

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA DI BOLOGNA**

SECONDA FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CON SEDE A CESENA

**CORSO DI LAUREA**

IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA

IN DISEGNO TECNICO ASSISTITO DAL CALCOLATORE

**STUDIO DI UN CARRELLO INNOVATIVO PER  
MOVIMENTAZIONE DI UNA MACCHINA  
INCELLOFANATRICE AUTOMATICA**

CANDIDATO

Lorenzo Gabellini

RELATORE

Luca Piancastelli

Anno accademico 2010/2011  
Sessione III

# Indice

## Introduzione

### CAPITOLO 1 - SPECIFICHE DI PROGETTO

1.1 Sistema svolgibobina ..... 4

1.2 Prestazioni e dati progettuali ..... 6

### CAPITOLO 2 – MOVIMENTAZIONE

2.1 Funzionamento di una ‘hub motor’ ..... 7

2.2 Esempi di veicoli con ‘hub motor’ ..... 13

2.3 Prestazioni e dati riguardanti la ruota motrice ..... 17

2.4 Ruote condotte e contatti striscianti ..... 23

2.5 Impianto frenante ..... 28

### CAPITOLO 3 – STRUTTURA FINALE

3.1 Supporti e guida circolare ..... 34

3.2 Modello di studio ..... 39

3.3 Soluzioni alternative ..... 46

## Conclusioni

## Bibliografia

## Introduzione

L'industria di packaging offre varie soluzioni per quanto riguarda l'imballaggio di pallets; solitamente vengono per la maggior parte utilizzati macchinari relativamente lenti funzionanti tramite bracci meccanici rotanti automatizzati, nel caso di dimensioni elevate del pallet, altrimenti per le situazioni che richiedono meno ingombro, si adoperano imballatrici manuali accompagnate da un operatore umano.



Sapendo che la velocità e la funzionalità delle macchine nell'industria insieme alla sicurezza sul lavoro degli operatori sono elementi di fondamentale importanza, lo scopo del progetto è quello di realizzare un macchinario veloce che riesca a imballare in breve tempo pallets di grosse dimensioni, quindi avente ingombro piuttosto elevato (3 metri di diametro circa) e che sia comandato esternamente dall'operatore tramite comando elettrico. In pratica l'addetto al funzionamento del macchinario non è coinvolto fisicamente nel trasporto dello svolgibobina affidato al carrello movimentato della macchina.

La difficoltà della realizzazione del carrello è soprattutto quella di garantire le alte velocità di rotazione in modo tale da avere un imballaggio estremamente performante per quanto riguarda i tempi; il problema fondamentale conseguente

all'alta velocità è quello della resistenza meccanica del telaio del carrello e della sua progettazione strutturale, in quanto le masse coinvolte nella rotazione e di conseguenza soggette ad accelerazione e forza centrifuga sono considerevoli. Altro elemento da valutare è la soluzione migliore per la movimentazione della struttura mobile, che deve soddisfare prerequisiti come minore ingombro possibile, costo basso e al tempo stesso buone prestazioni.

Il progetto prende spunto da una tipologia di macchina automatica già esistente, costituita da una guida circolare percorsa da un carrello svolgibobina che assicura l'imballaggio del pallet; le macchine di questo tipo già esistenti non raggiungono però una velocità di rotazione elevata. L'obiettivo di questo studio è stato quindi trovare un modo per assicurare una velocità di rotazione soddisfacente a un sistema svolgibobina abbastanza consistente per quanto riguarda il peso e gli ingombri.

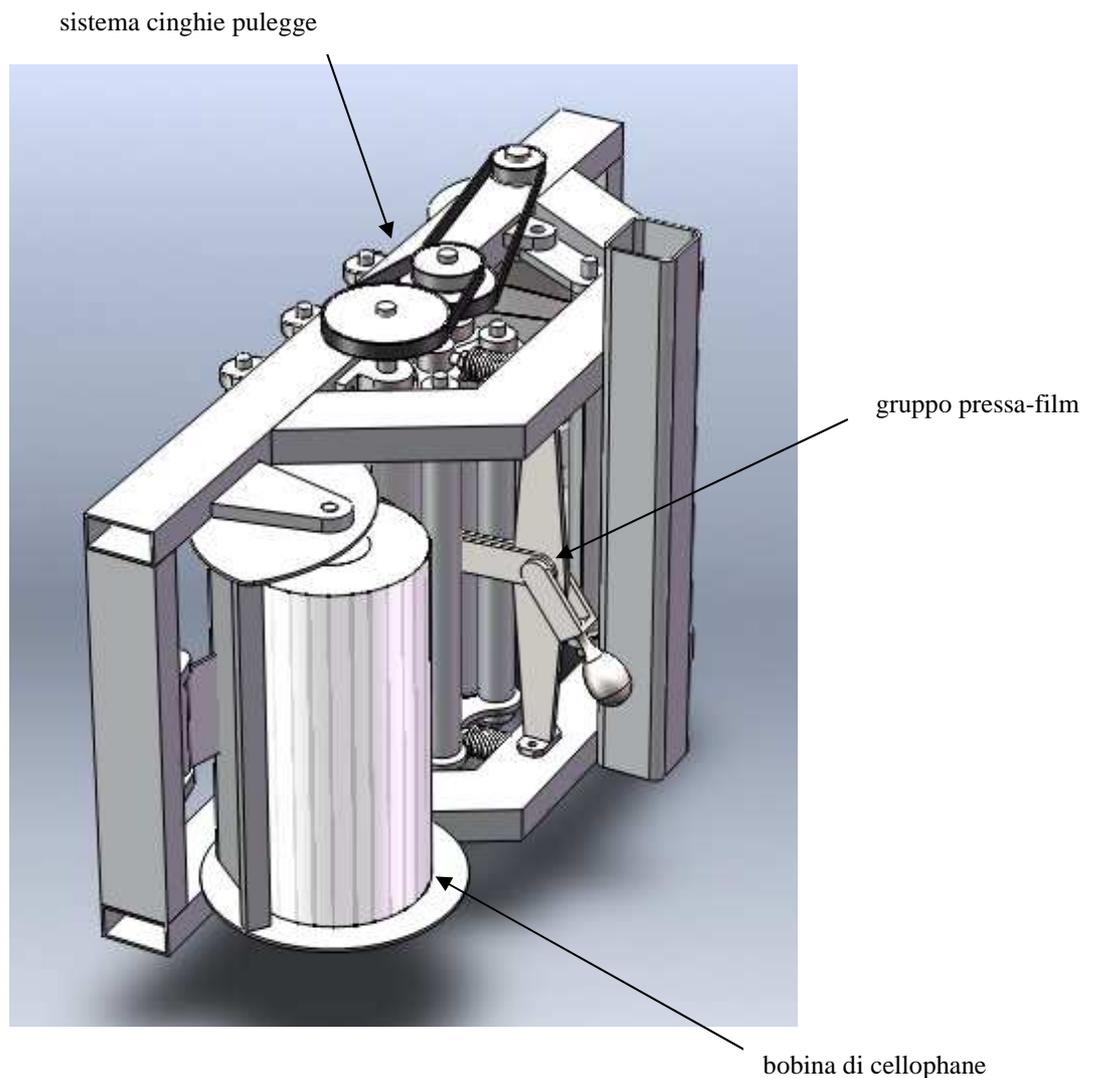


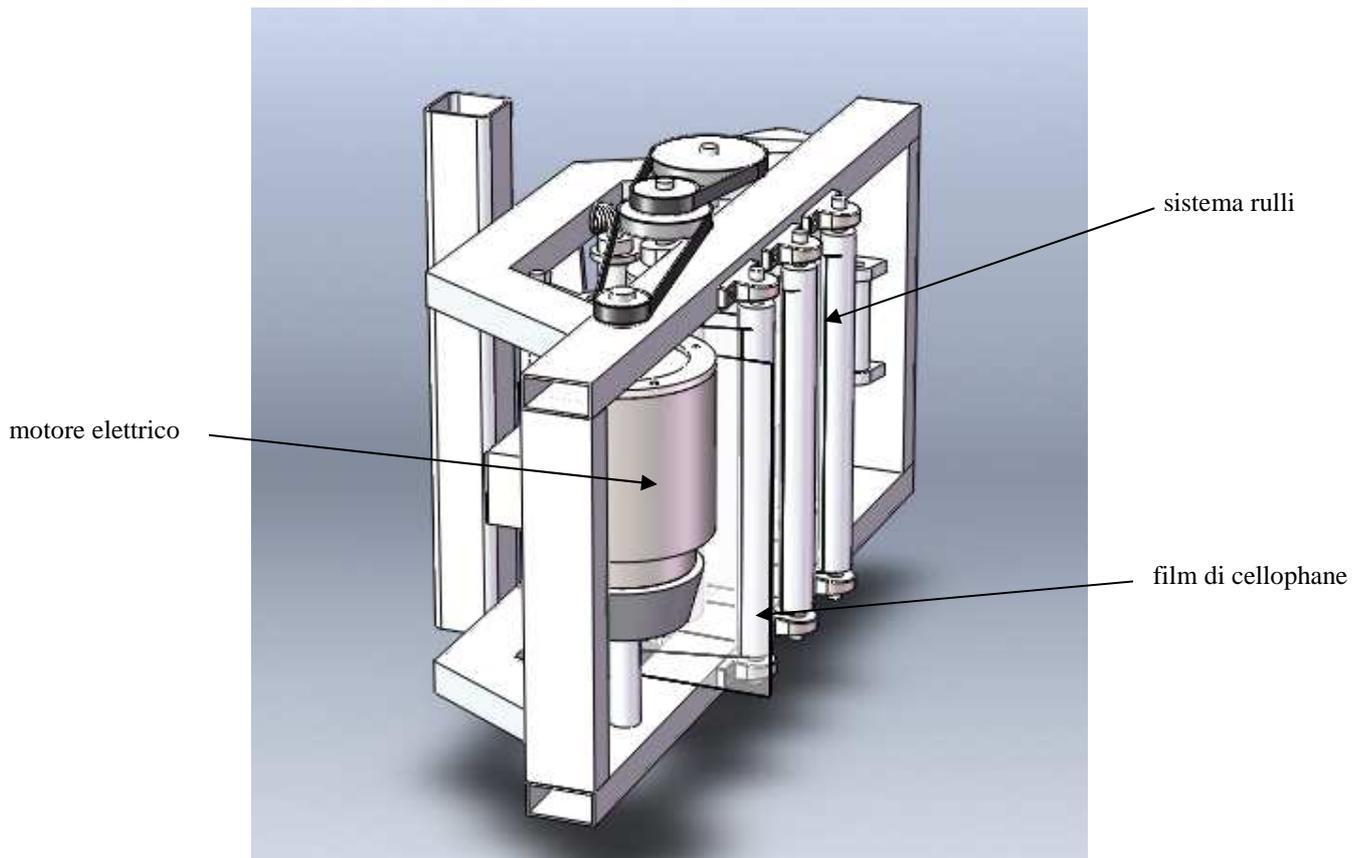
# CAPITOLO 1 - SPECIFICHE DI PROGETTO

Lo studio del progetto prevede la realizzazione di un carrello da applicare a un sistema svolgibobina di una macchina incellofanatrice automatica e la scelta degli organi per la sua movimentazione.

## 1.1 Sistema svolgibobina

Lo svolgibobina è composto da una struttura in alluminio che ne costituisce il telaio, da una serie di rulli che consentono al film di cellophane di essere svolto e di avere la corretta tensione, da un motore elettrico che attraverso una serie di pulegge e cinghie aziona i rulli; infine è presente un sistema pressa-film che permette di modificare la tensione dello strato di cellophane che si svolge dalla bobina.





Il peso complessivo della struttura è di 120 kg circa comprensivi del peso della bobina (24 kg, 500 mm in altezza), che si possono ritenere con buona approssimazione distribuiti uniformemente nello spazio occupato dalla stessa; l'ingombro complessivo è 1300 mm in larghezza, 800 mm in altezza determinati dall'elemento verticale che collega le due parti superiore e inferiore del telaio, e 480 mm di profondità.

Nelle varie tipologie di macchinari automatici per imballaggio di pallet solitamente, quando le masse in gioco sono notevoli, il motore e lo svolgi bobina sono fermi a velocità nulla; in questi casi è il pallet stesso che, appoggiato sopra un piano motorizzato girevole, ruotando su di sé viene ricoperto dalla pellicola di cellophane. Lo studio del progetto di un macchinario che ha come elemento girevole uno svolgibobina del peso di 120 kg rende sicuramente più complicata la realizzazione, a causa delle elevate forze che ne derivano, ma è l'unico modo per assicurare un'alta velocità di rotazione, non raggiungibile utilizzando macchine con piano girevole dato che il pallet non può ruotare troppo velocemente su se stesso. In altri casi per svolgere la bobina si utilizza un braccio rotante, che però

non risulterebbe adeguato a questa applicazione poiché il diametro del pallet è considerevole e il braccio raggiungerebbe una lunghezza troppo elevata.

L'idea generale per il progetto è stata quella di applicare a questa struttura un telaio e un insieme di ruote per consentire il moto dell'intero sistema su una guida circolare. Il dato più restrittivo è quello che riguarda il peso del carrello, elemento critico relativamente al tipo di applicazione che si vuole ottenere.

Una delle importanti possibilità date, per quanto riguarda la realizzazione del telaio e di come applicarlo, è quella di modificare, anche se con attenzione e solo lievemente, la struttura dello svolgibobina.

## **1.2 Prestazioni e dati progettuali**

La velocità angolare massima dello svolgibobina munito di carrello deve essere di 60 giri al minuto e il diametro della guida deve essere di circa 3 metri. Il telaio deve permettere la sistemazione di un numero di ruote adeguato (il minimo possibile) per assicurare il moto e l'equilibrio in modo che il sistema non subisca spostamenti in direzione radiale; è opportuno assicurarsi che lo svolgibobina venga vincolato non solo nel verso in cui la forza centrifuga agisce ma anche in quello opposto, ovvero è necessaria una ruota di sicurezza che permetta al carrello di essere stabile a velocità nulla e durante la partenza.

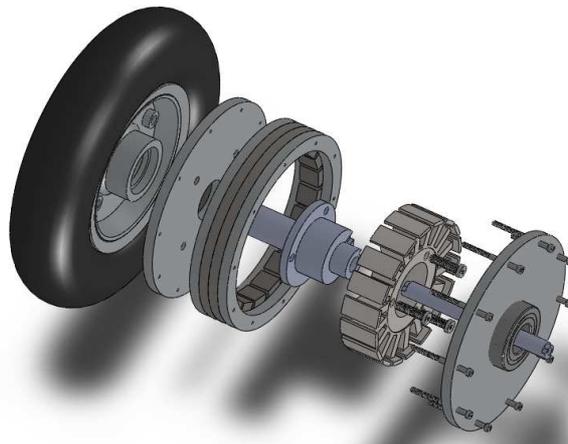
Il moto deve essere affidato a un motore elettrico e la scelta di tutti i componenti per la realizzazione del progetto deve tenere strettamente in considerazione il problema del peso, cioè optare per le soluzioni più leggere possibili.

## CAPITOLO 2 – MOVIMENTAZIONE

Il problema fondamentale per la movimentazione è la scelta del motore elettrico e di come alimentarlo. Inizialmente si era pensato di utilizzare un motore elettrico ‘brushless’ alimentato da una batteria, il quale potesse fornire la coppia a un albero e successivamente alla trazione delle ruote anteriori del carrello; tale soluzione però risulta troppo complicata e scomoda sia in termini di peso che di spazio. La soluzione meno dispendiosa è quella di utilizzare come motore una ruota motorizzata elettrica e un circuito a contatti striscianti per fornire corrente continua alla ruota; il sistema è quindi alimentato dalla corrente alternata di linea (220V), che tramite un trasformatore viene modificata in ampiezza e poi raddrizzata in continua; in sintesi si ha quindi un circuito in corrente continua formato da un generatore e un utilizzatore (costituito dalla ruota motorizzata) collegati tramite guide metalliche e contatti striscianti che assicurano la chiusura del circuito.

### 2.1 Funzionamento di una ‘hub motor’

Una ruota motorizzata, la cui traduzione letterale dall’inglese ‘hub motor’ sarebbe ‘ruota al mozzo’, è costituita essenzialmente da una parte mobile e una fissa, ovvero il rotore e lo statore. Il vantaggio fondamentale rispetto a un motore elettrico è che una ‘hub motor’ permette la movimentazione diretta senza la necessità di avere organi ausiliari per la trasmissione del moto. Le tipologie di ruote motorizzate sono varie (ad esempio con statore a contatti striscianti o con funzionamento ‘brushless’, a ingranaggi oppure senza), quella scelta per il progetto è una ruota ‘brushless’ a funzionamento diretto ovvero senza ingranaggi.



Il suo funzionamento è come quello di un motore elettrico 'brushless' ("senza spazzole") alimentato in corrente continua; a differenza di un motore elettrico a contatti striscianti (detto comunemente "a spazzole") in un motore 'brushless' la commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti non avviene per via meccanica, ovvero con l'utilizzo di spazzole, ma elettronicamente.

Il vantaggio principale di una ruota motorizzata 'brushless', rispetto a una 'a spazzole', è che si può avere una maggiore velocità di rotazione, grazie all'assenza di contatti meccanici (spazzole), i quali rendono difficile lo scorrimento tra il rotore e lo statore generando delle perdite, e inoltre possono causare la formazione alle alte velocità di pericolose scintille.

Per capire come funziona una ruota motorizzata è necessaria una descrizione delle parti costitutive di un motore elettrico a corrente continua a spazzole e non, e di come esso opera.

Una macchina elettrica motrice a spazzole in corrente continua, ovvero capace di trasformare energia elettrica in energia meccanica, si basa essenzialmente sul principio dell'induzione elettromagnetica; il circuito magnetico dei motori a corrente continua interessa sia l'induttore, cioè la parte esterna fissa che funge da telaio, detta carcassa, che l'indotto, che corrisponde alla parte interna rotante.

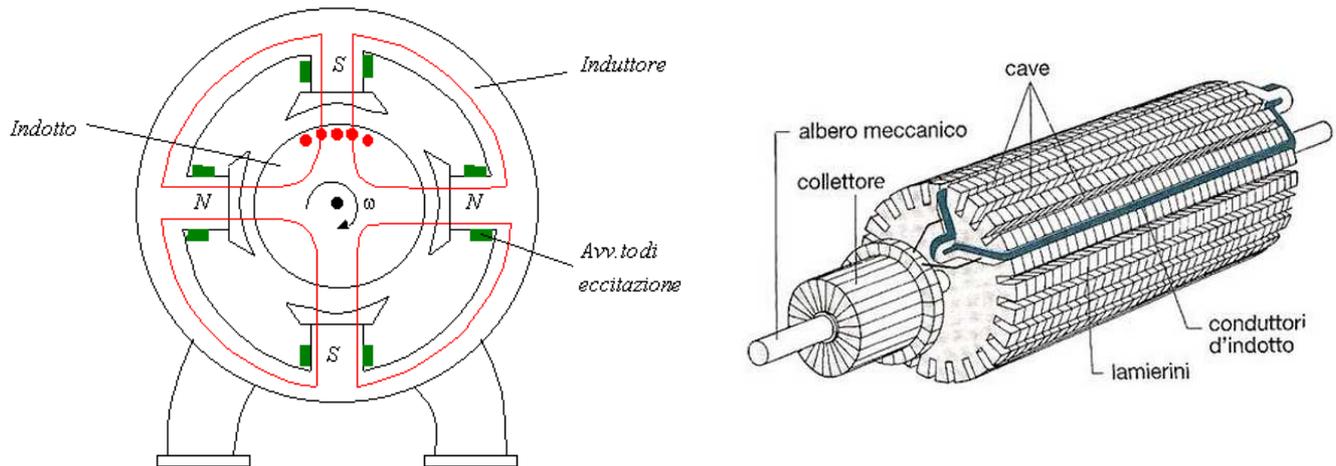
L'induttore è composto oltre che dalla carcassa, dai poli; essi sono formati a loro volta da un nucleo e da avvolgimenti di eccitazione necessari a generare il flusso magnetico.

L'altra parte di circuito magnetico è dovuta all'indotto, cioè alla parte rotante, la quale è solitamente realizzata da un insieme di lamierini metallici tranciati sotto forma di corona circolare. L'insieme dei lamierini, detto pacco, è cilindrico e porta alla periferia delle scanalature, le cave, che servono a contenere i conduttori dell'indotto, mentre all'interno esso è attraversato dall'albero motore.

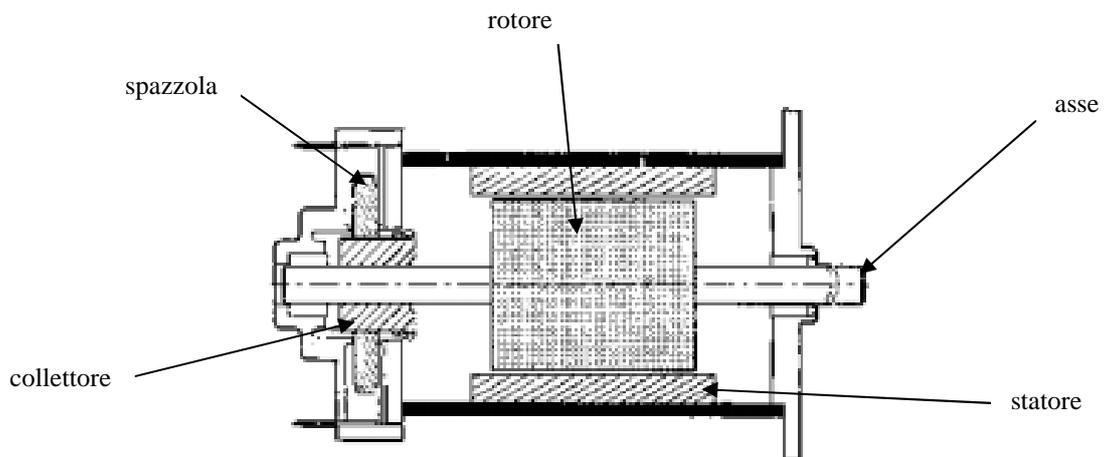
La corrente che circola nelle spire avvolte nel nucleo dei poli dell'induttore, permette la formazione di un campo magnetico così che i poli disposti radialmente rispetto alla carcassa e ugualmente distanti tra loro, assumono polarità alterne (nord-sud-nord ecc...).

Il circuito dell'indotto è formato sostanzialmente dai conduttori di indotto le cui parti attive sono quelle che si trovano alloggiare nelle apposite cave, preventivamente realizzate nella struttura magnetica di indotto. I conduttori rettilinei posti nelle cave vengono collegati anteriormente e posteriormente in

modo da formare un circuito chiuso e da avere forza elettromotrice massima ai capi del collettore; essi costituiscono un avvolgimento attorno al rotore cilindro ferromagnetico su cui sono incise le cave. Le spazzole insieme al collettore a cui sono collegate assicurano la commutazione della corrente che permette al rotore di mantenere un moto circolare all'interno dello statore.

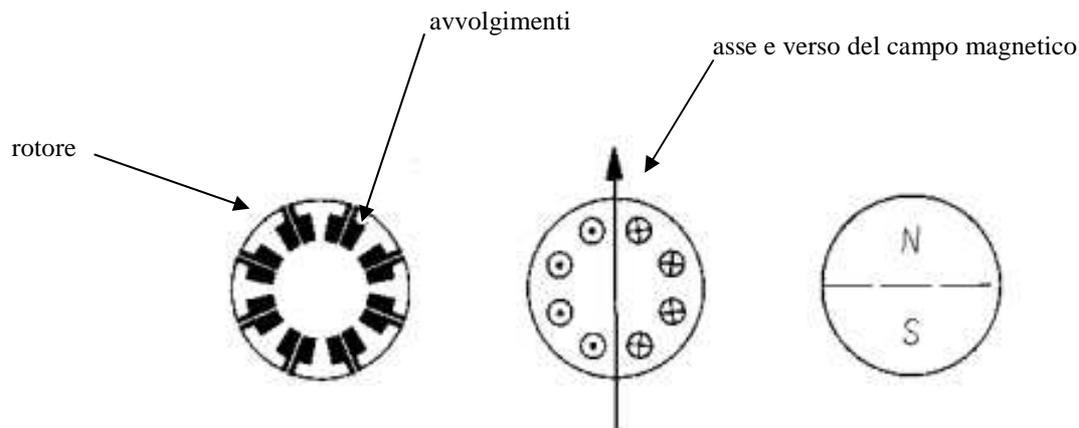


*Schema di un motore elettrico in corrente continua a spazzole e schema del rotore (indotto)*



*Sezione schematica che rappresenta un motore a corrente continua a spazzole*

Il rotore essendo costituito dagli avvolgimenti inseriti nelle cave, disposte in senso longitudinale, opera come un cilindro ferromagnetico avvolto da un solenoide; la direzione del campo magnetico che si forma collegando il collettore a un generatore esterno di corrente, la quale passerà quindi attraverso gli avvolgimenti del rotore, coincide con l'asse che divide a metà la sezione circolare dello stesso rotore .

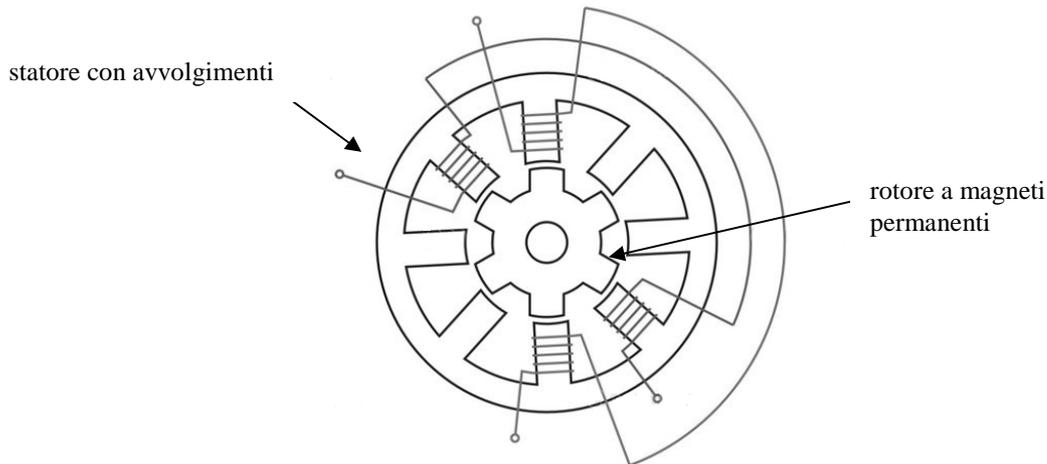


Infatti l'asse individua sulla sezione la linea di separazione in cui la corrente negli avvolgimenti del rotore cambia verso, determinando quindi la formazione di due poli nord-sud disposti, relativamente al verso della corrente, secondo la regola della mano destra. Siccome anche nello statore sono presenti poli magnetici, per effetto dell'attrazione dei poli contrari e della repulsione dei poli di stesso segno, sul rotore si genera una coppia che lo mette in moto. Questa coppia è massima quando l'asse dei poli del rotore è perpendicolare all'asse dei poli dello statore. Non appena il rotore si mette in moto le spazzole operano su lame diverse del collettore. Gli avvolgimenti del rotore sono così alimentati in maniera che l'asse dei nuovi poli del rotore sia comunque perpendicolare a quello dello statore; ovvero mentre il rotore ruota poiché i suoi poli sono attratti da quelli dello statore, la corrente negli avvolgimenti del rotore cambia di segno in corrispondenza dei capi del collettore a cui sono collegati i cavi di alimentazione. Grazie a questo continuo cambiamento di verso di corrente nei conduttori, il rotore continua a girare.

Invertendo i fili di alimentazione del motore, viene invertito anche il verso della corrente negli avvolgimenti del rotore e conseguentemente anche le due polarità. La coppia risulta in questo caso di senso contrario al precedente ed il motore

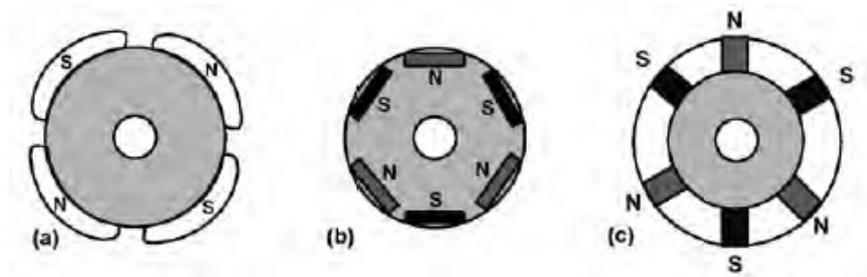
cambia il senso di rotazione. Per sua natura, il motore in corrente continua è quindi un motore a due sensi di rotazione.

La differenza del motore elettrico 'brushless' rispetto a quello 'a spazzole', come già detto, è che esso non necessita dei contatti striscianti e inoltre il rotore non è formato da un cilindro ferromagnetico avvolto da spire, ma è composto da un insieme di magneti permanenti.



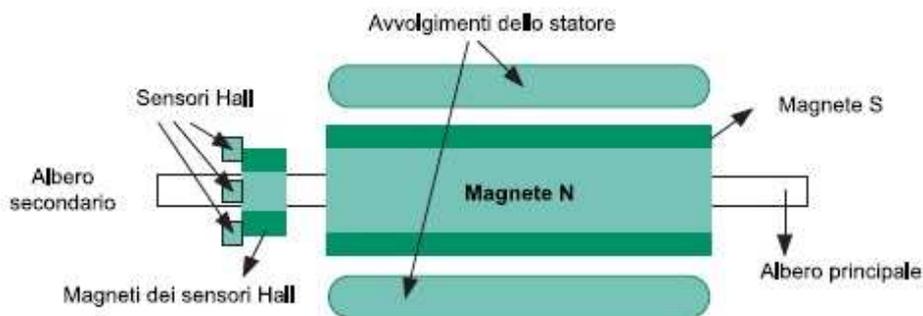
*Schema di rotore e statore di un motore 'brushless'*

Nel motore 'brushed' ("a spazzole") tramite spazzole e collettore si ottiene il cambiamento di verso della corrente necessaria a creare l'inversione di campo magnetico, mentre nel 'brushless' non è possibile regolare e controllare direttamente il campo magnetico prodotto dai magneti e l'inversione di corrente negli avvolgimenti del rotore. Per fare questo in un motore 'brushless' si utilizza un banco di transistor di potenza comandati da un microcontrollore. Il problema principale del loro pilotaggio consiste nel conoscere la posizione esatta del motore, perché solo in questo modo il controller può sapere quale fase azionare. Essendo i motori 'brushless' o BLCD un tipo particolare di motore sincrono, il campo magnetico generato dal rotore e dallo statore presentano la stessa frequenza. I BLDC si suddividono in tre categorie: a singola fase, a 2 fasi e a 3 fasi. Il numero di fasi corrisponde al numero di avvolgimenti presenti sullo statore. Il rotore è realizzato con magneti permanenti il cui numero può variare tra due e dieci coppie di poli con alternanza Nord (N) e Sud (S).



L'immagine rappresenta tre tipi di rotore di un motore 'brushless' visti in sezione: la sezione (a) raffigura un rotore con magneti sulla periferia, la (b) un rotore con magneti incorporati, la (c) un rotore con magneti inseriti. I materiali utilizzati possono essere ferrite o leghe. La prima scelta risulta più economica, la seconda consente di contenere le dimensioni

Siccome la commutazione di un BLDC è controllata elettronicamente, per muovere il rotore gli avvolgimenti dello statore (normalmente collegati a stella tra loro) devono essere energizzati in una ben precisa sequenza (ogni sequenza è costituita da 6 step). È importante, perciò, conoscere la posizione del rotore in ogni istante. Questa è rilevata, generalmente, usando sensori ad effetto Hall che sono incorporati all'interno dello statore. La maggior parte dei motori hanno tre sensori Hall. Se i poli magnetici del rotore passano vicino questi sensori, essi danno un segnale alto o basso a seconda che sia passato un polo N oppure un polo S.



In alcuni motori elettrici 'brushless' il rotore è posto esternamente allo statore, mentre solitamente è il contrario; allo stesso modo in una 'hub motor' il rotore corrisponde alla parte esterna della ruota, mentre lo statore è contenuto nel mozzo.

La funzione degli elementi costitutivi il motore di una 'hub motor' rimane però invariata rispetto al tradizionale motore elettrico e la differenza consiste solo nel fatto che essendo il mozzo vincolato al telaio, esso è obbligato nella posizione fissa di statore. Di conseguenza per una 'hub motor brushless', gli avvolgimenti controllati dal banco di transistori sono nel mozzo.

## **2.2 Esempi di veicoli con 'hub motor'**

Gli esempi applicativi più comuni di 'hub motor' sono le biciclette elettriche; la ruota motrice è solitamente quella posteriore e presenta all'interno del mozzo l'insieme di magneti e avvolgimenti del rotore e dello statore. Il mozzo è quindi formato da una parte esterna mobile e da una fissa che contiene gli avvolgimenti dello statore; la parte mobile, come avviene in una comune bicicletta, è collegata al cerchio tramite i raggi. La potenza di questi motori elettrici è solitamente dai 250 ai 1000 Watt, le tensioni a cui lavorano sono 28 36 oppure 48 Volt e il peso circa dai 5 ai 10 kg. Le velocità raggiungibili tramite biciclette elettriche spinte da questo tipo di motori sono dai 20 ai 45 km/h circa.

Oltre a semplici veicoli per uso cittadino esistono anche modelli più sofisticati e tecnologici che presentano soluzioni ricercate.





Per alimentare le 'hub motor' sono solitamente utilizzate delle batterie applicate al veicolo in vari modi, nella parte posteriore, dietro al sellino, o come nella foto sopra a sinistra collegate all'elemento obliquo del telaio.



Un altro esempio applicativo di 'hub motor' sono le motociclette e gli scooter. In particolare questi ultimi si prestano bene a essere movimentati da motori elettrici; la ruota posteriore è collegata a una batteria e assicura la trazione del veicolo. In questo caso la potenza arriva anche fino a 5 kW, la tensione a cui lavora questo tipo di ruote solitamente è di 48 V e il peso è dell'ordine dei 10-15 kg.

Gli scooter elettrici raggiungono velocità abbastanza elevate, arrivando anche fino ai 60 km/h, e permettono di percorrere tracciati di 60-80 km con una carica.



Il montaggio di una hub motor in uno scooter elettrico avviene esattamente come una comune ruota posteriore, con la differenza che invece di collegare tramite corona catena e pignone la ruota all'albero motore per la trazione si collegano i cavi dell'alimentazione ai capi della batteria.

In alcuni casi le batterie che alimentano la 'hub motor' sono ricaricate tramite 'fuel cell', ovvero celle a idrogeno. Esse permettono di tradurre l'energia chimica

liberata nella reazione di ossidoriduzione dell'idrogeno in energia elettrica sotto forma di differenza di potenziale da applicare ai capi della batteria.

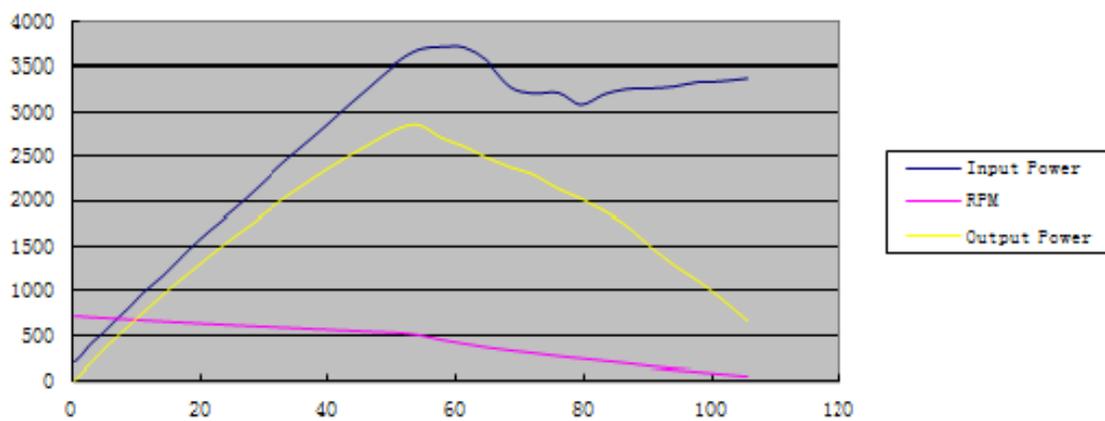
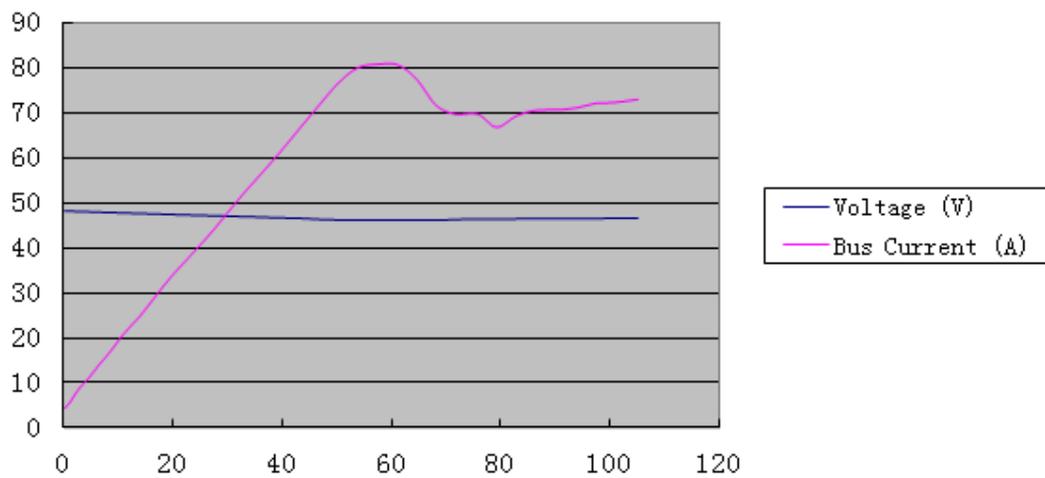
Un ulteriore campo in cui le 'hub motor' vengono utilizzate è quello delle automobili; la potenza di questi motori è in genere di 5-10 kW e si utilizzano due ruote motrici. Il peso di una di queste ruote è di circa 20 kg e la tensione è dai 36 ai 144 V; la velocità raggiungibile è fino ai 120 km/h.







Insieme al disegno e alla foto vengono allegati direttamente dalla casa costruttrice i dati generali e le prestazioni della 'hub motor', indicati nei seguenti grafici e nella tabella dei valori.



Torque (Nm)	Voltage (V)	Bus Current (A)	Input Power	RPM	Output Power	Efficiency (%)	Speed (km/h)
0,1	48,07	4,306	207	715,6	10,7	5,1	57,10488
0,1	48,06	4,321	207,7	715,7	5,35	2,5	57,11286
0,2	48,07	4,305	206,9	715,6	16,05	7,7	57,10488
0,1	48,07	4,297	206,5	715,6	10,7	5,1	57,10488
0,1	48,06	4,362	209,6	715,3	5,34	2,5	57,08094
0,2	48,06	4,465	214,6	715,3	16,04	7,4	57,08094
0,4	48,05	4,734	227,5	714	32,03	14	56,9772
1	48,03	5,584	268,2	712	74,54	27,7	56,8176
1,8	47,98	7,068	339,2	707,8	132,3	39	56,48244
2,9	47,93	8,947	428,8	702,8	210,2	49	56,08344
4,6	47,86	11,2	536,4	694,5	337,6	62,9	55,4211
6,4	47,79	14,01	669,5	687	462,4	69	54,8226
8,6	47,69	17,14	817,6	678,1	608,5	74,4	54,11238
10,8	47,59	20,74	987,3	668,5	754,9	76,4	53,3463
13,8	47,48	24,68	1172	655,2	950,5	81	52,28496
16,6	47,36	29,02	1374	644,5	1123	81,6	51,4311
19,6	47,24	33,57	1586	633,2	1297	81,7	50,52936
22,6	47,12	37,56	1770	622,2	1475	83,3	49,65156
26,3	46,99	42,46	1995	608,3	1674	83,8	48,54234
29,4	46,87	46,96	2201	597,5	1836	83,4	47,6805
32,7	46,75	51,84	2424	586,7	2005	82,7	46,81866
35,9	46,63	56,18	2620	576,4	2163	82,5	45,99672
39,3	46,49	60,88	2830	566	2328	82,2	45,1668
43,2	46,35	66,57	3086	552,4	2499	80,9	44,08152
46,8	46,12	71,8	3312	540,5	2647	79,9	43,1319
50,3	45,97	76,7	3526	529,4	2787	79	42,24612
53,9	45,97	80,12	3683	505,8	2852	77,4	40,36284
57,7	45,97	80,93	3721	447,1	2701	72,6	35,67858
61,3	45,95	80,74	3711	405,7	2603	70,1	32,37486
64,7	45,99	77,57	3568	365,8	2478	69,4	29,19084
68,3	45,9	71,73	3293	332,1	2374	72,1	26,50158
71,8	46,09	69,81	3217	304,9	2293	71,2	24,33102
75,9	46,17	69,84	3225	267,9	2129	66	21,37842
79,4	46,2	66,86	3089	242,7	2018	65,3	19,36746
83	46,22	69,37	3207	216,6	1882	58,6	17,28468
86,4	46,25	70,62	3266	191,8	1735	53,1	15,30564
90,5	46,3	70,75	3276	156,3	1481	45,1	12,47274
94	46,33	71,16	3296	130,6	1285	38,9	10,42188
97,6	46,32	72,2	3345	109,2	1116	33,3	8,71416
100,9	46,34	72,36	3353	88,4	934,1	27,8	7,05432
105,4	46,34	73,07	3386	59,9	661,1	19,5	4,78002

Per determinare il tempo che il carrello impiega a raggiungere la velocità massima richiesta, pari a 60 rpm in una circonferenza di raggio 1.5 m, bisogna ricavare punto per punto l'accelerazione in relazione ai valori di coppia e velocità presenti nella tabella. Il calcolo da fare preventivamente è quello che riguarda la velocità periferica massima; conoscendo la velocità angolare  $\omega$  (  $60 \text{ rpm} = 60 \cdot 2\pi / 60 \approx 6.3 \text{ rad/sec}$  ), si ricava :

$$v = \omega R = 6.3 * 1.5 \approx 9.5 \text{ m/sec} \approx 35 \text{ km/h}$$

Se si prendono in considerazione i valori della tabella ci si accorge che il valore di velocità richiesto è nettamente inferiore di quello massimo raggiungibile dalla ruota motorizzata (praticamente la metà); è però bene avere in questi casi un margine di sicurezza abbastanza elevato, anche perché può capitare che i dati del costruttore siano ricavati per estrapolazione e possono non essere completamente corretti in una applicazione pratica. Esistono 'hub motor' dello stesso tipo di quella scelta ma con potenza inferiore (1.5 o anche 0.8 kW), è preferibile però avere una potenza superiore anche per assicurare una maggiore accelerazione del sistema, così da raggiungere la situazione di regime ( $\omega = 60\text{rpm}$ ) in un tempo breve.

Conoscendo la massa totale del carrello che tiene conto anche del peso delle ruote e del telaio per collegarle alla struttura dello svolgi bobina, si ricavano i valori dell'accelerazione utilizzando la seguente equazione :

$$F = m a = C / r$$

C rappresenta la coppia, r il raggio della ruota motorizzata, m la massa totale del carrello e a l'accelerazione; quindi in conclusione la formula da utilizzare è :

$$a = C / ( r m )$$

Si considerino i valori di velocità da 4.7 a 7.0 km/h, presenti nella tabella partendo dal basso e i corrispettivi valori di coppia, ovvero da 105.4 a 100.9 N m.

Come è chiaro sia dalla tabella che dai grafici allegati, all'aumentare della velocità la coppia alla ruota diminuisce, quindi di conseguenza anche il valore di accelerazione diminuisce; il grafico accelerazione-tempo che ne deriva avrà il massimo valore di accelerazione per  $t=0^+$ , cioè nell'istante in cui il carrello parte, per poi scendere verso valori più vicini allo zero.

Inserendo nella formula i valori di coppia dati dalla casa costruttrice, con :

m = massa totale del carrello = 170 kg ;

r = raggio ruota motrice = 5 pollici = 127 mm ;

è possibile creare una tabella di valori ricavando l'accelerazione.

Velocità ( km/h )	Coppia ( N m )	Accelerazione ( m/s <sup>2</sup> )
4.7	105.4	4.9
7.0	100.9	4.7
8.7	97.6	4.5
10.4	94.0	4.4
12.4	90.5	4.2
15.3	86.4	4.0
17.2	83.0	3.8
19.3	79.4	3.7
21.3	75.9	3.5
24.3	71.8	3.3
26.5	68.3	3.2
29.1	64.7	3.0
32.4	61.3	2.8
35.6	57.7	2.7

I valori di velocità e coppia riportati dalla tabella iniziale sono stati approssimati a un decimale ‘dopo la virgola’ utilizzando il metodo di troncamento e non quello di approssimazione al decimale superiore, poiché è meglio considerare valori minori, in modo tale che la stima del tempo necessario a raggiungere la velocità di 60 giri a minuto sia la più alta possibile.

L’accelerazione ricavata è un’accelerazione puntuale, ovvero relativa ai valori di coppia e velocità corrispondenti; è opportuno quindi calcolare il valore medio di accelerazione per ogni intervallo compreso tra due valori di velocità e ricavare poi il tempo  $\Delta t$ . Il calcolo è il seguente :

$$\Delta t = \Delta v / a_m = ( v_{n+1} - v_n ) / [ ( a_n + a_{n+1} ) / 2 ]$$

Dove  $a_m$  è l’accelerazione media.

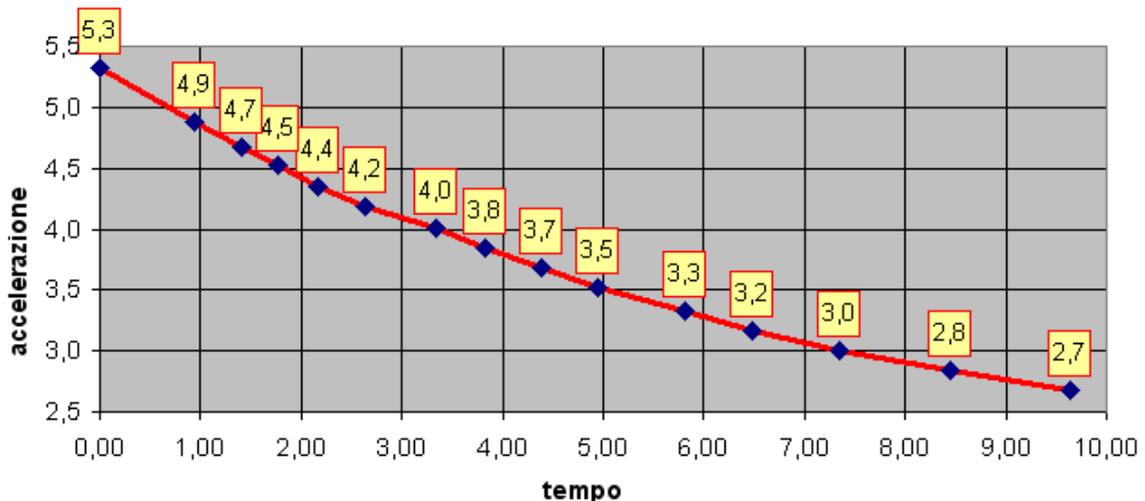
In questo modo sono stati calcolati i valori di tempo per ogni intervallo; la loro somma corrisponde al tempo totale in cui la macchina raggiunge i 35 km/h.

La tabella data dal costruttore insieme alla ruota motorizzata è priva di valori di coppia riguardanti velocità inferiori a 4.7 km/h; per ricavare un grafico accelerazione tempo è necessario avere l'accelerazione anche prima di tale valore, quindi si è supposto inizialmente che dagli 0 ai 4.7 km/h l'accelerazione fosse costante e pari al valore di 4.9 m/s<sup>2</sup> (primo valore ricavato). In questo modo la curva del grafico accelerazione-tempo che si ricava non è coerente, nel senso che il primo tratto è parallelo all'asse delle ascisse (accelerazione costante), poi segue un andamento che tende all'asintoto  $x = 0$ .

Per avere un andamento omogeneo i valori dell'intervallo da 0 a 4.7 km/h sono stati estrapolati, considerando una pendenza di tale intervallo uguale a quella dell'intervallo successivo; si ottiene così una coppia iniziale  $C_0$  pari a 114.9 N m e un'accelerazione  $a_0$  di 5.3 m/s<sup>2</sup>, corrispondente al valore  $v_0 = 0$ .  $\Delta t_1$

Intervallo di velocità ( m/ s )	Accelerazione media ( m/s <sup>2</sup> )	$\Delta t$ ( s )
$\Delta v_1 = v_1 - v_0 = 4.7$	$a_{m1} = ( a_{m0} + a_{m1} ) / 2 = 5.10$	$\Delta t_1 = 0.92$
$\Delta v_2 = 2.3$	$a_{m2} = 4.80$	$\Delta t_2 = 0.48$
$\Delta v_3 = 1.7$	$a_{m3} = 4.60$	$\Delta t_3 = 0.37$
$\Delta v_4 = 1.7$	$a_{m4} = 4.45$	$\Delta t_4 = 0.38$
$\Delta v_5 = 2.0$	$a_{m5} = 4.30$	$\Delta t_5 = 0.47$
$\Delta v_6 = 2.9$	$a_{m6} = 4.10$	$\Delta t_6 = 0.71$
$\Delta v_7 = 1.9$	$a_{m7} = 3.90$	$\Delta t_7 = 0.49$
$\Delta v_8 = 2.1$	$a_{m8} = 3.75$	$\Delta t_8 = 0.56$
$\Delta v_9 = 2.0$	$a_{m9} = 3.60$	$\Delta t_9 = 0.56$
$\Delta v_{10} = 3.0$	$a_{m10} = 3.40$	$\Delta t_{10} = 0.88$
$\Delta v_{11} = 2.2$	$a_{m11} = 3.25$	$\Delta t_{11} = 0.68$
$\Delta v_{12} = 2.6$	$a_{m12} = 3.10$	$\Delta t_{12} = 0.84$
$\Delta v_{13} = 3.3$	$a_{m13} = 2.90$	$\Delta t_{13} = 1.14$
$\Delta v_{14} = 3.2$	$a_{m14} = 2.75$	$\Delta t_{14} = 1.16$

Il tempo totale è di 9.64 secondi approssimabili a circa 10 secondi. Il calcolo svolto, utilizzando l'accelerazione media può essere considerato corretto, visto che i valori di accelerazione che determinano gli intervalli sono valori vicini.



## 2.4 Ruote condotte e contatti striscianti

Per assicurare la completa stabilità del sistema sono state scelte oltre alla ruota motrice, una ruota con cerchio da 10 pollici di uno scooter e due ruote con cerchi in lega da 13 pollici di una automobile.

La ruota da 10 serve insieme alla 'hub motor' a sorreggere la struttura in senso verticale, mentre le restanti ruote servono per assicurare l'equilibrio in senso orizzontale, creando un vincolo alla forza centrifuga.

La presenza di pneumatici nelle ruote permette anche di ammortizzare eventuali colpi subiti durante il moto del carrello che possono essere ad esempio causati dalla presenza di elementi estranei sulla guida; l'effetto non è chiaramente paragonabile a quello dato da un ammortizzatore, ma è sufficiente per questa applicazione.

Quando il carrello è fermo sulla guida e mentre accelera a bassa velocità è necessario assicurare l'equilibrio orizzontale anche nel verso opposto alla forza che si oppone a quella centrifuga; per questo motivo è stata montata anche una ruota industriale a rullo per carrelli dal diametro pari a 80.

Questa ruota è capace di sopportare carichi molto meno elevati rispetto alle altre ed è stata progettata per arrivare a velocità di circa 10 km/h; a velocità superiori il carrello è soggetto a una forza centrifuga che lo costringe in una posizione in cui la ruota di sicurezza non è a contatto con la guida e in cui non subisce carichi.

Tuttavia la ruota di sicurezza non dovrebbe mai venire a contatto con la guida, ed è stata inserita esclusivamente per avere la certezza che il carrello rimanga sempre vincolato ad essa. Quindi per quanto riguarda questa ruota visto l'uso che se ne deve fare le sue caratteristiche sono comunque sufficienti.



È opportuno calcolare la vita utile delle ruote in relazione ai chilometri percorsi dal carrello in un anno; considerando che la macchina incellofanatrice è inserita in una catena automatica, che le ore giornaliere di funzionamento della catena sono 20 e i giorni lavorativi all'anno sono 220 si ha:

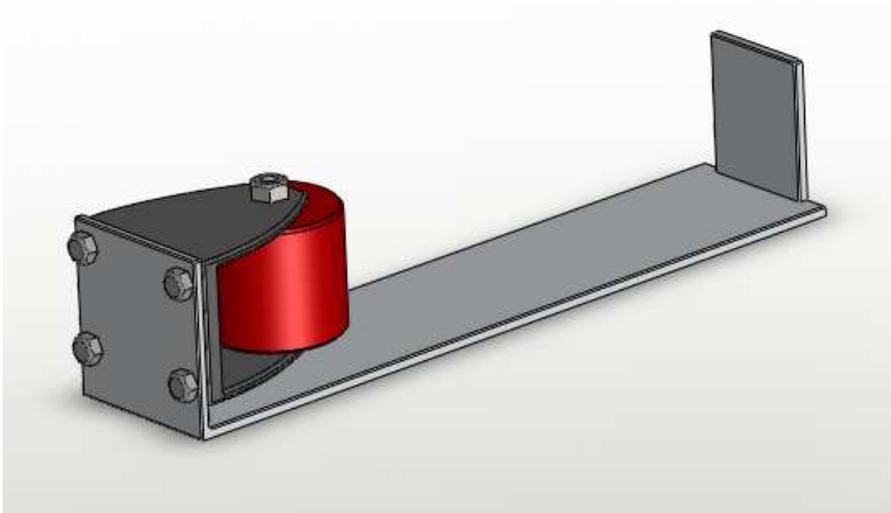
$$\text{km/anno} = n * 60 * 20 * p * 2\pi R * 220 / 1000$$

Dove n è il numero di giri massimo pari a 60 rpm, 60 sono i minuti all'ora, R il raggio della guida pari a 1.5 metri, 1000 è il fattore di conversione da metri a chilometri, infine p è un coefficiente che determina la percentuale di tempo in cui il carrello gira alla velocità massima ed è pari a 0.15. Infatti la maggior parte del tempo di funzionamento il carrello non è alla velocità massima, ma accelera e appena arriva ai 60 rpm decelera per poi fermarsi.

Il risultato finale è di circa 22400 Km all'anno; ciò significa che per quanto riguarda gli pneumatici da automobile essi sono da sostituire circa ogni due anni, quelli da scooter ogni anno; la ruota di sicurezza, siccome ha un rivestimento in

poliuretano e viene azionata solo in casi eccezionali, è soggetta a un'usura minore, per cui è da sostituire solo se necessario.

La ruota di sicurezza è già fornita del supporto comprensivo del piano di attacco con i fori per le viti; per collegare l'insieme rullo supporto allo svolgi bobina si è pensato di utilizzare una staffa a 'C' in alluminio direttamente saldata allo svolgibobina.



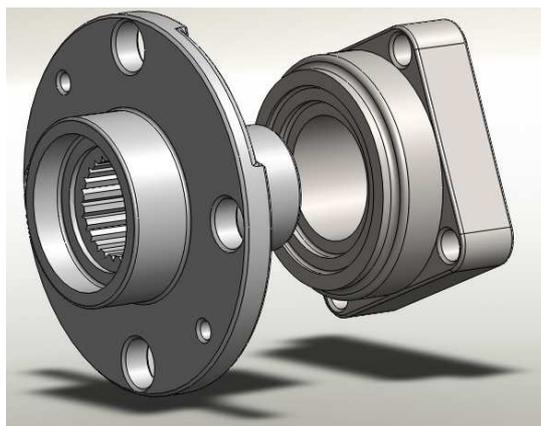
Di seguito riportiamo la foto del rullo di sicurezza dotato anche della piastra per collegarlo alla struttura del carrello. Le caratteristiche del rullo sono indicate nella tabella seguente relativa al catalogo di una ditta che produce ruote industriali per carrelli. Il rullo scelto è quello più leggero da 3.35 kg.



 mm	 mm	 mm	 mm		
Altezza da terra	Dim. piastra	Interasse fori	Ø fori piastra	Portata max (con supporto)	Peso complessivo
<i>Overall height</i>	<i>Top plate size</i>	<i>Plate holes spacing</i>	<i>Plate holes diameter</i>	<i>Max load cap. (with support)</i>	<i>Global weight</i>
132	100x85	80x60	13	650	3,350
132	100x85	80x60	13	700	3,450
132	100x85	80x60	13	650	3,370
135	100x85	80x60	13	750	3,410

Le ruote da 13 pollici, sono fornite di un mozzo per auto Fiat Panda, in modo da assicurare il rotolamento delle stesse sulla guida circolare. Si è scelto di utilizzare il mozzo delle ruote anteriori dell'auto poiché presentano una piastra rettangolare che garantisce un collegamento semplice ed efficace con altri organi, nel nostro caso il telaio di collegamento tra le ruote e lo svolgi bobina. L'alloggio dell'albero a profilo scanalato all'interno del mozzo, che durante il funzionamento dell'auto serve per trasmettere la coppia motrice dal semiasse alle ruote, non contribuisce come si potrebbe pensare al rotolamento della ruota durante il moto del carrello; è sufficiente infatti assemblare il mozzo tramite collegamento bullonato da un lato alla ruota e dall'altro a telaio.





Il motore elettrico dello svolgibobina e la 'hub motor' per funzionare devono ricevere all'esterno energia sottoforma di corrente continua; l'unico modo di chiudere un circuito in cui una macchina motrice elettrica, è in moto, è quello di utilizzare una batteria oppure contatti striscianti in rame e piste metalliche.

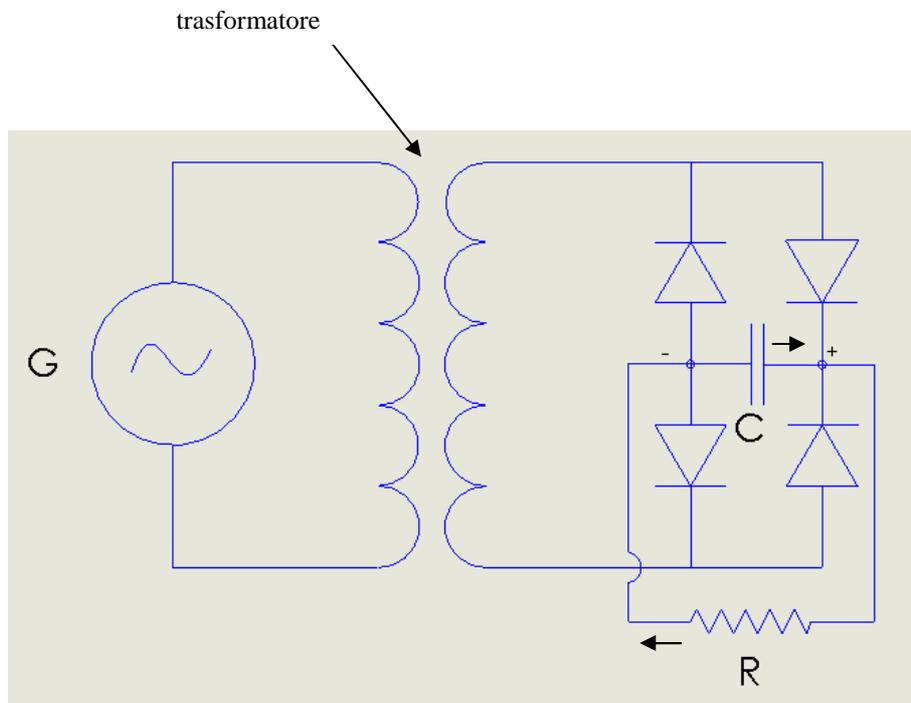
Siccome la differenza di potenziale a cui lavorano i motori è differente, cioè 48 V quella della 'hub motor' e 220 V quella del motore elettrico, saranno necessarie due coppie di piste metalliche, e due trasformatori di corrente. Le piste metalliche possono essere direttamente collegate alla guida del carrello interponendo tra esse guaine isolanti.

Solitamente nel caso di un utilizzatore in corrente continua si identifica con il nome di trasformatore l'elemento che oltre a modificare la tensione ai capi del circuito, svolge implicitamente la funzione di modificare la corrente da AC in DC. Nel caso del motore elettrico che aziona i rulli per svolgere la bobina, servirà solamente l'elemento raddrizzatore di corrente e non un trasformatore vero e proprio, poiché la tensione a cui lavora è già a 220 Volt.

Lo schema del circuito, valido per ognuno dei due circuiti separati, uno per la ruota motorizzata e uno per il motore elettrico, è molto semplice ed è formato da un generatore e da un utilizzatore; si può supporre che i motori ricevano direttamente potenza da un generatore in corrente alternata, che rappresenta la disponibilità di potenza data dalla linea elettrica.

Riferendosi allo schema di pagina 28, G rappresenta il generatore in corrente alternata, R il resistore, che in questo caso particolare rappresenta o la ruota motorizzata o uno dei due motore elettrici, C un condensatore; gli elementi rappresentati da figure triangolari sono diodi, mentre l'elemento formato da una

serie di semicerchi accostati tra loro identifica il trasformatore. Quest'ultimo permette di modificare l'ampiezza della sinusoide che rappresenta l'andamento della corrente alternata fornita dal generatore; successivamente il circuito formato dal condensatore e dai diodi permette di raddrizzare la corrente in continua.



Il funzionamento del ponte formato dai diodi è il seguente. La corrente alternata che circola dopo il trasformatore arriva prima in un verso di percorrenza del circuito e poi da un altro; la disposizione dei diodi, che permettono il passaggio della corrente solo nel verso della freccia, assicura che la corrente passi nel condensatore sempre nella stessa direzione. In questo modo il condensatore può assorbire energia e fornirla poi con continuità al resistore.

## 2.5 Impianto frenante

Quando il pallet viene inserito all'interno della guida, il carrello deve accelerare fino ad arrivare alla velocità massima mentre lo avvolgibobina è in funzione; poi deve rallentare e fermarsi. Durante il funzionamento normale della macchina, per fermare il carrello è sufficiente invertire il verso della corrente a monte del circuito in modo tale che la ruota motorizzata abbia coppia opposta a quella

iniziale, e assicuri una frenata graduale del sistema. Il tempo di frenata sarà il medesimo di quello calcolato per l'accelerazione.

In situazioni critiche di pericolo o emergenza è opportuno avere un impianto frenante abbastanza potente da fermare la macchina in un tempo più breve possibile nei limiti di aderenza delle ruote. La soluzione migliore e più semplice è quella di utilizzare l'impianto frenante di uno scooter.



Oltre ai due dischi, di cui le ruote superiori del carrello, ovvero la 'hub motor' e la ruota condotta da 10 pollici, sono già fornite, sono necessarie due pinze freni e il sistema a leva comprensivo della pompa.



Schematicamente il sistema frenante è costituito da due molle che tengono premute le leve del freno, ovvero mantengono le ruote frenate; quando si accende la macchina, viene fornita corrente anche a un compressore di piccole dimensioni che spinge i pistoni di un attuatore pneumatico direttamente collegato alle leve dei freni.

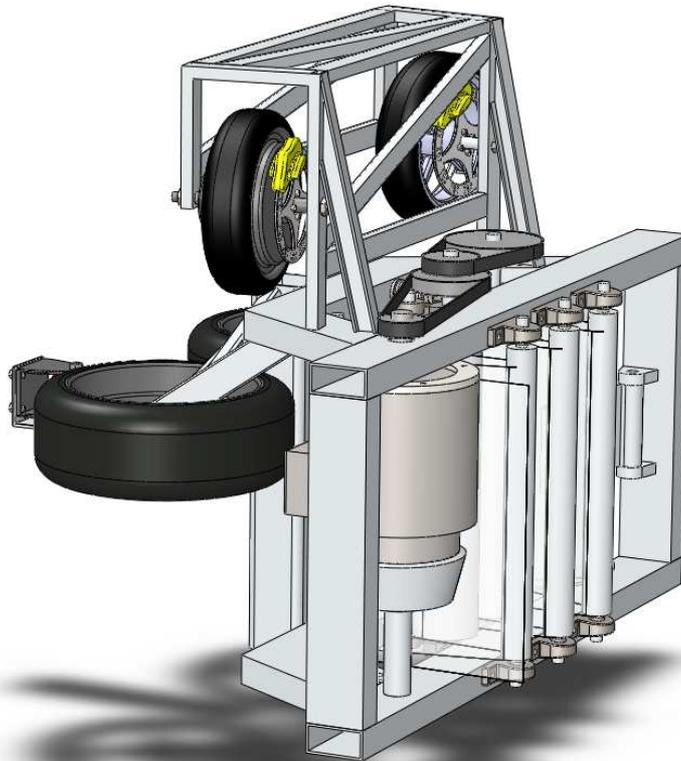
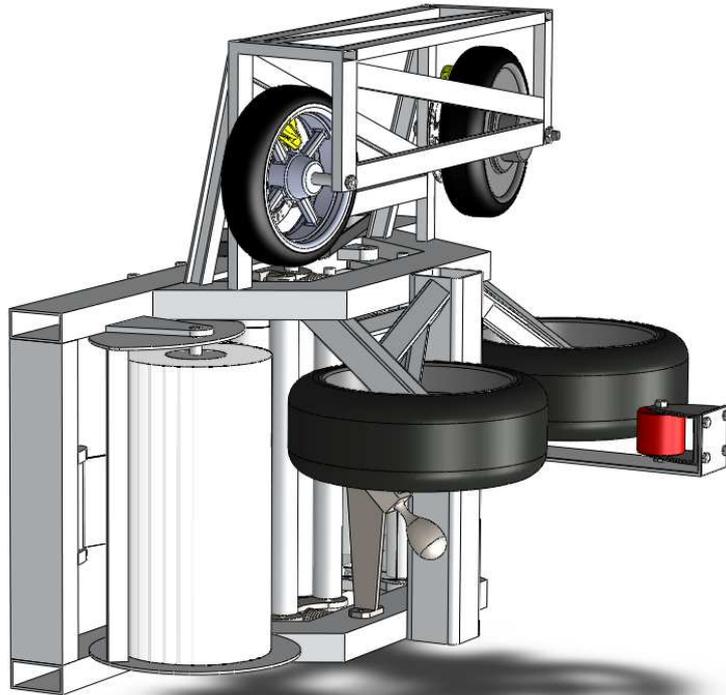


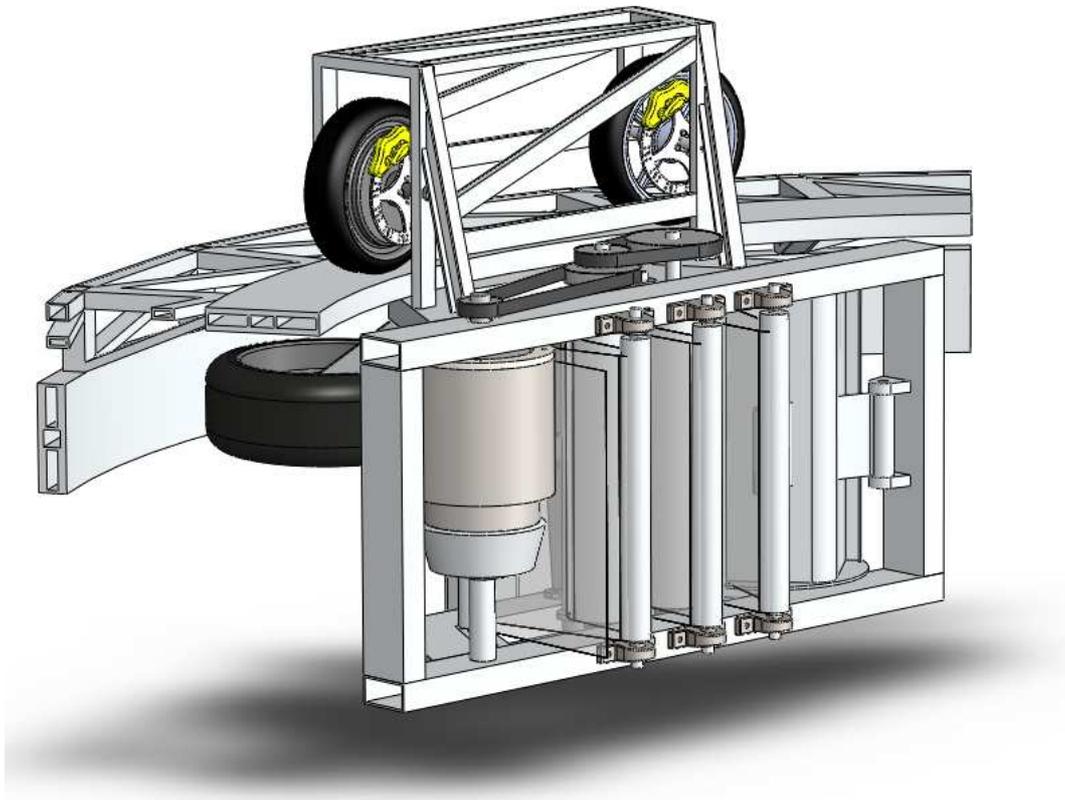
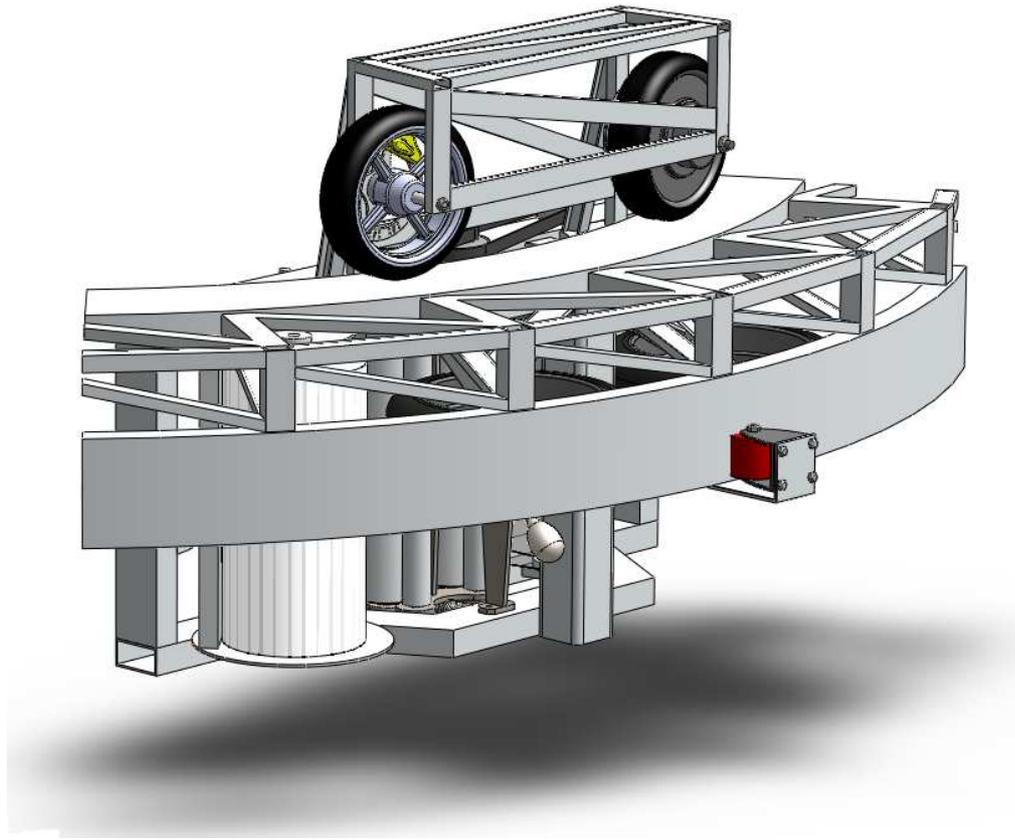
Il flusso d'aria che proviene dal compressore è regolato da una valvola. La resistenza elastica della molla è vinta dall'azione dell'attuatore e le ruote possono muoversi liberamente. In linea di massima il funzionamento del sistema è il seguente. Quando la macchina è in moto il compressore è sempre funzionante e la forza delle molle è contrastata da quella dell'attuatore. Quando la macchina è spenta oppure quando viene premuto il tasto di sicurezza, che apre il circuito elettrico impedendo il passaggio di corrente, si spegne conseguentemente anche il compressore, quindi la forza elastica delle molle non è contrastata da quella dell'attuatore e può agire sulle leve. Considerando la velocità con cui si muove il carrello, ovvero 35 km/h, e il peso totale di 170 kg, si può dire che un impianto frenante di sicurezza di questo tipo sia affidabile. Per regolare la frenata si agisce sulla rigidità della molle; molle più rigide spingono più a fondo le leve e si ha quindi una frenata veloce. L'ideale è raggiungere un compromesso in modo tale da avere una frenata in tempi brevi e totale aderenza delle ruote.

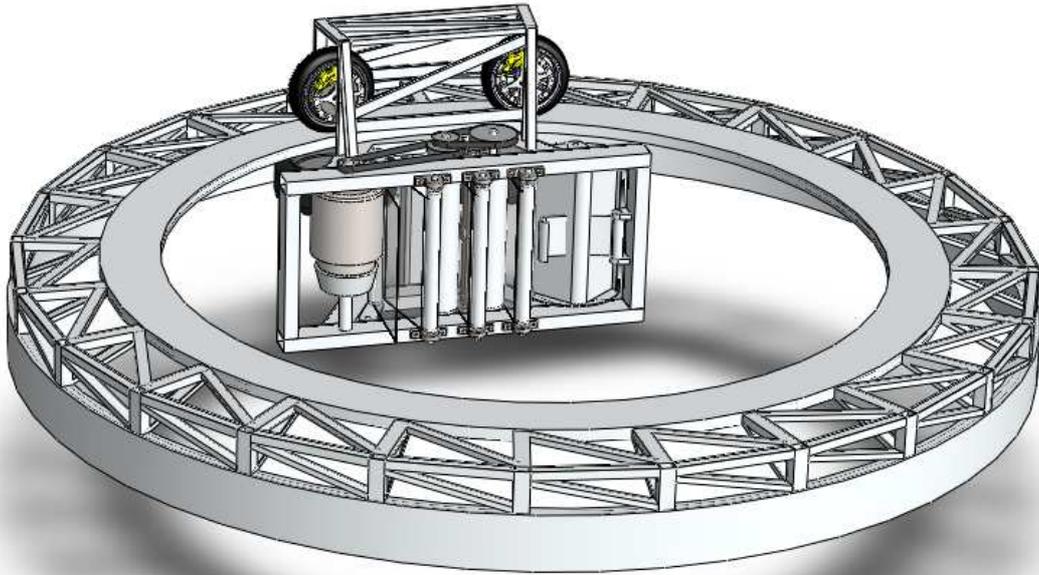
Siccome anche il compressore necessita di corrente continua si può fornire corrente continua, come nel caso del motore elettrico per lo svolgibobina e della ruota motorizzata, tramite contatti striscianti.

## CAPITOLO 3 – STRUTTURA FINALE

L'aspetto del carrello svolgibobina al termine dello studio è il seguente :







Gli elementi che costituiscono il telaio progettato per collegare lo svolgibobina alle ruote sono sostanzialmente di due tipi, un supporto superiore e uno disposto orizzontalmente. In totale si hanno tre elementi, due per collegare le ruote da 13 pollici alla struttura portante e uno superiore per connettere a telaio la ruota motorizzata e quella da 10 pollici. È opportuno determinare il peso di ogni elemento che costituisce il carrello per verificare il valore del peso finale :

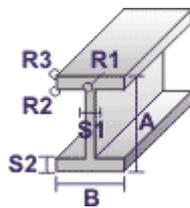
- massa svolgibobina = 120 kg ;
- massa ruote auto (cerchio e pneumatico) = 2 \* 8 kg ;
- massa ruota scooter (cerchio e pneumatico) = 3 kg ;
- massa ruota motorizzata = 31 libbre  $\approx$  14 kg ;
- massa supporto superiore = 4.8 kg ;
- massa supporti orizzontali = 2 \* 2 kg ;
- massa sistema di sicurezza (rullo e supporto) = 4 kg ;
- massa mozzo auto = 2 \* 2 kg ;
- massa impianto frenante = 4 kg ;

La massa finale è di circa 170 kg; l'ingombro totale è di 1300 mm in lunghezza, 1060 in larghezza, 935 mm in profondità.

### 3.1 Supporti e guida circolare

I supporti e la guida sono formati da tubi di alluminio, le cui misure geometriche delle sezioni sono state scelte tra quelle già in commercio, presenti nei cataloghi di varie aziende.

Le tipologie di profilati scelti sono due, a sezione rettangolare cava, raggiata e a spigoli vivi, e a sezione ad 'H' raggiato.



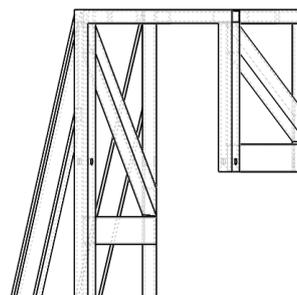
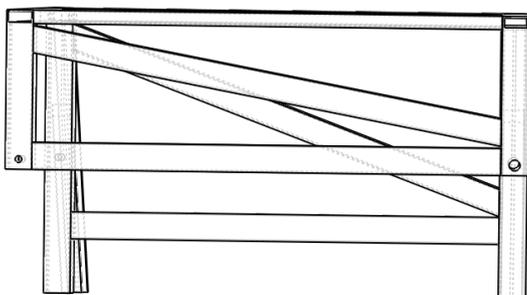
A	B	S1	S2	R1	R2	R3	lega	Kg/m
7	19.25	1.25	1.25	0.25	0.25	0.25	6060	0,15
11.8	15.4	1.4	1.4	0	0	0.5	6060	0,15
15	8	1.2	1.5	0.2	0.8	0.8	6060	0,10
19.3	35.5	1.5	1.5	0.5	0	0	6060	0,35
22	70	9	3.5	0.5	0	0	6060	1,69
25	25	4	2	2	0	0	6060	0,50
36	30	4	4	0	2	0	6060	0,95
40	50	4	4	4	0	0	6060	1,43
40	87	3	3	2	0	0	6060	1,68
50	40	3.7	4	3.5	0	3	6060	1,28
52	22	2.5	2.2	0.3	0.3	0.3	6060	0,58
80	42	4	6	4	0.6	0.6	6060	2,10
80	50	5	5	5	0.62	0.62	6060	2,30
82	145	3	6	0.5	0.5	0.5	6060	5,27
100	50	5	7	4	0.6	0.6	6060	3,05



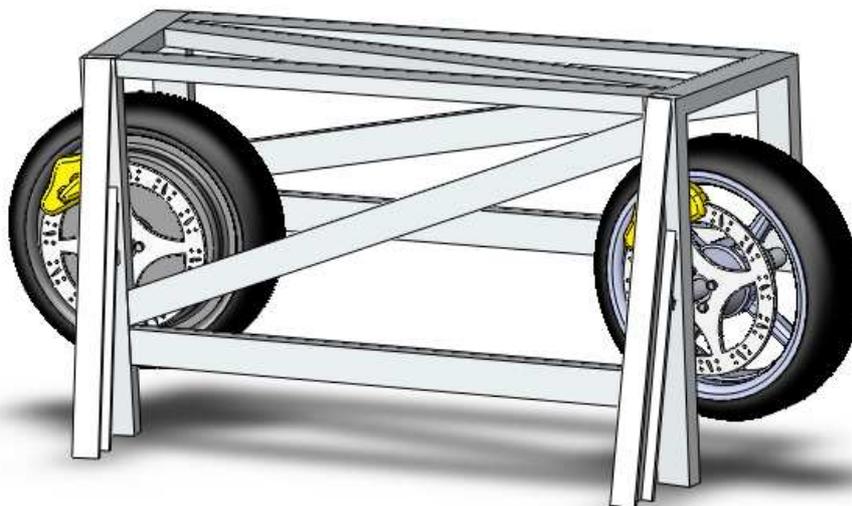
## TUBO RETTANGOLARE A SPIGOLI VIVI LEGA 6060 - UNI 9006-1

Larghezza (mm)	Altezza (mm)	Spessore (mm)	Peso (Kg) al metro
40	20	1,2	0,373
40	20	1,5	0,462
40	20	2	0,606
40	20	2,5	0,742
40	20	3	0,875
40	20	4	1,123
40	25	1,5	0,502
40	25	2	0,659
40	25	2,5	0,812
40	25	3	0,956
40	30	1,5	0,543
40	30	2	0,713
40	30	2,5	0,877
40	30	3	1,037
40	30	4	1,339
40	35	2,5	0,945
41	22	1,5	0,457
42	15	2	0,572
43	23	3,5	1,115
45	15	2	0,605
45	20	2	0,659
45	20	3	0,956

Il supporto superiore è composto da due travi oblique con sezione a 'H' di dimensioni 36 x 30 x 4 x 4 ( altezza,larghezza, spessore anima, spessore ali) e da una serie di travi a sezione rettangolare cava di dimensioni 40 x 20 x 2 e 40 x 20 x 4 (altezza, larghezza, spessore); tutti gli elementi sono collegati tra loro mediante saldatura.

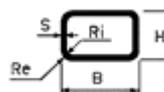


Il supporto è collegato direttamente alle ruote mediante fori di dimensioni pari a quelle dei perni della ruota da 10 pollici e di quella motorizzata, i quali hanno rispettivamente diametro di dimensioni 10 e 16 mm.



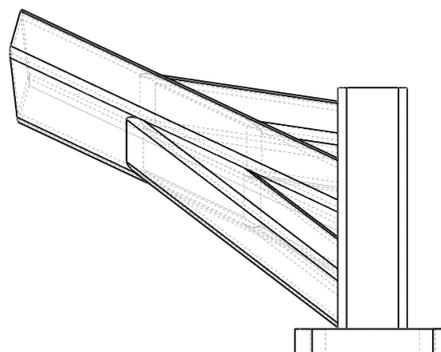
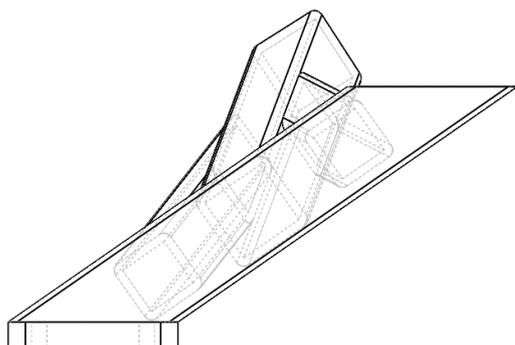
I supporti orizzontali sono costituiti invece travi a sezione rettangolare raggiata cava di dimensioni 100 x 40 x 4 e 50 x 50 x 4 con raggi di raccordo di 3 mm. Anche in questo caso il collegamento degli elementi è assicurato da saldatura.

#### TUBI RETTANGOLARI con ANGOLI RAGGIATI

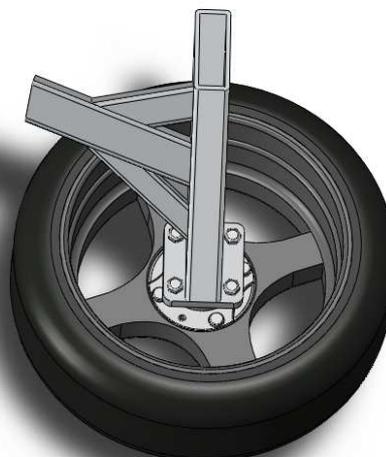
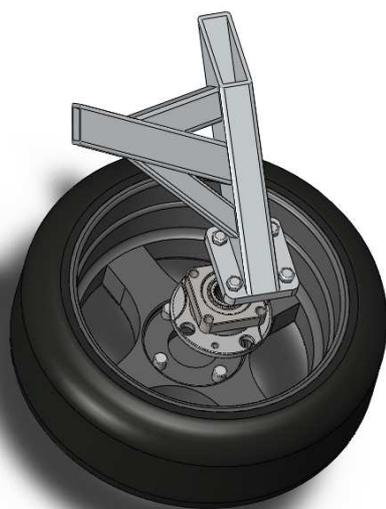


CODICE	B x H x S mm	PESO gr/ml
51201215	20 x 12 x 1,5	211
51201512	20 x 15 x 1,2	211
5130101	30 x 10 x 1	205
51301015	30 x 10 x 1,5	300
51352515	30 x 25 x 1,5	430
5140201	40 x 20 x 1	313
51402015	40 x 20 x 1,5	442
5140202	40 x 20 x 2	594
5140204	40 x 20 x 4	1104
51403015	40 x 30 x 1,5	537
5140303	40 x 30 x 3	1037
51602012	50 x 30 x 1,2	489
5160252	50 x 35 x 2	867
51603015	50 x 40 x 2,5	750
5160302	50 x 50 x 4	929

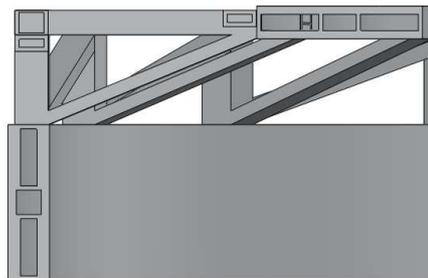
5170303	70 x 30 x 3	1523
51804015	80 x 40 x 1,5	950
51100404	100x40x4	2851
51150505	150 x 50 x 5	5130



Le ruote da 13 pollici sono collegate allo svolgibobina mediante il mozzo, come già detto, per cui la piastra che va a contatto con il mozzo ha lo stesso interasse di quest'ultimo per quanto riguarda i fori, ma è più larga in modo da permettere una buona saldatura tra la stessa e la trave obliqua ad essa collegata.



Infine la guida è stata realizzata con travi a sezione rettangolare cave unite tra loro mediante saldatura; nelle parti in cui si ha il contatto con le ruote sono state utilizzate lamiere sottili, che racchiudono le travi circolari della guida.



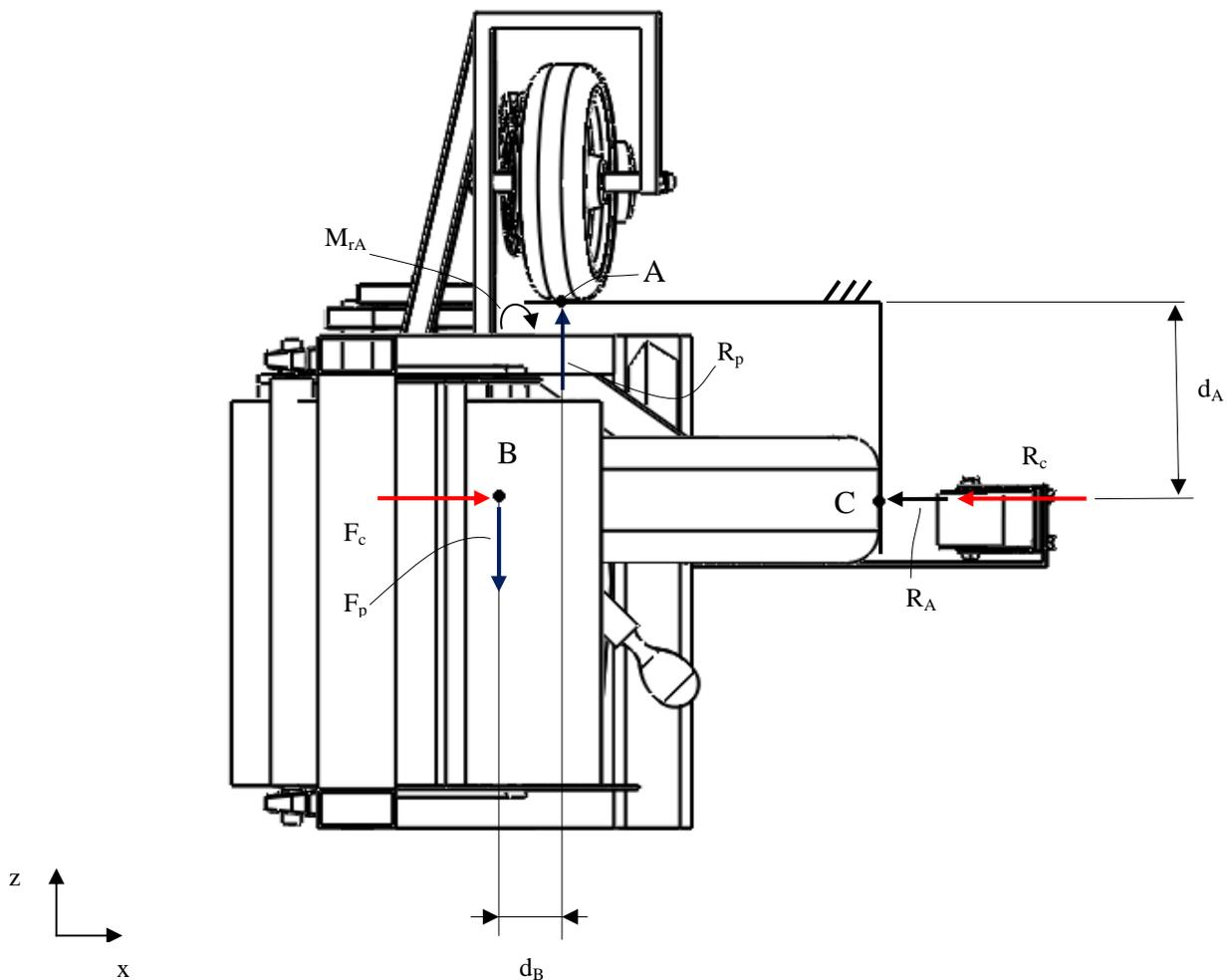
Per i supporti e la guida è stata scelta la lega di alluminio 6060 T6, della serie 6000, commercialmente detta Anticorodal. È un tipo di lega legata con silicio e magnesio, che ha subito un trattamento termico del tipo 6, ovvero è stata temprata e invecchiata artificialmente.

Le caratteristiche meccaniche di questo materiale sono intermedie, molto minori dell'Avional (lega 7000), ma superiori di altre leghe come ad esempio quelle della serie 2000; i pregi dell'Anticorodal sono soprattutto la facile saldabilità e reperibilità sul mercato oltre al costo relativamente basso.

Lega	Stato	Resistenza a trazione [ RM (N/mm <sup>2</sup> ) ]	Carico di snervamento [ Rp0,2 (N/mm <sup>2</sup> ) ]	Allungamento [SU 50 mm - A %]		Durezza [HB]
6060-6063	0	100	55	29	-	28
	T1	155	95	19	-	44
	T4	170	100	22	-	47
	T5	205	165	12	-	65
	T6	230	200	12	-	72
	T8	265	230	9	-	79

### 3.2 Modello di studio

Per verificare la resistenza alle sollecitazioni dei singoli componenti, è necessario considerare la distribuzione delle forze e dei momenti che agiscono sulla struttura mediante uno schema.



Lo studio delle forze che agiscono sul carrello può essere ridotto alla verifica di equilibrio statico nella situazione critica di velocità massima; si può supporre che la massa dell'intero carrello sia concentrata nel baricentro B.

Consideriamo il carrello in posizione statica in assenza di moto. La forza peso  $F_p$  applicata al baricentro è equilibrata da una reazione  $R_p$  data dal vincolo della guida e crea un momento  $M_p$ , descritto da un vettore in direzione  $y$  uscente dal piano del

foglio, che tende a far ruotare la struttura in senso antiorario (secondo lo schema proposto).

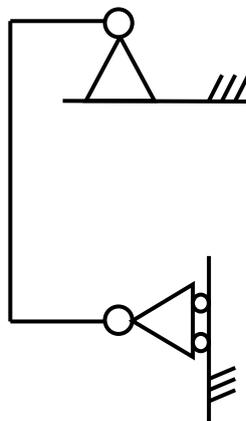
Il modulo di  $M_p$  si ottiene dal prodotto di  $F_p$  per la distanza tra la retta lungo  $z$  passante per il punto di appoggio della struttura (che viene utilizzato come polo di riferimento) e il baricentro. In questa situazione se si sviluppano le equazioni di equilibrio si ottiene :

$$(1) F_p = R_p ;$$

$$(2) F_p d_B = M_{rA} .$$

Dove  $d_B$  è la distanza di  $F_p$  dal baricentro,  $M_{rA}$  è il momento resistente.

È utile pensare il vincolo delle ruote superiori come una cerniera, mentre il vincolo delle ruote orizzontali come un carrello disposto verticalmente che si oppone solamente ai carichi diretti nel verso di  $x$ . Le ruote superiori possono opporsi anche se non totalmente a spostamenti orizzontali grazie all'attrito che hanno con la guida, ma non possono opporsi a momenti in direzione  $y$ .



Il vincolo delle ruote superiori non può contrastare il momento generato da  $F_p$ , quindi il momento  $M_{rA}$  deve essere dato necessariamente da una forza  $R_A$  applicata nel punto C. Si può quindi dire che è presente una forza  $R_A$  diretta lungo  $x$  che si oppone al momento di  $F_p$ , e avente modulo pari al rapporto tra  $M_{rA}$  e la distanza  $d_A$  tra la stessa forza e il punto A.

Quando il carrello è in moto lungo la guida, per effetto della forza centrifuga  $F_c$  data dal prodotto della massa totale  $m$  per l'accelerazione centrifuga  $a_c$ , esso tende ad

allontanarsi radialmente dal centro della guida. La forza centrifuga è equilibrata da una reazione vincolare  $R_c$  sul piano orizzontale in corrispondenza del contatto tra le ruote orizzontali e l'appoggio fornito dalla guida.

Per effetto della forza peso che non è allineata con la retta lungo  $z$  passante dal punto di appoggio superiore, si crea un momento che assicura il contatto delle ruote laterali e genera una forza su di esse.

L'equilibrio complessivo della struttura sul piano  $x-z$ , alla traslazione e alla rotazione, è dato dalle equazioni :

$$(1) F_p + R_p = 0 ;$$

$$(2) F_p d_B + F_c d_1 - R_c d_2 - M_{rA} = 0 ; (\text{polo A})$$

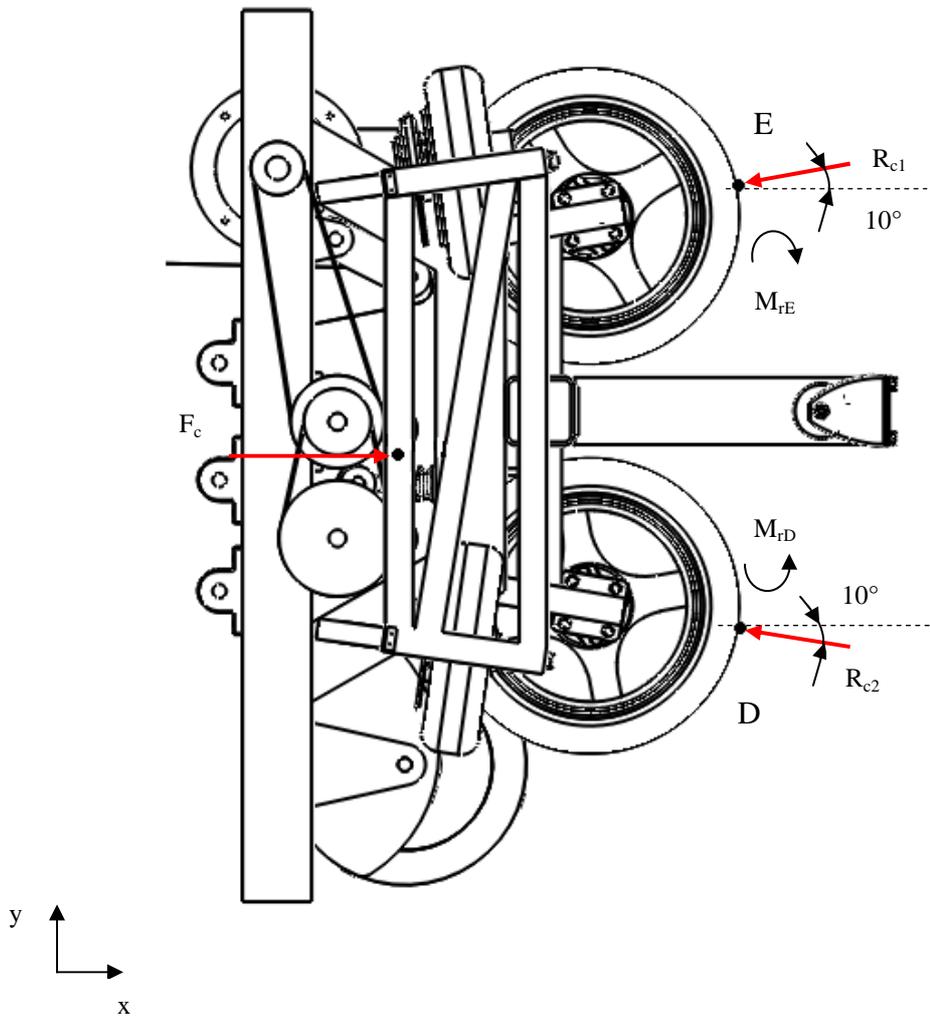
$$(3) F_c + R_c = 0 .$$

Dove  $d_B$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  sono rispettivamente le distanze tra  $F_p$ ,  $F_c$ ,  $R_c$  e il polo A.

La forza  $R_A$  non è stata considerata nell'equilibrio alla traslazione lungo  $x$  poiché essa contribuisce esclusivamente ad assicurare il vincolo al momento generato da  $F_p$ , e assicura l'appoggio delle ruote orizzontali.

Le forze  $F_c$  e  $R_c$  sono allineate in modo tale che il loro contributo per quanto riguarda i momenti si annulla. Questa considerazione porrebbe una soluzione diversa per quanto riguarda la posizione delle ruote orizzontali; se infatti esse fossero poste sotto il baricentro, si avrebbe una stabilità del sistema maggiore e la forza  $R_A$  risulterebbe minore. Considerando invece l'appoggio superiore per annullare il momento prodotto da  $F_p$ , esso dovrebbe essere posizionato in modo tale da rendere coincidenti le rette di applicazione delle forze  $F_p$  e  $R_p$ . In questo modo però si avrebbe una situazione di equilibrio instabile, poiché se  $R_p$  e  $F_p$  fossero allineate la direzione di rotazione del carrello sarebbe incerta, per cui, oltre che per problemi di ingombro delle ruote e del telaio, la soluzione migliore, per quanto riguarda la disposizione dei vincoli è quella proposta in precedenza.

Considerando il piano  $x-y$ , si vede che la reazione  $R_c$  è suddivisibile in due forze una per ciascuna ruota. Tali forze formano un angolo di  $10^\circ$  circa con l'asse  $y$ , poiché i punti di appoggio tra le ruote e la guida sono spostati verso l'esterno e non perfettamente allineati.



Su questo piano si formano due momenti resistenti uno su ciascuno dei supporti che collegano le ruote a telaio.

L'equilibrio è quindi dato da :

$$(4) F_c - R_{c1} \cos 10 + R_{c2} \cos 10 = 0 ;$$

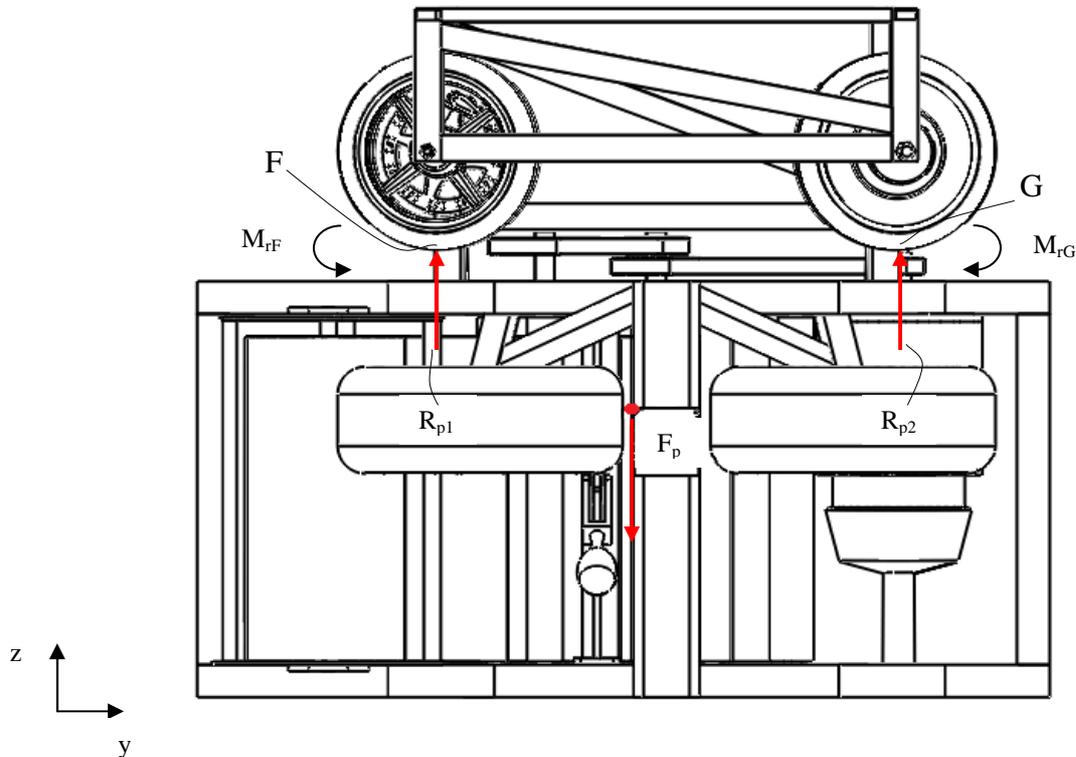
$$(5) R_{c1} \sin 10 - R_{c2} \sin 10 = 0 ;$$

$$(6) F_c d_3 - R_{c1} \cos 10 d_4 - M_{rD} = 0 ; \text{ (polo D)}$$

$$(7) F_c d_5 - R_{c2} \cos 10 d_6 - M_{rE} = 0 . \text{ (polo E)}$$

Dove  $d_3$ ,  $d_4$  rispettivamente sono le distanze che hanno i vettori  $F_c$  e il componente lungo x di  $R_{c1}$  con il punto D;  $d_5$  e  $d_6$  sono le distanze di  $F_c$  e il componente lungo x di  $R_{c2}$  con il punto E.

Considerando infine il piano y-z si formeranno due momenti resistenti sul supporto superiore, in corrispondenza di ogni appoggio.



In questo caso si ha :

- (8)  $F_p - R_{p1} + R_{p2} = 0$  ;
- (9)  $F_p d_7 - R_{p1} d_8 - M_{rF} = 0$  ; (polo D)
- (10)  $F_p d_9 - R_{p2} d_{10} - M_{rG} = 0$  . (polo E)

Dove  $d_7$ ,  $d_8$  rispettivamente sono le distanze che hanno i vettori  $F_p$  e  $R_{p1}$  con il punto G;  $d_9$  e  $d_{10}$  sono le distanze di  $F_p$  e  $R_{p2}$  con il punto F.

Nel calcolo delle forze si è supposto che la forza centrifuga agisca esclusivamente sui supporti orizzontali; quindi si può dire che sul supporto superiore è applicata solo la forza peso, mentre sui supporti delle ruote orizzontali la forza centrifuga e la forza  $R_A$ .

La verifica di resistenza è stata svolta sotto queste ipotesi, tramite un'analisi a elementi finiti, utilizzando il programma 'Solidworks Simulation'.

La forza peso e la forza centrifuga sono state applicate, nella simulazione, direttamente nel baricentro, in modo tale da non considerare i momenti di trasporto delle forze, che solitamente si ricavano dalle equazioni di equilibrio.

I valori di  $F_p$  e  $F_c$  si ricavano facilmente dalle formule note :

$$F_p = m g ;$$

$$F_c = m a_c = m \omega^2 R .$$

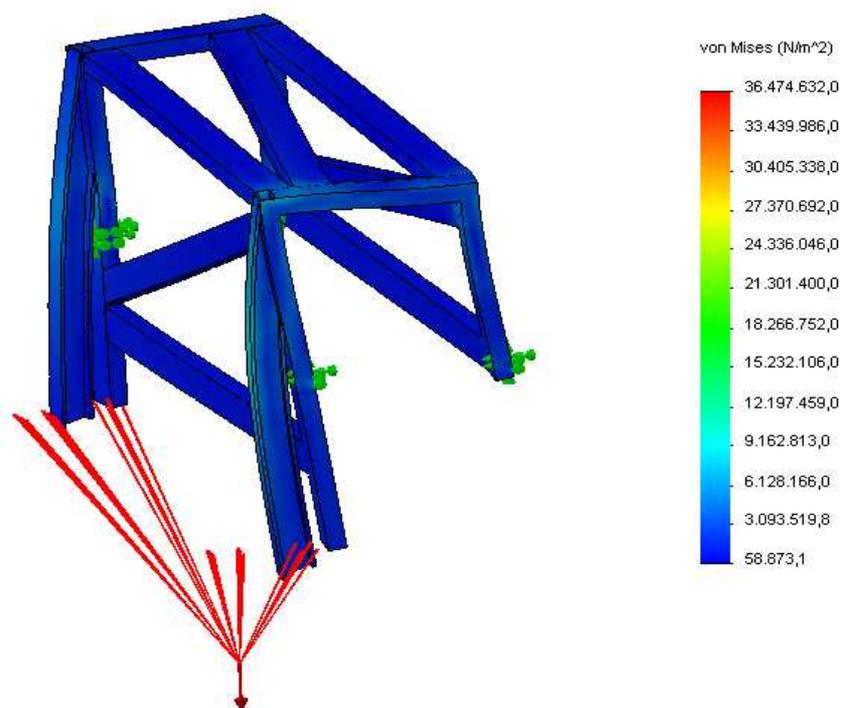
Con  $m$  pari a 170 kg,  $\omega$  pari a 6.3 rad/sec,  $R$  pari a 1.5 metri si ricava che la forza peso è di 1668 N e la forza centrifuga di 10121 N.

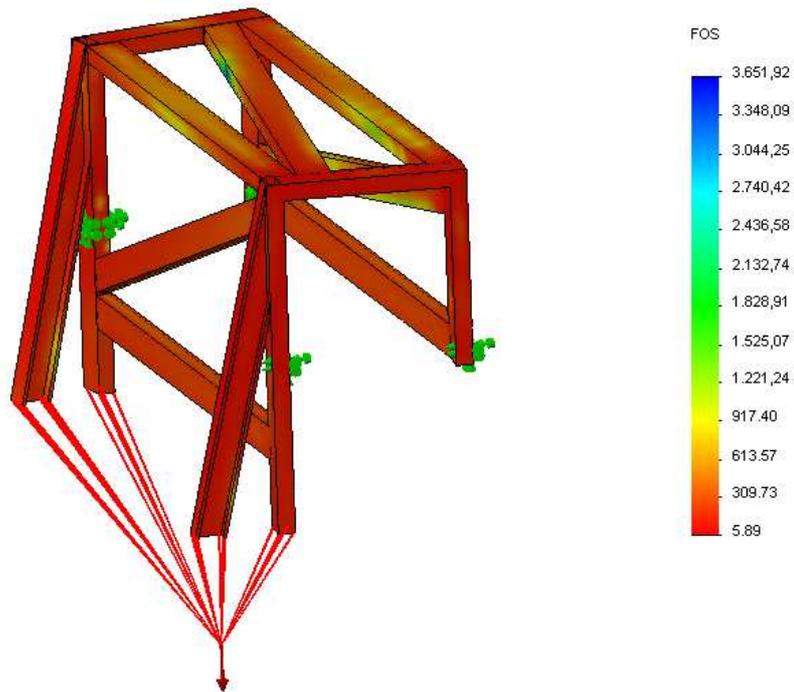
La forza  $R_A$  si ricava dalla equazione (2) e dalla sua definizione :

$$R_A = M_{rA} / d_A = F_p d_B / d_A$$

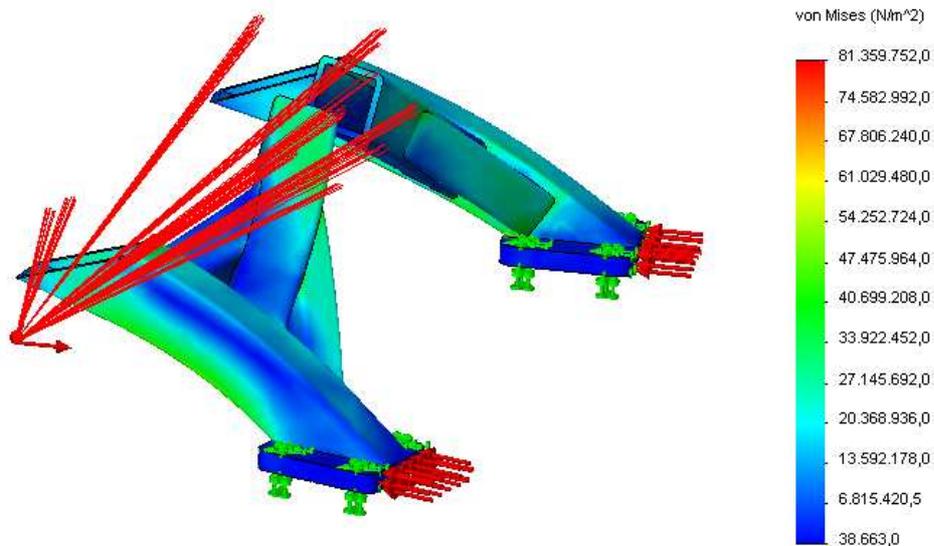
Con  $d_B$  pari a 110 mm e  $d_A$  pari a 265 mm si ottiene che  $R_A$  è pari a circa 695 N.

Di seguito sono riportati i grafici della simulazione che rappresentano la distribuzione delle tensioni e del fattore di sicurezza nei supporti.





Il valore del fattore di sicurezza minimo del supporto superiore, come è indicato nella tabella di valori a fianco del grafico è pari a 5.9 circa; può sembrare un valore alto ma considerando che il carrello potrebbe subire urti in senso verticale, dovuti ad esempio alla presenza di elementi estranei sulla guida, è da ritenere adeguato.

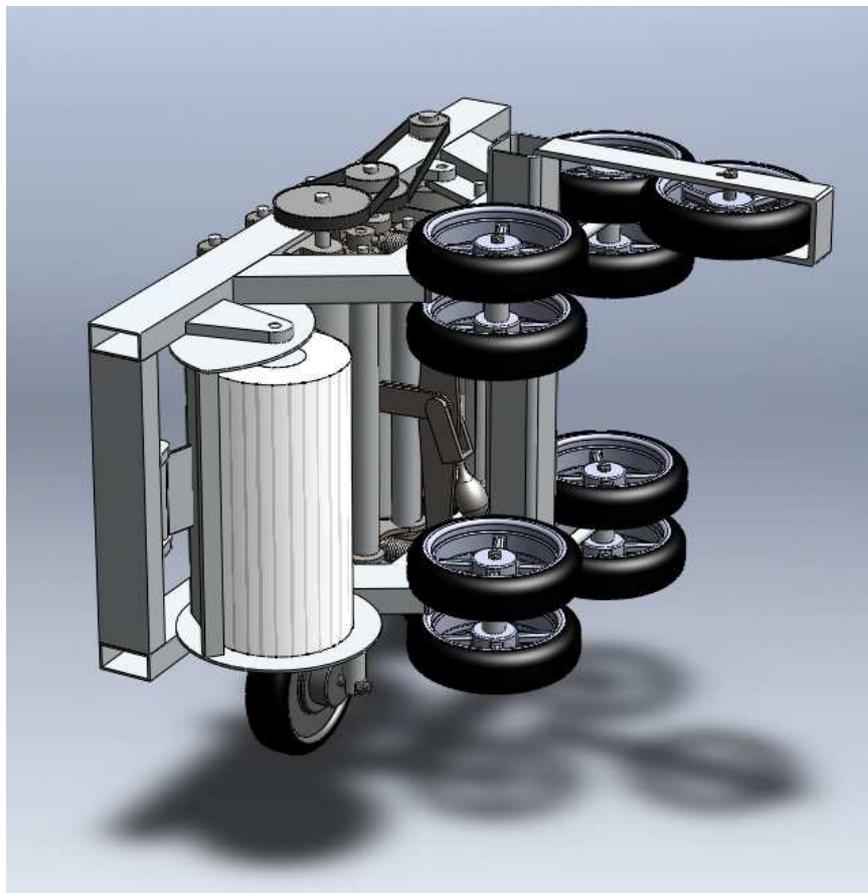


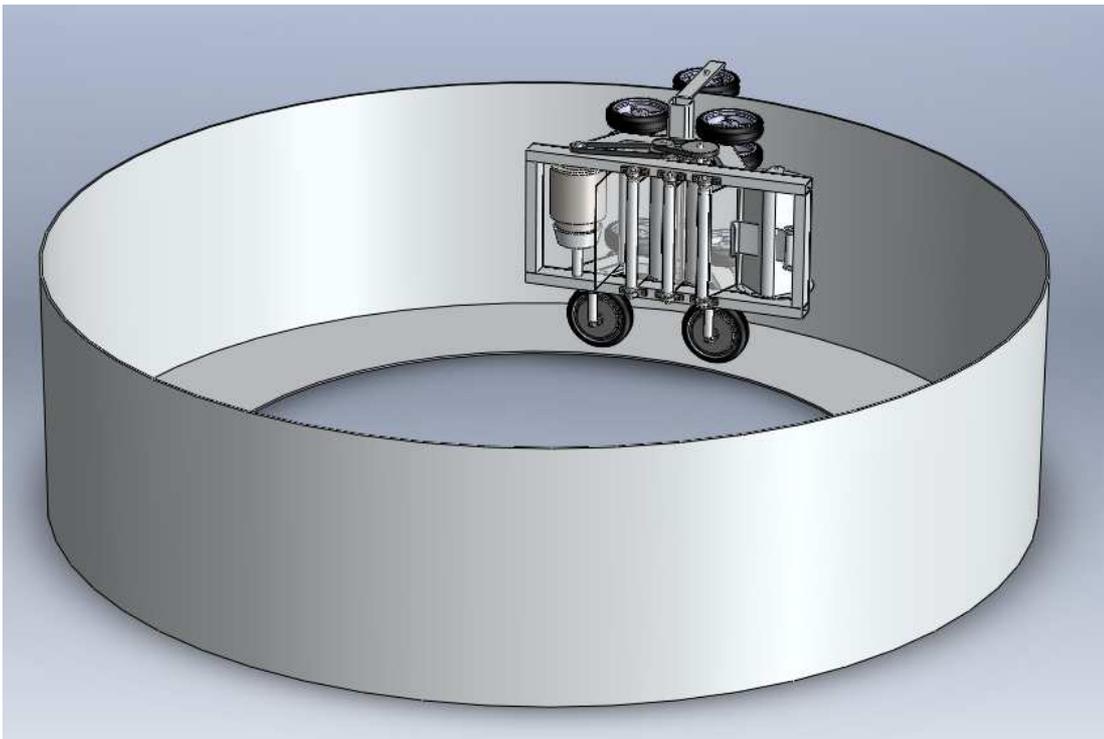
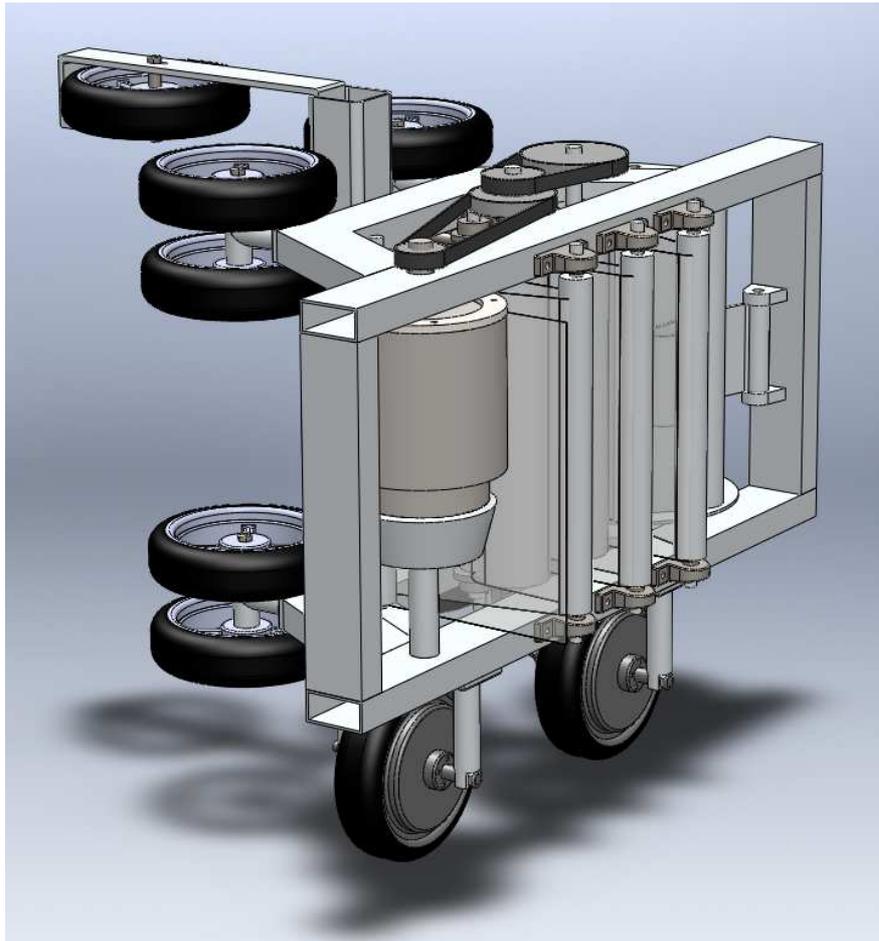
In questo ultimo caso il fattore di sicurezza minimo per i supporti orizzontali è di 2.6 circa, un valore accettabile.



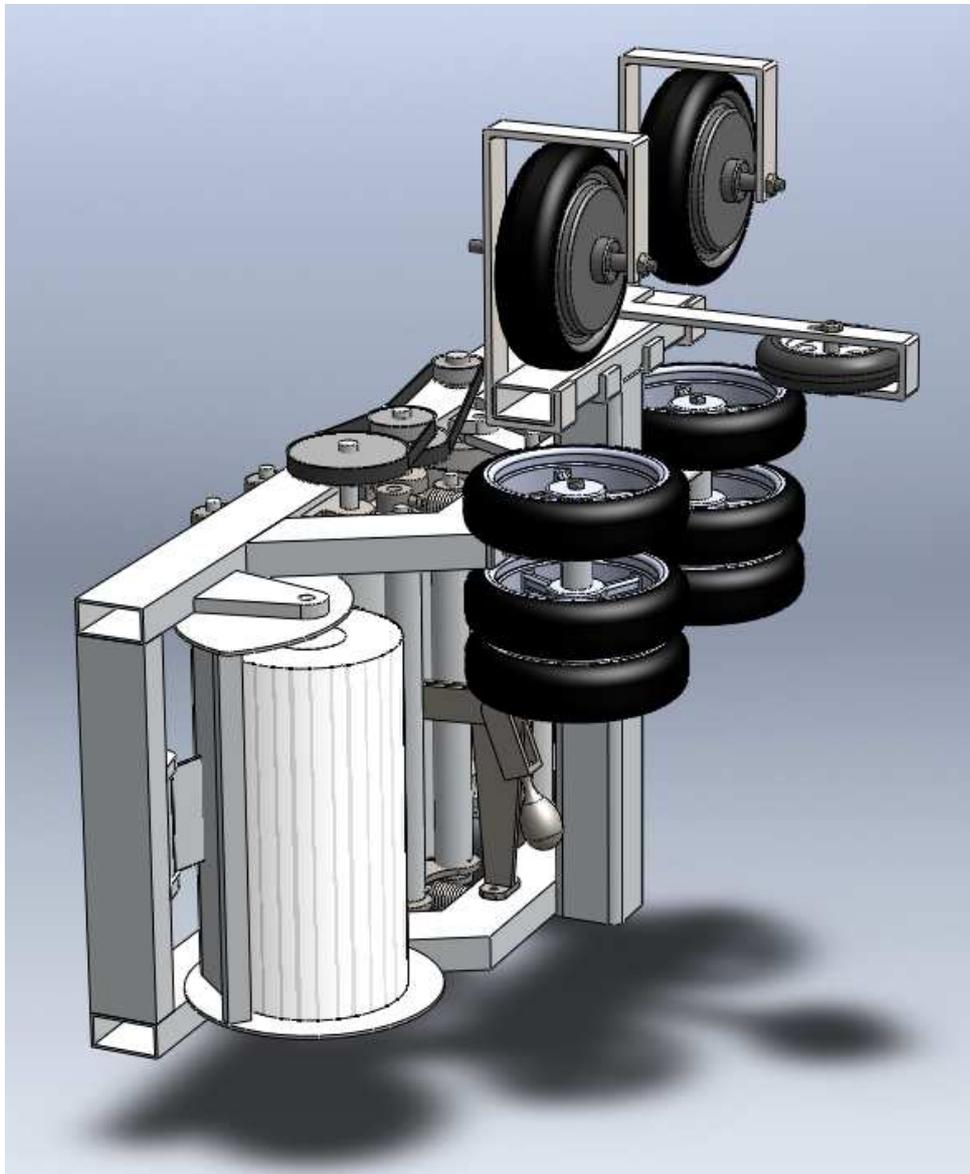
### 3.3 Soluzioni alternative

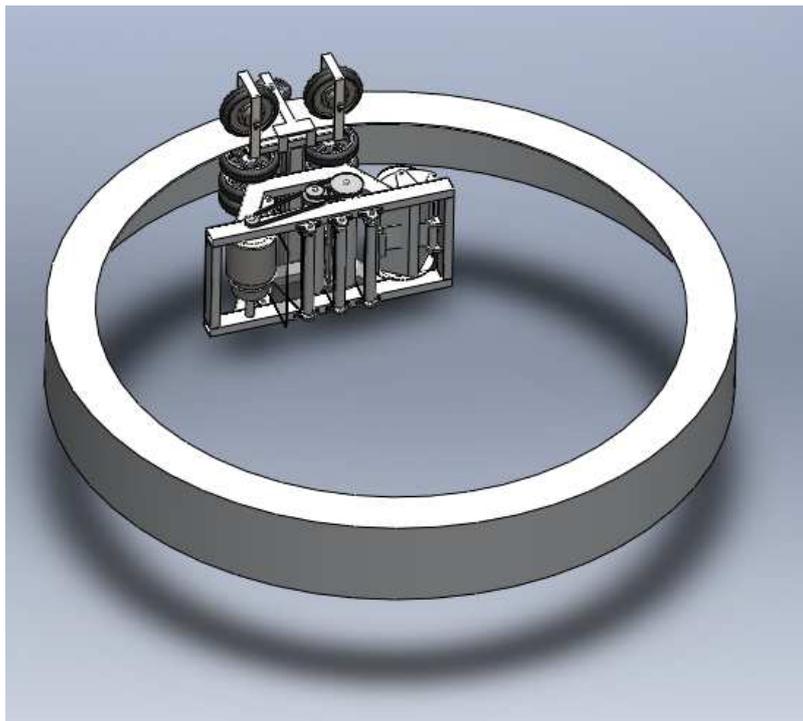
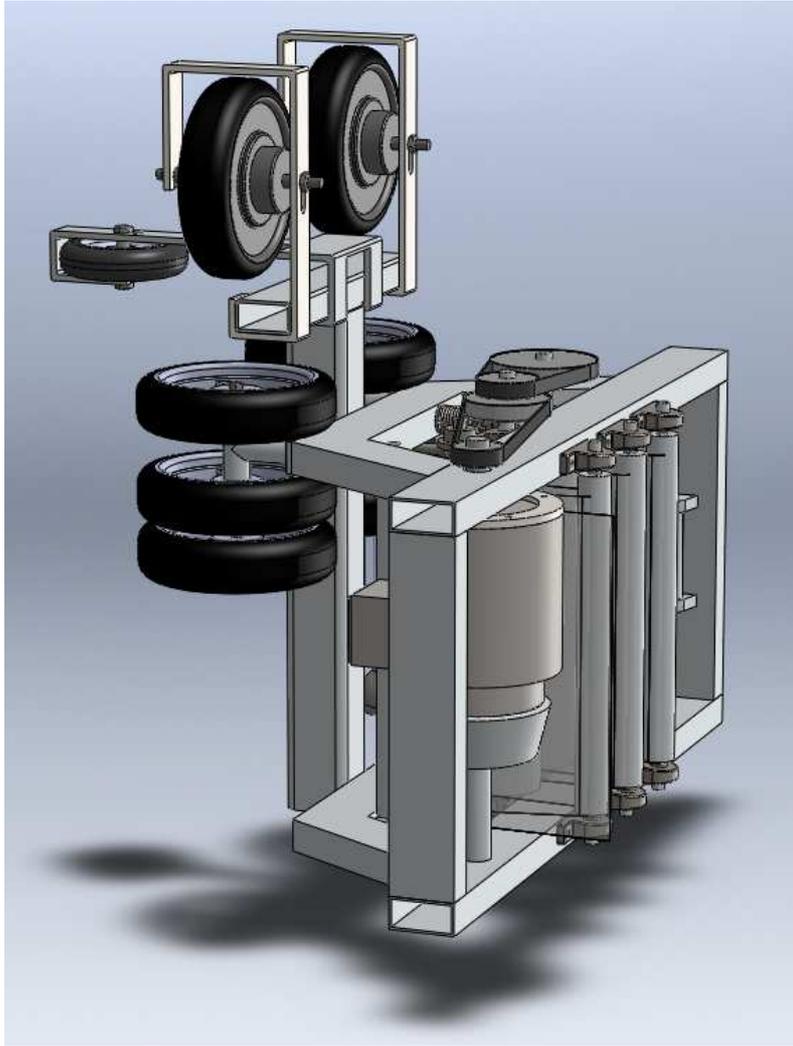
In precedenza si erano trovate soluzioni alternative a quella finale, che poi sono state escluse per problemi di peso e ingombro. Ad esempio in un primo momento si era pensato di disporre le ruote di appoggio verticale nella parte inferiore del carrello e utilizzare esclusivamente ruote per scooter.



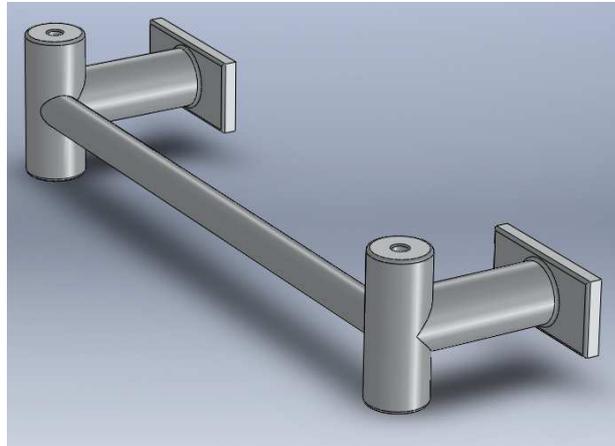


Il problema rilevante oltre al peso del carrello che raggiungeva i 190 kg totali era anche l'eccessivo ingombro della guida. Per risolvere il primo problema si è pensato di dimezzare il numero di ruote orizzontali; inoltre si è stata sostituita la ruota di sicurezza che inizialmente era una ruota da scooter, con una di tipo industriale. Per ovviare al secondo problema le ruote disposte verticalmente sono state posizionate nella parte superiore. Considerando che ogni ruota da scooter può sorreggere circa un massimo di 150-200 kg, svolgendo i calcoli sulla forza centrifuga, si è visto che non era possibile avere solo quattro ruote orizzontali, ovvero la metà delle precedenti ed era quindi necessario disporre almeno sei.



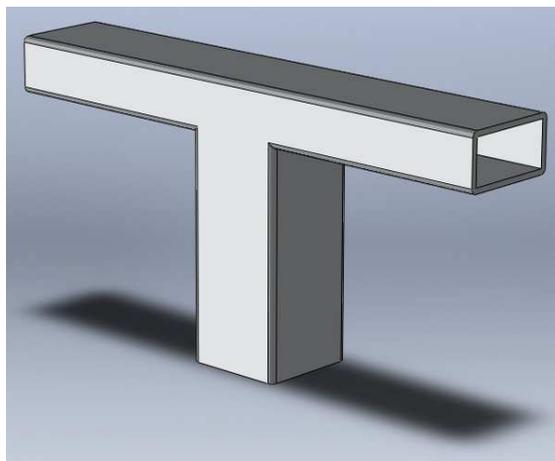


In quest'ultimo modello, l'elemento che assicura l'attacco delle ruote orizzontali è un telaio in tubi di alluminio saldati fra loro. Le piastre a sezione rettangolare permettono la saldatura sulla struttura dello svolgibobina.



Per diminuire ulteriormente il peso sono state scelte, come si vede nell'immagine del disegno finale, due ruote di automobile da disporre orizzontalmente, più resistenti e nell'insieme meno pesanti. È stata eliminata una delle ruote motorizzate, sostituendola con una da scooter, poiché era sufficiente averne una sola motrice in relazione al peso finale della struttura.

Nell'ultimo modello proposto era presente un elemento a 'T' che inserito nella trave verticale della struttura dello svolgibobina permetteva di collegare i supporti superiori delle ruote verticali. Esso è stato eliminato e i supporti superiori sono stati direttamente applicati alla parte alta della struttura dello svolgibobina. In questo modo il carrello risulta più compatto e l'ingombro verticale essendo minore assicura nell'insieme una maggiore stabilità.



Infine un'ulteriore modifica è stata quella di accorciare di 160 mm la trave verticale della struttura iniziale dello svolgibobina per avere minore ingombro in altezza.

## **Conclusioni**

Al termine dello studio è stato definito in maniera essenziale l'aspetto del carrello per movimentare lo svolgibobina, considerando globalmente i vari componenti per un funzionamento adeguato. La macchina rappresenta comunque un prototipo destinato a subire ulteriori modifiche finalizzate a migliorare e perfezionare il complesso nelle parti che lo costituiscono.

Gli argomenti che soprattutto richiedono maggiore attenzione in futuro sono lo sviluppo di un modello per definire in modo più approfondito la realizzazione dell'impianto di sicurezza frenante e del circuito elettrico a contatti striscianti, e il perfezionamento dei supporti in alluminio.

Per quel che riguarda l'impianto frenante, è stata svolta esclusivamente un'analisi schematica dei componenti utili al suo funzionamento, senza scendere nei particolari, ad esempio come assemblarli tra loro e alla struttura principale. Il circuito di alimentazione deve essere rifinito e richiede una valutazione per quanto riguarda il modo di realizzare il sistema a contatti striscianti e i collegamenti dei cavi per dare potenza alla ruota motrice, al motore elettrico per l'azionamento dei rulli e al compressore che aziona l'attuatore pneumatico.

I supporti che costituiscono il telaio, possono essere ottimizzati in quanto a peso e ingombri, ad esempio valutando più accuratamente la scelta delle sezioni e delle dimensioni dei tubi che lo compongono. È opportuno inoltre prestare ulteriore attenzione alla verifica di resistenza complessiva della struttura; infatti i valori dei fattori di sicurezza ottenuti al termine dell'analisi a elementi finiti sono il risultato di una simulazione che offre uno studio di massima della distribuzione delle tensioni sui componenti, per cui è possibile svolgere un'ulteriore verifica tramite calcoli manuali.

La macchina incellofanatrice per funzionare correttamente dovrà essere fornita oltre che della guida, anche di una struttura esterna che permetta un moto in senso verticale tale da consentire allo svolgibobina di imballare in maniera adeguata il pallet. Infatti lo strato di cellophane ha un'altezza tale da non riuscire a coprire totalmente i pallets più alti. Un altro ambito su cui lavorare, per quanto riguarda il moto della macchina, è quello che riguarda il sincronismo tra motore elettrico dello svolgibobina e ruota motorizzata, realizzabile tramite controller di potenza da applicare al circuito.

Nonostante ci siano aspetti da migliorare, lo studio è stato utile a delineare un modello su cui basarsi per sviluppi futuri. Non è immediato trovare una soluzione ragionevole per assicurare una struttura di questo tipo ad una guida nel modo più coerente possibile e scegliere gli elementi per assicurare il moto; inizialmente infatti sono stati concepiti modelli differenti poi scartrati, alcuni dei quali mostrati nel capitolo terzo nella parte ‘soluzioni alternative’.

Gli elementi guida per le scelte svolte sulle varie parti sono stati il costo e la facile reperibilità commerciale di prodotti già esistenti sul mercato, ad esempio, nella scelta di profilati metallici, soffermandosi su articoli presenti in catalogo, e optando per una lega discreta ma non eccellente in quanto a resistenza, ma più economica; nella scelta della ‘hub motor’ è stata favorita la soluzione meno dispendiosa possibile ( il prezzo della ruota motorizzata è di 320 dollari compreso il disco freni) ma efficace in quanto a potenza. Una valutazione è stata quella sulla scelta delle ruote condotte; in questo caso si è preferito mettere in primo piano il fattore del peso lasciando in secondo piano quello del risparmio, considerando l’opportunità di utilizzare cerchi in lega di alluminio piuttosto che cerchi in acciaio, più pesanti anche se meno costosi.

## **Bibliografia**

*Macchine elettriche – Mario Pezzi*

*Apparecchiature elettroniche – Jackson*

*Principles and application of electrical engieiring – Giorgio Rizzoni*

Articoli tratti dalla rivista on-line 'Firmwire'

Siti consultati :

- *[www.goldenmotors.it](http://www.goldenmotors.it)*
- *[www.kellycontroller.com](http://www.kellycontroller.com)*
- *[www.tecnoruote.it](http://www.tecnoruote.it)*
- *[www.migliarialluminio.it](http://www.migliarialluminio.it)*
- *[www.profall.it](http://www.profall.it)*
- *[www.alluminiodiqualitya.it](http://www.alluminiodiqualitya.it)*
- *[www.bimba.com](http://www.bimba.com)*