



Sviluppo di una ruota di reazione ultrasottile per nanosatelliti modulari

Giorgio Capovilla

23 Ottobre 2018

Stato dell'arte ACS

Sistema controllo di assetto (ACS):

- ▶ Propulsori;



Stato dell'arte ACS

Sistema controllo di assetto (ACS):

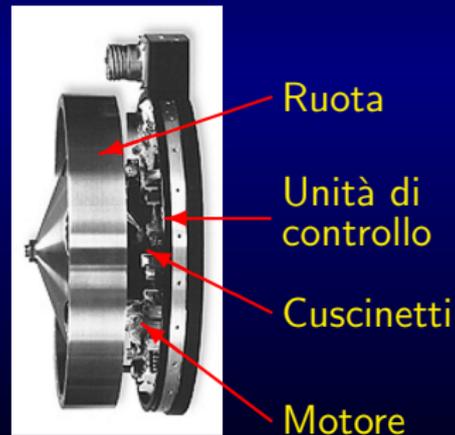
- ▶ Propulsori;
- ▶ Magnetorquers;



Stato dell'arte ACS

Sistema controllo di assetto (ACS):

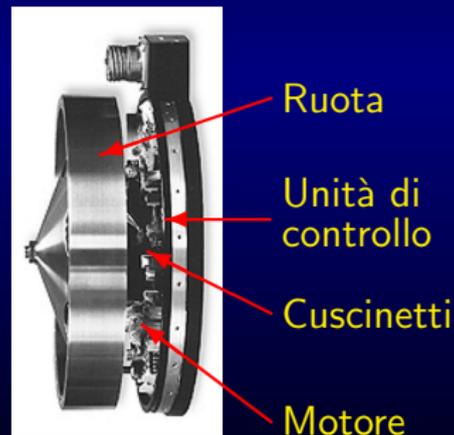
- ▶ Propulsori;
- ▶ Magnetorquers;
- ▶ Momentum storage torquers:



Stato dell'arte ACS

Sistema controllo di assetto (ACS):

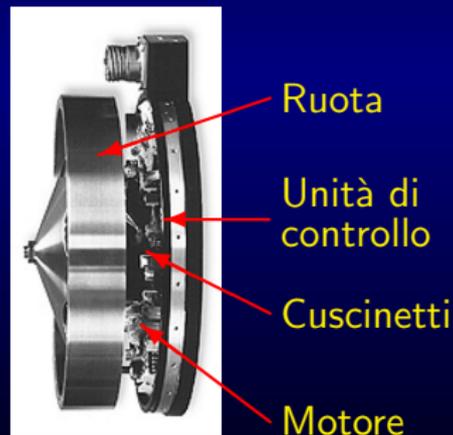
- ▶ Propulsori;
- ▶ Magnetorquers;
- ▶ Momentum storage torquers:
 - ▶ Ruota di reazione (RW)
 - ▶ $\bar{\omega} = 0$;
 - ▶ Due direzioni di rotazione.



Stato dell'arte ACS

Sistema controllo di assetto (ACS):

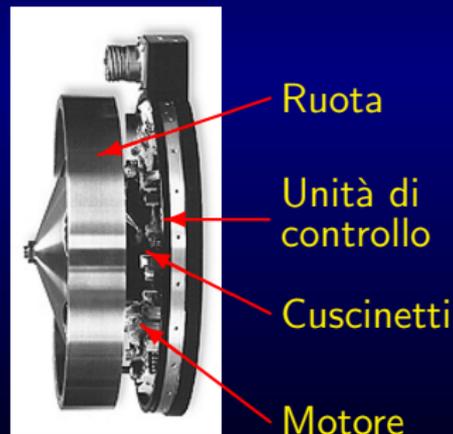
- ▶ Propulsori;
- ▶ Magnetorquers;
- ▶ Momentum storage torquers:
 - ▶ Ruota di reazione (RW)
 - ▶ $\bar{\omega} = 0$;
 - ▶ Due direzioni di rotazione.
 - ▶ Ruota di momento (MW)
 - ▶ $\bar{\omega} = 5\,000 - 10\,000\text{ RPM}$;
 - ▶ $\Delta\omega = 20\%$.



Stato dell'arte ACS

Sistema controllo di assetto (ACS):

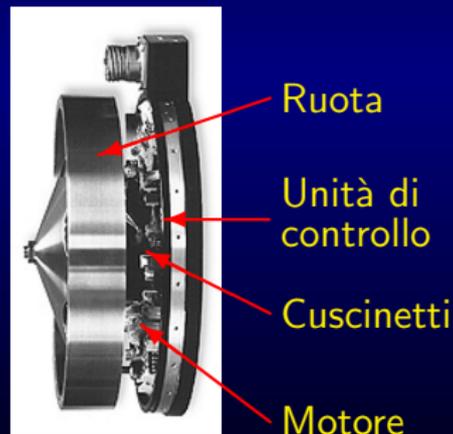
- ▶ Propulsori;
- ▶ Magnetorquers;
- ▶ Momentum storage torquers:
 - ▶ Ruota di reazione (RW)
 - ▶ $\bar{\omega} = 0$;
 - ▶ Due direzioni di rotazione.
 - ▶ Ruota di momento (MW)
 - ▶ $\bar{\omega} = 5\,000 - 10\,000\text{ RPM}$;
 - ▶ $\Delta\omega = 20\%$.
 - ▶ Control moment gyroscopes
 - ▶ $\bar{\omega} > 0$;
 - ▶ Giroscopio su sospensione cardanica.



Stato dell'arte ACS

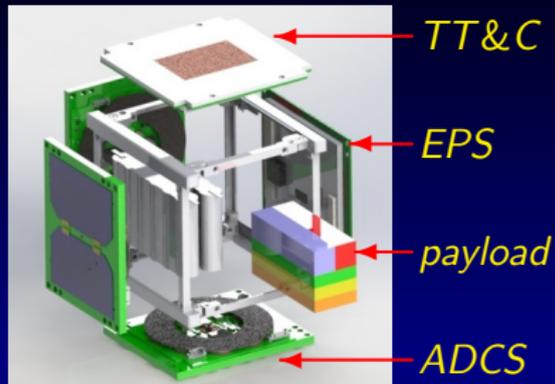
Sistema controllo di assetto (ACS):

- ▶ Propulsori;
- ▶ Magnetorquers;
- ▶ Momentum storage torquers:
 - ▶ Ruota di reazione (RW)
 - ▶ $\bar{\omega} = 0$;
 - ▶ Due direzioni di rotazione.
 - ▶ Ruota di momento (MW)
 - ▶ $\bar{\omega} = 5\,000 - 10\,000\text{ RPM}$;
 - ▶ $\Delta\omega = 20\%$.
 - ▶ Control moment gyroscopes
 - ▶ $\bar{\omega} > 0$;
 - ▶ Giroscopio su sospensione cardanica.
 - ▶ Integrazione con sensori di assetto.



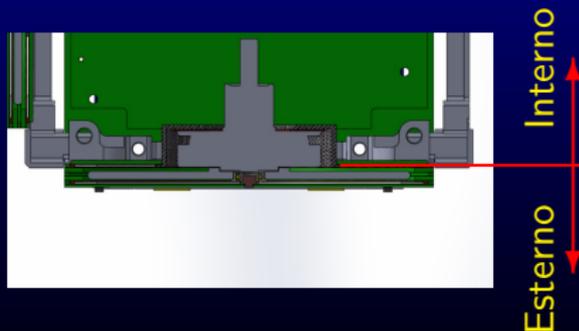
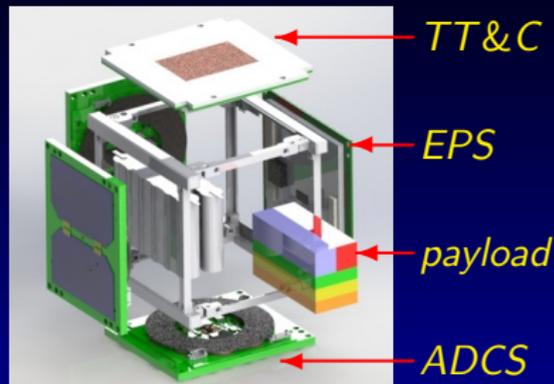
Requisiti tile ADCS

- ▶ Ruota di reazione/momento per CubeSat AraMiS;



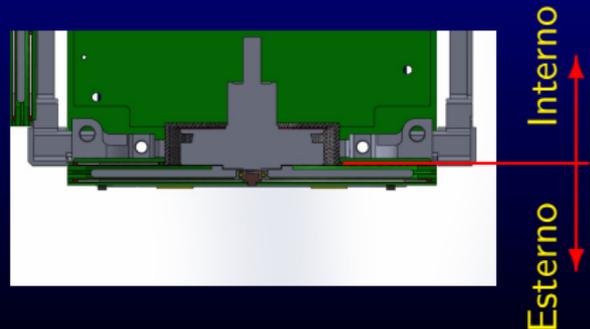
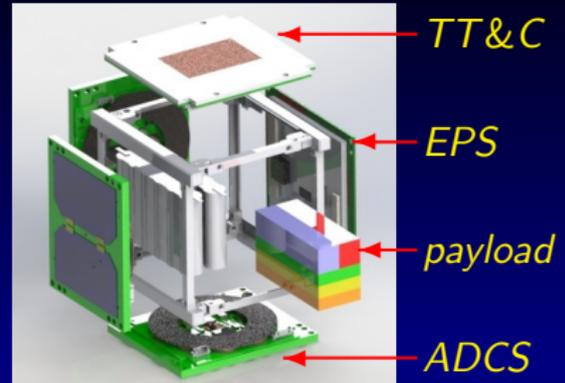
Requisiti tile ADCS

- ▶ Ruota di reazione/momento per CubeSat AraMiS;
- ▶ Spessore:
 - ▶ Verso esterno: max 6.5 mm;
 - ▶ Verso interno: minimo possibile.



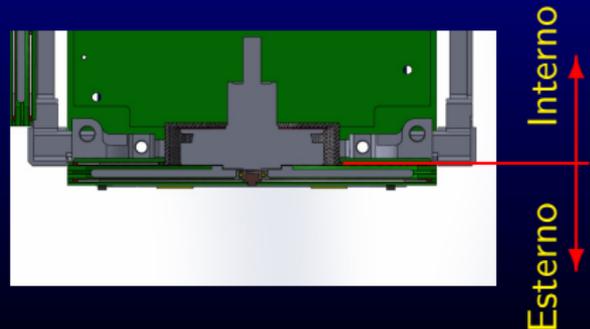
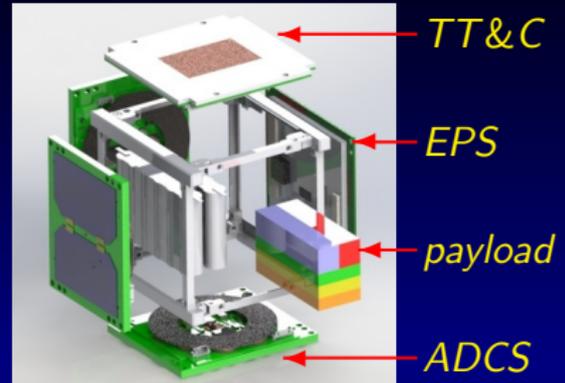
Requisiti tile ADCS

- ▶ Ruota di reazione/momento per CubeSat AraMiS;
- ▶ Spessore:
 - ▶ Verso esterno: max 6.5 mm;
 - ▶ Verso interno: minimo possibile.
- ▶ Uso componenti commerciali (Struttura 1U ISIS);



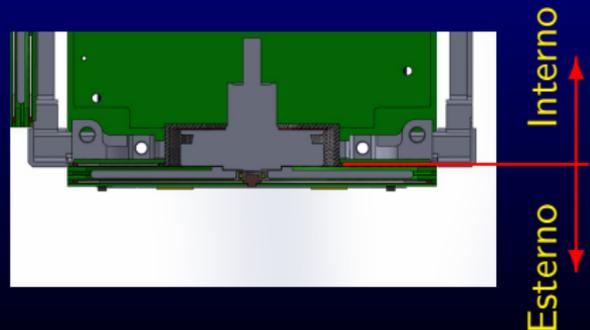
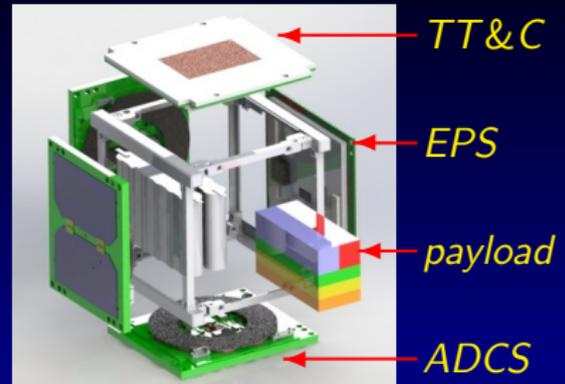
Requisiti tile ADCS

- ▶ Ruota di reazione/momento per CubeSat AraMiS;
- ▶ Spessore:
 - ▶ Verso esterno: max 6.5 mm;
 - ▶ Verso interno: minimo possibile.
- ▶ Uso componenti commerciali (Struttura 1U ISIS);
- ▶ Modularità: controllo 1, 2 o 3 assi;



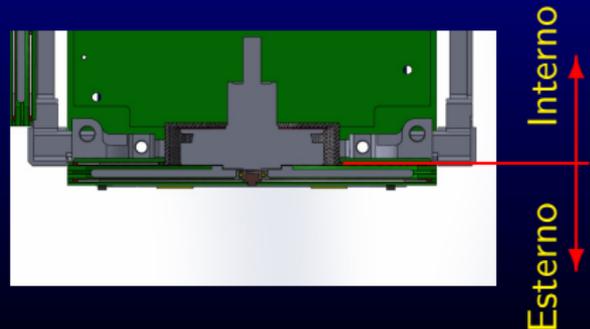
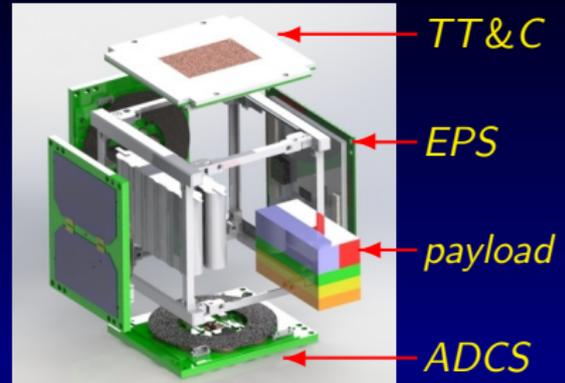
Requisiti tile ADCS

- ▶ Ruota di reazione/momento per CubeSat AraMiS;
- ▶ Spessore:
 - ▶ Verso esterno: max 6.5 mm;
 - ▶ Verso interno: minimo possibile.
- ▶ Uso componenti commerciali (Struttura 1U ISIS);
- ▶ Modularità: controllo 1, 2 o 3 assi;
- ▶ Caratteristiche e prestazioni in linea con stato dell'arte;
 - ▶ Integrazione magnetorquers e magnetometri.



Requisiti tile ADCS

- ▶ Ruota di reazione/momento per CubeSat AraMiS;
- ▶ Spessore:
 - ▶ Verso esterno: max 6.5 mm;
 - ▶ Verso interno: minimo possibile.
- ▶ Uso componenti commerciali (Struttura 1U ISIS);
- ▶ Modularità: controllo 1, 2 o 3 assi;
- ▶ Caratteristiche e prestazioni in linea con stato dell'arte;
 - ▶ Integrazione magnetorquers e magnetometri.
- ▶ Teatro operativo: orbita LEO.

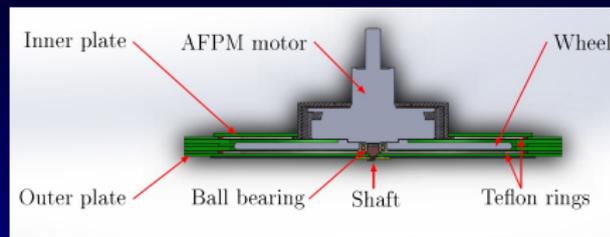


RW/MW: architettura generale (1)

► Ruota in cavità interna:

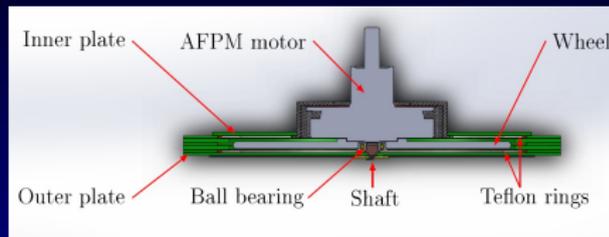
Diametro: 72.0 *mm*

Spessore: 1.8 *mm*



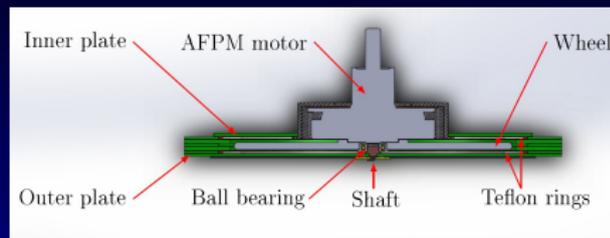
RW/MW: architettura generale (1)

- ▶ Ruota in cavità interna:
 - Diametro: 72.0 *mm*
 - Spessore: 1.8 *mm*
- ▶ Attuazione con motore Axial Flux Permanent Magnet (AFPM):
 - Impiegati 3 modelli;



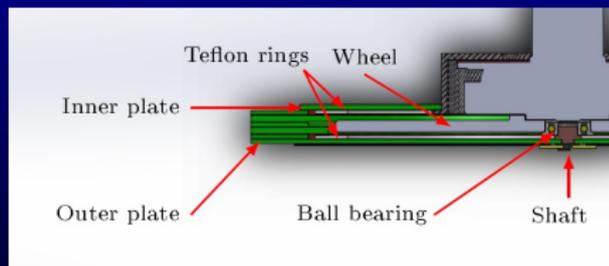
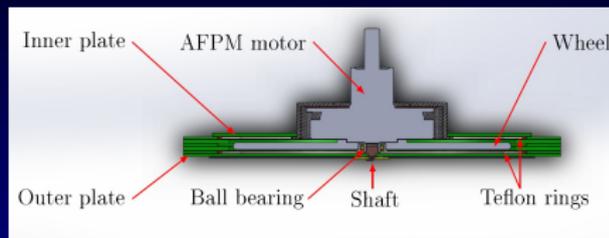
RW/MW: architettura generale (1)

- ▶ Ruota in cavità interna:
 - Diametro: 72.0 *mm*
 - Spessore: 1.8 *mm*
- ▶ Attuazione con motore Axial Flux Permanent Magnet (AFPM):
 - Impiegati 3 modelli;
- ▶ Modulo controllo motore su inner plate;



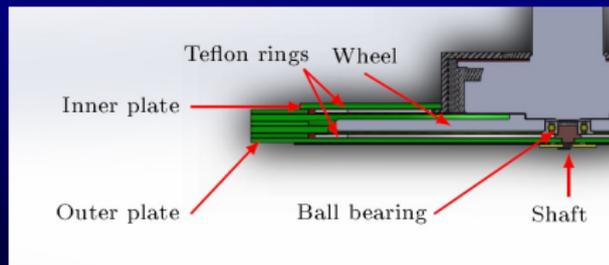
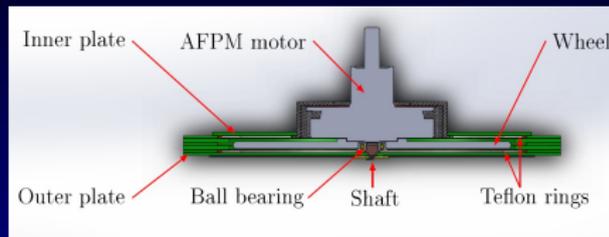
RW/MW: architettura generale (1)

- ▶ Ruota in cavità interna:
 - Diametro: 72.0 mm
 - Spessore: 1.8 mm
- ▶ Attuazione con motore Axial Flux Permanent Magnet (AFPM):
 - Impiegati 3 modelli;
- ▶ Modulo controllo motore su inner plate;
- ▶ Albero per trasmissione forze;



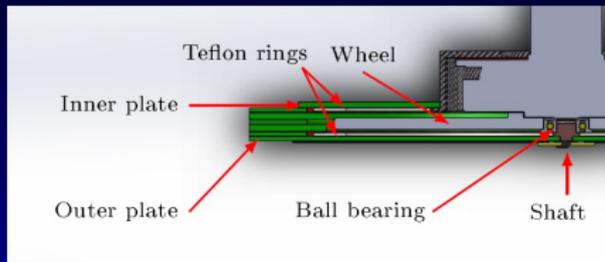
RW/MW: architettura generale (1)

- ▶ Ruota in cavità interna:
 - Diametro: 72.0 *mm*
 - Spessore: 1.8 *mm*
- ▶ Attuazione con motore Axial Flux Permanent Magnet (AFPM):
 - Impiegati 3 modelli;
- ▶ Modulo controllo motore su inner plate;
- ▶ Albero per trasmissione forze;
- ▶ Due cuscinetti per trasmissione coppie giroscopiche.



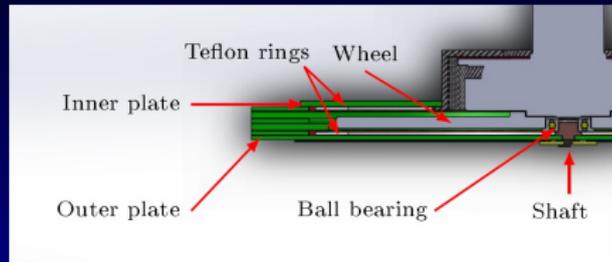
RW/MW: architettura generale (2)

- ▶ Teflon rings per attutire urti;



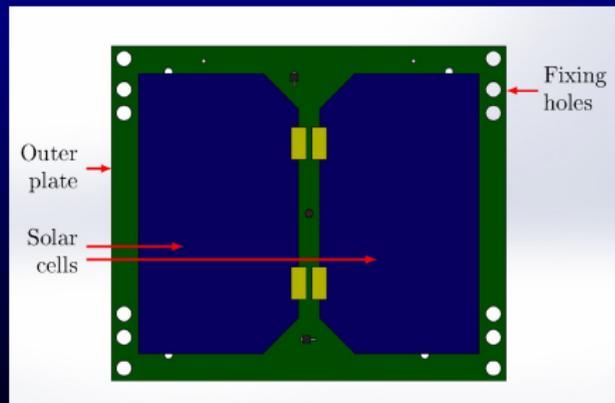
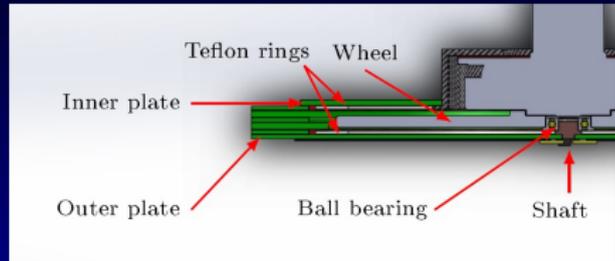
RW/MW: architettura generale (2)

- ▶ Teflon rings per attutire urti;
- ▶ Stack di PCBs;
- ▶ Inner plate dentro struttura 1U;



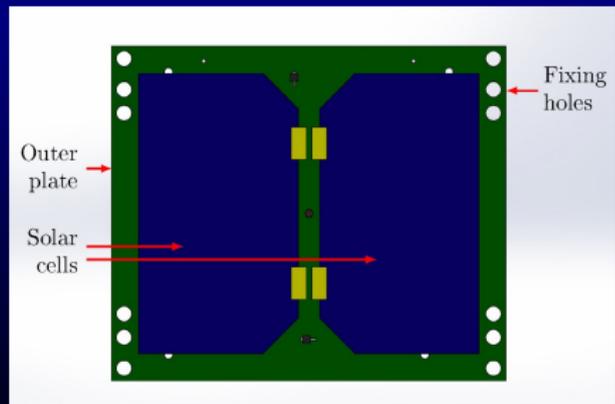
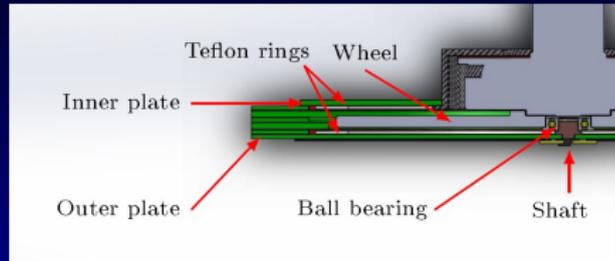
RW/MW: architettura generale (2)

- ▶ Teflon rings per attutire urti;
- ▶ Stack di PCBs;
- ▶ Inner plate dentro struttura 1U;
- ▶ Integrazione celle solari;

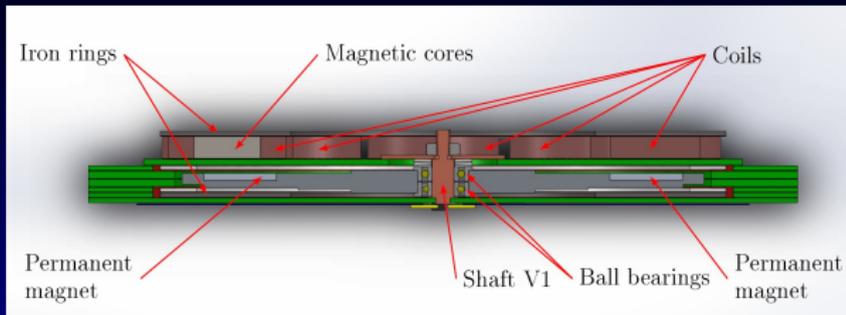


RW/MW: architettura generale (2)

- ▶ Teflon rings per attutire urti;
- ▶ Stack di PCBs;
- ▶ Inner plate dentro struttura 1U;
- ▶ Integrazione celle solari;
- ▶ Fixing holes: fori montaggio per struttura 1U.

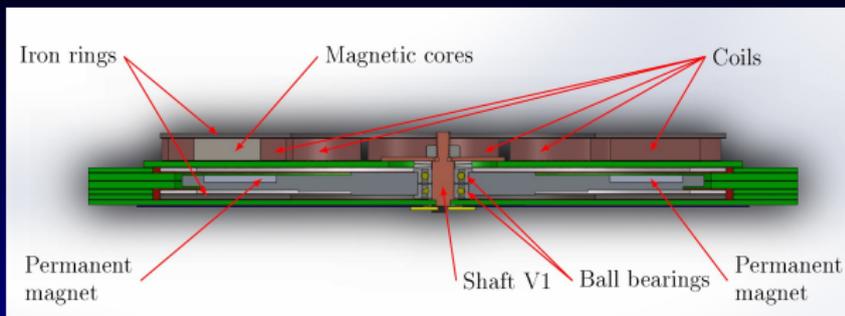


RW/MW: versione 1

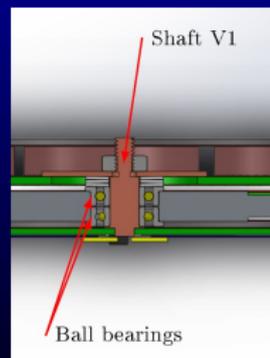


- Dimensioni: $97.8 \times 82.4 \text{ mm}$;

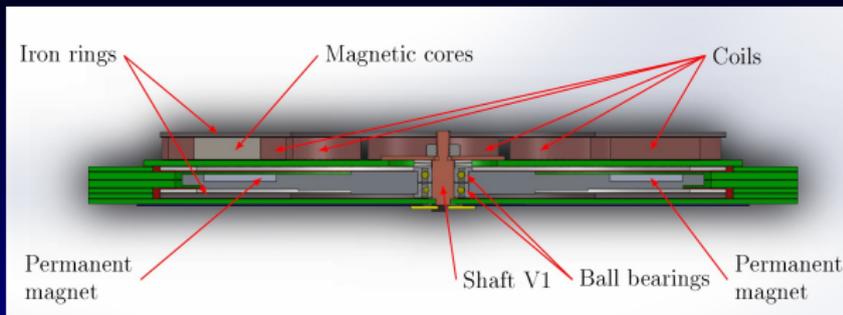
RW/MW: versione 1



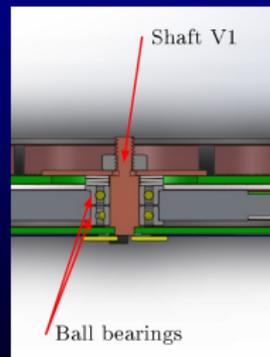
- ▶ Dimensioni: 97.8 x 82.4 mm;
- ▶ Due cuscinetti calettati su shaft;



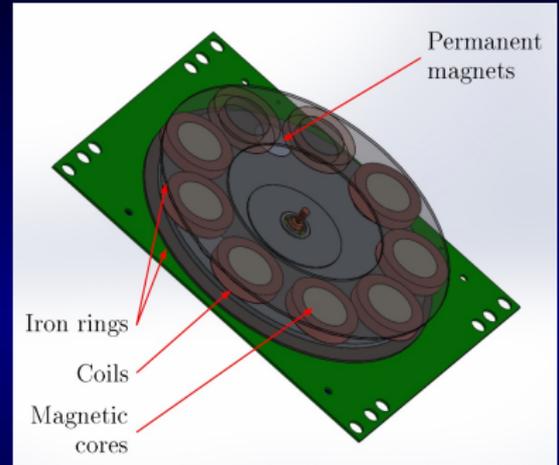
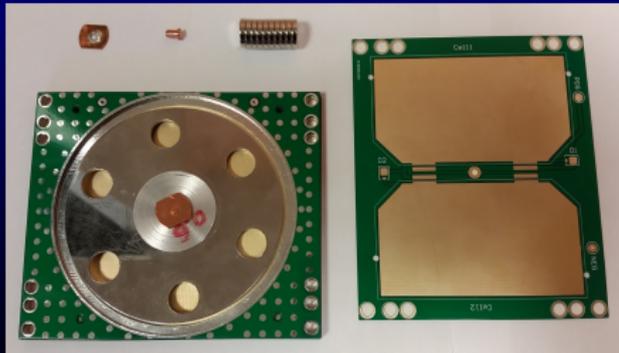
RW/MW: versione 1



- ▶ Dimensioni: 97.8 x 82.4 mm;
- ▶ Due cuscinetti calettati su shaft;
- ▶ Motore AFPM costruito autonomamente;
- ▶ Componenti motore distribuiti.

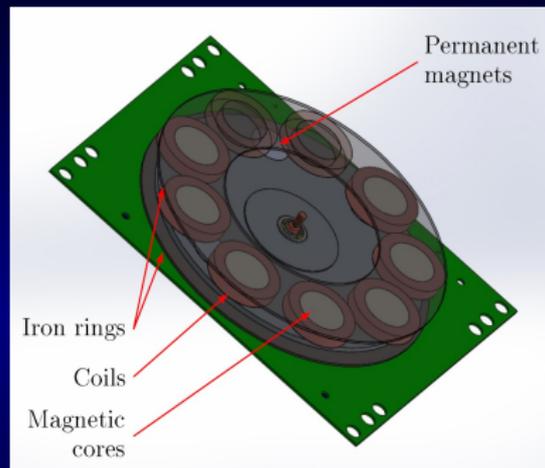
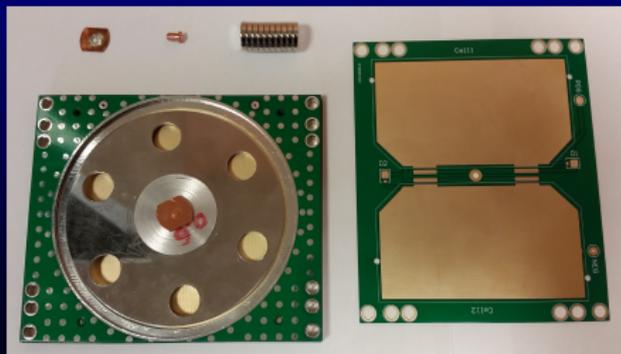


Versione 1: analisi motore AFPM (1)



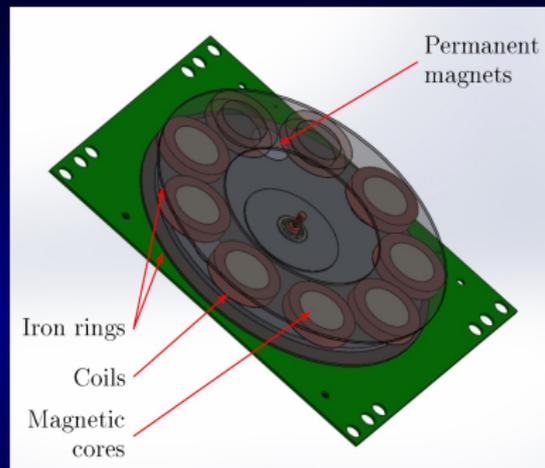
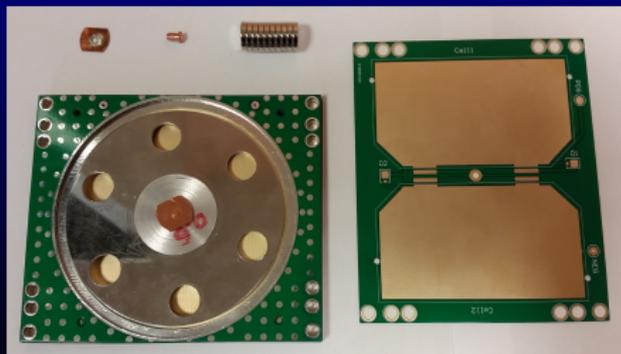
Versione 1: analisi motore AFPM (1)

- ▶ Motore trifase;
- ▶ 3 bobine per fase;



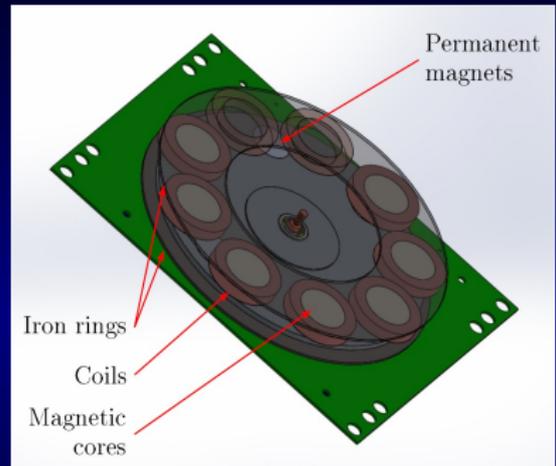
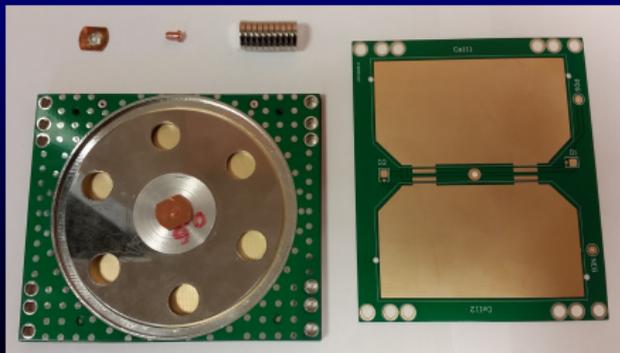
Versione 1: analisi motore AFPM (1)

- ▶ Motore trifase;
- ▶ 3 bobine per fase;



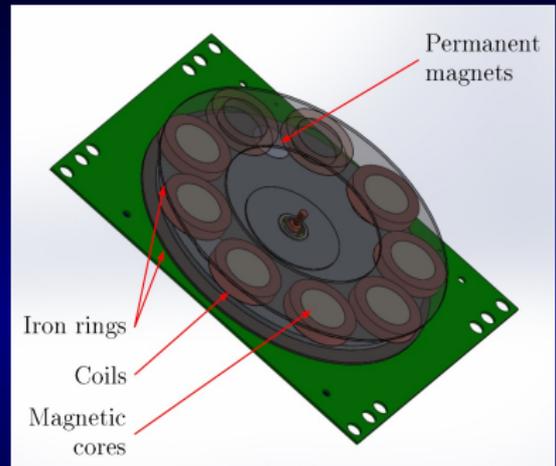
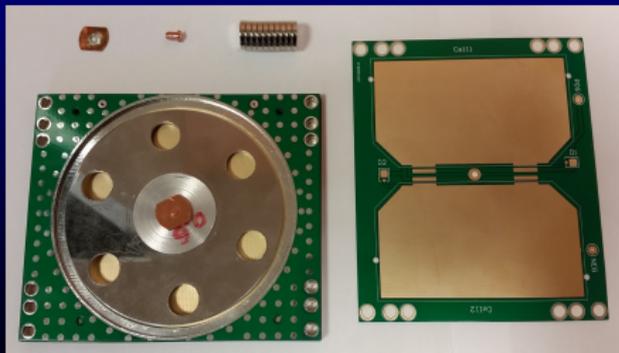
Versione 1: analisi motore AFPM (1)

- ▶ Motore trifase;
- ▶ 3 bobine per fase;
- ▶ Azionamento bobine con onde quadre in tensione: sfasamento di 120° elettrici = 40° meccanici;



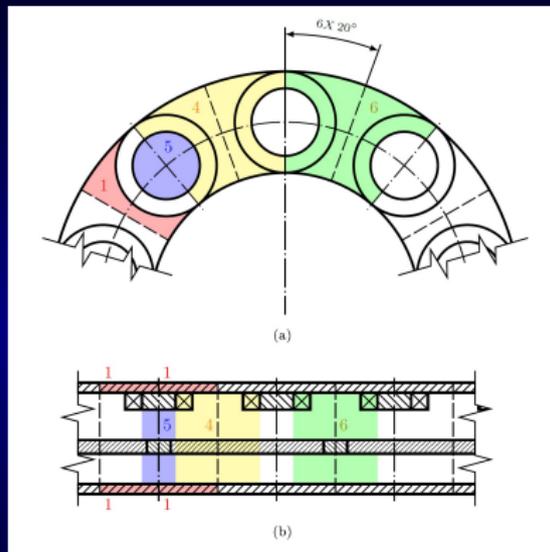
Versione 1: analisi motore AFPM (1)

- ▶ Motore trifase;
- ▶ 3 bobine per fase;
- ▶ Azionamento bobine con onde quadre in tensione: sfasamento di 120° elettrici = 40° meccanici;
- ▶ Interazione con magneti.



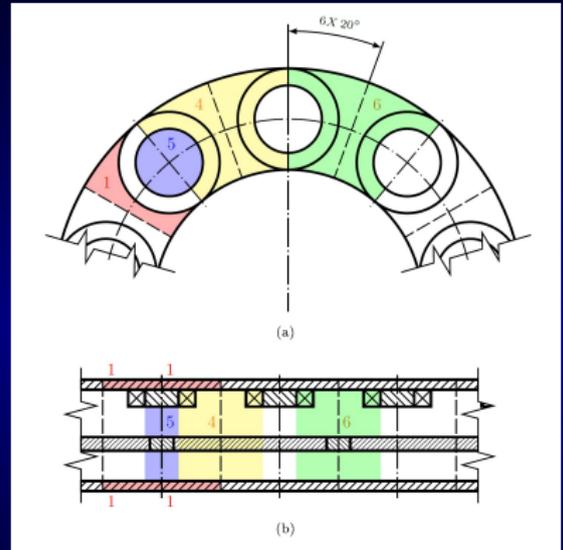
Versione 1: analisi motore AFPM (2)

1. Analisi circuito magnetico:



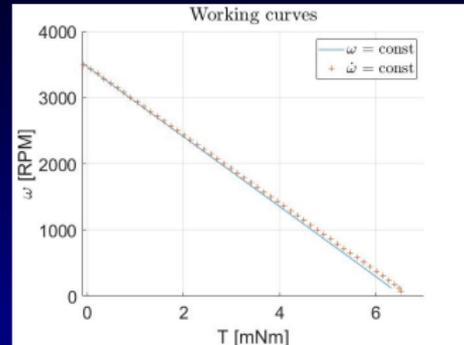
Versione 1: analisi motore AFPM (2)

1. Analisi circuito magnetico:
 - ▶ Verifica saturazione iron rings: limitazione tensione coils a 2 V.



Versione 1: analisi motore AFPM (2)

1. Analisi circuito magnetico:
 - ▶ Verifica saturazione iron rings: limitazione tensione coils a 2 V.
2. Valutazione prestazioni:
 - ▶ Valutazione curva $T - \omega$;



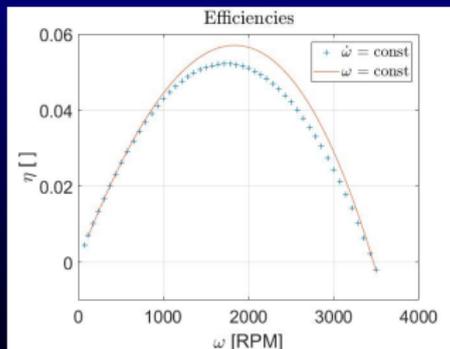
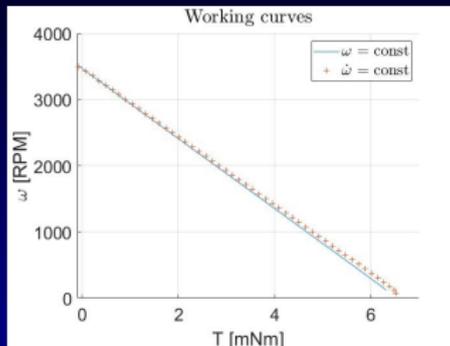
Versione 1: analisi motore AFPM (2)

1. Analisi circuito magnetico:

- ▶ Verifica saturazione iron rings: limitazione tensione coils a 2 V.

2. Valutazione prestazioni:

- ▶ Valutazione curva $T - \omega$;
- ▶ Valutazione rendimento $\eta - \omega$;



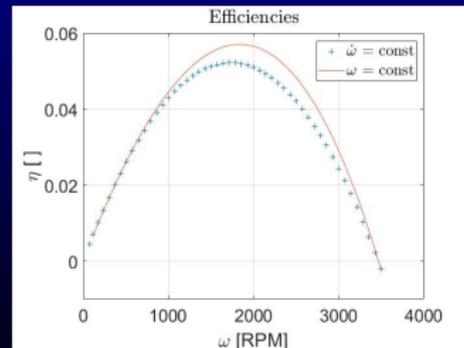
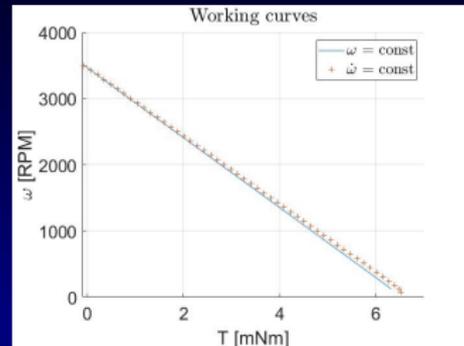
Versione 1: analisi motore AFPM (2)

1. Analisi circuito magnetico:

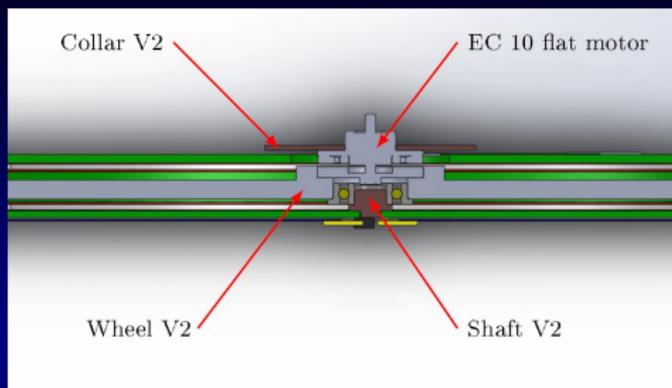
- ▶ Verifica saturazione iron rings: limitazione tensione coils a 2 V.

2. Valutazione prestazioni:

- ▶ Valutazione curva $T - \omega$;
- ▶ Valutazione rendimento $\eta - \omega$;
- ▶ Rendimento non accettabile: scelta motore commerciale.



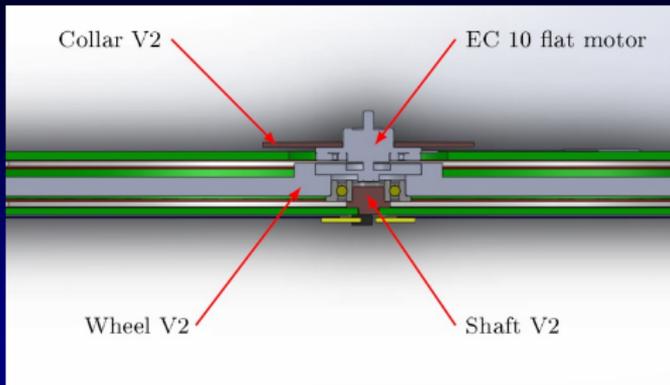
RW/MW: versione 2



- ▶ Motore Maxon EC 10 flat;



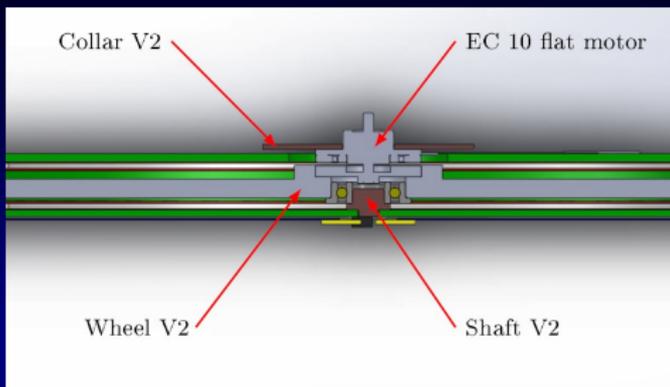
RW/MW: versione 2



- ▶ Motore Maxon EC 10 flat;
- ▶ Singolo cuscinetto;



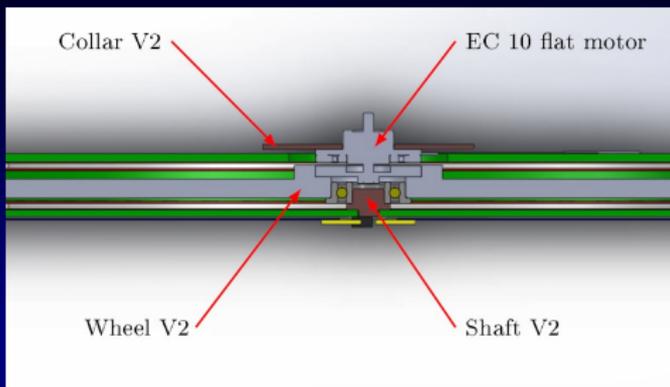
RW/MW: versione 2



- ▶ Motore Maxon EC 10 flat;
- ▶ Singolo cuscinetto;
- ▶ Interfaccia ruota con rotore tramite colletto;



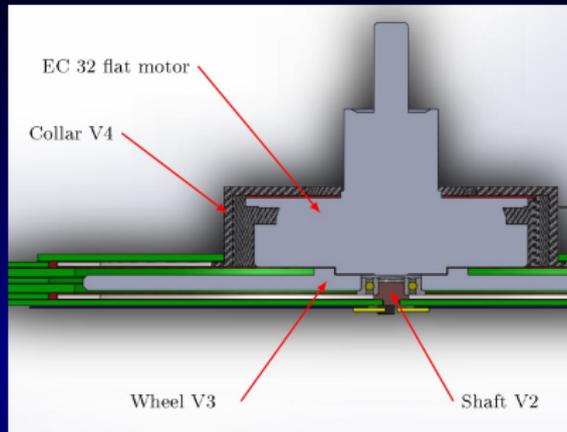
RW/MW: versione 2



- ▶ Motore Maxon EC 10 flat;
- ▶ Singolo cuscinetto;
- ▶ Interfaccia ruota con rotore tramite colletto;
- ▶ Uscita di produzione motore.



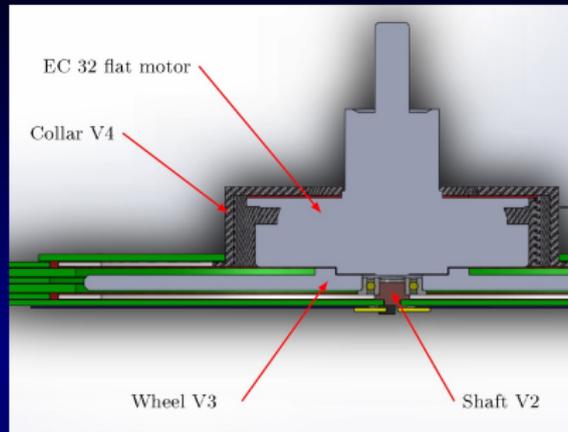
RW/MW: versioni 3-4



- ▶ Motore Maxon EC 32 flat;



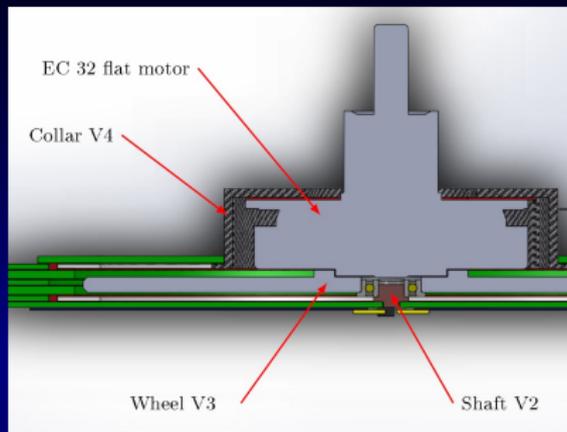
RW/MW: versioni 3-4



- ▶ Motore Maxon EC 32 flat;
- ▶ Collar V4 in CFRP: tessuto $0^{\circ}/90^{\circ}$;



RW/MW: versioni 3-4



- ▶ Motore Maxon EC 32 flat;
- ▶ Collar V4 in CFRP: tessuto $0^\circ/90^\circ$;
- ▶ Adattato colletto ruota.

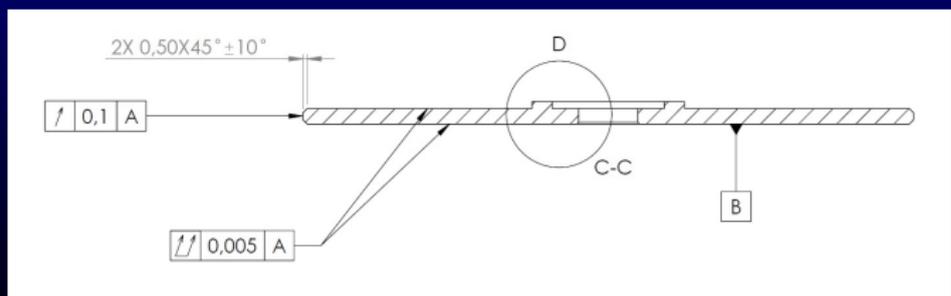
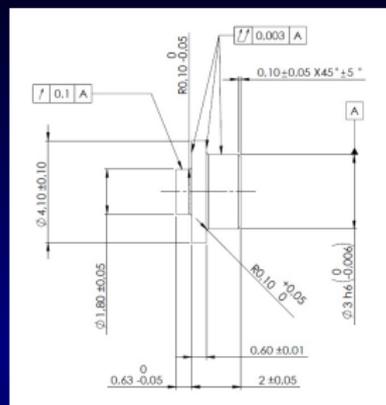


Versioni 3-4: analisi tolleranze

- ▶ Verifica compatibilità spessori con cavità ruota;

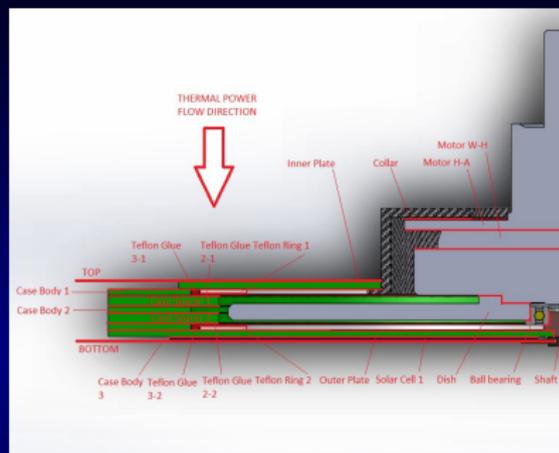
Versioni 3-4: analisi tolleranze

- ▶ Verifica compatibilità spessori con cavità ruota;
- ▶ Assegnazione quote ruota e shaft V2;
- ▶ Assegnazione tolleranze ruota e shaft V2.



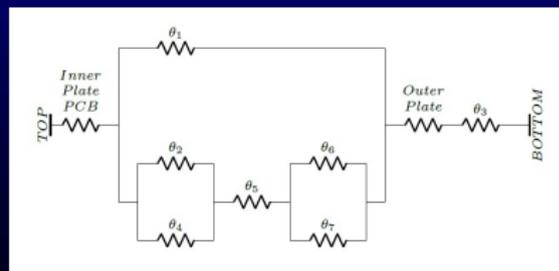
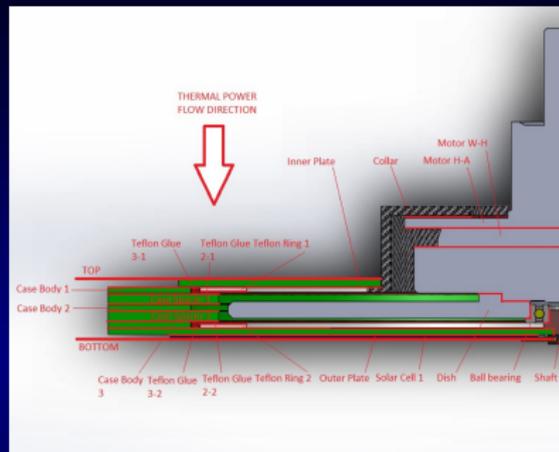
Versione 4: analisi termica

1. Calcolo resistenze top-bottom componenti;



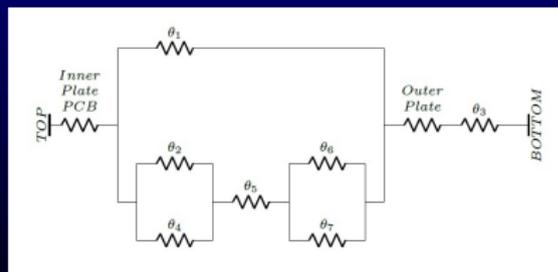
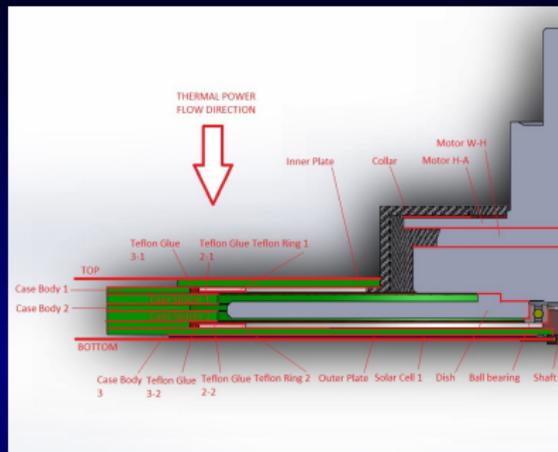
Versione 4: analisi termica

1. Calcolo resistenze top-bottom componenti;
2. Modellizzazione assieme;



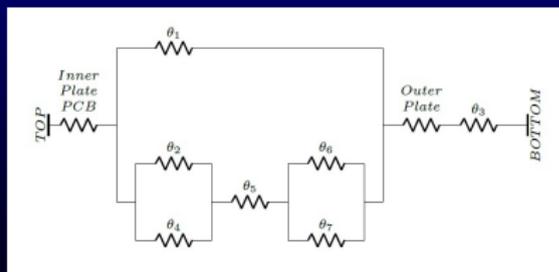
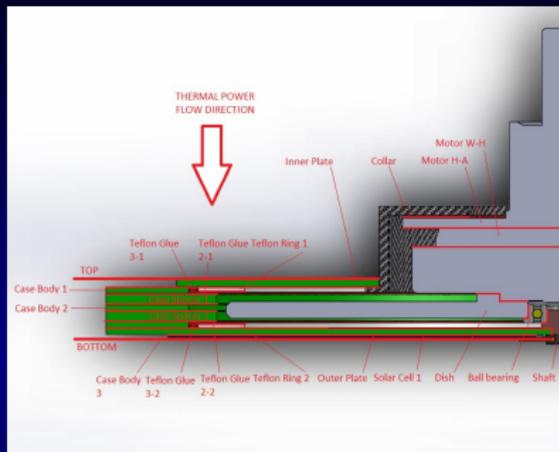
Versione 4: analisi termica

1. Calcolo resistenze top-bottom componenti;
2. Modellizzazione assieme;
3. Calcolo resistenza tile;



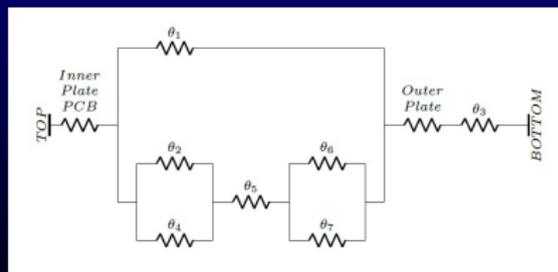
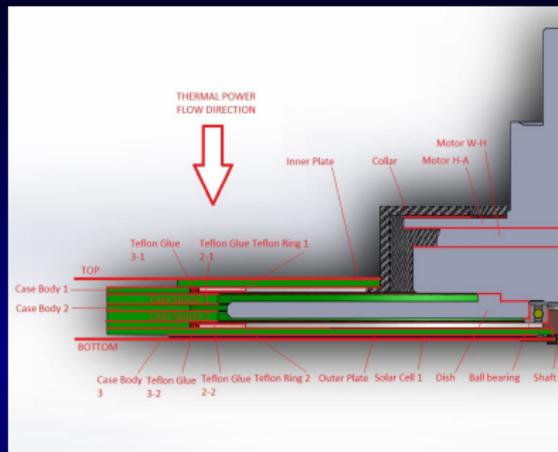
Versione 4: analisi termica

1. Calcolo resistenze top-bottom componenti;
2. Modellizzazione assieme;
3. Calcolo resistenza tile;
4. Simulazione cold case:
 - ▶ Payload a 20 °C;
 - ▶ Irraggiamento per albedo terrestre;
 - ▶ Motore spento.



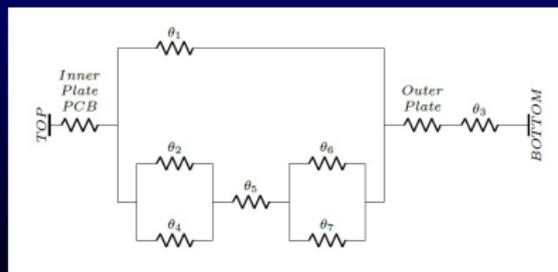
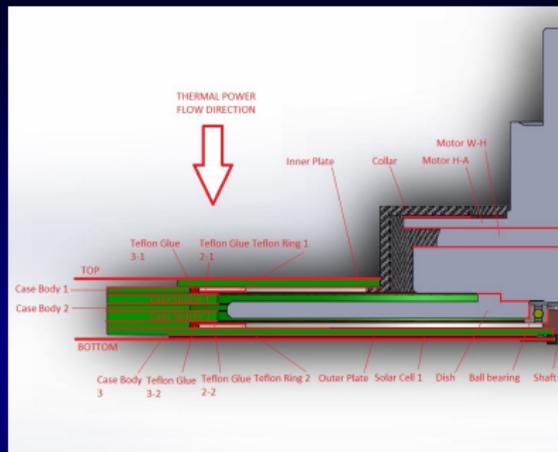
Versione 4: analisi termica

1. Calcolo resistenze top-bottom componenti;
2. Modellizzazione assieme;
3. Calcolo resistenza tile;
4. Simulazione cold case:
 - ▶ Payload a 20 °C;
 - ▶ Irraggiamento per albedo terrestre;
 - ▶ Motore spento.
5. Simulazione hot case:
 - ▶ Irraggiamento solare;
 - ▶ Motore in condizioni di massimo continuativo.



Versione 4: analisi termica

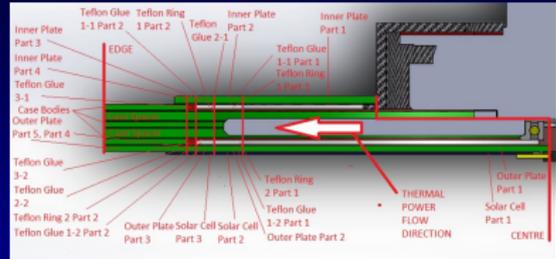
1. Calcolo resistenze top-bottom componenti;
2. Modellizzazione assieme;
3. Calcolo resistenza tile;
4. Simulazione cold case:
 - ▶ Payload a 20 °C;
 - ▶ Irraggiamento per albedo terrestre;
 - ▶ Motore spento.
5. Simulazione hot case:
 - ▶ Irraggiamento solare;
 - ▶ Motore in condizioni di massimo continuativo.
6. Temperature entro ammissibili componenti;



Versione 4: analisi termica

1. Calcolo resistenze top-bottom componenti;
2. Modellizzazione assieme;
3. Calcolo resistenza tile;
4. Simulazione cold case:
 - ▶ Payload a 20 °C;
 - ▶ Irraggiamento per albedo terrestre;
 - ▶ Motore spento.
5. Simulazione hot case:
 - ▶ Irraggiamento solare;
 - ▶ Motore in condizioni di massimo continuativo.
6. Temperature entro ammissibili componenti;

7. Calcolo resistenza centre-edge.



Versione 4: analisi strutturale (1)

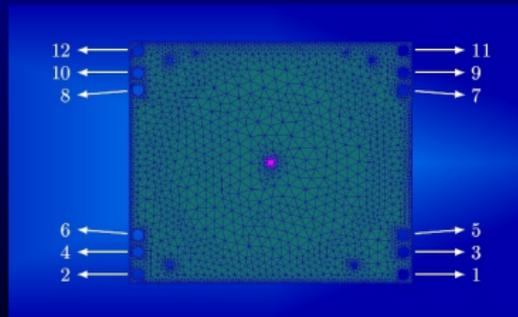
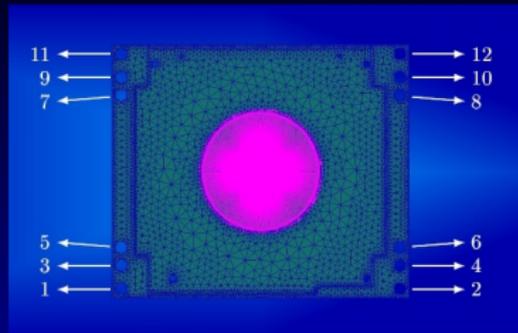
1. Valutazione massa V4: 102 g;

Versione 4: analisi strutturale (1)

1. Valutazione massa V4: 102 g;
2. Condizioni di lancio:
 - ▶ Verifica carichi inerziali;
 - ▶ Lanciatore Vega;
 - ▶ Carico di robustezza:
 $7\text{ g} \cdot 1.8 \simeq 13\text{ g}$.

Versione 4: analisi strutturale (1)

1. Valutazione massa V4: 102 g;
2. Condizioni di lancio:
 - ▶ Verifica carichi inerziali;
 - ▶ Lanciatore Vega;
 - ▶ Carico di robustezza:
 $7 g \cdot 1.8 \simeq 13 g$.
3. Modello FEM:
 - ▶ Assieme motore-ruota rigido (MPCs);



Versione 4: analisi strutturale (1)

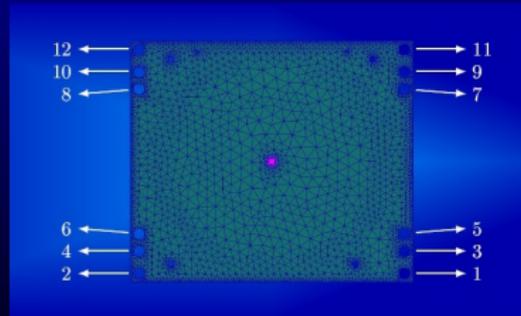
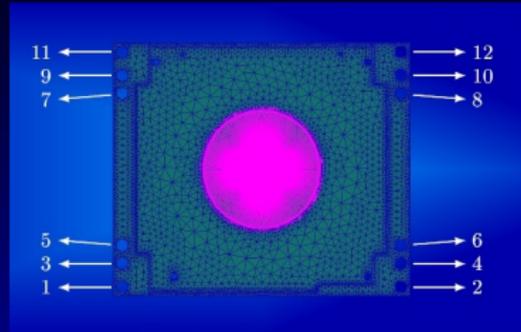
1. Valutazione massa V4: 102 g;

2. Condizioni di lancio:

- ▶ Verifica carichi inerziali;
- ▶ Lanciatore Vega;
- ▶ Carico di robustezza:
 $7 g \cdot 1.8 \simeq 13 g$.

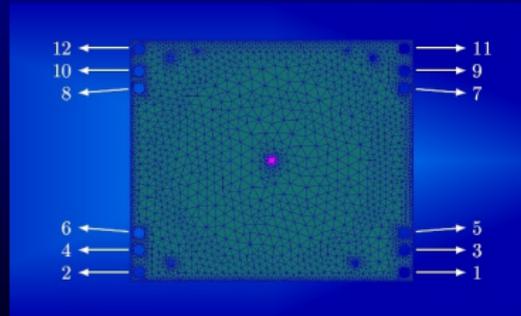
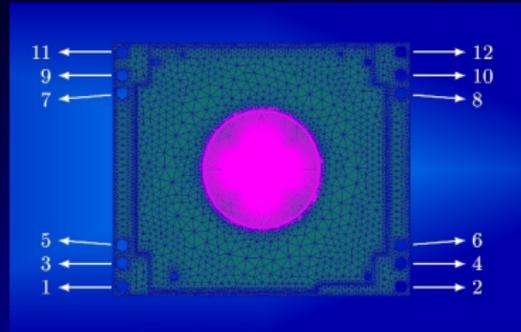
3. Modello FEM:

- ▶ Assieme motore-ruota rigido (MPCs);
- ▶ Materiale PCB: resina epossidica;
- ▶ Incollaggi ideali;



Versione 4: analisi strutturale (1)

1. Valutazione massa V4: 102 g;
2. Condizioni di lancio:
 - ▶ Verifica carichi inerziali;
 - ▶ Lanciatore Vega;
 - ▶ Carico di robustezza:
 $7 g \cdot 1.8 \simeq 13 g$.
3. Modello FEM:
 - ▶ Assieme motore-ruota rigido (MPCs);
 - ▶ Materiale PCB: resina epossidica;
 - ▶ Incollaggi ideali;
 - ▶ Fori di montaggio bloccati;



Versione 4: analisi strutturale (1)

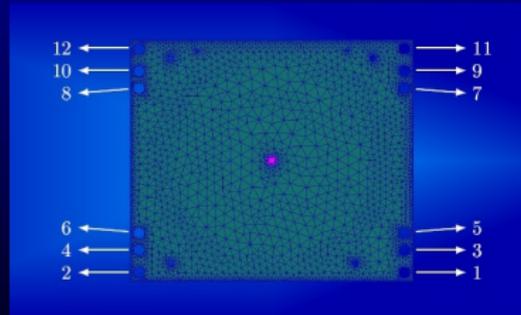
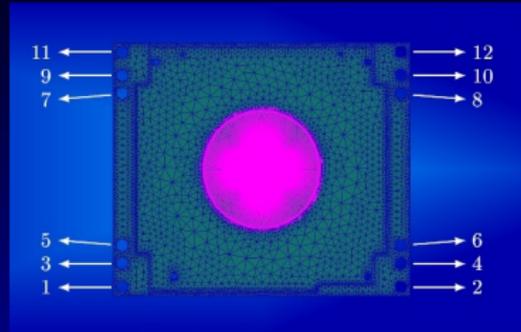
1. Valutazione massa V4: 102 g;

2. Condizioni di lancio:

- ▶ Verifica carichi inerziali;
- ▶ Lanciatore Vega;
- ▶ Carico di robustezza:
 $7 g \cdot 1.8 \simeq 13 g$.

3. Modello FEM:

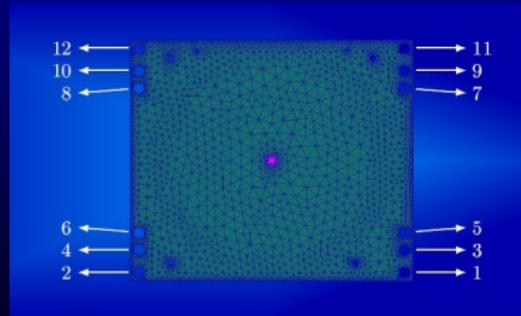
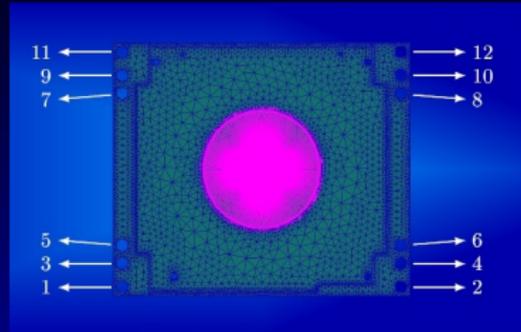
- ▶ Assieme motore-ruota rigido (MPCs);
- ▶ Materiale PCB: resina epossidica;
- ▶ Incollaggi ideali;
- ▶ Fori di montaggio bloccati;
- ▶ Carichi lungo tre assi;



Versione 4: analisi strutturale (1)

1. Valutazione massa V4: 102 g;
2. Condizioni di lancio:
 - ▶ Verifica carichi inerziali;
 - ▶ Lanciatore Vega;
 - ▶ Carico di robustezza:
 $7 g \cdot 1.8 \simeq 13 g$.
3. Modello FEM:

- ▶ Assieme motore-ruota rigido (MPCs);
- ▶ Materiale PCB: resina epossidica;
- ▶ Incollaggi ideali;
- ▶ Fori di montaggio bloccati;
- ▶ Carichi lungo tre assi;
- ▶ Elementi tetra (Tet10).



Versione 4: analisi strutturale (2)

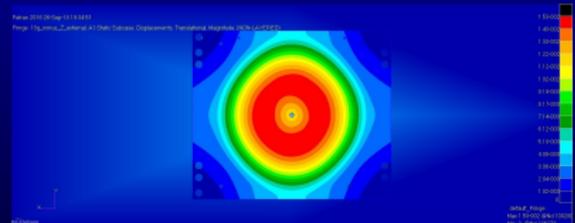
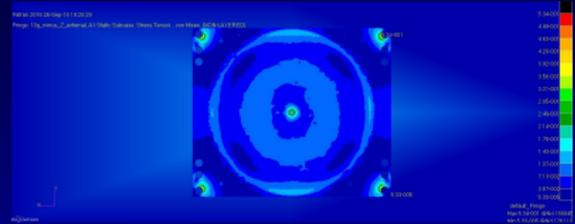
Risultati:

1. Frequenze di risonanza fondamentali compatibili con Vega;

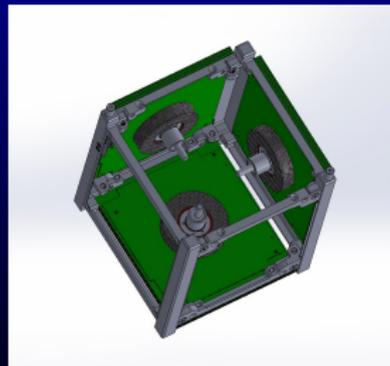
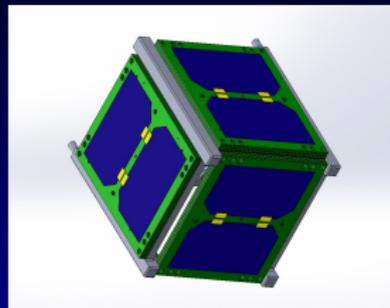
Versione 4: analisi strutturale (2)

Risultati:

1. Frequenze di risonanza fondamentali compatibili con Vega;
2. Tensioni e spostamenti massimi per carichi normali;

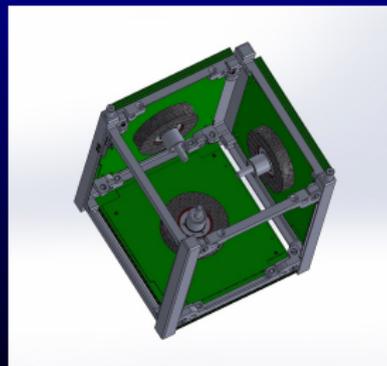
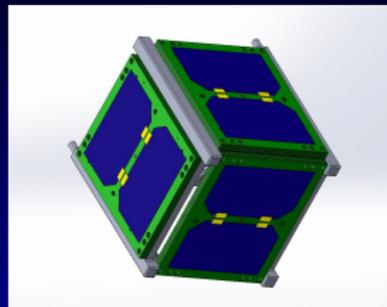
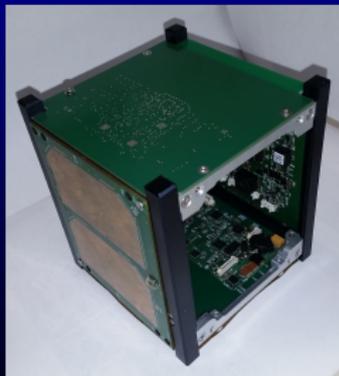


Conclusioni e lavori futuri



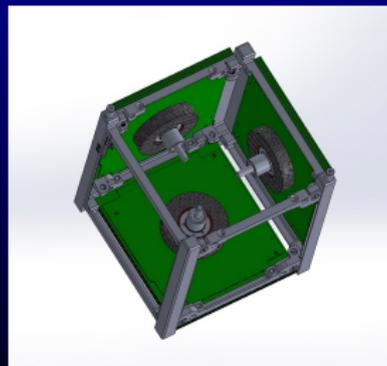
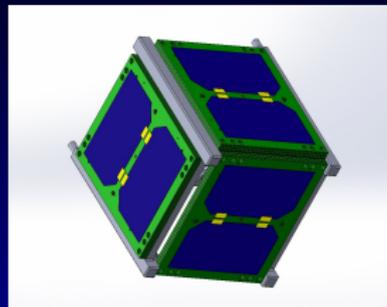
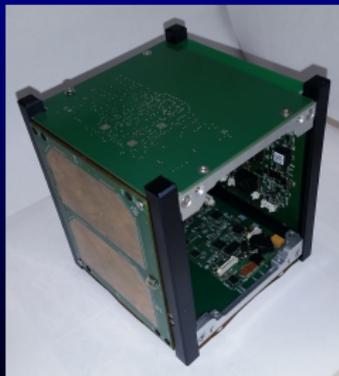
Conclusioni e lavori futuri

- ▶ Massa EC 32 flat eccessiva:
sviluppo autonomo motore con
diversa disposizione magneti;



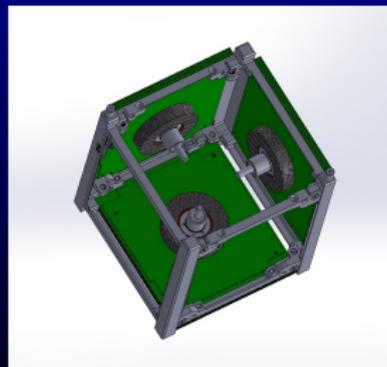
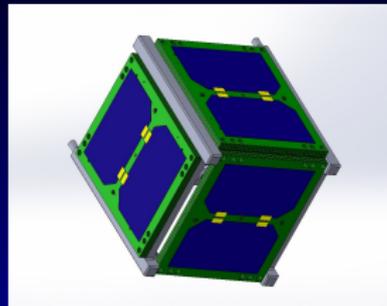
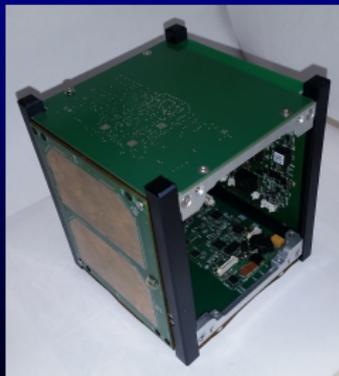
Conclusioni e lavori futuri

- ▶ Massa EC 32 flat eccessiva:
sviluppo autonomo motore con
diversa disposizione magneti;
- ▶ Miglioramento analisi termica:
analisi completa CubeSat;



Conclusioni e lavori futuri

- ▶ Massa EC 32 flat eccessiva:
sviluppo autonomo motore con
diversa disposizione magneti;
- ▶ Miglioramento analisi termica:
analisi completa CubeSat;
- ▶ Impiego CFRP al posto di FR4.



Grazie per l'attenzione