li richiede.
- Un client DDE è semplicemente il programma che è in attesa di ricevere i dati oggetto della comunicazione.

In questo caso quindi il server è rappresentato dal programma RSLinx mentre Microsoft Excel ricopre il ruolo di client. All'interno del programma RSLinx si crea una comunicazione di tipo OPC/DDE dall'apposito comando predisposto nella barra dei menù andando a selezionare la voce topics configurations. Figura 117.

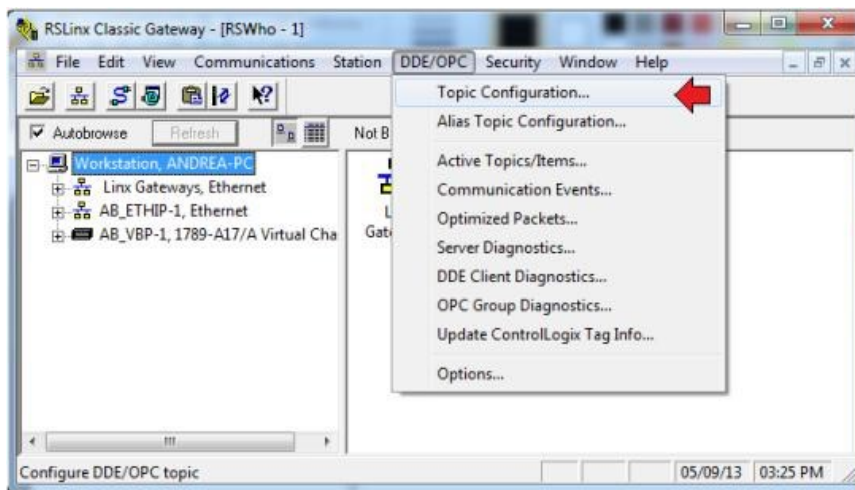


Figura 117

Si è nominata la comunicazione Jacobs\_Automation\_iTrak. Il menù permette di definirne le principali caratteristiche desiderate dall'utente come ad esempio il periodo di tempo con il quale vengono ripetuti gli scambi di comunicazione come mostrato in figura 118.

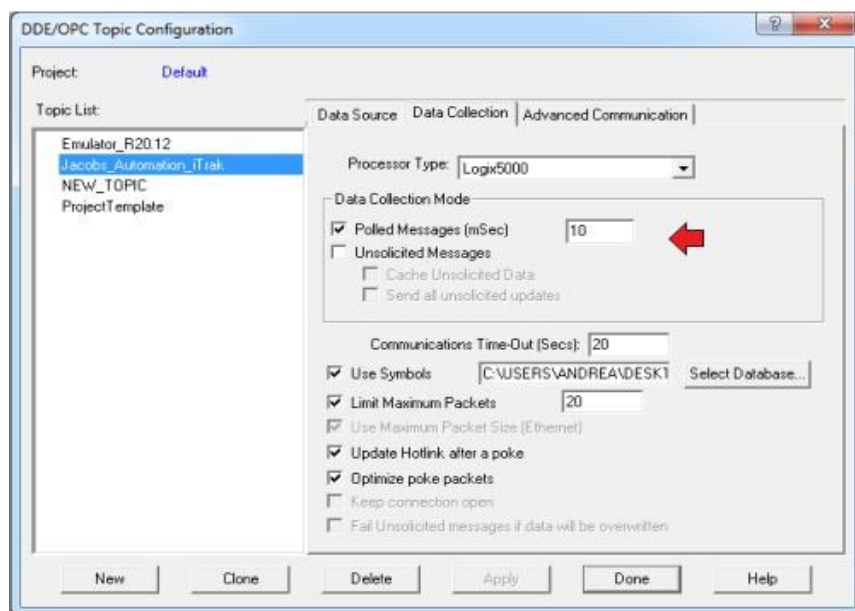


Figura 118

Una volta costituita la comunicazione, occorre impostare i singoli collegamenti tra le variabili di interesse all'interno del PLC e le celle di destinazione in Excel. Per fare ciò, occorre copiare il collegamento DDE con l'apposito comando nel menù Edit.

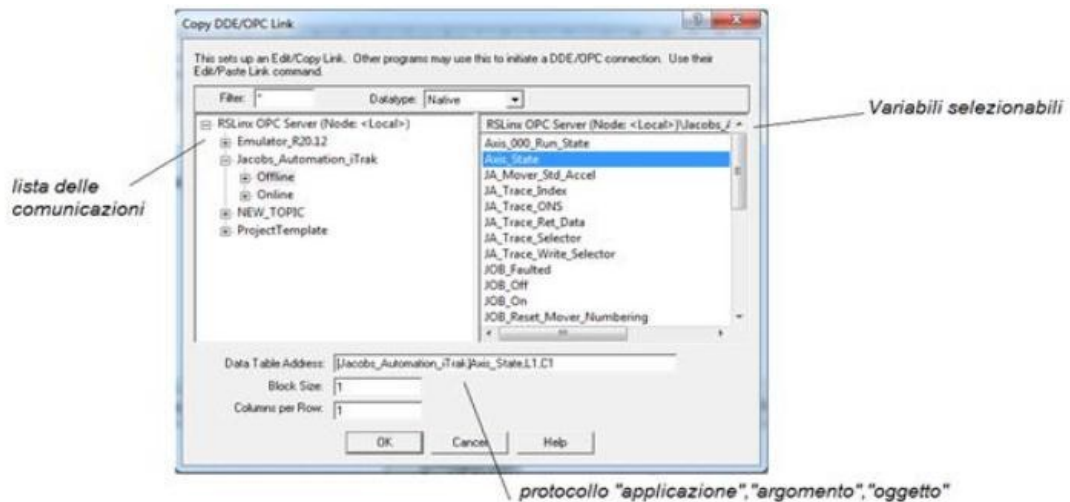


Figura 119

All'interno del programma Excel è necessario incollare il link del protocollo DDE alla cella di destinazione e selezionare il tipo di collegamento speciale come mostrato in figura 120. Al termine di ciò la cella presenta il valore della variabile presente all'interno del PLC ed ogni qual volta il valore cambia, risulta cambiato anche nella cella del foglio di lavoro.

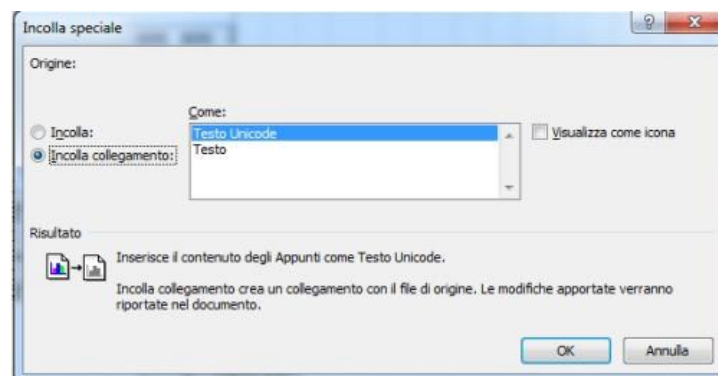


Figura 120

### 5.4.5 Interfaccia in ambiente Excel

Utilizzando le opportune celle di lavoro e le relative variabili presenti nel controllore, è stato possibile realizzare l'interfaccia di simulazione in ambiente Excel. Si è deciso di costituire la rappresentazione grafica strettamente dipendente dalle variabili presenti nella logica di controllo in modo da realizzare un sistema che si adattasse in modo autonomo in presenza di eventuali modifiche delle caratteristiche fisiche dell'architettura utilizzata. All'interno di RSLogix è stato creato un apposito programma, situato all'interno della task relativa al motion group, destinato alla gestione della comunicazione delle quote da rappresentare all'interno del foglio di lavoro di Excel.

```

//ciclo sui mover attivi
for j:=0 to num_mover_attivi-1 by 1 do

    //parte lineare superiore positiva
    if((Movers_ActualPositions[j] <= A)and (Movers_ActualPositions[j])>= 0))
        then
            Quota_dde_Y[j] := y_const_1;
            Quota_dde_X[j] := Movers_ActualPositions[j]);
        end_if;

    //parte lineare superiore negativa
    if((Movers_ActualPositions[j] < Lunghezza_modulo)and
        (Movers_ActualPositions[j])>= D)) then
            Quota_dde_Y[j] := y_const_1;
            Quota_dde_X[j] := Lunghezza_modulo - Movers_ActualPositions[j]);
        end_if;

    //Curva 1
    if((Movers_ActualPositions[j] > A)and (Movers_ActualPositions[j]< B))
        then
            //in radianti = ARCO/RAGGIO
            theta[j] := (Movers_ActualPositions[j]-A)/raggio;
            Quota_dde_X[j] := A + raggio*sin(theta[j]);
            Quota_dde_Y[j] := raggio*cos(theta[j]);
        end_if;

    //Parte lineare inferiore prima metà
    if((Movers_ActualPositions[j] >= B)and
        (Movers_ActualPositions[j])<= met))then
            Quota_dde_Y[j] := y_const_2;
            Quota_dde_X[j] := (met - Movers_ActualPositions[j]);
        end_if;

    //Parte lineare inferiore seconda metà
    if((Movers_ActualPositions[j] > met) and
        (Movers_ActualPositions[j])<= C))then
            Quota_dde_Y[j] := y_const_2;
            Quota_dde_X[j] := (met - Movers_ActualPositions[j]);
        end_if;

    //Curva 2
    if((Movers_ActualPositions[j] > C)and
        (Movers_ActualPositions[j])< D)) then
            theta[j] := (Movers_ActualPositions[j]-C)/raggio; //in radianti
            Quota_dde_X[j] := -(C-met) - raggio*sin(theta[j]);
            Quota_dde_Y[j] := raggio*cos(theta[j]);
        end_if;
    end_for;

//Motor Film
theta_film := motor_FILM.actualposition/radius; //in radianti = ARCO/RAGGIO
Quota_dde_film_X := radius*sin(theta_film);
Quota_dde_film_Y := radius*cos(theta_film);

```

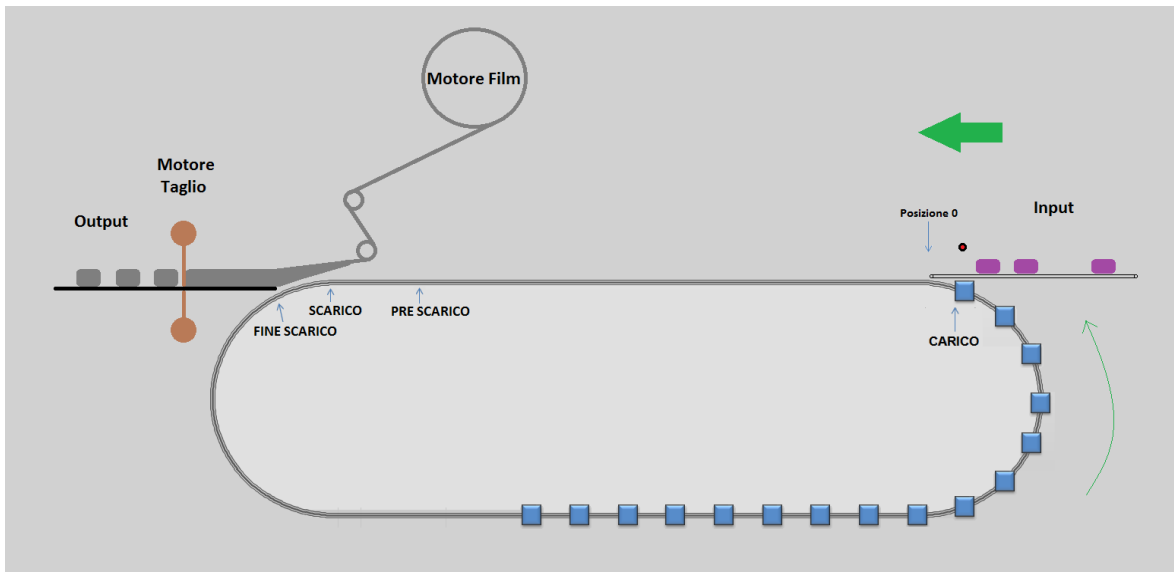
Le variabili principali che sono state considerate sono le varie Actual position dei relativi assi virtuali rappresentativi dei singoli carrelli, dell'asse del film, del nastro d'ingresso e del nastro d'uscita. Si è rappresentato il sistema ITRAK tramite un grafico a due dimensioni. In particolare la rappresentazione grafica appare come se l'utente osservasse l'architettura Jacobs frontalmente. Essendo le Actual-Position valori assoluti di posizione all'interno della lunghezza totale del sistema, è risultato necessario tradurre le relative posizioni dei motori in coordinate (x,y) per poter rappresentare il movimento in un grafico a dispersione X Y. Analoga cosa è stata realizzata per il motore del film e dei nastri d'ingresso e d'uscita anche per le quote di carico, pre-scarico, controllo, scarico, fine scarico. La conversione di coordinate viene effettuata all'interno del programma QuoteDDE. Si riporta in figura 121 una rappresentazione delle celle ottenute nel foglio di lavoro relative alle quote dei singoli carrelli ed in seguito il codice sviluppato per risolvere tale concetto. Si premette che, a livello di simulazione, sono stati utilizzati 16 movers sul sistema ITRAK identico al progetto reale che è stato realizzato dopo.

<b>Calcolo delle coordinate dei movers</b>			
<b>MOVER</b>	<b>POSIZIONE</b>	<b>QUOTA_X</b>	<b>QUOTA_Y</b>
<i>mover 000</i>	3000	400	-254,7771
<i>mover 001</i>	2900	300	-254,7771
<i>mover 002</i>	2800	200	-254,7771
<i>mover 003</i>	2700	100	-254,7771
<i>mover 004</i>	2600	0	-254,7771
<i>mover 005</i>	2500	-100	-254,7771
<i>mover 006</i>	2400	-200	-254,7771
<i>mover 007</i>	3900	697,4521	235,4027
<i>mover 008</i>	3800	780,0828	180,2263
<i>mover 009</i>	3700	835,3251	97,63953
<i>mover 010</i>	3600	854,5887	-9,794687
<i>mover 011</i>	3500	835,4803	-97,26461
<i>mover 012</i>	3400	780,3696	-179,9393
<i>mover 013</i>	3300	697,8269	-235,2472
<i>mover 014</i>	3200	600	-254,7771
<i>mover 015</i>	3100	500	-254,7771

**Figura 121**

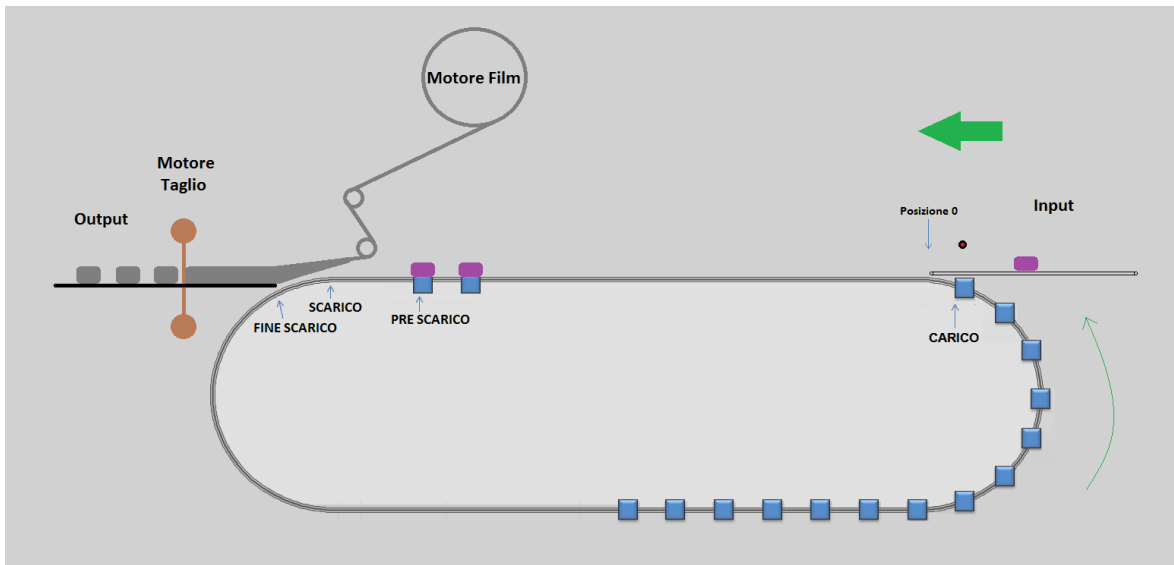
In seguito si riporta una parte di codice in linguaggio ST utilizzato per la Simulazione.

In figura 122 si riporta l'interfaccia risultante ottenuta in ambiente Excel avendo utilizzato le convenzioni precedentemente descritte. Rappresenta la condizione del sistema al termine della procedura di riposizionamento in cui i carrelli vengono disposti in coda al carico. la quota di carico è 3900 mm, perciò il mover 007 è considerato il best mover, come si nota della tabella (figura 121) la sua posizione è 3900 mm.



**Figura 122**

In figura 123 si rappresenta l'arrivo avvenuto di due prodotti. I carrelli sono già disposti opportunamente in coda allo scarico e attendono il movimento del film. Il master virtuale che lega i carrelli al film quando arrivano alla quota pre-scarico non è in movimento perché i mover in coda sono solamente due.



**Figura 123**

In figura 124 si ha la fase di accodamento del terzo carrello al buffer destinato alla zona di scarico.

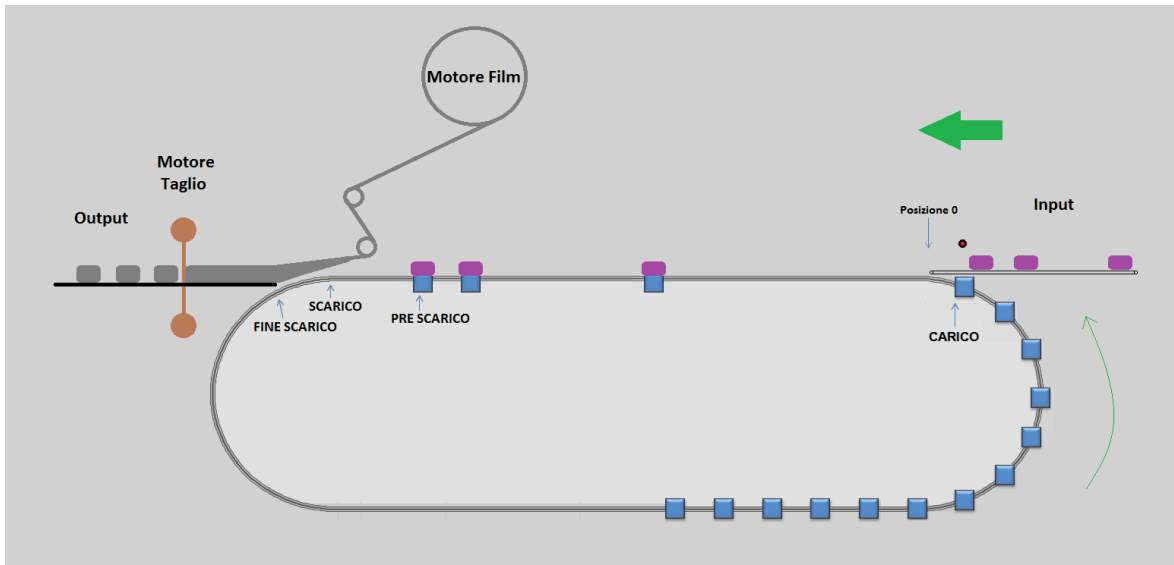


Figura 124

In figura 125 si ha il tipico funzionamento in un ciclo flowpack. Il numero di carrelli in coda è sufficiente al movimento della master virtuale che muove il film e tutto il resto della flowpack. Viene eseguito il controllo di sincronizzazione prima dello scarico. Nella quota di fine scarico, il carrello abbandona le dipendenze del film e ritorna a posizionarsi in coda alla zona di carico per agganciarsi di seguito col nastro d'ingresso.

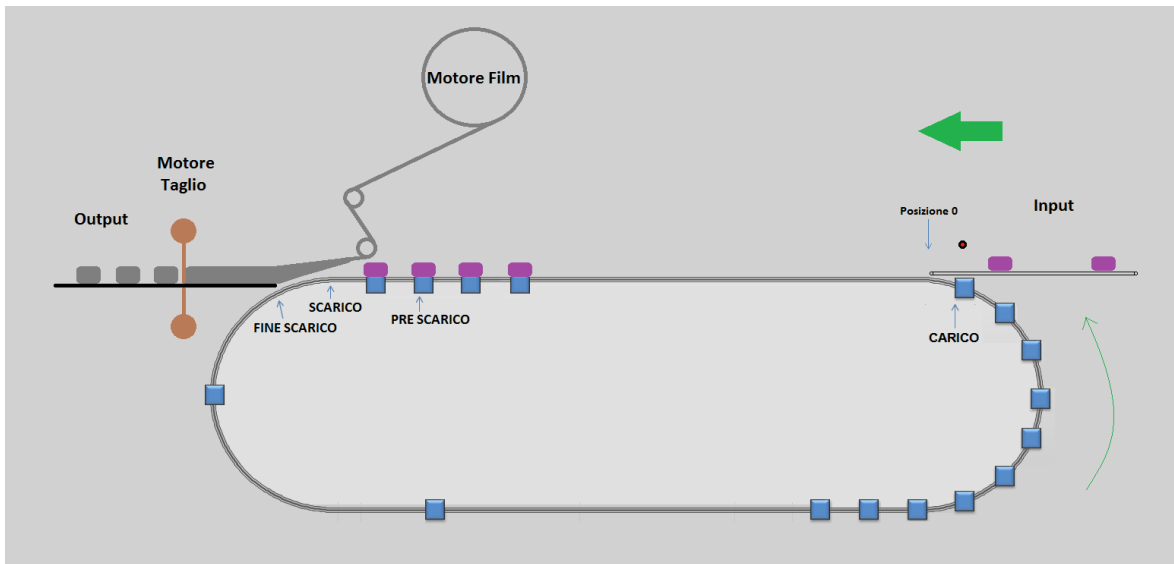


Figura 125

## CAPITOLO 6

### RISULTATI SPERIMENTALI

Il precedente capitolo è stato ampiamente dedicato all'analisi della logica di controllo utilizzata per la soluzione adottata attraverso l'uso di ITRAK nel sistema Flowpack. Il prossimo proposito da affrontare, prevede di esaminare le reali prestazioni del sistema in esame per comprendere fino in fondo se sia possibile realizzare, a tutti gli effetti, un'evoluzione delle catene di produzione CT PACK sfruttando la nuova tecnologia a disposizione. In questo capitolo verranno descritte e analizzate le varie prove di test eseguite sul sistema fornito da Jacobs Automation. Come primo step, sono riportate le prove sull'analisi dell'errore di inseguimento della traiettoria comandata ai movers nelle zone lineari e nelle zone curvilinee della macchina, su tratti di diversa lunghezza e con diverse caratteristiche di velocità. Verranno eseguite, in seguito, le medesime prove sull'errore di inseguimento relazionate all'interno di un ciclo di funzionamento di tipo Flowpack. Si affronteranno, in secondo luogo, prove relative alla verifica della reale capacità di sincronismo del sistema Jacobs con altri azionamenti elettrici. Saranno studiati sia il mantenimento del sincronismo in condizioni statiche e sia il sincronismo a regime di funzionamento. Si passerà poi allo studio delle tempistiche di comunicazione delle informazioni di motion tra il controllore Rockwell e il sistema integrato nell'architettura di Jacobs. Infine, si dedicherà l'attenzione all'analisi delle differenze relative alle tempistiche di gestione del moto all'interno del PLC e del sistema Jacobs.

#### 6.1 Analisi dell'errore di inseguimento

La prima verifica affrontata riguarda l'analisi dell'errore di inseguimento di un carrello in relazione alla traiettoria comandata all'interno della logica di controllo. Come descritto nel capitolo 5, all'interno di RSLogix 5000 ogni mover è rappresentato da un asse virtuale appositamente definito. Il comando di movimento su ognuno di questi è realizzato semplicemente attraverso l'uso delle apposite motion instruction su tali assi. La traiettoria di movimento decisa per ogni asse viene poi trasmessa agli azionamenti presenti all'interno del sistema ITRAK attraverso l'opportuno collegamento al Gateway. Perciò, agli occhi dell'utente, i comandi di motion risultano come un normale comando effettuato su di un asse fisico normalmente utilizzato in ambito industriale. Il sistema ITRAK è in grado di fornire dei dati di feedback riguardanti l'errore commesso su tale concetto. I dati d'interesse in questo caso, sono contenuti all'interno di una struttura dati dedicata contenente le informazioni e le variabili necessarie per la comunicazione tra la



macchina Jacobs ed il controllore. Tale struttura, denominata JA\_CONTROL\_DATA, è definita all'interno delle variabili globali della logica di controllo e, come si può notare dalla seguente figura, la propria posizione all'interno dell'organizzazione software del sistema è strettamente richiesta all'interno della ADD\_ON\_INSTRUCTION dedicata alla comunicazione del sistema. L'ADD\_ON\_INSTRUCTION, denominata JAIO, è situata all'interno del raccogliitore delle AddOnIntruction, posizionato a sua volta nella struttura del controller organizer Rockwell.

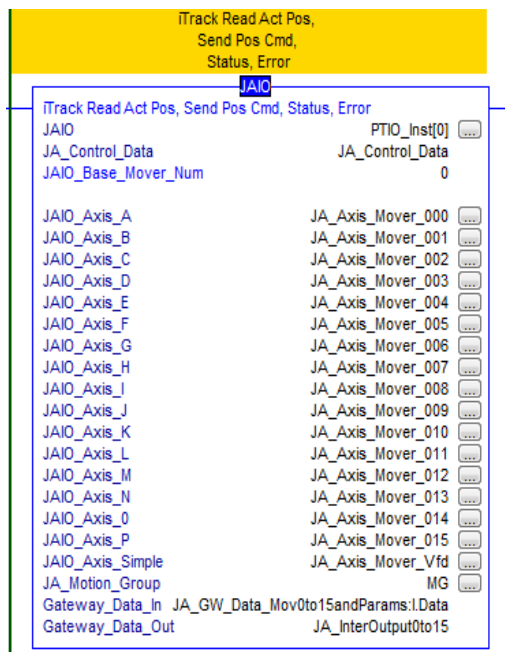


Figura 126

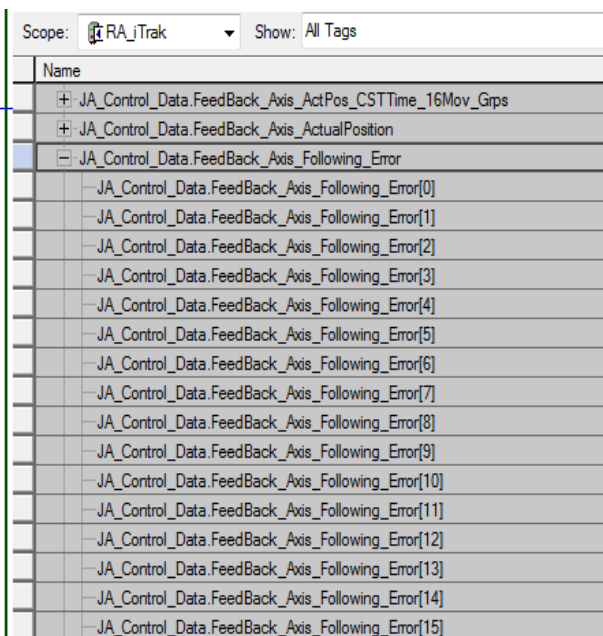


Figura 127

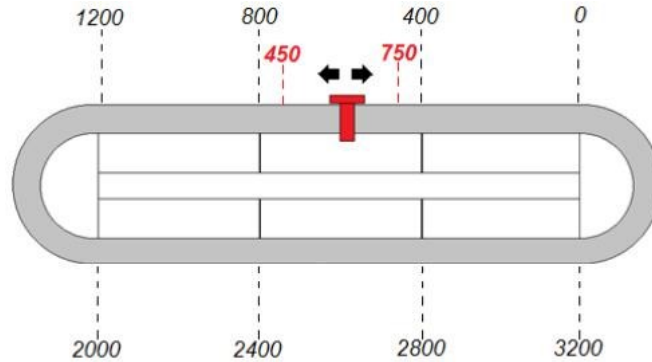
All'interno della struttura JA\_CONTROL\_DATA è possibile selezionare la variabile dedicata al feedback di errore commesso come mostrato in figura 127. Essendo i carrelli costituiti dalle medesime caratteristiche, si è deciso di selezionare un elemento su cui effettuare i test tra i sedici presenti nel sistema. In seguito sono riportati i test eseguiti su tratti lineari e curvilinei al variare delle velocità in gioco e della lunghezza dei tratti.

## 6.2 Errore di inseguimento nei tratti lineari e curvilineo

### TRATTO LINEARE

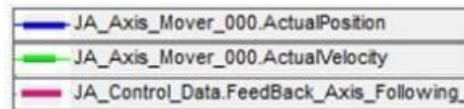
La prima serie di test riguarda l'analisi dell'errore di inseguimento commesso dal sistema su di un tratto lineare, di lunghezza pari a 300 mm. Si è selezionato il modulo centrale superiore con il tratto compreso tra le quote riportate in figura 128. Il test viene eseguito facendo oscillare il carrello tra le estremità, aumentando la velocità, l'accelerazione e la derivata dell'accelerazione (jerk) secondo la seguente tabella:

Velocità [mm/sec]	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
Accel. [mm/sec <sup>2</sup> ]	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
Jerk [mm/sec <sup>3</sup> ]	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000

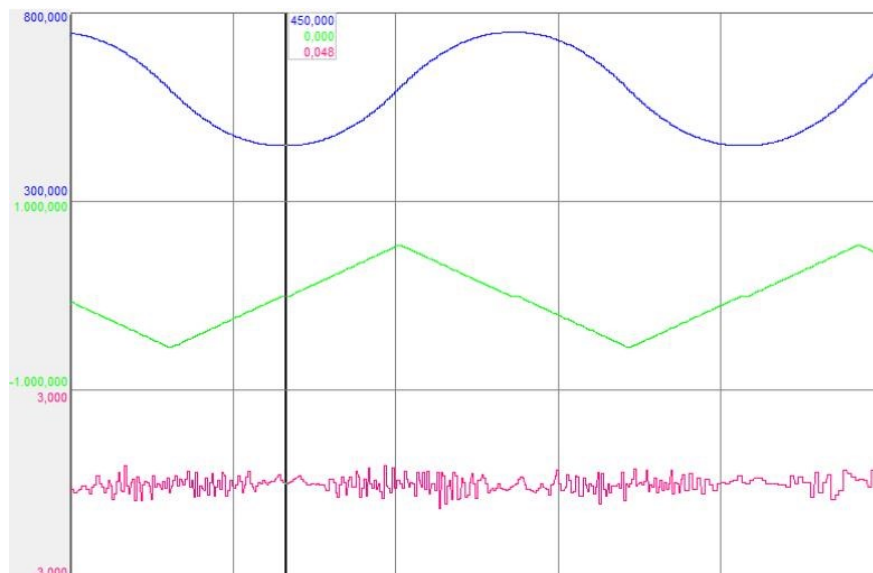


**Figura 128**

Utilizzando l'apposito tool all'interno di RSLogix 5000, sono stati eseguiti i grafici degli andamenti della posizione (actual position) del carrello, della velocità (actual velocity) e dell'errore di inseguimento: (Ja\_Control\_Data.FeedBack\_Axis\_Following\_Error). In figura 130, 131, 132, 133 si riportano un esempio di grafico ottenuto evidenziando in sequenza i campionamenti dei valori delle variabili.



**Figura 129**



**Figura 130**

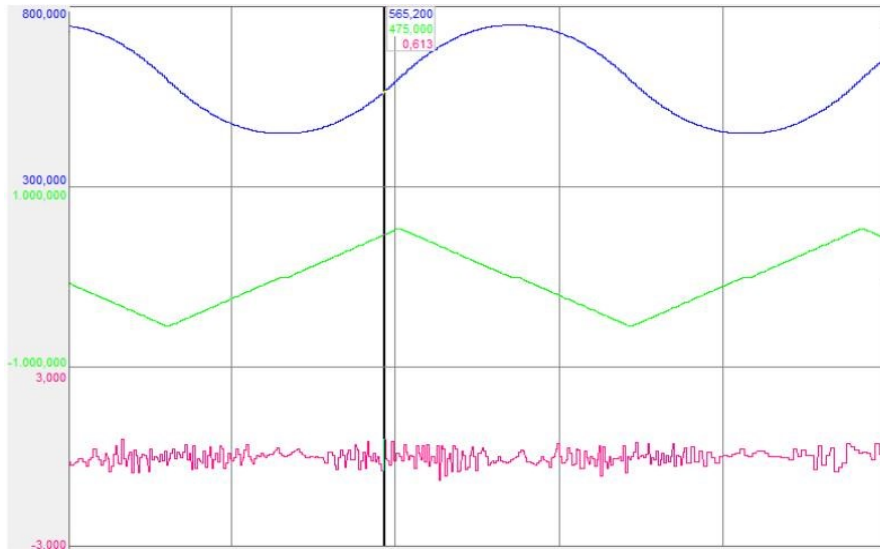


Figura 131

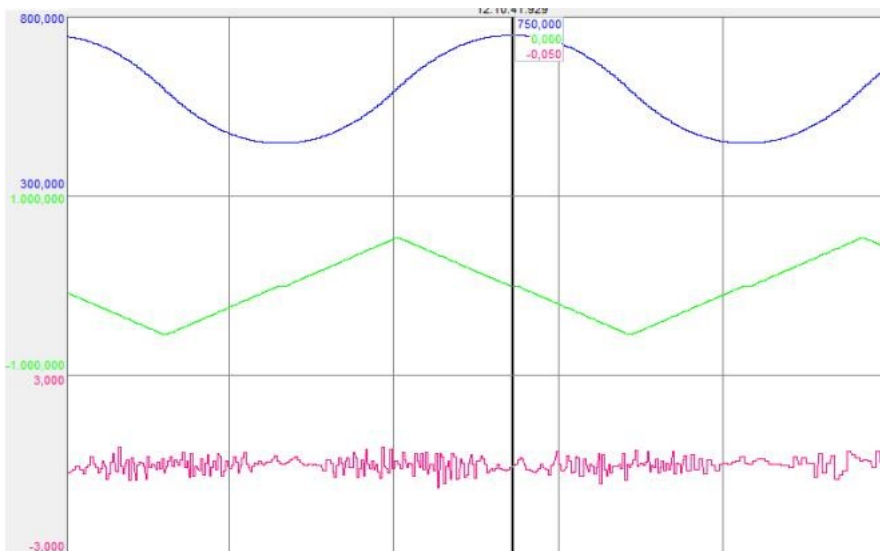


Figura 132

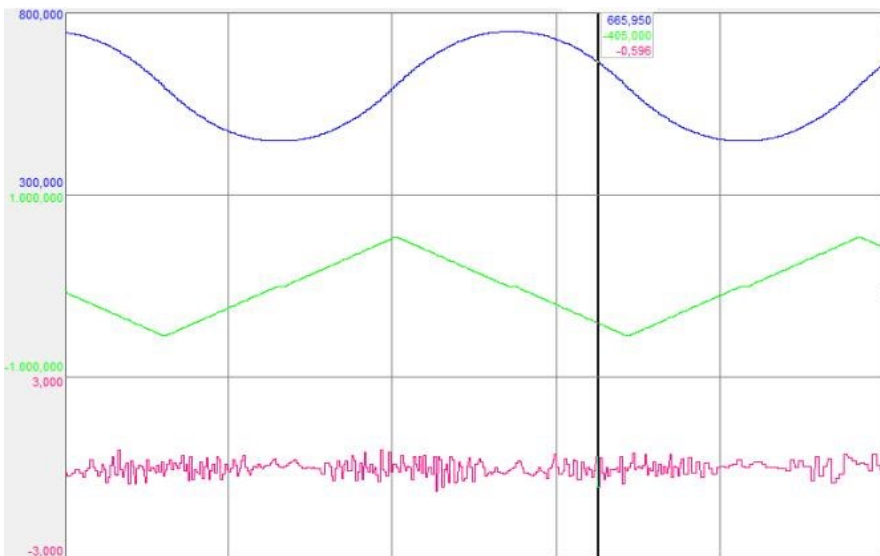
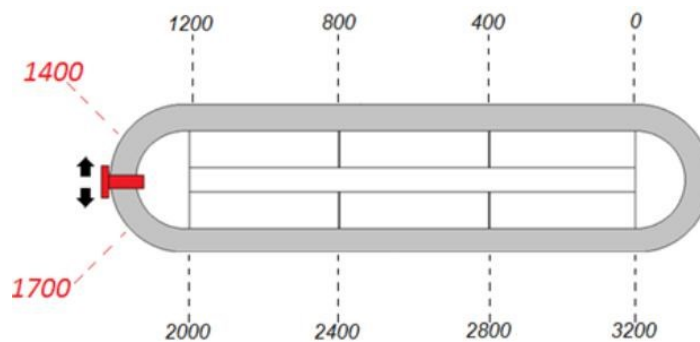


Figura 133

Dai grafici è possibile notare che la posizione rispetta l'oscillazione comandata tra le due quote con estremità definite. La velocità, come lecito attendersi, acquisisce il valore massimo nel punto mediano dello spostamento. L'errore ha un andamento pressoché nullo nelle estremità a valore di velocità assenti, mentre accentua l'intensità attorno alla zona di velocità massima.

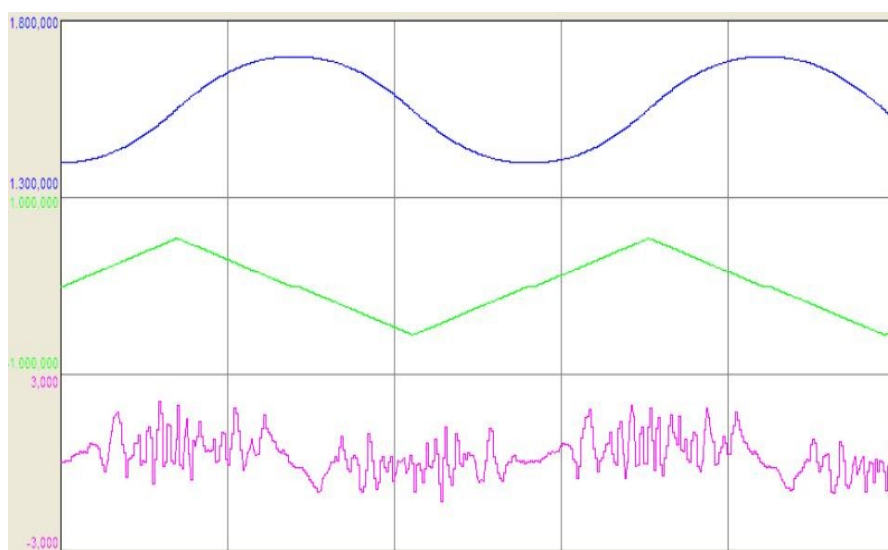
### TRATTO CURVILINEO

Per quanto riguarda le prove eseguite nel tratto curvilineo, si considerino le medesime considerazioni fatte precedentemente. In particolare, si fa riferimento alla tabella A per le variazioni di velocità, accelerazione e jerk. Si consideri la stessa lunghezza di oscillazione utilizzata ma traslata opportunamente nella zona di interesse come mostrato in figura 134.



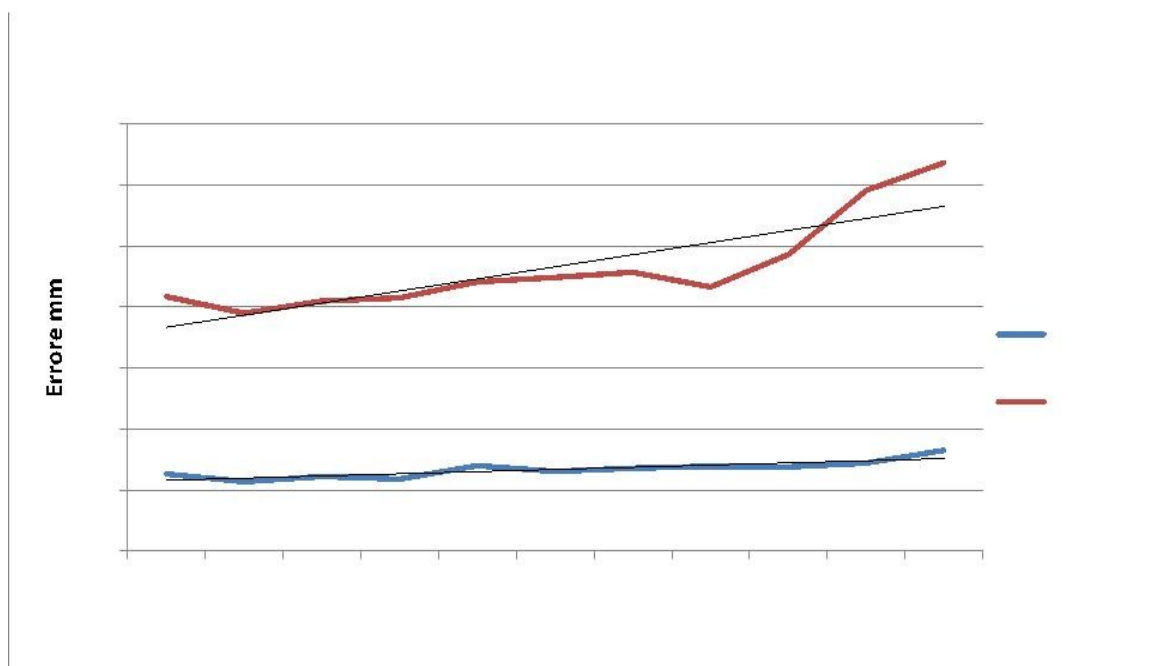
**Figura 134**

La figura mostra l'andamento delle variabili di posizione, velocità ed errore di inseguimento ottenuti in una delle prove eseguite sulla zona prestabilita. Si premette di aver utilizzato gli stessi valori di dinamica utilizzati nel caso precedente per poter confrontare gli andamenti anche da un punto di vista visivo.



**Figura 135**

Risulta immediato che, le prestazioni in termini di precisione di posizionamento nella parte curvilinea, sono decisamente differenti da quanto visto per il tratto lineare. Analogamente a quanto affermato nel caso precedente, i valori più accentuati dell'errore di inseguimento si presentano alle quote in cui il carrello raggiunge le velocità più sostenute. Volendo analizzare più nel dettaglio le differenze di comportamento delle due zone di interesse, sono stati campionati i valori di errore massimo commesso all'interno di una prova ed il relativo valore di velocità corrispondente. In figura 136 sono riportati gli andamenti di tali errori in funzione della velocità.



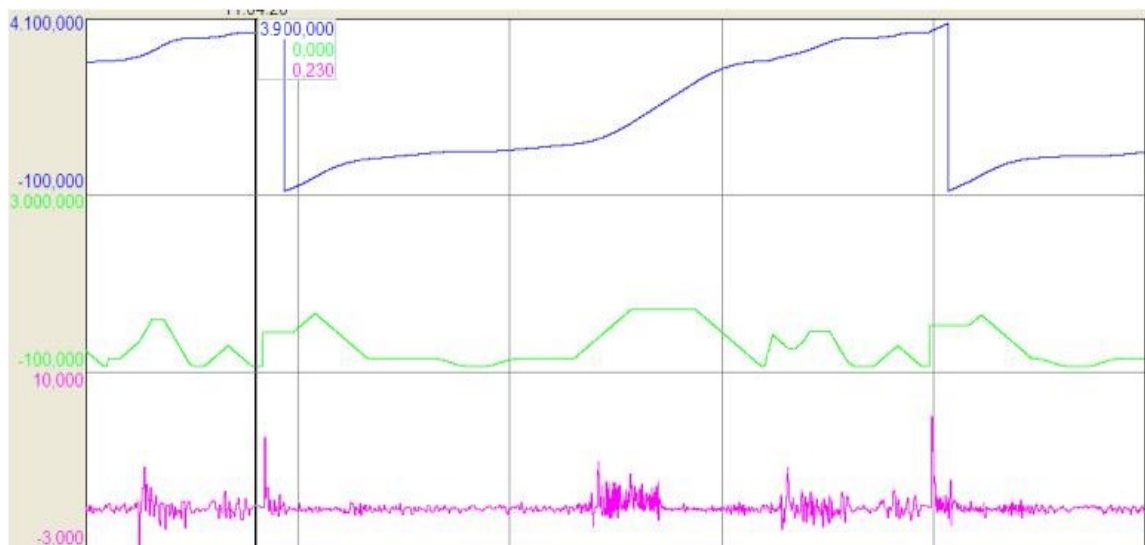
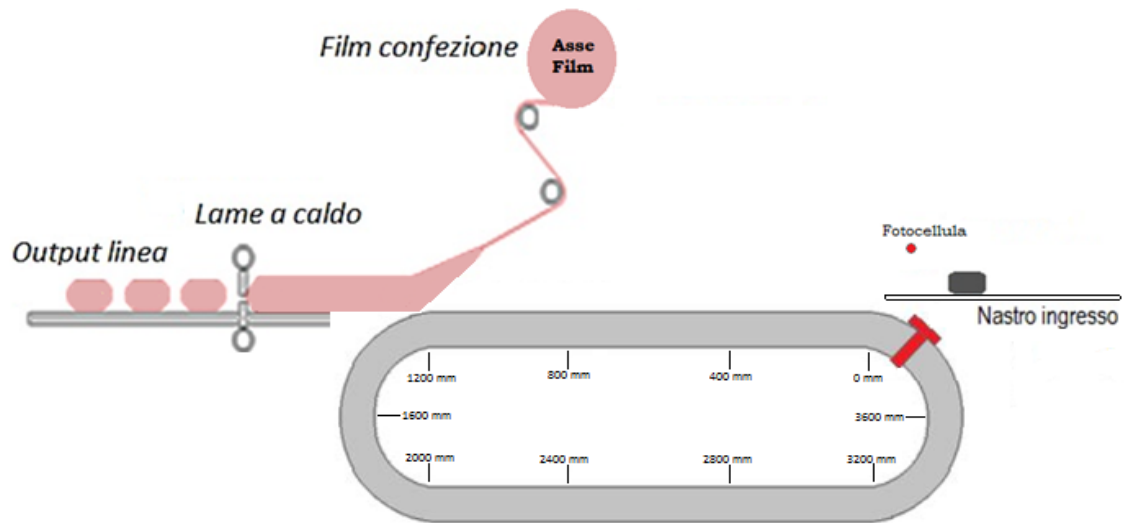
**Figura 136**

Il grafico rispecchia quanto già visto, ad un primo impatto, dall'analisi delle variabili misurate nei grafici precedenti. L'errore di inseguimento nel tratto lineare assume grandezze dell'ordine del decimo di millimetro e presenta una lieve dipendenza dall'aumento di velocità dell'azionamento. Il tratto curvilineo assume valori di errore circa quattro volte il caso precedente ed inoltre una più accentuata relazione con l'aumento della velocità.

### **6.3 Analisi sul ciclo Flowpack**

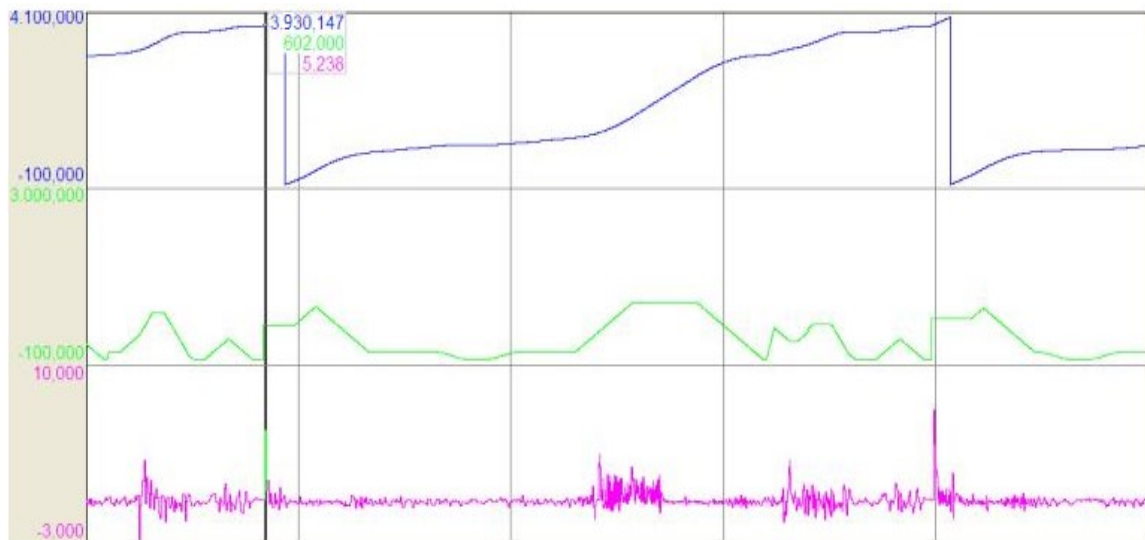
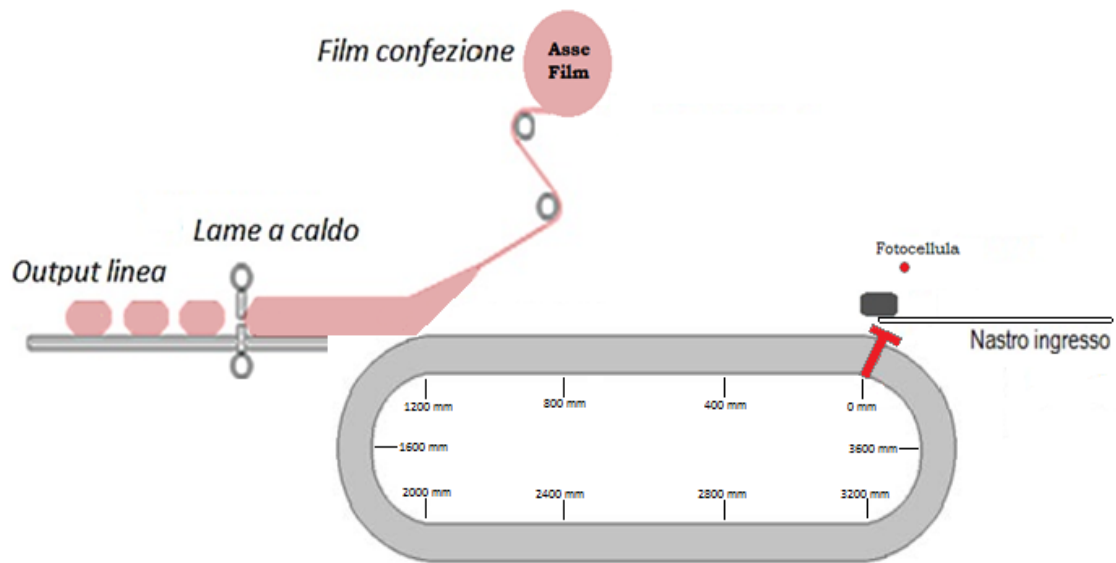
In questo paragrafo prevede di effettuare l'indagine dell'errore di inseguimento di posizione applicata al sistema ITRAK in configurazione di funzionamento di tipo Flowpack. Si è selezionato un carrello, tra quelli a disposizione sulla rotaia, in modo da analizzare in dettaglio le quote significative del percorso durante un ciclo flowpack.

Alla quota 3900 si è stabilita la zona di carico alla quale un carrello rimane in attesa dell'arrivo del prodotto. La velocità è ovviamente nulla e l'errore di posizione è inferiore al millimetro.



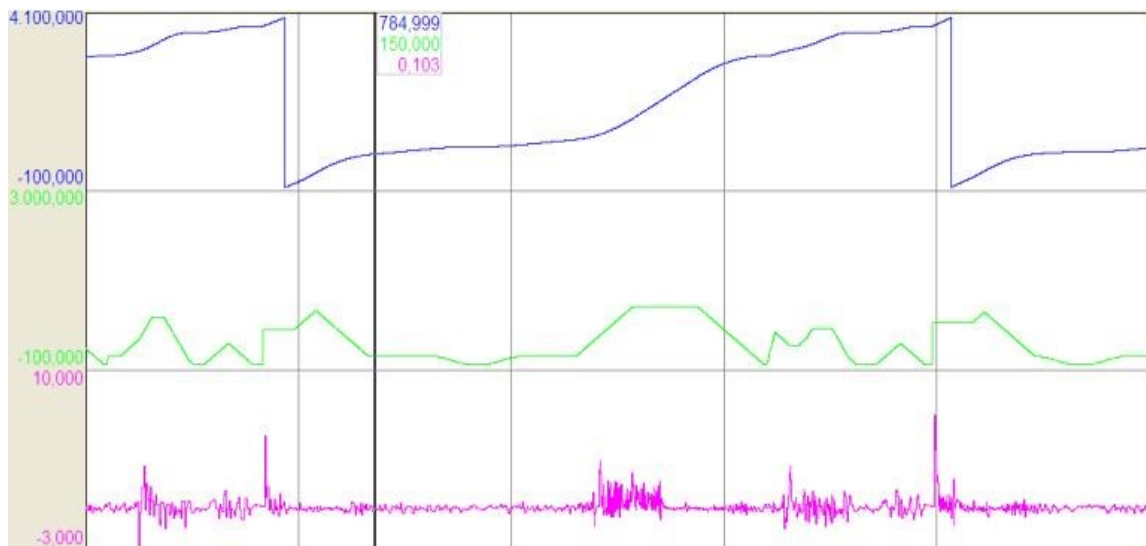
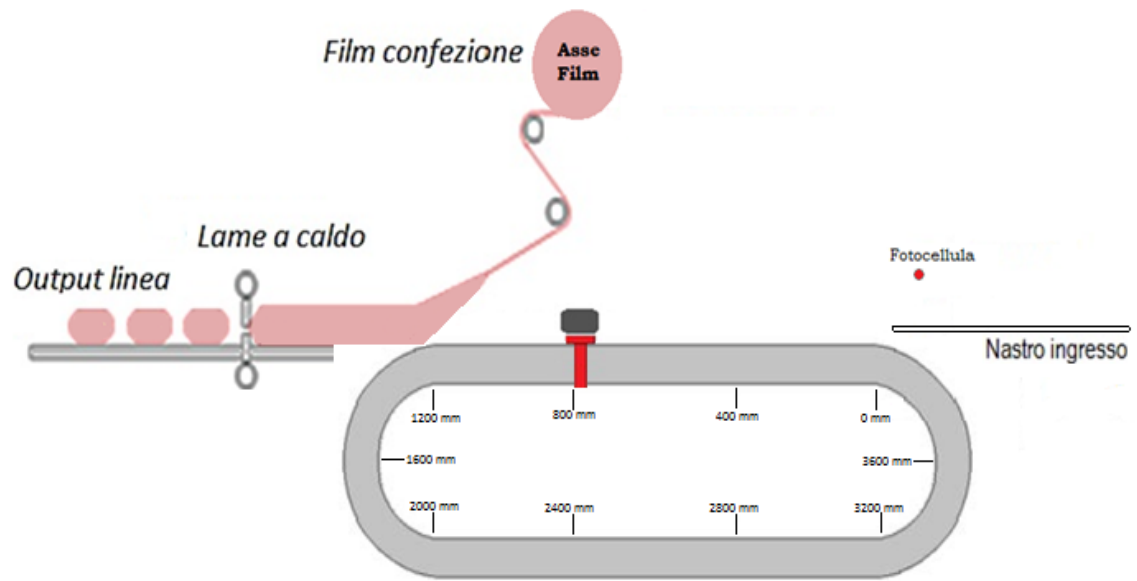
**Figura 137**

All'arrivo del prodotto, il mover scatta rapidamente verso la zona di accodamento. Si può notare una variazione a "gradino" della velocità e che l'errore sia cambiato (pari a 5 millimetri).



**Figura 138**

Il carrello prende il prodotto e va nella zona di pre-scarico, la velocità del carrello in questa zona è pari a quella dell'asse del film e quasi costante, si può notare che l'errore di posizione è inferiore al millimetro.



**Figura 139**

Alla quota 1100 è stabilita la zona di effettivo scarico del prodotto. La velocità è ancora quella dell'asse del film e l'errore di posizione estremamente basso.



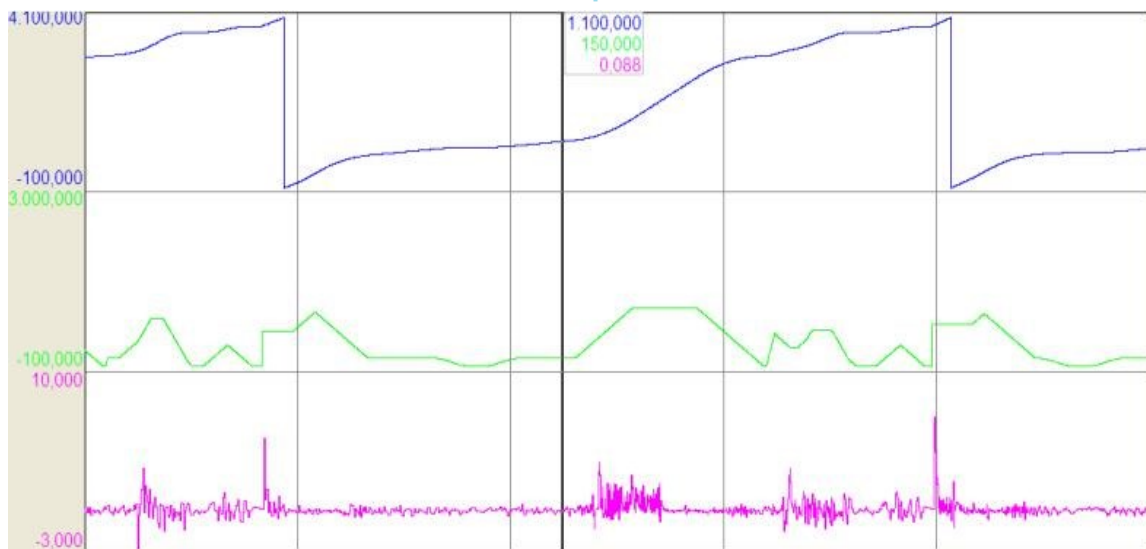
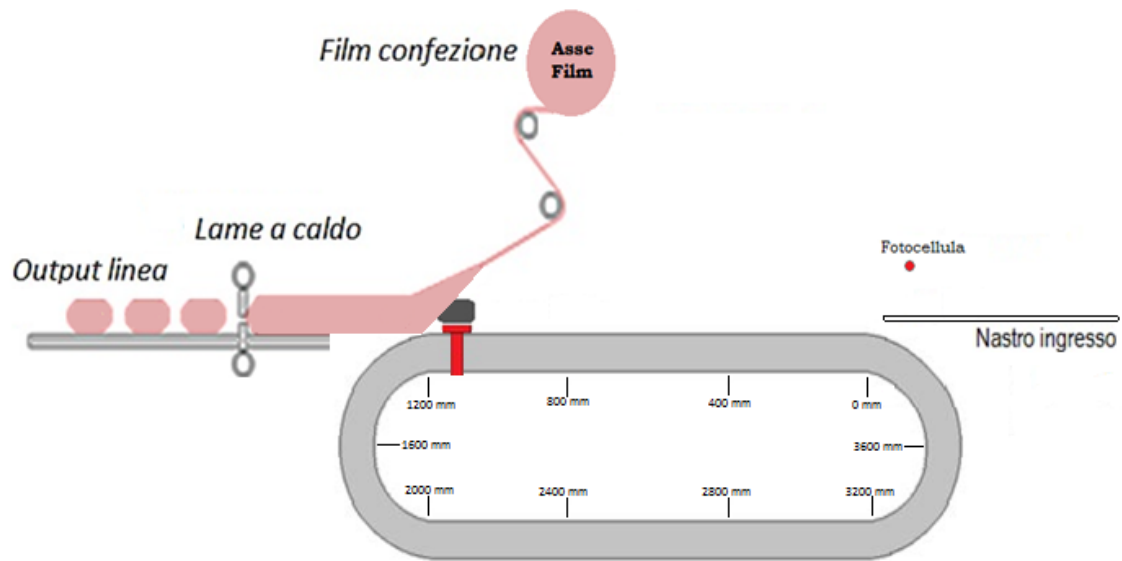
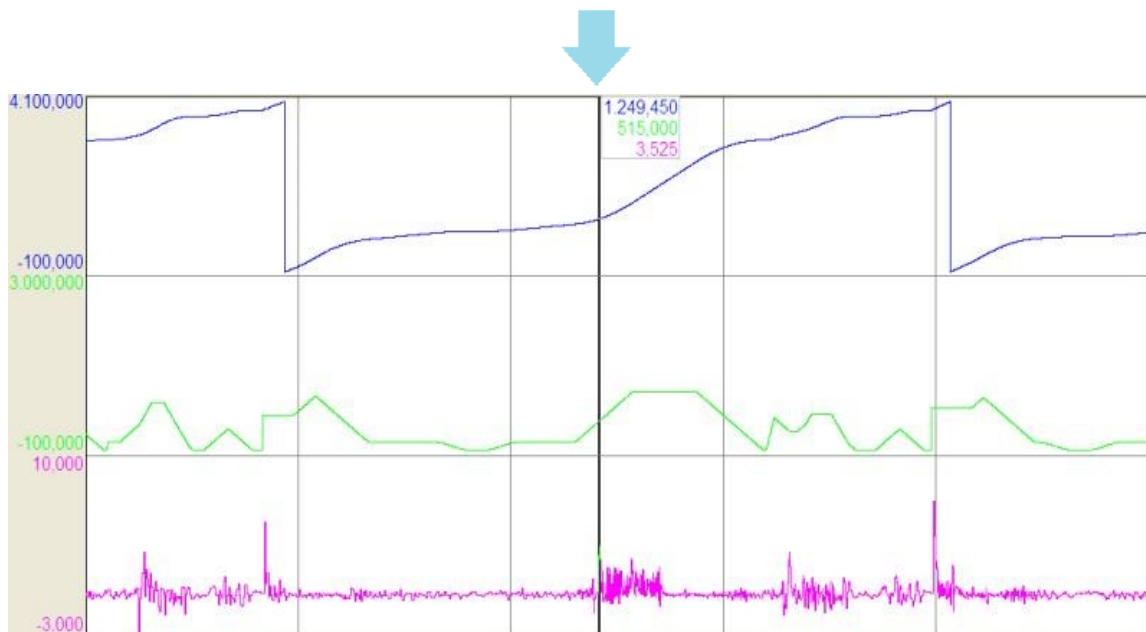
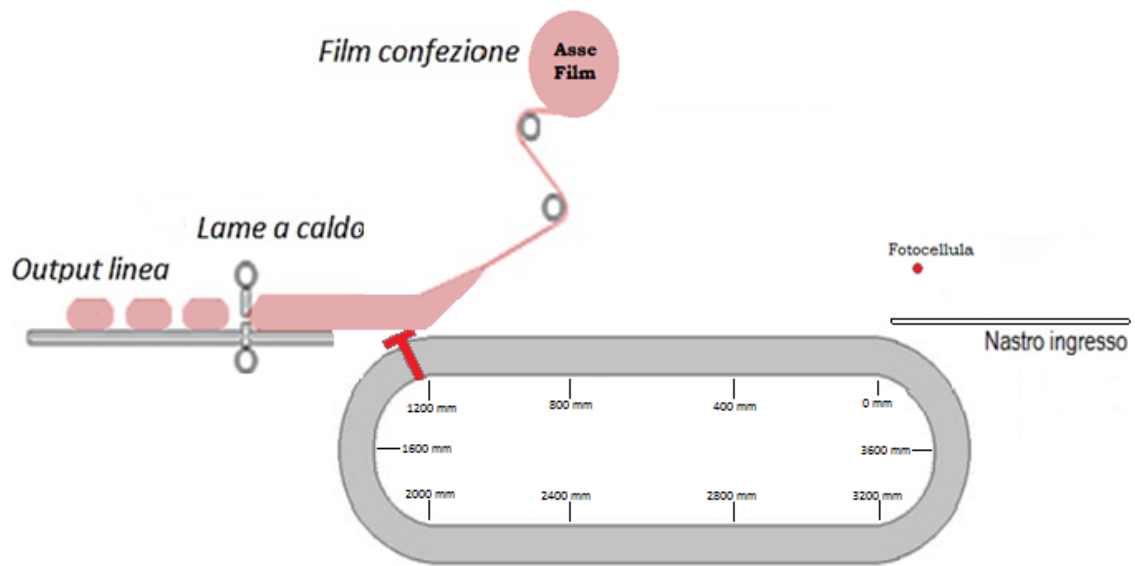


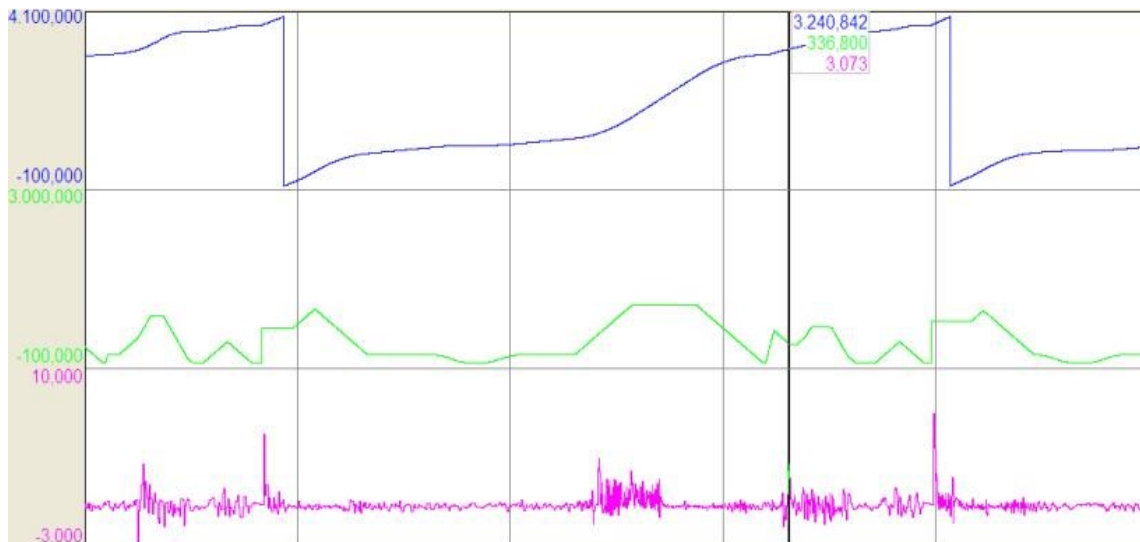
Figura 140

Giunti alla quota di fine scarico, il mover intraprende la procedura per sganciarsi dal comando di gear dal film per poi dirigersi verso la zona di accodamento alla zona di carico. La variazione di velocità è rapida implicando quindi la crescita dell'errore di posizione.



**Figura 141**

La parte finale del ciclo prevede la condizione di gear del carrello con l'elemento che lo precede. I movimenti in questa zona sono rapidi e brevi poiché alla partenza di ogni carrello dalla zona di carico, occorre garantire una pronta condizione di servizio. I movimenti sono da ritenersi "impulsivi". Si notano infatti rapide variazioni di velocità le quali comportano un errore di posizione sensibile a tali andamenti. Si giunge in seguito nuovamente alla zona di carico alla quota 3900 per poter ripetere il ciclo di servizio.

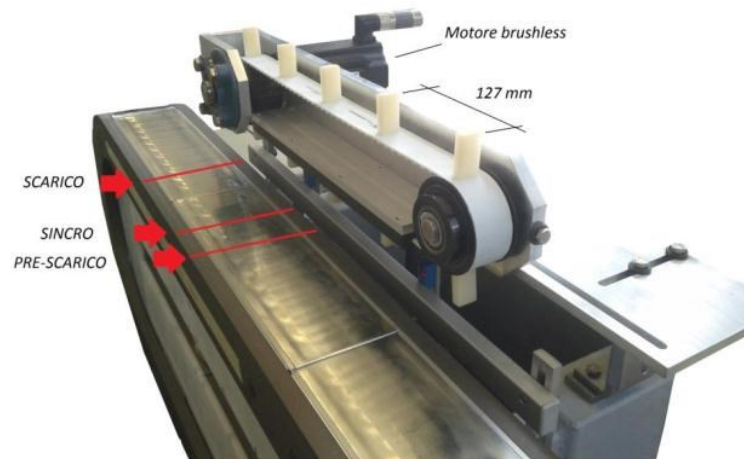


**Figura 142**

Analizzando i grafici precedentemente riportati, è naturale notare che, facendo riferimento alle diverse quote, l'errore di inseguimento cresce in certe quote e diminuisce in altre in dipendenza della velocità e della zona dove si trova il carrello. Bensì, ragionando in termini di prestazione all'interno del ciclo di tipo flowpack, l'aumento dell'errore in base a suddette motivazioni non comporta importanti problematiche poiché la zona di funzionamento fondamentale per il sincronismo con il film non è soggetta ad elevati valori di imprecisione essendo a velocità costante.

#### **6.4 Prove di sincronismo col film**

L'obiettivo di tali prove è quello di poter iniziare a comprendere le reali potenzialità fisiche del sistema e cercare di capire l'efficienza di tali sistema inserito in una linea di produzione costituita da diversi sistemi automatizzati che hanno la necessità di interagire perfettamente tra loro. Si è deciso quindi di inserire il motore del film al di sopra della rotaia lineare superiore del sistema Jacobs con cui poter eseguire dei test di sincronizzazione dei movimenti tra il film e i carrelli. In particolare, il nuovo componente è costituito da una cinghia dotata di denti di riferimento messa in rotazione da un motore elettrico brushless comandato dallo stesso plc con cui si effettua il controllo del sistema ITRAK. La cinghia dotata di denti ha un passo uguale a 127 mm, e questo è il passo di taglio da effettuare al prodotto nudo.



**Figura 143**

Il tipo di motore brushless utilizzato è un Kinetix VP a bassa inerzia. Questo servomotore opera con azionamenti di tipo Kinetix 5500 i quali sostengono la nuova tecnologia di comunicazione Integrated Motion su EtherNet/IP. Basato su una tecnologia collaudata per prestazioni dinamiche, questo servo motore contribuisce ad aumentare l'affidabilità di produzione. Questo motore richiede un solo cavo per fornire le funzioni di feedback, freno motore, e comando in potenza, consentendo di ridurre i tempi di installazione e messa in servizio, semplificando il cablaggio e riducendo il volume di occupazione.

L'azionamento è un Kinetix 5500 EtherNet/IP Servo Drives. Opera con la nuova famiglia di controllori che supportano il protocollo Integrated Motion su EtherNet/IP. Con il suo design innovativo e compatto, l'azionamento Kinetix 5500 aiuta a ridurre al minimo ingombro della macchina e semplifica il cablaggio del sistema. Inoltre, la doppia porta Ethernet consente sia topologie di comando sui singoli azionamenti e sia tipologie ad anello come nei normali sistemi di azionamenti tipo Sercos.



**Figura 144**

La cinghia utilizzata prevede la presenza di dieci denti di riferimento posizionati alla distanza di 127 mm l'uno dall'altro. Il gap di separazione tra i riferimenti ha le stesse dimensioni della distanza di accodamento prodotto adoperata nel ciclo

flowpack. La scelta di tale dimensionamento è stata dettata dal fatto che, così facendo, si è reso possibile poter verificare il corretto sincronismo col film studiato durante la stesura della logica di controllo nella fase di scarico del prodotto.

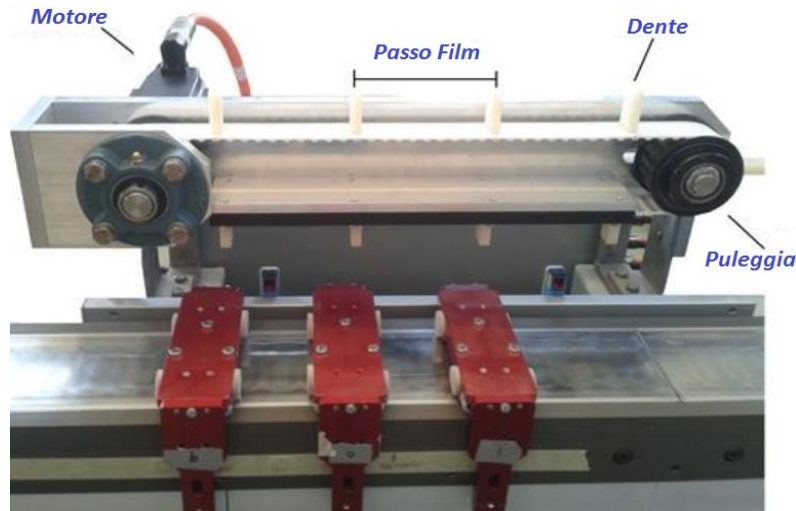


Figura 145

Dal punto di vista della programmazione software, ogni carrello è associato ad un asse di tipo virtuale all'interno del programma RSLOGIX. La cinghia è l'asse del film, essendo comandata da un motore, è associata ad un asse di tipo reale e ad un azionamento opportunamente inserito nella disposizione hardware all'interno dell'organizzazione del plc.

Sia i carrelli, sia il motor film sono associati a un asse virtuale chiamato Ax\_VirtualMaster. In figura 146 si riporta la condizione di funzionamento dei tre assi motion utilizzati.

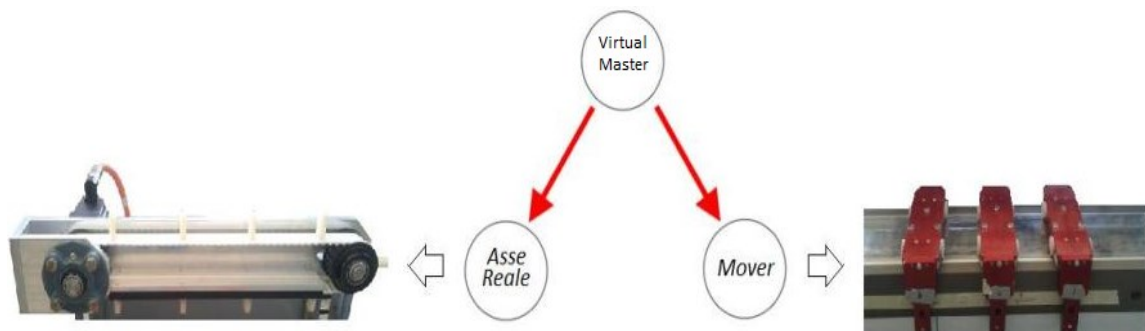


Figura 146

Nei seguenti sotto paragrafi verranno discusse due tipologie di prove effettuate con l'obiettivo di verificare le corrette condizioni di sincronismo imposte dal funzionamento del sistema in un ciclo flowpack.

### **6.4.1 Mantenimento della posizione nel tempo**

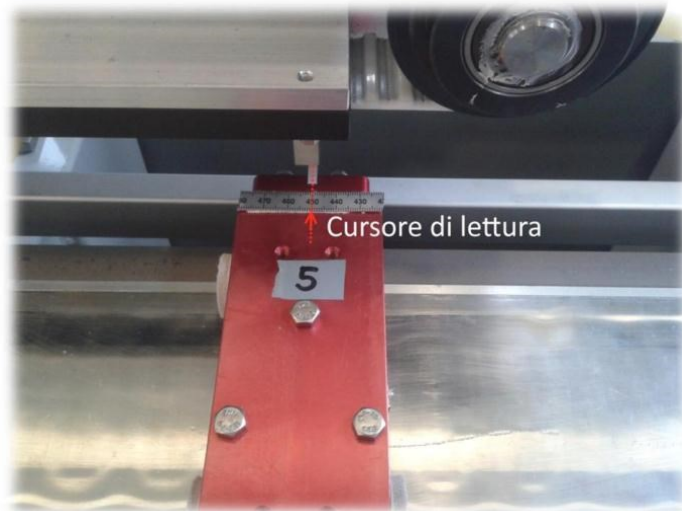
In questo paragrafo sono riportati i risultati dei test di durata eseguiti sul sistema con l'obiettivo di verificare il corretto mantenimento di posizione dei carrelli all'interno di un ciclo flowpack. In particolare, si è voluto osservare se l'accoppiamento in condizioni di sincronismo tra un carrello ed un dente della cinghia che simula il film, mantenesse invariate le caratteristiche nell'arco di tutte le prove di durata. Semplicemente, la condizione che si vuole verificare sul singolo mover è che le posizioni comandate ed i relativi feedback riportati nell'ambiente plc rispecchino le reali situazioni fisiche effettivamente presenti sul sistema. Per lo sviluppo di tale prova, si è resa necessaria l'individuazione di un riferimento fisico tra carrelli e denti della cinghia. Per fare ciò, i mover sono stati dotati, nella parte superiore, di un asticella millimetrata opportunamente dimensionata con le caratteristiche fisiche del carrello come riportato in figura 147.



**Figura 147**

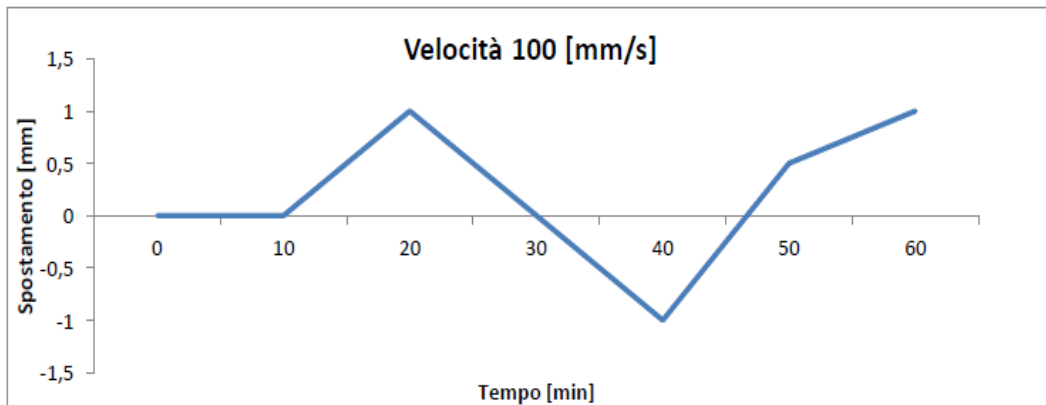
Da figura, inoltre, si può notare che anche il dente della cinghia che simula l'asse del film è stato opportunamente dotato di un indicatore posizionato in modo coincidente all'estremità del salterello. Quindi, avendo a disposizione tale configurazione, sono state effettuate le prove di misura sul carrello durante il funzionamento della macchina in ciclo flowpack. Sono state eseguite prove di durata lanciando la simulazione di produzione con diverse velocità operative della macchina, ognuna della durata di 1 ora di servizio operativo. All'interno del gap temporale, sono state eseguite delle interruzioni di tipo start and stop per poter effettuare le misurazioni di posizione con un intervallo di 10 minuti l'una dall'altra.



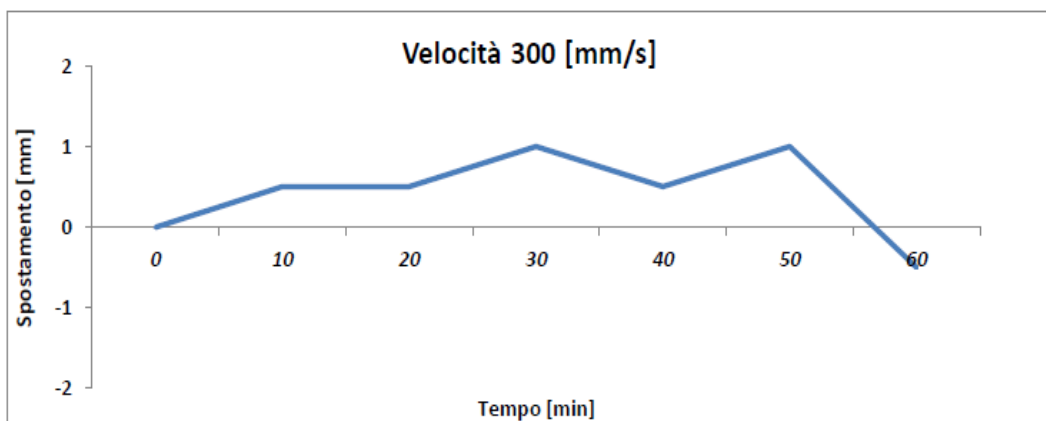


**Figura 148**

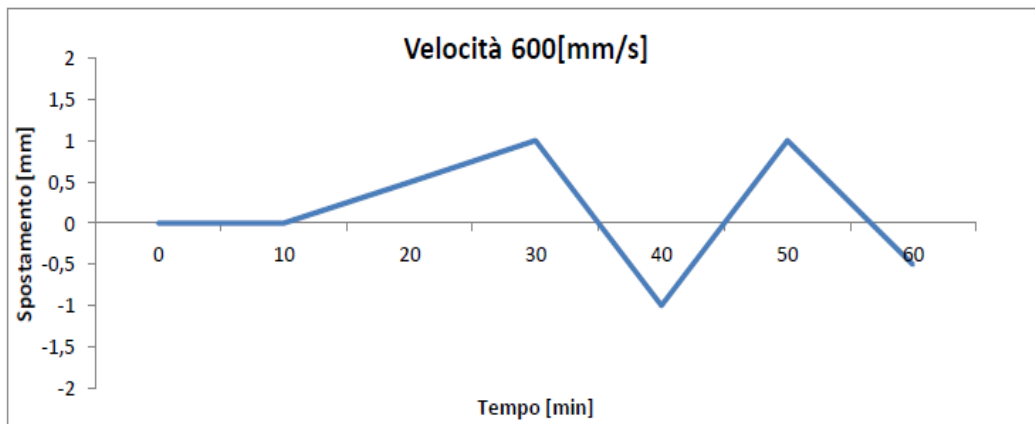
Nei grafici seguenti vengono riportati gli andamenti degli spostamenti misurati ai vari periodi di campionamento prefissati durante le prove. Il titolo di ogni grafico indica il valore di velocità a cui si riferiscono le misurazioni fatte. In ascissa è posto il tempo della prova mentre in ordinata il valore di spostamento registrato in millimetri.



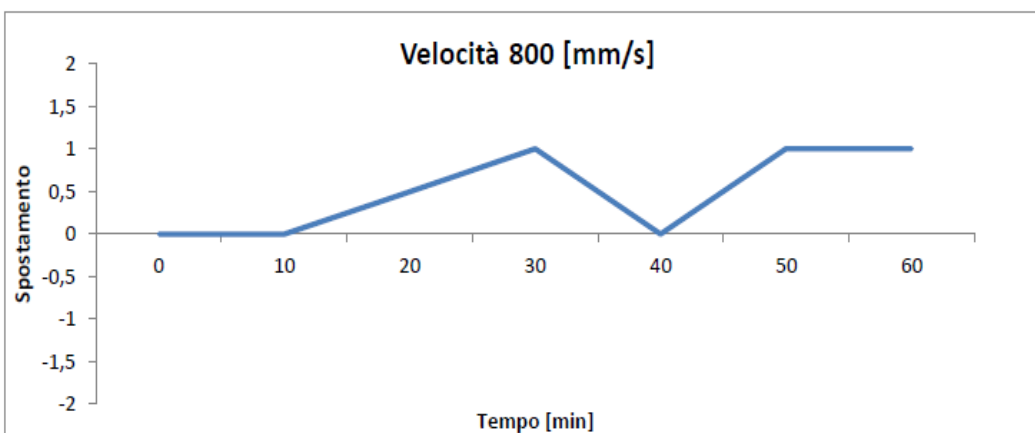
**Figura 149**



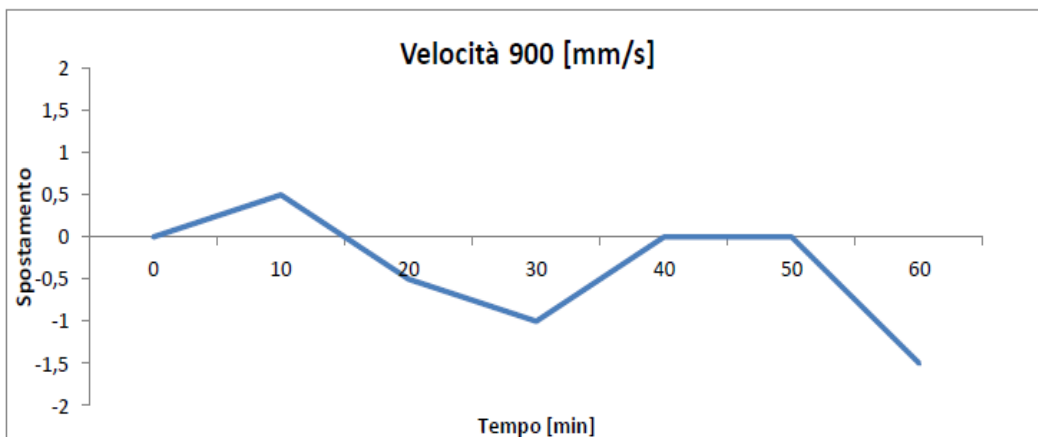
**Figura 150**



**Figura 151**



**Figura 152**



**Figura 153**

Come si può notare dalle figure precedentemente riportate, nei diversi cicli di prove di durata, l'azionamento lineare osserva spostamenti dell'ordine massimo di due millimetri rispetto il riferimento iniziale. Occorre tenere in considerazione che le misure rilevate possono essere influenzate dalle vibrazioni intrinseche del motore lineare in condizioni di stazionamento.

Omettendo al momento errori e imprecisioni di misura, è possibile affermare che



dai test effettuati si è verificato il corretto mantenimento di fase nel tempo nelle condizioni operative utilizzate. Si rimanda ad ulteriori sviluppi di analisi future per l'eventuale studio del mantenimento della posizione in condizioni di start and stop con valori di velocità più elevate e prove di durata di maggiore estensione.

## 6.5 Conclusioni

Riepilogando i vari risultati ottenuti durante gli anni di ricerca dedicati alla stesura di questo documento, si è giunti alle seguenti conclusioni:

- La programmazione del software riguardante la logica di controllo del sistema di produzione di tipo Flowpack ha raggiunto ottimi livelli di efficienza, rispondendo alle richieste di adattamento del sistema ITRAK alle caratteristiche dell'architettura flowpack già esistente.
- In base alle prove svolte sul errore di inseguimento di traiettoria dei singoli mover di ITRAK, sono state confermate le differenze di prestazione tra i tratti lineari e curvilinei dichiarate da Jacobs Automation.
- In base alle verifiche effettuate sul funzionamento di tipo flowpack, è possibile affermare che, nella zona di sincronismo col film ovvero la situazione più critica dell'intero ciclo, le prestazioni possono considerarsi ottimi in merito all'errore di inseguimento di posizione.

Concludendo, in merito ai test e ai risultati ottenuti fino a questo momento, si può certamente affermare che il sistema ITRAK offre effettivamente una nuova tecnologia dalle notevoli potenzialità nel campo degli azionamenti lineari. CT PACK, in base agli step maturati durante questi anni di ricerca, si è riuscita a integrare il sistema ITRAK in una linea di produzione flowpack presente nei propri stabilimenti. In questo modo sarà possibile osservare che il sistema offre realmente le potenzialità ed i requisiti necessari per l'individuazione di una soluzione alternativa ai sistemi di produzione esistenti.

La CT PACK è riuscita a migliorare la meccanica dei carrelli del sistema ITRAK, ha sviluppata una forma di carrello opportuna per il supporto verso la zona di confezionamento. Inoltre, ha reso tale meccanica il più versatile possibile, ha realizzato un design compatibile con diverse tipologie di formato, ha aggiunto un'altra coppia di ruote che poggiano sulla parte interna della rotaia per limitare le vibrazioni, gli spostamenti indesiderati e per evitare l'eventuale fuoriuscita dei carrelli in condizioni di malfunzionamento.

## BIBLIOGRAFIA

- Oliviero e Ravelli, "ELETTROTECNICA, volume secondo, Macchine Elettriche", Edizioni Cedam
- Boldea, Nasar, "Linear Electric Actuators and Generators", Cambridge University Press
- Fabrizio Lotti, "introduzione ai motori lineari", Dipartimento di Ingegneria delle costruzioni meccaniche, Bologna.
- F. Lotti, G. Vassura, A. Zucchelli, M. Salmon, "Selection of linear motors for high speed packaging machines", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 2001.
- J.F.Gieras, Z.J. Piech, "Lynear synchronous motor", CRC Press (USA), 2000.
- Istituto Nazionale Commercio Estero, "Elaborazione ICE su dati del Ministero del Commercio cinese", 2011, [www.ice.it](http://www.ice.it).
- Magnemotion, "MM LITE—positioning and control provided by MagneMotion Linear Synchronous Motor (LSM) Technology", [www.magnemotion.com](http://www.magnemotion.com)
- Jacobs, "iTrak user manual RsLogix v2026", [www.jacobsautomation.com](http://www.jacobsautomation.com)
- [www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com)
- Rocwell Automation, "Logix5000 Controllers Motion Instructions", Publication 1756- RM007J-EN-P - July 2008 14
- Rocwell Automation, "Kinetix 2000 Multi-axis Servo Drive", Publication 2093-UM001A-EN-P — March 2007
- Rocwell Automation, "Integrated Architecture and CIP Sync Configuration", Publication IA- AT003B-EN-P - June 2011