

.....

Politecnico di Milano  
Scuola del Design

Corso di Laurea Magistrale in Design & Engineering

# DESIGN FOR 3D PRINTING

**Progettazione di uno stabilizzatore attivo  
per action camera GoPro**

Tesi di laurea di:  
Davide Caprioli (matr. 797030)

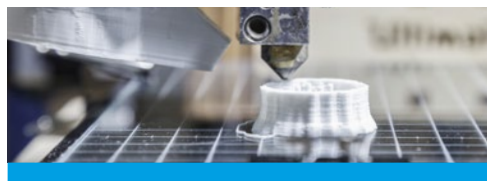
Docente relatore:  
Riccardo Gatti

Anno Accademico 2014/2015



## Indice generale

Introduzione.....VII



### Parte 1<sup>a</sup> - Contesto progettuale 1

1	Additive manufacturing .....	2	2	Progettare per l'additive manufacturing.....	24
1.1	Definizione	2	2.1	Tesi	24
1.2	Origini	3	2.2	Progettazione scalabile e logica multi-materiale	26
1.3	Principali tecnologie	4	2.3	Geometrie complesse per una maggiore funzionalità	27
1.4	Utilizzo in ambito industriale	9	2.4	Complessità a costo zero	27
1.5	Un fenomeno popolare: makers e DIY	10	2.5	Evoluzione della catena di approvvigionamento	27
1.6	Un attivatore per nuovi prodotti e nuove possibilità imprenditoriali	12	2.6	Evoluzione dell'utente	28
1.7	Adozione ed espansione a livello industriale	14	2.7	Logica "open"	28
1.8	Dal prototipo al prodotto finito	15	2.8	Elenco degli obiettivi teorici	29
1.9	Materiali per una nuova generazione di prodotti	17	3	Definizione concept .....	30
1.10	Scenari di implementazione per l'innovazione	18	3.1	Ricerca di un'area progettuale	30
1.11	Additive manufacturing e costi diretti	20	3.2	Selezione di una categoria di prodotto	32
1.12	Trarre valore dell'additive manufacturing	22	3.3	Dispositivi di stabilizzazione: funzionamento	33
1.13	Prospettive di una produzione domestica	23	3.4	Prodotti esistenti: stato dell'arte	36
			3.5	Stabilizzatore attivo per action camera GoPro	38
			3.6	Brief di progetto	39



### Parte 2<sup>a</sup> -Sviluppo prodotto 41

4	Prototipo digitale A.....	42	6	Prototipo fisico C.....	96
4.1	Ricerca tecnologica preliminare	42	6.1	Applicazione della progettazione scalabile	96
4.2	Gimbal controller	42	6.2	Modifiche apportate al prototipo B	97
4.3	Motori	44	6.3	Componenti	98
4.4	Batterie	46	6.4	Adattamento della scalabilità alla problematica di un baricentro variabile	100
4.5	Reperimento dei materiali	47	6.5	Differenze tra le ipotesi di prototipo	102
4.6	Assemblaggio del controller	50	6.6	Assemblaggio prototipo FDM	106
4.7	Layout generale e dimensioni	52	6.7	Realizzazione prototipo DMLS	113
4.8	Componenti	54	6.8	Test prototipo FDM	114
4.9	Funzionamento	56	6.9	Galleria fotografica e ingombri	116
4.10	Ipotesi impianto elettrico	57	6.10	Costi effettivi prototipo FDM	120
4.11	Ipotesi sistema di impermeabilizzazione	59	6.11	Ipotesi di costo per 1000 esemplari	121
5	Prototipo fisico B.....	62	7	Conclusioni.....	122
5.1	Criticità evidenziate nel prototipo A	62	7.1	Progettazione scalabile: obiettivi raggiunti e limiti osservati	122
5.2	Controller proprietario	63	7.2	Verifica degli obiettivi teorici del progetto	124
5.3	Componenti	64	7.3	Verifica degli obiettivi del brief progettuale	125
5.4	Ipotesi di setup	66	7.4	Considerazioni economiche sulle tecnologie di produzione	124
5.5	Elettronica	68	7.5	Commenti conclusivi e scenari futuri	127
5.6	Collegamenti elettrici	69			
5.7	Produzione dei componenti	70			
5.8	Assemblaggio dell'elettronica	76			
5.9	Assemblaggio del gimbal	80			
5.10	Calibrazione IMU	92			
5.11	Setup del firmware	93			
5.12	Test e criticità evidenziate	94			
				Bibliografia, webgrafia, ringraziamenti .....	129

## Introduzione

Attualmente, la manifattura additiva sta dimostrando potenzialità crescenti nei confronti della produzione industriale. A questo proposito, la rivista 3D printing creative (n°3) ha pubblicato un articolo intitolato "La stampa 3D crea nuovi spazi" dove Frédéric Vacher, Media Strategy Marketing Director di Dessault Systèmes, dichiara quanto segue:

*"Questi sviluppi offrono opportunità reali per nuove tipologie di servizi che consentiranno alle aziende di trarre il massimo beneficio dalla tecnologia (additiva [N.d.A.]). L'industria manifatturiera entra così in una nuova era nella quale le start-up potranno realizzare progetti e prodotti di qualità senza la necessità di una fabbrica. [...] In passato immaginare un prodotto era una cosa, realizzarlo un'altra. Le stampanti 3D hanno cambiato tutto questo: ora è possibile creare un singolo prodotto, gestire piccoli lotti di produzione e richieste di personalizzazione. Se la domanda aumenta, è sufficiente aggiungere più macchine per soddisfarla."*

Il progetto di tesi mira a verificare la validità di queste affermazioni nel caso di un prodotto di media complessità, con lo sviluppo e la realizzazione di un prototipo pensato per una produzione definitiva in additive manufacturing e immaginato per un'ipotetica start-up.

La tesi si articola in una fase di ricerca e in una successiva fase progettuale. Nella fase di ricerca sono stati individuati alcuni potenziali vantaggi della tecnologia additiva in grado di favorire la sperimentazione di nuovi modelli di business a partire dallo studio di nuovi prodotti, appositamente concepiti per sfruttare i punti di forza di un'eventuale integrazione dell'additive manufacturing nella catena produttiva. Nella seconda parte della tesi, per valutare benefici e conseguenze di una progettazione orientata a una produzione in stampa 3D, è stato immaginato il progetto di un dispositivo elettronico consumer, dotato di caratteristiche che lo collocano a metà strada tra un oggetto potenzialmente gestibile in tutte le sue parti da un utente evoluto, secondo una logica tipicamente maker, e un oggetto standardizzato, pensato per una produzione seriale in piccola tiratura. Lo scopo principale del progetto è stato verificare potenzialità e limiti di questo approccio, valutandone la convenienza nel caso di un prodotto complessità media.



Parte 1<sup>a</sup>

# Contesto progettuale

1. Additive Manufacturing
2. Progettare per l'additive manufacturing
3. Definizione concept

# 1 Additive Manufacturing

## 1.1 Definizione

Con il termine "additive manufacturing" ci si riferisce ad una famiglia di tecnologie di produzione aventi come principio di funzionamento la stratificazione progressiva di materiale su livelli paralleli e perpendicolari ad un "asse Z" (verso l'alto), al fine di ottenere un oggetto tangibile tridimensionale.

Gli strati di materiale sovrapposto possono essere generati con vari metodi a seconda della tecnologia applicata: ogni strato può essere il risultato della deposizione di un filamento di materiale estruso, della sinterizzazione puntiforme e progressiva di un letto di polvere o ancora dell'indurimento tramite luce UV di un fotopolimero sensibile agli ultravioletti. Vi sono molte tecniche legate all'additive manufacturing; saranno espone in modo più esaustivo e specifico in uno dei paragrafi seguenti.

Additive manufacturing è un termine coniato per racchiudere al proprio interno i tre concetti di rapid prototyping, rapid tooling e rapid manufacturing, allo scopo di identificare le tre principali destinazioni di utilizzo di questa tecnologia oggi.

Come sarà descritto nel prossimo paragrafo, l'additive manufacturing è nato con l'intento di far evolvere in modo sostanziale i metodi di prototipazione utilizzati fino al momento della sua introduzione, ovvero la realizzazione pressoché artigianale di modelli in legno. In seguito, le tecnologie di fabbricazione additiva sono diventate utili anche nel campo della produzione di attrezzature "ad hoc" per macchinari industriali: pinze speciali per bracci robotici, staffe, condotti di raffreddamento ecc. Oggi è possibile realizzare stampi per piccole e piccolissime serie di oggetti destinati alla produzione tramite stampaggio a iniezione.

La nuova frontiera di utilizzo della fabbricazione additiva è il cosiddetto "rapid manufacturing", ovvero la produzione di componenti destinati ad essere utilizzati direttamente nel prodotto finito. Con tutta probabilità l'additive manufacturing è destinato ad evolversi, abbastanza per affiancare e sostituire le più comuni tecniche di produzione industriale utilizzate oggigiorno. Il tutto in maniera sempre più pervasiva, rapida e conveniente.

**Il workflow** necessario all'ottenimento di un oggetto tridimensionale è costituito da alcuni passaggi fondamentali che, nonostante le numerose tecnologie disponibili nell'ambito della fabbricazione additiva, rimangono pressoché identici.



**001. Un file .stl** rappresenta un solido la cui superficie è stata discretizzata in triangoli. Esso consiste delle coordinate X, Y e Z ripetute per ciascuno dei tre vertici di ciascun triangolo, con un vettore per descrivere l'orientamento della normale alla superficie. Più fitto è il reticolo di triangoli più informazioni vengono fornite al software incaricato di trasformare la geometria in movimenti macchina (comunemente denominato "slicer").

Il formato .stl non è l'unico formato esistente nell'ambito della fabbricazione additiva. Quasi sicuramente è il più utilizzato, perché molto semplice da generare e processare. Ha tuttavia delle limitazioni dal momento che descrive esclusivamente la geometria dell'oggetto senza incorporare informazioni aggiuntive (quali ad esempio il colore delle facce nel caso di una stampa tridimensionale a colori).

## 1.2 Origini



L'additive manufacturing è più conosciuto come "stampa 3D" ed è percepito da un pubblico non specialistico come un fenomeno recente. In realtà, la stampa 3D è pressoché coetanea della più familiare stampa bidimensionale. Entrambe, infatti, sono state inventate nei primi anni '80 e, più specificamente, è un brevetto datato 1986 a decretare l'avvio ufficiale del "rapid prototyping" - il termine "additive manufacturing" verrà coniato solo in seguito. L'ingegnere americano Charles Hull mise a punto la tecnica della stereolitografia e subito dopo fondò la 3D System, oggi tra le maggiori aziende mondiali specializzate in stampa 3D. Per circa un quarto di secolo questa tecnologia è rimasta confinata nelle realtà aziendali ed è stata impiegata esclusivamente per realizzare modelli estetici e parti di prototipi.

In quegli stessi anni, altre tecniche di rapid prototyping furono inventate e brevettate. Alcune, oggi, sono molto note: tra queste, la modellazione a deposizione fusa, la stereolitografia e la sinterizzazione di polveri. Tuttavia, al di là della maggiore o minore notorietà, tutte le tecniche di additive manufacturing sono ormai piuttosto mature, tanto da non essere quasi più coperte dai brevetti originali, scaduti tra il 2009 e il 2014. Venuti meno i brevetti, la stampa 3D ha potuto diventare sempre più accessibile: un fenomeno di costume e un abilitatore di nuovi scenari produttivi e professionali.

Negli anni '80, il rapid prototyping gettò le basi per un vero cambio di paradigma per quanto riguarda il processo progettuale. La sua invenzione, infatti, andò di pari passo con l'introduzione del moderno sistema CAD (Computer Aided Design), fondamentale controparte software necessaria al corretto sfruttamento di questa

tecnologia: senza l'elaborazione di un modello 3D all'interno di un CAD è impossibile ottenere un qualsiasi tipo di risultato.

Prima di questa rivoluzione, produrre componenti di alta precisione era un compito riservato alla cosiddetta fabbricazione sottrattiva: una famiglia di processi tecnologici che si basano sull'asportazione di materiale (truciolo) a partire da un blocco grezzo di partenza (fresatura, tornitura, ecc.). Nel periodo di invenzione della stereolitografia e delle altre tecniche di rapid prototyping, la fabbricazione sottrattiva aveva già raggiunto il culmine delle sue potenzialità; tuttavia, non risultava adatta alla produzione di forme complesse, molto difficili da ottenere senza l'ausilio di un applicativo software.

L'introduzione del rapid prototyping rese possibile l'ottenimento di forme più elaborate e ridusse enormemente i tempi necessari a realizzare modelli tangibili di quanto concepito su carta e all'interno del software. Il passaggio dal progetto all'oggetto era diventato questione di giorni o addirittura di ore, laddove prima era necessario richiedere l'intervento di un modellista esperto e preventivare settimane di lavoro per poter ottenere un primo risultato tangibile.

Questa è la ragione principale per cui è opportuno considerare l'introduzione del rapid prototyping, insieme al digital prototyping - ovvero la progettazione 3D all'interno di un ambiente software - come una vera e propria pietra miliare per quanto riguarda l'industrial design. Poter vedere e toccare con mano il proprio lavoro, esplorarne i meriti e i difetti, è fondamentale per ogni progettista; consente inoltre di avere cicli iterativi di modifiche più ravvicinati nel tempo e, conseguentemente, un risultato migliore.

La fabbricazione additiva, a partire dagli anni della sua introduzione, ha svolto il ruolo fondamentale di contrarre tempi e costi di sviluppo dei prodotti in tutte le fasi del processo di progettazione e, probabilmente, a seguito di progressivi e costanti affinamenti nel tempo, diventerà altrettanto fondamentale nella fase di produzione, anche grazie alla disponibilità di materiali via via più performanti e compatibili con esigenze di basso costo e velocità di produzione.

## 1.3 Principali tecnologie

Le tecnologie per la stampa 3D si classificano sulla base dei materiali impiegati nel processo e del modo in cui vengono trattati. L'impiego di una tecnologia piuttosto che un'altra è una scelta da effettuare in base a una serie di parametri molto variegati: velocità di produzione e costo finale del pezzo, investimento necessario per la stampante (nel caso si decida di acquistarla), resistenza meccanica e finitura superficiale desiderate.

In linea di massima tali tecnologie si possono suddividere in tre filoni, basati sulle caratteristiche di consistenza della materia prima: polvere, liquido o solido. Alla categoria delle stampanti a polvere appartengono quelle basate sulla sinterizzazione o fusione di polveri (SLS - Selective Laser Sintering, SLM - Selective Laser Melting, DMLS - Direct Metal Laser Sintering, EBM - Electron Beam Melting) o sulla deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo (3DP - 3D Printing o binder jetting). Sul fronte delle tecnologie a materiale liquido vi sono da una parte quelle che si basano sulla fotopolimerizzazione tramite lampade UV (SLA - Stereolithography, DLP - Digital Light Processing) e dall'altra quelle che stampano a getto (IJM - Ink Jet Modeling, MJM - Multi Jet Modeling). Infine, i macchinari per la stampa 3D che impiegano materiali di partenza allo stato solido si suddividono nei modelli che impiegano una tecnica basata sull'incollaggio stratificato di fogli (LOM - Laminated Object Manufacturing) o sull'estrusione di un materiale solido o semi solido (FDM - Fused Deposition Modeling).

L'ASTM International, un organismo di normalizzazione statunitense, acronimo di American Society for Testing and Materials, suddivide le tecnologie di fabbricazione additiva in 6 famiglie di processi:

### VAT POLYMERIZATION

Un processo di fabbricazione additiva in cui un fotopolimero sensibile alla luce UV, localizzato all'interno di una vasca, viene solidificato da una sorgente luminosa ultravioletta, strato dopo strato. La tecnologia più diffusa che utilizza questo principio di funzionamento è la Stereolitografia (SLA), il procedimento brevettato dalla 3D System nel 1986 che ha segnato l'inizio dell'era della prototipazione rapida. In una macchina stereo-

**002. "Charles Hull** (all'anagrafe Charles W. Hull) (Clifton, 12 maggio 1939) è un ingegnere, inventore e imprenditore statunitense; è il cofondatore, vice-presidente e chief technology officer della 3D Systems. Ha inventato la stereolitografia, il primo esempio commerciale di prototipazione rapida, e il formato STL. Detiene più di 60 brevetti negli Stati Uniti e decine nel mondo [...] È stato inserito nella National Inventors Hall of Fame nel 2014."

fonte: [wikipedia.org](http://wikipedia.org)



**003. L'American Society for Testing and Materials** fu fondata il 16 giugno 1898 negli Stati Uniti per far cooperare le aziende dell'acciaio e del trasporto su ferro. Oggi è tra i maggiori contributori tecnici dell'ISO, ha un ruolo di leadership nella definizione dei materiali e dei metodi di prova in quasi tutte le industrie. Ha contribuito in modo sostanziale a definire la terminologia dell'additive manufacturing, a partire dal termine stesso che oggi identifica questo gruppo di processi tecnologici.

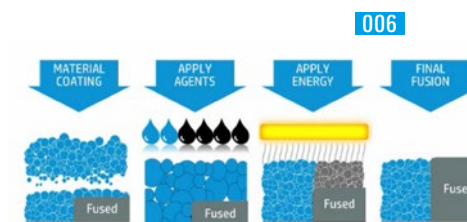


**004. FormLabs Form1+** è uno dei primi esemplari di stampante stereolitografica dedicato a un mercato consumer/enthusiast con un prezzo di accesso di 3399 euro.

**005-006. HP Multi Jet Fusion Process** è una tecnologia proprietaria sviluppata da HP che vedrà la luce sui primi macchinari a partire dal 2016.

Si tratta di un procedimento innovativo che integra la deposizione di materiale, l'applicazione di un agente chimico legante e l'applicazione di energia termica. Può essere considerato un ibrido tra "material jetting", "binder jetting" e "powder bed fusion".

Questa tecnologia promette una velocità di stampa 10 volte maggiore rispetto alle tecnologie esistenti - grazie ad una deposizione dei materiali per superfici e non puntiforme - un costo minore del prodotto finito e la possibilità di effettuare una stampa multicolore e multimateriale in un unico procedimento; con una risoluzione di dettaglio comparabile a quella di una stereolitografia. Si tratta di un passo deciso verso un additive manufacturing pensato per la produzione definitiva.



litografica una vasca riempita di resina fotosensibile contiene una piattaforma orizzontale mobile capace di salire o scendere. Questa piattaforma supporta la parte in costruzione e scende verso il basso via via che il macchinario completa la solidificazione di ogni strato. Svolge il compito di attivare e indurire il fotopolimero una luce laser puntiforme, indirizzata lungo una traiettoria che percorre l'intera sezione dell'oggetto, tramite uno specchio in rapido movimento. Gli oggetti prodotti tramite questa tecnologia sono caratterizzati da una risoluzione elevata (ogni strato è solitamente spesso da 0,05 a 0,15 millimetri) e da una finitura superficiale molto liscia. Una variante della SLA è la tecnologia DLP, Digital Light Processing, sviluppata dall'americana Texas Instruments. La differenza fondamentale rispetto alla stereolitografia risiede nella proiezione della luce UV, operata non da un laser bensì da un proiettore. A essere proiettata è un'intera sezione dell'oggetto, non un singolo punto mobile che deve percorrere una traiettoria. Ne consegue una solidificazione uniforme e istantanea di un intero strato di materiale per volta: tutti i punti della sezione vengono solidificati in un solo ciclo. Il miglioramento dei tempi di produzione è significativo così come la riduzione dello spessore degli strati.

### MATERIAL JETTING

Principio di funzionamento che sfrutta una testina di stampa del tutto simile a quelle delle stampanti Inkjet bidimensionali. L'unica sostanziale differenza risiede nel materiale con cui la testina è alimentata: anziché inchiostro, vengono rilasciati cera, resine acriliche o fotopolimeri. Le principali tecnologie che si basano su questo principio sono denominate Multi Jet Modeling e Polyjet. Le stampanti MJM depositano cera e resine acriliche, le stampanti Polyjet equipaggiano la testina di stampa con una fonte di luce UV, in grado di attivare e solidificare un fotopolimero precedentemente depositato. Entrambe le tipologie di stampante sono in grado di depositare un secondo materiale, solubile, utilizzato per realizzare gli elementi di supporto a perdere. Questi macchinari sono adatti ad un utilizzo da ufficio in quanto non utilizzano materiali potenzialmente tossici e sono poco invasive per quanto riguarda rumore e cattivo odore. Le parti realizzate sono di elevato livello estetico e, nel caso di alcuni specifici fotopolimeri e resine, possiedono medio-alte proprietà meccaniche.



## BINDER JETTING

Anche in questo caso è previsto l'utilizzo di una testina di stampa; con una differenza. Non viene rilasciato materiale di costruzione ma un legante chimico in grado di unire in maniera puntiforme e progressiva i singoli granelli di un letto omogeneo di polvere. La polvere non trattata dal legante rimane sospesa sullo strato sottostante e viene rimossa al termine del procedimento, per essere riutilizzata. Sono un'applicazione di questa tecnologia le stampanti Zcorp della 3D System, in grado di realizzare oggetti a colori in quadricromia (sui contorni di ogni sezione, insieme alla colla, viene depositata una piccola quantità di inchiostro). I materiali trattabili con questo procedimento sono molteplici a partire da polveri plastiche, compositi e polveri metalliche; esistono macchinari specifici per ognuno di essi. I pezzi realizzati con questa tecnologia sono generalmente molto porosi e piuttosto fragili. Risultano però molto più economici rispetto alle altre tecnologie di stampa e questo li rende particolarmente adatti per essere utilizzati come modelli estetici a scopo dimostrativo.

## POWDER BED FUSION

È un processo di fabbricazione additiva che sfrutta energia termica per fondere e solidificare una regione di un letto di polvere, strato dopo strato. Sfruttano questo principio di funzionamento le tecnologie: Selective Laser Sintering, Selective Laser Melting (di cui Direct Metal Laser Sintering è un nome commerciale alternativo) ed Electron Beam Melting. La stampa SLS è un processo brevettato nel 1989 da Carl Deckers, studente dell'Università del Texas. Utilizza l'energia di un raggio laser per unire a livello molecolare polveri di materiale, omogenee o eterogenee. Il laser si trova in una posizione fissa e uno specchio mobile situato nella parte superiore della camera di stampa ne devia la luce, in modo tale che il punto luminoso percorra l'intera traiettoria che descrive una sezione dell'oggetto. La polvere colpita dal raggio viene sinterizzata e si lega ai granelli circostanti. Ogniquale volta uno strato viene completato, una piattaforma mobile si muove verso il basso e un elemento mobile orizzontale deposita nuova polvere per lo strato successivo. Al termine della stampa, la polvere non processata viene recuperata e riutilizzata. Qualcosa di analogo accade nella stampa SLM. In questo



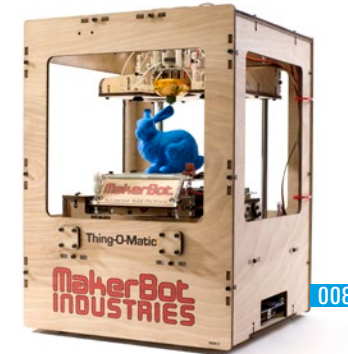
**007. La stampante Carbon 3D CLIP** costituisce una evoluzione del processo DLP; CLIP è acronimo di Continuous Liquid Interface Production. È stata presentata in veste di prototipo nel 2014 e non è ancora in commercio.

A differenza dei macchinari DLP, la CLIP consente una produzione continua del pezzo stampato, grazie alla proiezione di un filmato che rappresenta lo scorrere dinamico e progressivo di tutte le sezioni dell'oggetto, dal basso verso l'alto, a velocità costante.

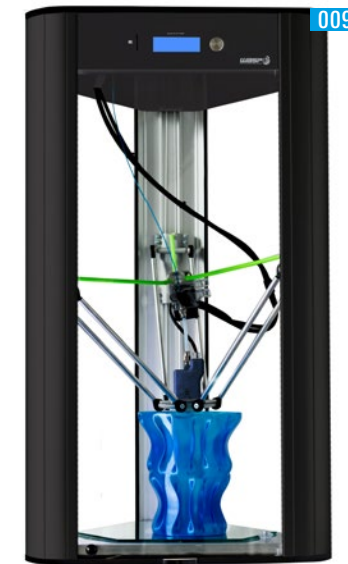
Il filmato viene proiettato sulla faccia inferiore di una vasca contenente liquido fotosensibile, resa in quella zona permeabile all'ossigeno. L'ossigeno inibisce la polimerizzazione della resina e il processo si attiva solamente nelle zone colpite dalla proiezione UV. Contemporaneamente, il braccio della macchina situato nella zona sovrastante muove verso l'alto il volume di materiale già solidificato. L'effetto è alquanto scenografico: la parte appare estratta direttamente dal liquido di partenza.

Grazie a questa videoproiezione continua, e non di singoli layer, la stampa CLIP permette di ottenere strati di materiale di spessore infinitesimo; virtualmente non esistono e la struttura molecolare risulta continua. Il pezzo è dunque monolitico e non presenta anisotropicità. I dettagli sono molto precisi e la finitura superficiale molto fine, comparabile se non addirittura superiore rispetto alla stereolitografia.

Il tempo di stampa appare enormemente ridotto: 6 minuti e mezzo di stampa CLIP equivalgono a 11 ore e mezzo di SLA e 3 ore circa di SLS e/o Polyjet printing.



**008. La MakerBot Thing-O-Matic** è stata una delle prime stampanti FDM a fare il suo ingresso nel panorama delle stampanti 3D consumer.



**009. Wasp Delta 2040** è un altro esempio di stampante FDM pensato per il mondo consumer e delle piccole realtà produttive. È progettata in Italia ed è in grado di stampare filamenti di PLA e ABS.

Un modello di questo macchinario è stato utilizzato per realizzare i primi campioni delle scocche del progetto descritto nella seconda parte della tesi.

caso, i singoli elementi di polvere non sono solo legati a livello molecolare, rimanendo uniti ma distinguibili, ma sono fusi insieme in un pezzo monolitico. Mentre la SLS è utilizzabile con diverse famiglie di materiali, quali polimeri, materiali compositi, ceramiche e alcune leghe metalliche, SLM/DMLS ed EBM sono utilizzabili con polveri metalliche pure, non additivate. Ne sono un esempio acciai e acciai inossidabili, titanio, alluminio e leghe cromo-cobalto. Anziché un raggio laser, l'Electron Beam Melting sfrutta un fascio di elettroni come fonte di energia termica. Prima di colpire il letto di polvere, questo fascio viene direzionato da una coppia di magneti rotanti ad anello, attraverso cui gli elettroni vengono fatti passare; il campo magnetico variabile devia il fascio e lo muove lungo la traiettoria impostata. I pezzi realizzati tramite sinterizzazione (SLS) presentano una porosità maggiore rispetto a quelli realizzati tramite fusione (SLM, EBM): i secondi presentano una minore porosità e una struttura molecolare più omogenea (da cui derivano anche migliori caratteristiche meccaniche). Uno dei campi di applicazione di queste tecnologie riguarda la realizzazione di protesi ortopediche da innesto: la biocompatibilità delle ceramiche e dei metalli utilizzati (soprattutto il titanio) e la lieve porosità dei pezzi realizzati li rende una soluzione ideale per l'innesto all'interno del corpo umano.

## MATERIAL EXTRUSION

Il principio di funzionamento sfruttato da questa tecnologia, come è facile immaginare, è l'estrusione. Un materiale malleabile in uno stato semi solido viene depositato, attraverso l'ugello di un estrusore, su uno strato di materiale sottostante depositato in precedenza e già solidificatosi. La deposizione e l'indurimento progressivo degli strati consente la fabbricazione dell'oggetto dal basso verso l'alto. La stampa FDM, acronimo di Fused Deposition Modeling, è il processo di fabbricazione additiva più diffuso che sfrutta questo principio. È una tecnologia sviluppata e introdotta negli anni '80 da Scott Trump, in seguito co-fondatore di Stratasys. Ad oggi, sfruttano questa tecnologia due filoni di macchinari: le macchine da stampa professionali e quelle dedicate ad un pubblico di appassionati, per uso domestico e/o dedicato a piccole realtà produttive. Si tratta della tecnologia di stampa 3D che ha avuto la diffusione più capillare, in grado di interessare anche

un pubblico di persone non necessariamente legato ad un contesto professionale. La stampa FDM è capace di processare moltissimi materiali e le parti ottenute sono generalmente resistenti al calore, agli agenti chimici, allo stress meccanico e alle variabili di ambiente. In particolare, grazie alla elevatissima resistenza e alla grande stabilità termica di materiali speciali quali ad esempio l'Ultem, è possibile costruire prodotti e attrezzature avanzate per i settori medicale, automobilistico, aerospaziale e alimentare. Utilizzando materiali speciali, come il policarbonato, si possono realizzare anche prototipi funzionali e piccole produzioni definitive. A fronte di ottime proprietà chimiche e meccaniche, la finitura superficiale dei prodotti realizzati con questa tecnologia appare grezza, in quanto gli strati di filamento risultano evidenti. Solitamente la superficie viene migliorata con procedimenti di sabbiatura, abrasione chimica o verniciatura. Per quanto riguarda i costi di produzione, la stampa FDM può risultare molto costosa nel caso di macchine industriali; tuttavia può essere anche molto accessibile se si utilizza una stampante "domestica", il cui costo è oggi compreso tra i 700 e i 2000 euro.

SHEET LAMINATION

Un processo tramite il quale fogli di materiale vengono opportunamente tagliati, sovrapposti e uniti. È una tecnica introdotta nel 1991 dalla Helisys Inc. ma attualmente non è tra le più diffuse. I fogli di materiale possono essere di vario tipo: carta, plastica, cellulosa, metalli e materiali compositi rinforzati. Anche gli agenti di fissaggio sono diversi: si utilizza la colla per la carta, colla o calore per i materiali plastici, saldatura o bulloni per i materiali metallici. Uno dei vantaggi di questa tecnologia è la possibilità di costruire oggetti di dimensioni elevate, maggiori della gran parte delle tecnologie attuali di stampa 3D. Tuttavia il trattamento successivo è impegnativo perché è complessa l'estrazione del materiale in eccesso. Nel caso in cui si utilizzino fogli di carta come materiale di partenza, il prodotto finale presenta aspetto e caratteristiche simili al compensato, per cui deve essere impermeabilizzato e trattato con carta abrasiva. Il costo del procedimento è molto legato alla precisione che si desidera ottenere; tuttavia può essere considerato un processo relativamente poco costoso, soprattutto nel caso di oggetti molto grandi.



**010-011. Oggetti realizzati in Polyjet printing;** presentano caratteristiche ottenibili solo ed esclusivamente con questa tecnologia di stampa. Un macchinario Polyjet è in grado di stampare simultaneamente diversi materiali (definiti dalla casa produttrice "digital materials") e di miscelarli tra loro.

Questi sono combinati all'interno di una testina di stampa, a partire da alcune resine primarie caricate nel macchinario. Una miscela adattabile alle più diverse situazioni, permette di riprodurre di volta in volta caratteristiche meccaniche, di consistenza e di colore, proprie di altri materiali, solitamente stampati a iniezione. La gamma di miscele ottenibili è ampia: comprende ABS, gomma, materiali bio compatibili per protesi dentali, simil-polipropilene. Esiste inoltre la possibilità di realizzare modelli a colori a partire da 6 colori primari.



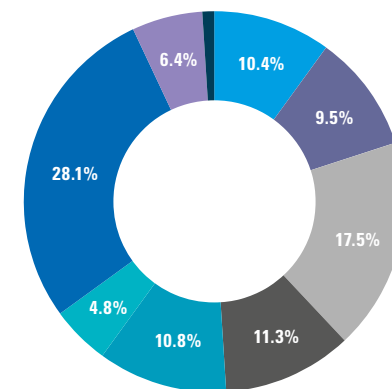
1.4 Utilizzo in ambito industriale

Le applicazioni dell'additive manufacturing in ambito industriale si possono suddividere in tre macro categorie: design, analisi e progettazione ingegneristica, realizzazione di stampi e attrezzature.

Dal punto di vista del design, l'additive manufacturing si conferma uno strumento fondamentale per accorciare i tempi di esplorazione stilistica e di sviluppo. Realizzare un modello fisico dell'oggetto progettato permette di esplorarne le forme in modo visivo e aptico, verificarne i difetti e procedere rapidamente a una loro ridefinizione. Un ulteriore vantaggio è dato dalla possibilità di verificare le masse di assieme e componenti; un'operazione particolarmente utile nel caso di progetti che prevedano un comportamento dinamico del prodotto (un veicolo ad esempio). La velocità con cui è possibile giungere alla realizzazione di un qualsiasi prototipo, sia esso un modello di studio o un prototipo definitivo, rimane comunque il vantaggio primario che l'additive manufacturing offre ai designer in fase di progettazione.

Dal punto di vista dell'engineering, la disponibilità di componenti tridimensionali realizzati in additive manufacturing consente di effettuare operazioni di analisi e pianificazione altrimenti molto difficili da compiere: una comparazione visiva/funzionale di varianti progettuali, test in galleria del vento di forme aerodinamiche oppure verifiche strutturali e di affaticamento di un determinato componente o assieme. Inoltre, l'additive manufacturing può essere sfruttato per realizzare parti di pre-produzione, utili nel processo di definizione degli stampi e delle attrezzature necessarie alla produzione definitiva.

Infine, la realizzazione di stampi e attrezzature trae vantaggio dalle tecnologie di Additive Manufacturing in due modi: secondo un approccio indiretto o secondo un approccio diretto. Si è nell'ambito del primo caso quando vengono realizzate matrici utili a realizzare, in un secondo passaggio, l'attrezzatura necessaria per un determinato processo. Queste matrici intermedie si utilizzano ad esempio nel processo di realizzazione di matrici per colate in sabbia o per microfusione o ancora per realizzare elettrodi per elettroerosione. Nel secondo caso l'Additive Manufacturing viene utilizzato per costruire direttamente l'attrezzatura.



- Visual aids (for engineers, designers, medical professionals, etc.)
- Presentation models (including Architectural)
- Prototypes for fit and assembly
- Patterns for prototype tooling (including silicone rubber molds)
- Patterns for metal castings
- Tooling components (created directly on an AM system)
- Functional parts (for short run, series production, prototyping, etc.)
- Education/research
- Other (1.3%)

**Ambiti di utilizzo dell'Additive Manufacturing** all'interno di contesti industriali. Queste informazioni sono il risultato di un sondaggio effettuato nel 2013 da Wohlers Associates, società specializzata in studi di settore riguardanti l'Additive Manufacturing.

"...the chart came from a Wohlers Associates' survey question "How do your customers use the parts built on your AM systems?"..."

fonte: Wohlers Report 2013

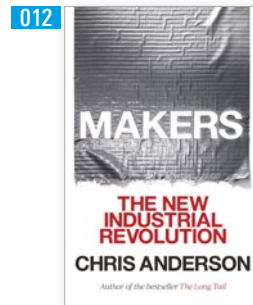
Il dato più significativo riguarda l'utilizzo dell'Additive Manufacturing per quanto riguarda la produzione di parti funzionali. Si stima che questo dato sia destinato a crescere nei prossimi anni e che le parti definitive realizzate in stampa 3D saranno sempre più in larga parte destinate all'utilizzo all'interno di prodotti e dispositivi di produzione definitiva.

## 1.5 Un fenomeno popolare: makers e DIY

Dal 2009 in avanti, le tecnologie di additive manufacturing hanno subito un rapido processo di "democratizzazione", dovuta soprattutto alla decadenza di molti brevetti relativi alle macchine per stampa FDM e SLA. Questo ha portato a una diffusione sempre maggiore di versioni analoghe, ma semplificate, di macchinari propri dell'ambito industriale. Più immediati da utilizzare - anche se talvolta meno affidabili - questi prodotti sono stati apripista di un mercato in cui le start-up hanno saputo portare innovazione nel settore. Le grandi aziende leader di mercato, al contrario, sono rimaste lontane da questo tipo di offerta, prettamente orientata ad un'utenza consumer.

Parallelamente alla diffusione delle tecnologie digitali di fabbricazione (non solo stampanti 3D ma anche laser cutter a controllo numerico) ha preso vita a livello mondiale un movimento di artigiani digitali: il cosiddetto movimento dei "makers". I makers sono considerati uno degli elementi fondanti per una possibile terza rivoluzione industriale in atto. Cultori dell'open source e del DIY (Do-It-Yourself, Fai-da-te), appassionati, piccoli professionisti alla ricerca di una nuova "materia prima digitale" su cui mettere le mani; persone che hanno in comune il desiderio di innovare, tanto nel quotidiano quanto nella sfera professionale. La cultura makers è oggi un fenomeno popolare e conosciuto; e spesso, alcuni oggetti emblematici, come la stampante 3D, i droni, la scheda di prototipazione Arduino sono associati a questo movimento. Concretamente parlando, si tratta di una comunità di persone che desidera realizzare oggetti più personali, aggiustarne altri non più apparentemente utili e alimentare con la narrazione delle proprie azioni una community di utenti che condivide online i medesimi interessi e crede nella partecipazione.

"Make", "Share", "Give", "Learn", "Tool Up", "Play", "Participate", "Support", "Change" sono le parole chiave che il manifesto dei maker utilizza per offrire una sintesi di questa cultura. Si tratta di concetti in grado di suggerire una nuova possibile strada per lo sviluppo manifatturiero e industriale di domani. Una progettazione condivisa globale unita a una produzione locale, con una forte attitudine alla personalizzazione e alla generazione di progetti non standardizzati.



**012. In "Makers - The new industrial revolution" (2012)** Chris Anderson, giornalista e saggista inglese, direttore di Wired USA dal 2001 al 2012 nonché osservatore che prima di tutti ha definito molti dei trend più avanzati della nostra era, descrive le sfaccettature di una rivoluzione industriale alle porte. Dopo aver sovvertito il mondo dei bit - quindi l'industria della musica, dei video e dell'editoria - la cultura digitale è sul punto di trasformare il mondo degli atomi e degli oggetti fisici; e così, come nella prima rivoluzione industriale fu la macchina a vapore a innescare un cambiamento epocale, anche in questo caso un macchinario, la stampante 3D, è pronto a cambiare le regole della produzione. Grazie alla capacità di realizzare oggetti tridimensionali, essa porterà alla concretizzazione del concetto di "fabbrica personale".

In uno dei passaggi del libro si legge:

"Nel suo intervento alla Maker Faire 2011, Neil Gershenfeld, il professore del MIT il cui libro Fab: The Coming Revolution on Your Desktop anticipava in larga misura il Movimento dei Makers già una decina di anni fa, descriveva la sua epifania in questi termini:

Mi sono reso conto che la soluzione vincente per la produzione digitale è la produzione personale. Non si tratta di fabbricare quello che potete acquistare al Wal-Mart, ma di fabbricare quello che non potete comprare lì.

È esattamente come il passaggio dai mainframe ai personal computer. [...] i personal computer non sono nati per gestire il magazzino e le paghe. I personal computer venivano usati per cose personali: dalla posta elettronica ai videogame. Lo stesso discorso vale per la produzione personale."



**013. Cardboard Desk Lamp** è un esempio di prodotto "open" progettato con il pacchetto di CAD gratuiti fornito da Autodesk (123D) e scaricabile/riproducibile/modificabile da chiunque. L'utilizzo di fette di materiale tagliate a laser e incastrate tra loro è uno dei metodi di costruzione più utilizzati nell'universo makers; tanto da diventare uno dei linguaggi formali più emblematici (vedi: 008 MakerBot Thing-O-Matic).

**014. La Rally Fighter** è un progetto condiviso tra la casa costruttrice californiana Local Motors e una community online di utenti interessati al progetto. Costruita intorno a un telaio leggero progettato da un team di ingegneri, la Rally Fighter monta elementi di carrozzeria disegnati dalla community - attraverso successivi concorsi online - o presi in prestito da altre automobili. Si tratta di un'auto "open hardware" ad alte prestazioni e altamente personalizzabile: gli stessi vinili sono proposti dalla community o dai clienti stessi. Ogni Rally Fighter è unica, costa 75000 dollari e viene assemblata in coppia con un meccanico dal futuro proprietario, in 7 giorni e all'interno dello stabilimento produttivo.



I maker cercano dunque di seguire un nuovo paradigma produttivo: quello della produzione personale. In questi ultimi anni si è fatto strada un nuovo modo di realizzare prodotti incentrato sulla personalità e sulla personalizzazione degli oggetti. Sono nate piattaforme di vendita diretta che hanno saputo valorizzare questa filosofia, come ad esempio Etsy: sito dedicato alla vendita di oggetti realizzati artigianalmente, sia in senso digitale che tradizionale.

La realizzazione di oggetti semplici non è però l'unico tentativo di concretizzazione della filosofia maker. Uno dei casi più emblematici riguarda la progettazione della Rally Fighter, un'automobile concepita dall'americana Local Motors insieme al supporto di una community di utenti non direttamente coinvolti nell'azienda. Si tratta del primo caso al mondo di realizzazione di un'automobile in crowdsourcing.

Inoltre, sulla scia di questa nuova filosofia sono nati innumerevoli siti web in grado di offrire servizi di produzione digitale: dal taglio laser di plexiglass, pellame, metallo alla stampa 3D in tutte le sue varianti. Molte di queste piattaforme web derivano da aziende che inizialmente si occupavano di offrire servizi di prototipazione rapida alle industrie, altre sono start-up, nate appositamente per aprire un nuovo mondo di servizi, prima inaccessibile, a un pool di utenti con esigenze evidentemente differenti rispetto ad un'azienda.

Il facile accesso ai servizi di prototipazione e produzione digitale, unito alla diffusione di piattaforme di prototipazione elettronica - Arduino è il caso più famoso - e di software, anche gratuiti, per la modellazione CAD e la scansione 3D ha messo nelle mani di molti curiosi quello che di norma era accessibile a pochi professionisti. Ciò ha generato un mix di ingredienti in grado di liberare un potenziale creativo senza precedenti. Chi possiede questa energia può in definitiva considerarsi "un maker".

Un maker è creatore di nuovi oggetti con nuovi metodi, è interprete della sintesi fra sapere e "nuovo", possiede le competenze digitali e non teme contaminazioni. È un artigiano digitale con una mentalità a 360 gradi, attenta a captare qualsiasi informazione utile alla propria attività.

## 1.6 Un attivatore per nuovi prodotti e nuove possibilità imprenditoriali

Le tecnologie migliorano, i costi scendono, i materiali diventano sempre più interessanti: l'additive manufacturing si propone come un mezzo di produzione sempre più appetibile per la produzione di oggetti. Il movimento dei makers non è l'unica espressione di un nuovo paradigma produttivo che si distacca dalla logica delle grandi industrie, anzi. Molto spesso i makers rimangono un fenomeno "privato", singoli appassionati curiosi di creare per sé stessi o per altri appassionati. Altre volte la mentalità che li caratterizza si fonde con un nuovo modo di fare impresa; e quando questo accade si generano le situazioni più interessanti. Nascono attività imprenditoriali nuove, fondate sulla progettazione e la commercializzazione di nuovi prodotti, oppure attività imprenditoriali pre-esistenti si aggiornano per offrire servizi "digitali" di nuova concezione, affiancandoli ad un sapere più "tradizionale" acquisito nel tempo. Per questo motivo la stampa 3D può essere considerata un elemento di rilancio economico per le piccole e medie imprese e contemporaneamente un attivatore per attività imprenditoriali di nuova impostazione.

L'ingresso sul mercato di piccole imprese o di singoli autoproduttori è reso possibile dalla presenza di aziende in grado di offrire servizi di stampa on demand, utili per realizzare singoli pezzi o piccole tirature. Normalmente, attori commerciali di piccole dimensioni non avrebbero la possibilità di investire in macchinari di tipo industriale: i costi sono alti e il possesso di un macchinario implica una produzione in grandi lotti del prodotto a cui viene destinato (occorre ammortizzare i costi di acquisto e di manutenzione). Affidarsi a servizi di additive manufacturing permette di lavorare per lotti minimi e consente alla piccola impresa di offrire al singolo cliente un livello di personalizzazione del prodotto senza pari. Ogni singolo esemplare può essere realizzato su misura con un dispendio di risorse esclusivamente destinato allo sviluppo e non all'aggiornamento di macchinari, attrezzature e linee di produzione. Un vantaggio non di poco conto se si considera che la "personalizzazione di massa" non è mai decollata proprio per questo motivo: tutte le case automobilistiche, per fare un esempio, si sono uniformate ad offrire una personalizzazione solo apparente e mai sostanziale dei propri modelli; cosa che è radicalmente cambiata nel caso della Rally Fighter (vedi pagina precedente).



### 3D HUBS

**3D Hubs** è una piattaforma online che mette in condivisione un network di stampanti 3D. Collega chi già è in possesso di una stampante con chi ne ha bisogno. Una sorta di Airbnb della stampa 3D.

Il funzionamento è molto semplice: chi ha bisogno di stampare un file 3D visita il sito, sceglie uno degli Hub registrati e invia il file. Quando l'oggetto è pronto, è possibile ritirarlo in loco oppure riceverlo a domicilio.

Tutti coloro che sono in possesso di una stampante possono registrarsi e iniziare ad offrire un servizio. In questo senso, 3D Hubs offre l'opportunità di inserirsi in un mercato già affollato dal punto di vista globale - molti sono infatti i service di stampa 3D online più "blasonati" - ma non ancora ampiamente esplorato nella sua dimensione locale.

### nervous system

**n-e-r-v-o-u-s.com** è un sito che offre la possibilità di personalizzare e acquistare gioielli, abiti e complementi d'arredo. Non solo service di stampa 3D, dunque, ma anche piattaforme per creare e acquistare oggetti personalizzati.

**015. Tetra Kinematics 175n** è una parure composta da 175 pezzi in poliammide stampati già incernierati in un solo ciclo di stampa. È solo uno tra gli innumerevoli esempi di gioielli stampati in 3D nati negli ultimi anni.

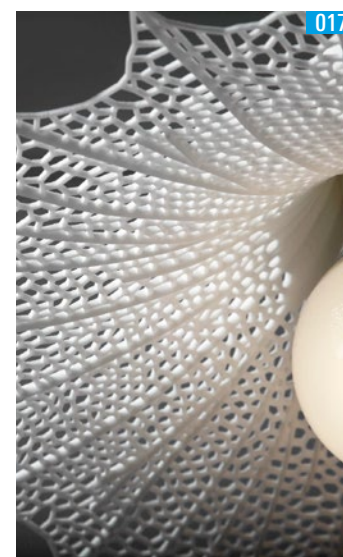


015



016

**.exnovo**  
Professional 3D Printing Lighting  
Made in Italy



017

**.exnovo** è un'azienda trentina pioniera nella realizzazione di prodotti di arredo e di illuminazione, con tecnologie di additive manufacturing. È la prima azienda in Italia ad aver sfruttato la stampa 3D per realizzare prodotti di consumo (nonché una tra le prime in Europa) pur trattandosi di esemplari in serie limitata.

I prodotti a catalogo sono frutto della collaborazione tra innovazione tecnologica e saper fare artigiano. Dopo un'esperienza ventennale nel campo della prototipazione infatti, .exnovo ha deciso di impiegare il know-how acquisito nella realizzazione di manufatti di arredo, integrando stampa 3D e lavorazione artigianale. Ogni oggetto realizzato dalla macchina viene lavorato e rifinito a mano e alcuni dei particolari sono realizzati in legno.

Nella sua visione .exnovo ha interpretato la "Terza Rivoluzione Industriale" secondo un modello "analogico-digitale", orientato all'innovazione tecnologica ma mediato dall'artigianalità creativa ed esecutiva tipica del luogo.

**016. Il Catalogo di .exnovo 2015** presenta in copertina un esemplare della linea Afillia: la serie, che insieme a Rhizaria, ha rappresentato per l'azienda trentina uno dei maggiori successi. Nel 2014 è entrata a far parte dell'ADI Design Index e nel 2015 ha vinto un Interior Innovation Award.

L'ispirazione semantica per il concetto formale della lampada deriva dalla scienza botanica. Afillia, che in gergo botanico equivarrebbe a dire "pianta priva di foglie", intende rappresentare il vuoto e il pieno, la forza e la leggerezza. L'aria e la luce, infatti, sono idealmente i principali componenti di cui si compone l'oggetto. Il supporto della lampada, presente in tutte le sue declinazioni (tre lampade da tavolo e tre lampade a sospensione), è in circolo - legno pregiato della tradizione altoatesina - e si abbina a un diffusore in nylon realizzato con tecnologia SLS (Selective Laser Sintering). Design: Alessandro Zambelli

**017. Biophilia** è un paralume in polimero sinterizzato, realizzato tramite SLS. Il prodotto è caratterizzato da una geometria organica che ben si presta ad essere prodotta tramite sinterizzazione. L'aspetto finale è quello di un prodotto che ricorda un organismo vivo, appartenente al mondo vegetale, che cresce e si sviluppa. Design: Francesca Lanzavecchia e Hunn Wai

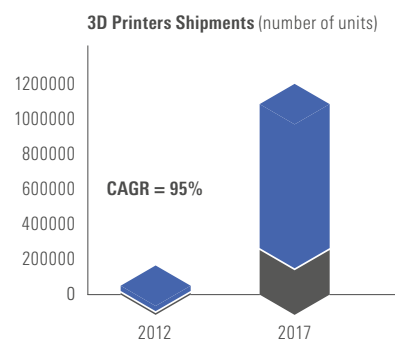
## 1.7 Adozione ed espansione a livello industriale

L'additive manufacturing sta mostrando un potenziale rivoluzionario sempre più concreto nel campo della produzione di oggetti: da semplici prodotti "make-to-stock" a prodotti più complessi, di alto valore ingegneristico, per svariati tipi di settori: aerospaziale, difesa, industriale/manfatturiero. Tutti: investitori, venture capitalist, società di analisi di mercato che si occupano di tecnologia hanno pubblicato studi e previsioni che indicano forti tendenze di crescita per quanto riguarda il mercato e l'impiego delle tecnologie additive. Non solamente in ambito privato e consumer ma anche in termini di impiego industriale.

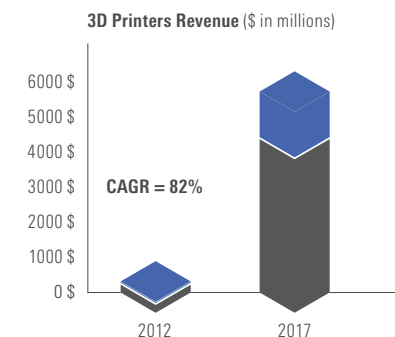
Volendo riportare un solo esempio, la società di servizi e consulenze finanziarie Wells Fargo, all'interno del report intitolato "Beyond 2014: Evolving Opportunities in Technology", pubblicato nel febbraio 2014, osserva e prevede un tasso annuale di crescita del 95% per quanto riguarda la vendita di stampanti 3D nel periodo 2012-2017 (raggruppando dispositivi consumer e macchine professionali). Il numero di stampanti vendute resterà sbilanciato verso i dispositivi consumer, a fronte di un bacino di utenti di riferimento molto più ampio rispetto ad un'utenza professionale e a grazie a un costo delle stampanti di qualche ordine di grandezza inferiore. Entro il 2017 però, il fatturato risultante dalla vendita di macchinari di tipo industriale risulterà pari, con buona approssimazione, all'80% del totale. Ne deriva che il numero di macchinari industriali venduti alle aziende è destinato ad avere un peso sempre maggiore nello scenario produttivo.

PricewaterhouseCoopers (PwC), società che fornisce servizi professionali di revisione di bilancio, consulenza legale e fiscale, ha pubblicato nel 2014 un report piuttosto esaustivo, che, attraverso un sondaggio sottoposto a un campione di circa 110 aziende produttive statunitensi, offre una panoramica interessante sullo stato attuale della diffusione dell'AM nel campo della produzione industriale. Mi limiterò a riportarne alcuni punti salienti.

Un primo dato significativo riguarda l'adozione delle tecnologie additive da parte delle aziende sottoposte al sondaggio: il 66,7% le ha adottate "in qualche misura" (ad esempio sperimentando come poterle applicare nel



● Enterprise  
● Consumer



● Enterprise  
● Consumer

**"3D printer use is migrating from hobbyists to commercial manufacturers"** il grafico mostra le previsioni di vendita di stampanti 3D, sia consumer che professionali.

Benché il numero dei dispositivi consumer rimarrà maggiore, la crescita dei proventi per la vendita di macchinari professionali indica che il numero di macchine impiegate all'interno di contesti aziendali e/o industriali è destinato ad aumentare. Un segno del crescente interesse per queste tecnologie da parte dei professionisti.

Fonte: Gartner (settembre 2013) e Wells Fargo Wealth Management (2014) "3-D Printers, Worldwide"

proprio ambito o utilizzandole per realizzare prototipi o parti definitive); il 24,7% prevede di adottarle in futuro: 5,2% entro il prossimo anno (2015), 10,3% entro 3 anni (2017), 9,2% dopo i 3 anni (dopo il 2017). Solamente l'8,6%, al momento del sondaggio, non ne ha previsto in alcun modo l'adozione.

Questo dato, unito alla previsione di crescita del numero di parti definitive realizzate con tecnologie additive (dal 19% nel 2011 al 28% nel 2012, con un grafico in aumento), è indicativo del fatto che con molta probabilità l'AM tenderà ad assumere un ruolo tutt'altro che marginale nel panorama produttivo di molti settori.

## 1.8 Dal prototipo al prodotto finito

Applicare il 3D printing nell'ambito del rapid prototyping non è nulla di nuovo per molti produttori. È un passaggio che in passato ha permesso una maggiore semplicità nella realizzazione dei prototipi e in generale una maggiore velocità per la ricerca, lo sviluppo e l'arrivo sul mercato di nuovi prodotti. Secondo PwC, nel 2014, il 25% dei produttori ha utilizzato la stampa 3D solo ed esclusivamente nell'ambito della prototipazione; il 10% sia per prototipare che per realizzare parti definitive; il 3% per realizzare parti che non potevano essere realizzate con i tradizionali metodi di produzione; l'1% per produrre componenti finali. Il 14% è certamente una percentuale inferiore rispetto al primo dato ma con tutta probabilità è un numero destinato ad aumentare.

Ci sono molti indizi che puntano in questa direzione. General Electric, ad esempio, che ha dimostrato il proprio interesse nelle tecnologie additive già dal 2012 acquisendo Morris Technologies (un'azienda specializzata in stampa 3D), valuta che attualmente meno del 10% dei propri prodotti sia "toccato" dal 3D printing; sia in termini di prototipazione che in termini di produzione diretta. Stima tuttavia che questa percentuale possa raggiungere il 50% entro il 2020.

Ma in che termini e in quale misura, realisticamente, l'additive manufacturing potrà interessare in futuro la produzione diretta di manufatti industriali?



**018. La suola della serie Nike Vapor Talon (2013)** è stata la prima sviluppata e realizzata tramite la tecnologia SLS, allo scopo di migliorare le prestazioni dell'atleta in fase di accelerazione.

**019. La serie Nike Vapor HyperAgility (2014)** costituisce un'ulteriore evoluzione del concetto di "suola specialistica" realizzata in additive manufacturing.

Grazie alla particolare geometria adottata, l'accelerazione, la decelerazione e i cambi di direzione risultano migliori rispetto ad una suola tradizionale. La suola non è stata solamente prototipata in AM ma anche realizzata in serie limitata mediante sinterizzazione laser.

"SLS technology has revolutionized the way we design cleat plates – even beyond football – and gives Nike the ability to create solutions that were not possible within the constraints of traditional manufacturing processes." (Shane Kohatsu, Director of Nike Footwear Innovation)

Per rispondere a questa domanda riporterò un altro dato emerso dal sondaggio di PwC (lo ricordo, sottoposto nel 2014 ad un campione di 110 aziende di manufacturing con sede negli Stati Uniti). Alla richiesta di indicare la probabilità con cui le tecnologie di additive manufacturing avrebbero potuto essere utilizzate in futuro (3-5 anni) per produzioni in bassa tiratura di prodotti specializzati, il 15% del campione lo ha ritenuto molto probabile; il 34% probabile; il 25% moderatamente probabile; l'8% un po' improbabile; il 18% molto improbabile. Il 74% del campione, in sintesi, ha valutato questo scenario come una possibilità concreta.

Per quanto riguarda l'impiego dell'AM nella realizzazione di prodotti di alta tiratura (sempre nell'arco di 3-5 anni) il sondaggio ha restituito i risultati seguenti: l'8% lo ha ritenuto molto probabile; il 13% probabile; il 17% moderatamente probabile; il 29% un po' improbabile; il 33% molto improbabile. Il risultato appare dunque ribaltato: solo il 38% del campione lo ritiene in qualche misura possibile.

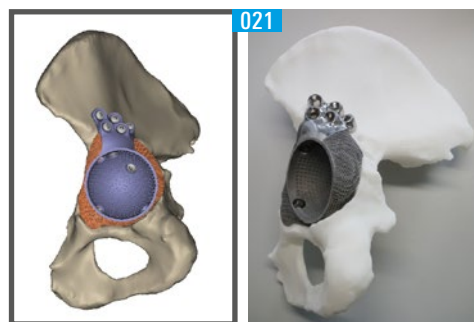
Almeno in un futuro prossimo, l'additive manufacturing parrebbe dunque destinato a trovare spazio nella produzione di prodotti specializzati, destinati a medio-bassi volumi di vendita. E un'ulteriore prova a conferma di questa ipotesi sarà data anche in uno dei prossimi paragrafi, dove si confronteranno dal punto di vista economico le tecnologie di additive manufacturing e le tecnologie industriali tradizionali.

Stratasys, la cui divisione RedEye (oggi Stratasys Direct Manufacturing) si occupa di servizi di rapid prototyping e manufacturing, ha recentemente osservato un cambio di tendenza per quanto riguarda la propria offerta in termini di servizi alle aziende. Negli ultimi anni, gli ordini sono passati dall'essere per la quasi totalità prototipi, all'essere al 65% prodotti definitivi: oggetti destinati all'utilizzo finale, stampi o attrezzature.

A fronte di questi ed altri indizi si possono delineare i contorni di un nuovo scenario produttivo: il cosiddetto "direct digital manufacturing". Una forma di produzione nuova che sta trovando applicazione in svariati settori: dall'industria dei medical device (protesi avanzate, apparecchi odontoiatrici, tessuti biologici) al settore aerospaziale, ai consumer goods.



020



**020. Lo stabilimento di Avio Aero a Cameri** è la prima fabbrica al mondo che ospita solo macchinari additivi. Al suo interno si trovano decine di macchine per DMLS ed EBM che si occupano di stampare pale per motori a turbina. Avio Aero è infatti una divisione di General Electric dedicata allo sviluppo di soluzioni per il settore aerospaziale.

Le pale vengono realizzate in polvere di alluminio di titanio, una lega che garantisce leggerezza e resistenza alle alte temperature, entrambe condizioni fondamentali per la destinazione d'uso di questi prodotti. Grazie al procedimento di sinterizzazione, le pale presentano infatti una migliore uniformità metallurgica rispetto ad analoghi componenti realizzati in colata. Con il metodo tradizionale, servirebbero settimane e 4kg di materiale grezzo per ogni kg di prodotto finito. Tramite DMLS ed EBM, invece, bastano pochi giorni, con un rapporto materia prima/materiale lavorato pari a 1,5:1. Meno materiale significa minore energia, minori emissioni e risparmio economico.

**021. aMace® Integrated** è un esempio di coppa protesica realizzata tramite sinterizzazione di polveri. Courtesy: Mobelife custom orthopedics.

## 1.9 Materiali per una nuova generazione di prodotti

Nel prossimo futuro, un affinamento della qualità di stampa e un previsto miglioramento dei tempi di produzione permetteranno di includere le tecnologie di additive manufacturing nel ventaglio di opzioni praticabili per la produzione diretta di componenti. Al momento, nessuno può valutare con esattezza quanto rapidamente la tecnologia sarà in grado di evolversi, ma c'è accordo nel credere che questo passaggio possa compiersi nell'arco di 5 anni.

Le potenzialità offerte dall'AM in ambito produttivo sono molteplici. Basti pensare alla possibilità di concepire prodotti la cui forma possa assolvere in modo puntuale allo scopo prefissato ed evitando di sottostare alle regole più limitanti dei comuni processi produttivi. Certo, anche le tecnologie di additive manufacturing hanno le proprie regole e vincoli di cui la progettazione deve necessariamente tener conto; ragionevolmente meno, tuttavia, rispetto ad uno stampaggio a iniezione o ad una fresatura. Un secondo vantaggio risiede nella possibilità di ridurre i componenti, sostituendo un assieme di molte parti con un componente geometricamente più complesso, non convenientemente realizzabile, altrimenti, con tecniche di produzione tradizionali.

Non solo qualità e tempi di stampa segneranno un miglioramento: anche la scienza dei materiali che accompagna l'evoluzione delle tecnologie additive è destinata a crescere di pari passo. Ogni anno vengono resi disponibili nuovi materiali, per svariate tecnologie ed è ragionevole aspettarsi sempre nuovi materiali per sempre nuove applicazioni. Ceramiche, materiali compositi, polimeri, polveri metalliche e vetri: gli inchiostri tridimensionali sono destinati a diventare più numerosi e più specializzati. È il caso del grafene, materiale in fase di studio presso Graphene 3D Labs, società fondata nel 2013 per la ricerca di nuovi materiali stampabili. Si tratta di un materiale ad alta capacità conduttiva, miscelabile ad un polimero di supporto ed estrarribile. Un materiale di questo tipo apre la strada alla stampa di sistemi intelligenti, che integrano piste conduttive nel volume tridimensionale del prodotto. Sfruttando la capacità di gestire la lavorazione simultanea di più materie prime, è facile immaginare come stampanti multi-materiale e multi-estrusore/deposizione potranno realizzare assieme dotati di funzionalità tecnologiche.



022



**Black Magic 3D** è una spin-off di Graphene 3D Labs, che si occupa di commercializzare materiali per la stampa 3D.

**022. Una bobina di filamento in grafene** prodotta e commercializzata da Black Magic 3D. Il costo di una bobina da 100 grammi, è di 55 dollari.

Il grafene ha diverse proprietà: grazie alla sua particolare struttura molecolare, consente di ottenere parti rigide, leggere e resistenti; è in grado di condurre l'elettricità e permette di realizzare oggetti impermeabili. È un materiale che possiede grandi potenzialità per molte applicazioni.

**Anche Hp sta lavorando sullo sviluppo di nuovi materiali:** "si parla di colori, di ceramiche, di metalli, di biocompatibilità. L'obiettivo è offrire gli stessi set di colori attualmente disponibili nella stampa 2D." (da: *3D Printing Creative* n.3, 2014, pag.69)

HP vuole sviluppare nuovi materiali per la sua tecnologia Multi Jet Fusion, in arrivo nel 2016. Dion Weisler, Executive Vice President di HP, ha specificato che si tratterà di una tecnologia rivolta al mercato considerato più ampio e con maggiori prospettive di crescita: quello della produzione diretta.

## 1.10 Scenari di implementazione per l'innovazione

I sostenitori dell'additive manufacturing intravedono la possibilità per le tecnologie additive di pareggiare o addirittura superare, in termini di convenienza e costi, i metodi di fabbricazione tradizionali; offrendo contemporaneamente la possibilità di innovare a livello di supply-chain e di performance dei prodotti.

Gli avanzamenti nel campo dell'AM rendono naturale per le aziende valutare la possibilità di superare il modello "rapid prototyping" e impiegare queste tecnologie nella realizzazione di prodotti definitivi (direttamente vendibili al consumatore o impiegabili all'interno di assiemi più complessi). L'additive manufacturing è in grado di competere con le tradizionali tecniche produttive in un confronto diretto dei costi. Tuttavia, come vedremo, un modello sostitutivo non può far emergere il vero potenziale di innovazione della stampa 3D.

Un'analisi condotta da Deloitte, azienda di servizi di consulenza e revisione, mostra come le tecnologie di additive manufacturing possano rappresentare per le aziende una reale opportunità di sviluppo, incentrata sia sull'abbassamento dei costi che sulla differenziazione dell'offerta. La condizione è che si instaurino modelli di business di nuova concezione. Questi modelli vengono esemplificati all'interno di uno schema, nel quale ognuno prefigura un differente scenario di implementazione della tecnologia in ambito produttivo.

Attualmente, la propensione delle aziende è quella di mantenersi all'interno dello scenario 1 (vedi pagina a fronte), per molti aspetti il meno innovativo. In questo scenario, l'implementazione dell'additive manufacturing avviene senza modifiche sostanziali al modello di business. La stampa 3D viene vista come un metodo per realizzare componenti prima realizzati attraverso metodi industriali tradizionali (modello sostitutivo). In questo modo le reali potenzialità dell'additive manufacturing non vengono sfruttate e si rinuncia a trarre vantaggio da una riorganizzazione della supply chain o da una maggiore diversificazione dei prodotti realizzati.

La stampa 3D permette infatti di produrre "closer-to-demand" ovvero più vicino alla richiesta reale di un prodotto; e di poterlo fare vicino al suo luogo di destinazione. Dotare uno stabilimento di macchinari per la fabbricazione additiva significa inoltre adottare

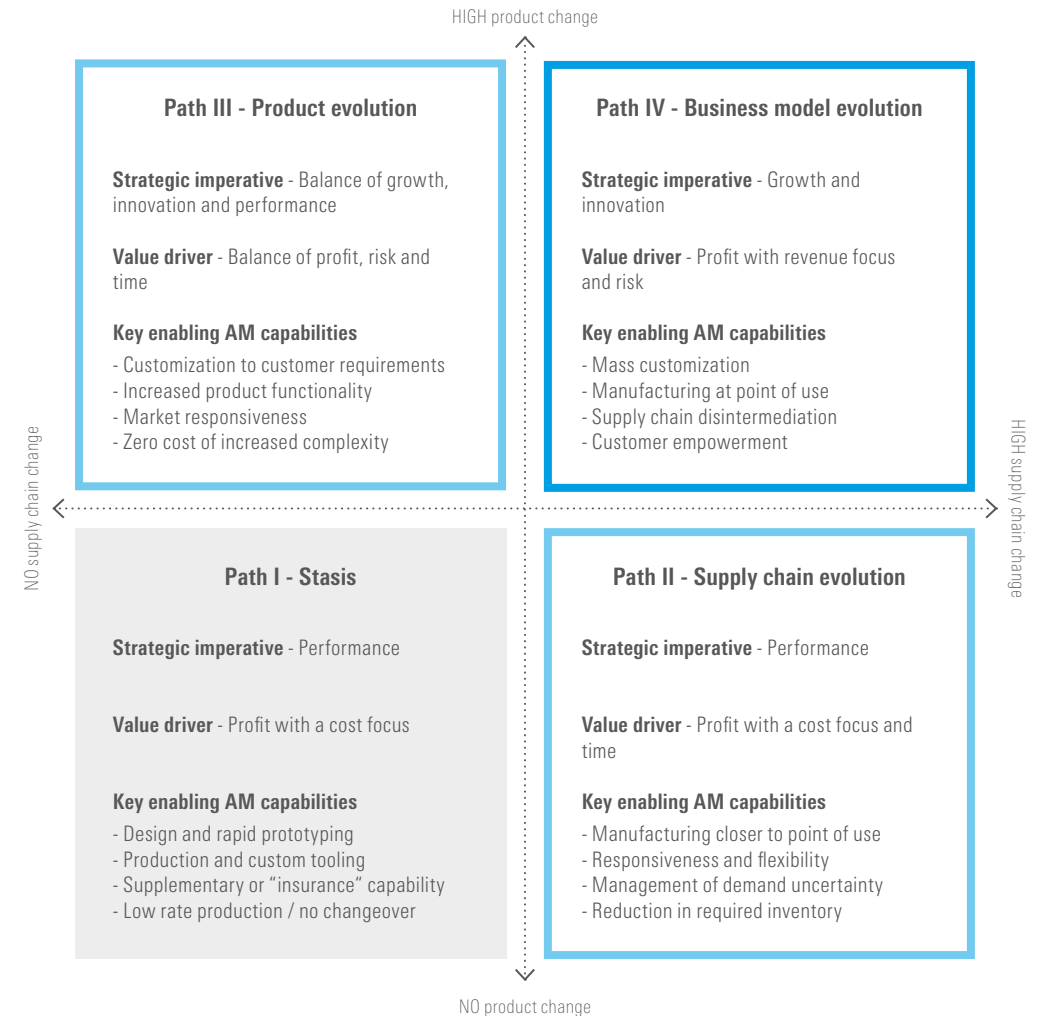
un'economia di diversificazione (o economia di scopo) grazie alla quale poter produrre più prodotti, maggiormente diversificati e più innovativi.

In sintesi, l'adozione dell'additive manufacturing risulta vincente per due motivi: la riduzione del capitale necessario per raggiungere un'economia di scala (produrre un numero maggiore di prodotti a un costo medio inferiore) e la riduzione del capitale necessario per raggiungere un'economia di scopo (diversificazione della produzione in uno stesso stabilimento produttivo). Si potrebbe riassumere in: più prodotti e più diversificati a parità di investimento.

Se si volesse spiegare in maniera più approfondita, significa necessità di investire meno denaro per raggiungere la cosiddetta dimensione minima efficiente, ovvero quel livello di produzione minimo (in numero di esemplari) che consente di minimizzare il costo medio del singolo prodotto. Il motivo è semplice: non essendo necessarie attrezzature dedicate, i costi fissi di un macchinario sono ripartiti su più tipologie di prodotto. Con la stessa macchina si possono quindi realizzare molti più prodotti, diversi tra loro, e non è necessario stabilire un numero minimo di esemplari, solitamente molto elevato, che possa giustificare il costo di eventuali stampi, altrimenti necessari.

Una diversa valutazione della dimensione minima efficiente può portare ad un ripensamento della catena di approvvigionamento: un'economia di scala più facile da ottenere può significare lo spostamento della produzione in nuove location. Zone escluse dalla produzione a causa di barriere economiche e logistiche troppo gravose, potrebbero riappropriarsi della possibilità di produrre. E di produrre là dove c'è bisogno.

Sul fronte dell'economia di scopo, l'AM permette per sua natura di ottenere una grande varietà di prodotti. Eliminare i costi relativi ad attrezzature dedicate significa poter sviluppare più versioni di uno stesso prodotto. Personalizzazione dunque; e la possibilità di riconfigurare la fabbrica all'infinito: i soli costi da sostenere riguardano la ricerca e lo sviluppo e non eventuali modifiche alle linee di impianto. Questo cambio di paradigma, insieme ad una revisione della supply chain, costituisce il vero potenziale di innovazione della stampa 3D.



**4 possibili scenari di implementazione** delle tecnologie additive immaginati da Deloitte, azienda di servizi di consulenza e revisione, nell'ambito di uno studio effettuato nel 2014.

Le quattro caselle descrivono alcuni possibili percorsi di evoluzione (o di stasi), attraverso cui l'implementazione della stampa 3D in fase di produzione potrebbe svilupparsi. Secondo Deloitte, per sfruttare i reali vantaggi dell'AM, occorrerà evitare di considerarlo un potenziale sostituto delle tecnologie di produzione tradizionali.

**scenario I** - Le aziende non mirano a modificare la catena di approvvigionamento o ad aumentare le performance dei prodotti attraverso un'uso più evoluto dell'additive manufacturing. Tuttalpiù, cercano di aumentare il valore aggiunto, all'interno della catena produttiva esistente.

**scenario II** - Grazie all'AM, le aziende riescono a raggiungere più facilmente un'economia di scala; possono trarre nuovi vantaggi da una capillarizzazione della catena produttiva, ad esempio.

**scenario III** - Grazie all'AM, le aziende riescono a raggiungere più facilmente un'economia di scopo; possono diversificare e personalizzare con più facilità la propria linea di prodotti.

**scenario IV** - Attraverso modifiche della supply chain e una diversificazione dei prodotti, le aziende possono puntare all'innovazione su più fronti. In questo scenario si sfrutta pienamente il potenziale vantaggio offerto da una produzione industriale che faccia uso dell'AM.

## 1.11 Additive manufacturing e costi diretti

In questo paragrafo si confronteranno i fattori che maggiormente influenzano i costi diretti di additive manufacturing e tecnologie tradizionali di produzione, con l'obiettivo di valutare in quali termini l'additive manufacturing possa competere con la produzione industriale odierna nell'ipotesi in cui si adottino le tecnologie additive per realizzare parti definitive. Le informazioni riportate di seguito provengono da un report di DUPress (Deloitte University Press) intitolato "3D opportunity for production: Additive manufacturing makes its (business) case", all'interno del quale vengono riportati i risultati di un'analisi basata sulla raccolta di numerosi casi di studio, dalla quale emergono interessanti risultati.

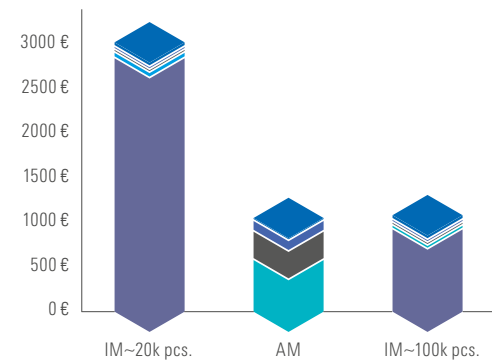
Prima di procedere al confronto è opportuno fare alcune premesse:

1) A detta di Dupress, una varietà di complessi fattori rende difficile creare modelli di valutazione dei costi che possano essere efficaci in più situazioni. Oggi sono disponibili numerosissimi fornitori, macchinari, servizi e quant'altro e la scelta può influenzare radicalmente il punto di approdo di una valutazione economica. In secondo luogo, la selezione del giusto processo, fra i molti disponibili nel campo delle tecnologie additive, richiede una certa dose di consapevolezza nel valutare tempi, costi, dimensioni massime raggiungibili e limiti di ogni tecnologia;

2) salvo poche eccezioni, molti dei casi di studio presi in considerazione tendono a confrontare l'additive manufacturing con il solo stampaggio a iniezione (injection molding). Questo perché, nel mercato relativo ai materiali per la stampa 3D, la plastica rappresenta una quota dell'80%; i metalli solo il 6% (dati relativi al 2012);

3) i casi considerati tendono a focalizzarsi su 3 tecnologie: la stereolitografia (SLA), la deposizione fusa di filamento (FDM o FFF) e la sinterizzazione laser selettiva (SLS). Quest'ultima in particolare viene vista come la più adatta in un'ottica di abbattimento dei costi;

4) la tendenza è quella di considerare la produzione di componenti relativamente piccoli. Oggi, tuttavia, esistono molti casi di utilizzo dell'AM anche per



	IM~20k pcs.	AM	IM~100k pcs.
Assembly	€ 0,035 (1,2%)	€ 0,012 (1,0%)	€ 0,035 (3,0%)
Operator	€ 0,009 (0,3%)	€ 0,117 (9,9%)	€ 0,004 (0,3%)
Material	€ 0,011 (0,4%)	€ 0,360 (30,4%)	€ 0,011 (1,0%)
Machine	€ 0,042 (1,4%)	€ 0,694 (58,7%)	€ 0,024 (2,1%)
Tooling	€ 2900 (96,8%)	€ - (0,0%)	€ 1075 (93,6%)
<b>Total</b>	<b>€ 2997</b>	<b>€ 1183</b>	<b>€ 1149</b>

● Assembly ● Operator ● Material ● Machine ● Tooling

**Confronto della ripartizione dei costi per la produzione di un componente di piccole dimensioni in plastica non infiammabile.**

Nel grafico sono rappresentati tre casi: 1) utilizzo di stampaggio a iniezione (IM) per una tiratura di 20 mila pezzi; 2) utilizzo di tecnologia additiva (AM); 3) utilizzo di stampaggio a iniezione (IM) per una tiratura di 100 mila pezzi.

I dati sono in grado di dimostrare la convenienza dell'AM per una produzione che non supera i 100 mila pezzi. Nel caso di una tiratura più ampia, lo stampaggio a iniezione diviene più conveniente. Fino a quella quota, al contrario, risulta essere più oneroso.

I risultati di questa ricerca sono stati individuati da DUPress e provengono da un caso di studio redatto da un'equipe di ricerca italiana. Come detto, vanno a rafforzare l'ipotesi secondo cui l'utilizzo dell'additive manufacturing in fase di produzione risulterebbe conveniente per medi e bassi volumi di produzione.

fonte: Deloitte University Press (2014) "3D opportunity for production: Additive manufacturing makes its (business) case"

applicazioni di grandi dimensioni, soprattutto per alcuni settori industriali;

5) spesso viene data per assodata una maggiore capacità dell'AM di competere economicamente nella produzione di parti relativamente complesse; per questo motivo si tendono a costruire i casi di studio intorno a componenti dotati di una complessità in qualche misura superiore alla media.

Fatte queste premesse, un'analisi dei casi di studio più emblematici rende possibile individuare quattro fattori di differenziazione: il costo delle attrezzature, dei macchinari, dei materiali e, con incidenza minore, della manodopera.

1) Nell'ambito delle tecnologie tradizionali di produzione, il costo delle attrezzature, in molti casi, supera di gran lunga tutte le voci di spesa relative alla produzione di un componente. Inoltre, le attrezzature devono essere sottoposte a manutenzione, stoccate in un magazzino e archiviate per lunghi periodi. Tutto ciò comporta evidentemente dei costi. Un vantaggio chiave per l'additive manufacturing riguarda la possibilità di annullare completamente il bisogno di attrezzature e i relativi costi.

2) Al contrario, il costo dei macchinari nell'AM è una voce di spesa che incide sul totale dei costi diretti per circa il 60-70%. Per effettuare un confronto realistico con le tecnologie tradizionali, tuttavia, occorre necessariamente considerare anche altri fattori. Il primo è il volume utile di fabbricazione della macchina, o "build-volume". Per distribuire i costi di ammortamento del macchinario su un numero elevato di prodotti occorre produrne molti e nel minor tempo possibile. Un build-volume più grande risulta fondamentale per raggiungere questo scopo: nell'additive manufacturing, infatti, non è conveniente realizzare un pezzo alla volta bensì sfruttare l'intero volume della camera di stampa "inforando" il maggior numero possibile di pezzi. Per farlo, occorre posizionare le parti in modo che il volume disponibile risulti il più possibile occupato, al netto di limiti di costruzione imposti da eventuali supporti. Più pezzi si realizzano in un ciclo di stampa, meno tempo sarà dedicato alla produzione di ognuno, inferiore sarà il costo del prodotto finito. Il secondo

fattore da considerare è il tempo di utilizzo effettivo della macchina. Una pressa per injection molding può raggiungere un rapporto tempo/tempo effettivo di produzione vicino al 90%. In una condizione normale di lavoro, questa percentuale si attesta tra il 60 e l'80% per 19 un macchinario di AM, il quale risulta in un certo senso meno efficiente.

3) Il costo dei materiali ha un peso del 30% nel processo di fabbricazione additiva, mentre si attesta tra il 0,2 e il 2,7% per una tecnologia di produzione tradizionale quale può essere l'injection molding. Questa differenza è dovuta in larga parte alle differenze di costo dei rispettivi materiali. Secondo alcune analisi, termoplastici e fotopolimeri per stampa 3D possono costare dai 175 ai 250 dollari al kg; nel caso di materiali analoghi per injection molding il costo al kg si aggira intorno ai 2-3 dollari. Un divario analogo esiste anche nel campo dei metalli: le polveri metalliche utilizzate per sinterizzazione e fusione risultano 100 volte più costose degli equivalenti "commercial grade". La riciclabilità dei suddetti materiali è anch'essa un costo. Pensare che l'AM sia un processo privo di scarti appare inappropriato anche se non esiste un'opinione univoca sull'argomento. Probabilmente, come nel caso del riciclo tradizionale, molto dipende dal livello di performance che richiede l'applicazione successiva al riciclo del materiale.

4) Per quanto riguarda la manodopera non vi sono sostanziali differenze tra le due famiglie di processi. Tuttavia, una semplificazione degli assieme dovuta alla produzione di componenti più complessi, potrebbe portare ad una riduzione dell'incidenza dei costi di manodopera nel processo di assemblaggio.

Per concludere, sulla base dei casi di studio analizzati e stando ad un modello esclusivamente basato su un confronto diretto dei costi, Deloitte tende a considerare l'additive manufacturing potenzialmente conveniente nel caso di medi o bassi volumi di produzione. Questo senza considerare altri fattori di potenziale innovazione derivanti dall'implementazione dell'AM nella catena produttiva; immaginando quindi uno scenario in cui l'additive manufacturing voglia limitarsi a sostituire i metodi tradizionali, senza nessuna modifica della catena di approvvigionamento e senza alcuna diversificazione dei prodotti offerti.



## 1.12 Trarre valore dall'additive manufacturing

L'analisi dei costi diretti è un aspetto importante. Tuttavia, non è sufficiente per valutare la convenienza economica di un modello di business che possa trarre vantaggio dall'impiego delle tecnologie additive in ambito produttivo. Come abbiamo visto, queste tecnologie possono offrire un alto potenziale di innovazione solo se affiancate a una revisione della catena di approvvigionamento e a una maggiore diversificazione dell'offerta. Le aziende che cercano un vero salto di qualità devono quindi puntare agli scenari 2, 3 e 4.

Le tecnologie di stampa tridimensionale sono più lente rispetto ai metodi tradizionali di produzione e ciò costituisce uno degli svantaggi maggiori per la stampa 3D. Un'altro punto a sfavore è rappresentato dal costo maggiore delle materie prime. In entrambi i casi, però, è possibile bilanciare la condizione sfavorevole di partenza adottando una logica progettuale che metta alla prova manager, ingegneri e progettisti nell'intento di sfruttare a proprio vantaggio i limiti della tecnologia.

A fronte di un tempo di produzione più lungo, è possibile fare a meno di passaggi prima fondamentali, come la produzione di stampi e attrezzature. Si possono fabbricare prodotti più vicini al luogo di utilizzo, diminuendo tempi e costi logistici, ed è possibile ottenere pezzi molto vicini alla forma finale, che non hanno bisogno di operazioni di finitura. Si pensi ad esempio ai numerosi passaggi necessari alla realizzazione di un pezzo in microfusione e alla relativa semplicità con cui lo stesso componente può essere stampato mediante sinterizzazione o fusione di polveri.

Per fronteggiare il costo maggiore dei materiali occorre progettare con l'obiettivo di ottimizzare la geometrie; e ridurre la materia prima necessaria a realizzare componenti di pari efficacia. Grazie all'ausilio di moderni software è già possibile farlo, mantenendo inalterati vincoli di posizionamento e di resistenza a stress meccanico.

In definitiva, La tecnologia additiva non è una "panacea". Non vi è alcuna ragione per considerarla un potenziale sostituto delle tecnologie tradizionali. Tuttavia, potrà assumere un ruolo maggiore nell'universo manifatturiero e costituire un driver per la crescita e lo sviluppo di molte aziende.



**023. La Generico Chair** di Marco Hammerling è un prototipo di sedia pensato per una produzione in additive manufacturing.

È il risultato di un processo di ottimizzazione topologica finalizzato a massimizzare l'efficienza della struttura e diminuire la quantità di materiale utilizzato. Si tratta di una sedia molto leggera e molto resistente; che parla un proprio linguaggio e riesce a trarre vantaggio dalla tecnologia per cui è stata pensata.

**024. staffa realizzata in DMLS** utilizzata all'interno degli Airbus A320. Rappresenta un altro esempio di ottimizzazione del volume geometrico, nell'ottica di una riduzione del materiale impiegato.



**025. 3DSystems Cube 3** è un esempio di stampante pensata per l'ambiente domestico. Ha un costo di circa 900 euro ed è paragonabile alla RepRap utilizzata per il calcolo dell'indice ROI, nell'esempio descritto nel paragrafo a fianco.

I dispositivi dotati di un design e una semplicità d'uso compatibili con la casa stanno aumentando; segno che una produzione di oggetti semplici in questo contesto è uno scenario tutt'altro che improbabile.

**026. New Matter 3D Printer** è una stampante low cost che fa parte di un ecosistema software pensato per un'estrema semplicità di utilizzo.

La stampante, sviluppata in collaborazione con Frog Design, parla un linguaggio contemporaneo. È un invito ad utilizzare questo oggetto come un qualsiasi elettrodomestico di uso comune. (credits: frogdesign.com)

## 1.13 Prospettive di una produzione domestica

Uno studio effettuato da alcuni ricercatori della Michigan Technological University si è posto come obiettivo la valutazione dell'indice di ritorno di investimento (ROI) di una stampante 3D utilizzata in un contesto domestico. Lo studio ha preso in considerazione una RepRap, macchinario entry-level di costo medio-basso.

Per condurre la ricerca sono stati selezionati 20 oggetti, tra cui: anelli per le tende, uno spremiaglio, un supporto da scrivania per pc portatili e così via. Oggetti relativamente semplici, i cui modelli CAD sono stati reperiti gratuitamente online. In seguito, sono stati annotati i prezzi di prodotti comparabili acquistabili via internet.

I ricercatori hanno calcolato il costo totale di produzione dei 20 oggetti, che è risultato pari a circa 18 dollari, considerando materiale, energia elettrica e costi macchina. Se si fossero dovuti acquistare online, il prezzo totale dei prodotti sarebbe oscillato tra i 312 dollari, nel caso migliore, e i 1943 dollari, nel caso pessimo. Questi dati sono stati utilizzati per calcolare il tempo di rientro dall'investimento, assumendo che una stampa degli stessi oggetti si ripetesse ogni anno. Nel caso dei 1943 dollari, esso è risultato pari a quattro mesi, nel caso dei 312 dollari, pari a due anni.

Due diversi indici di ROI sono stati calcolati, assumendo una vita utile del macchinario di 3 e 5 anni e prendendo in considerazione il solo caso dei 312 dollari (il più svantaggioso per il calcolo di questo indice). Considerando una vita utile di 3 anni, la percentuale di ritorno sull'investimento si è attestata tra il 20 e il 40%, nell'altro caso è stata valutata intorno al 200%.

Lo studio si conclude affermando che per la stampa di piccoli oggetti di utilizzo domestico, acquistare una stampante 3D potrebbe rivelarsi un buon investimento. E considerando che questo tipo di macchinari è destinato a migliorare, in termini di performance qualitative, disponibilità e costi, una forma di additive manufacturing implementata a livello domestico potrebbe rivelarsi un modello dalle potenzialità interessanti. Chi decidesse di adottarlo, per un certo tipo di prodotti, avrebbe l'opportunità di diventare parte attiva in un micro-processo di produzione e distribuzione.

## 2 Progettare per l'additive manufacturing

### 2.1 Tesi

Nel paragrafo seguente si dichiarano gli obiettivi della tesi: progettare per l'additive manufacturing sfruttando le "key enabling AM capabilities" individuate nella fase di ricerca. I paragrafi successivi spiegheranno quali punti sono stati presi in considerazione e in che modo, concretamente, influenzeranno la fase di progetto.

Una volta appurato che le possibilità di applicare la stampa 3D in ambito produttivo esistono, obiettivo della tesi sarà applicare alcuni dei principi individuati nella fase di ricerca per sviluppare un progetto fortemente orientato ad una produzione in additive manufacturing. Il progetto dovrà possibilmente interpretare alcune delle "key enabling AM capabilities" individuate nello schema a pagina 19 (e riproposto qui a fronte). L'intenzione è quella di provare a seguire alcuni di questi punti per realizzare un prodotto che possa essere in grado di sfruttare al meglio il potenziale di una produzione AM-oriented. Il progetto sarà dunque una sorta di "banco di prova" per capire, pur parzialmente, come progettare per l'additive manufacturing, quali prodotti, quanto complessi e con quale "mentalità". Al termine della fase di progetto, il prodotto dovrà essere in grado di toccare quei punti che rendono l'additive manufacturing una via di potenziale innovazione, nella cui traccia possono nascere nuovi modelli di business, di produzione e di distribuzione.

Intento della tesi: per sfruttare la stampa 3D come tecnologia produttiva primaria occorre pensare prodotti che ne sappiano sfruttare i reali vantaggi potenziali. Non basta sostituire con l'additive manufacturing le tecnologie tradizionali di produzione ma occorre fare leva sui vantaggi che nelle sue molte forme essa può offrire.

L'obiettivo è progettare un prodotto specializzato, di media complessità, pensato per soddisfare un'esigenza particolare, interessante per alcuni utenti specifici. A motivo di questa scelta vi è il diverso grado di convenienza della stampa 3D nel caso di basse, medie o alte tirature. Come si è visto, la stampa 3D risulta conveniente nell'ambito di una produzione limitata, che si assesta intorno alle migliaia di unità. Per questo, la progettazione di un prodotto specializzato appare più indicata. Si cercherà di progettare per includere i macchinari low-budget tra i possibili strumenti utili alla

fabbricazione del prodotto. In questo modo, almeno per quanto riguarda scocche ed eventuali parti in plastica, potrà essere auto-prodotto.

Secondariamente, pur mantenendosi nell'ambito della stampa 3D, il prodotto dovrà offrire la possibilità di essere realizzato con diversi materiali e diverse tecnologie. Uno dei vantaggi potenziali dell'additive manufacturing, infatti, risiede nel poter personalizzare la produzione di un componente in base alle esigenze del cliente. Pertanto, si cercherà di mantenerlo "aperto" alla possibilità di essere realizzato con diversi metodi; con l'obiettivo di offrire più livelli di performance - legati al materiale e alla tecnologia utilizzata - che possano venire incontro ad utenti con diverse esigenze prestazionali.

Progettare un prodotto nell'ambito della produzione additiva significa poter venire meno alla necessità di stoccare grandi scorte di magazzino. Per questo, preferibilmente, i componenti del prodotto finito dovranno essere di facile reperibilità. L'intenzione è quella di lasciare all'utente la possibilità di assumere un ruolo attivo anche nel reperimento delle parti oltre che nella fabbricazione delle scocche. Per questo motivo, almeno nella prima fase, il progetto si muoverà secondo un'ottica tipicamente "maker". Il che significa che si tenderà ad adottare soluzioni tecniche già esistenti e possibilmente reperibili. Il prodotto, in fase evoluta, potrà avvalersi di soluzioni industriali pensate "ad hoc", ma volendo sviluppare per questa tesi un prodotto/prototipo funzionante, appare ovvio come eventuali soluzioni "high-end" risultino al momento non adeguate allo scopo.

In ultima istanza, l'obiettivo di questa tesi è sviluppare un prodotto che non sia solamente un prototipo ma un oggetto funzionante, concepito per la produzione additiva, che possa essere un banco di prova per la sperimentazione di un modo di progettare capace di sfruttare il vero potenziale delle tecnologie additive e in grado di suggerire nuovi modelli di sviluppo e innovazione per la progettazione e la produzione di beni di consumo. Nei paragrafi seguenti si elencheranno i punti fondamentali presi in considerazione per la fase di progetto e si stilerà una lista dei requisiti che il prodotto finale dovrà possibilmente andare a soddisfare.



Nello schema, già proposto a pagina 19, sono state evidenziate le **key enabling additive manufacturing capabilities sulle quali si è deciso di indagare da un punto di vista progettuale**.

Per ognuno di questi punti si andrà alla ricerca di un pretesto progettuale utile a sperimentarne possibili vantaggi ed eventuali controindicazioni. Probabilmente, gli sbocchi della ricerca risulteranno in qualche misura semplificati, validi, o parzialmente validi, solamente nel caso specifico del progetto considerato. Tuttavia,

dalla sperimentazione di questi concetti si trarranno considerazioni che, sperabilmente, potranno avere un valore anche nel caso di progetti successivi, più articolati e immaginati a una scala differente.

Nei paragrafi seguenti, ognuno dei punti evidenziati sarà preso in considerazione singolarmente e tradotto in un obiettivo progettuale di ampio respiro. Non si tratterà, ancora, di obiettivi specifici, ma di volontà teoriche, in base alle quali individuare un'area di interesse adatta a un'applicazione intelligente dei concetti

selezionati, su di un progetto specifico; inerente quella stessa area progettuale.

Tra i concetti ritenuti più interessanti: la possibilità di offrire una vasta personalizzazione dei prodotti in base alle richieste degli utenti; la correlazione tra complessità geometrica e funzionalità delle parti; la possibilità di ottenere forme complesse senza costi aggiuntivi; l'eventualità di produrre vicino ai luoghi di utilizzo, operando una disintermediazione della catena di approvvigionamento; la possibilità di ideare prodotti pensati per un'utenza evoluta.

## 2.2 Progettazione scalabile e logica multi-materiale

Tra le “key enabling AM capabilities” che si è deciso di prendere in considerazione, la voce “customization to customer requirements” è parsa da subito la più interessante.

Nel corso della ricerca si è più volte indicata la possibilità di personalizzare i prodotti come uno degli aspetti più interessanti dell'additive manufacturing. La filosofia makers in primis ha fatto di questo aspetto uno dei propri cavalli di battaglia. La cultura dell'hand-made si basa su questo principio e se si è portati ad acquistare su Etsy un oggetto fatto a mano è perché lo si ritiene superiore o di maggior valore rispetto ad un oggetto analogo prodotto in serie.

Tuttavia, non è sulla personalizzazione estetica che si è deciso di scommettere nella seconda parte della tesi. Il concetto di “customization to customer requirements” è stato interpretato in modo tecnico. Ovvero, si è considerata la possibilità di procedere alla progettazione del prodotto/prototipo rendendo possibile una sua realizzazione tramite diverse tecnologie additive e diversi materiali. In breve, si è deciso di puntare su una progettazione scalabile e una logica multi-materiale.

L'idea potrebbe sembrare a prima vista una forzatura ma il progetto vuole volutamente configurarsi come un “banco di prova” grazie al quale poter sondare alcune delle potenzialità di una produzione AM-based nell'ambito dei beni di consumo. Una progettazione di tipo scalabile può costituire un vantaggio nel caso in cui versioni analoghe di uno stesso prodotto siano orientate a soddisfare diverse esigenze di performance. Pertanto, nella fase di progetto, si cercherà di tenere in considerazione più tecnologie di additive manufacturing, in modo tale che il prodotto definitivo risulti adattabile alle differenti esigenze di diversi utenti.

Ciò che si vuole ottenere è la possibilità di stampare componenti pressoché identici in materiali diversi, che possano risultare sempre efficaci nonostante vengano realizzati con l'una o l'altra tecnologia. Questa scelta impone di progettare rispettando i vincoli costruttivi di ogni tecnologia che si reputerà utile alla declinazione delle performance del prodotto. E, prevedibilmente, si dovranno adottare una serie di accorgimenti tecnici

utili ad assicurare la stampabilità del pezzo in una grande varietà di situazioni (geometrie in grado di auto-sostenersi in fase di stampa, canali di svuotamento per il materiale in eccesso, spessori compatibili, ecc.).

Un prodotto realizzato in PLA, un materiale oggi più o meno poco costoso e facilmente reperibile, può offrire prestazioni adeguate per un utilizzo consumer ma non essere sufficientemente adatto ad un utilizzo professionale o semi-professionale o ad un impiego in cui la resistenza chimica del prodotto è fondamentale per l'ambiente in cui lo si utilizza. Analogamente, realizzare un componente in sinterizzato di alluminio impone dei costi di produzione tali per cui la destinazione finale del prodotto deve presentare motivi sufficientemente validi per giustificare l'adozione di una tecnologia di tale livello. Questo tipo di situazione può verificarsi spesso quando si decide di realizzare un oggetto in additive manufacturing ed è proprio in questo ambito che si intende lavorare. Per farlo, si dovrà scegliere di progettare un prodotto dalle performance modulabili le cui parti abbiano prestazioni diverse a seconda che siano realizzate in PLA (FDM) o in sinterizzato di alluminio (DMLS) e così via.

Uno dei vantaggi di questa modalità progettuale risiede nella possibilità di produrre ovunque le parti di un prodotto e di poterlo fare con più tecnologie. Ciò permette di raggiungere una capillarità pressoché totale della catena produttiva, e di raggiungere un'economia di scala con meno risorse. Idealmente, una versione ad alte prestazioni e una versione a medie prestazioni possono coesistere, l'una realizzata con macchinari professionali e pensata per un'utenza di alto livello, l'altra producibile con tecnologie low-budget, per un pubblico di appassionati, interessato all'auto-produzione e ad un utilizzo basilare e/o occasionale del prodotto.

L'additive manufacturing può offrire molte possibilità di “personalizzazione” del processo produttivo ed è per questo motivo che si è deciso di progettare in modo polivalente.

Una progettazione di tipo scalabile permette di soddisfare esigenze specifiche dettate da condizioni di utilizzo altrettanto particolari e non universali.

## 2.3 Geometrie complesse per una maggiore funzionalità

Dal momento che l'additive manufacturing permette di realizzare più facilmente geometrie complesse, può risultare conveniente progettare componenti di complessità maggiore. Questi sono in grado di svolgere lo stesso compito normalmente affidato ad un insieme di più elementi e permettono di ottenere una maggiore robustezza del prodotto unita ad un risparmio sui costi di assemblaggio.

Progettando per l'additive manufacturing si cercherà di sfruttare opportunamente questa possibilità; con l'obiettivo di raggiungere una funzionalità del prodotto che sia la migliore possibile, a fronte di un numero minore di parti impiegate.

Attualmente non è possibile prevedere se vi saranno parti adatte a questo genere di sostituzione; tuttavia, avendo in mente di dedicarsi al progetto di un dispositivo prettamente “prestazionale”, è possibile che vi sarà modo di preferire un componente integrato rispetto ad un insieme di parti sfuse; avvicinandosi in questo modo al concetto di “increased product functionality” individuato nello schema di Deloitte.

## 2.4 Complessità a costo zero

Una complessità delle geometrie più facilmente gestibile in fase di produzione e una progettazione rivolta a più materiali e tecnologie, permettono di ottenere una sofisticazione del prodotto adattabile a diverse situazioni di utilizzo. Un prodotto può ricevere nuove funzionalità sia da una modifica migliorativa delle forme sia da un upgrade del processo produttivo; ed entrambe queste possibilità, a condizione di avere accesso ai macchinari necessari, risultano a costo zero.

I soli costi da affrontare riguardano i tempi di ricerca e di sviluppo delle nuove soluzioni. Non risultano necessarie né una riorganizzazione delle linee produttive né un rifacimento delle attrezzature. I macchinari sono per loro natura riconfigurabili a piacimento e hanno solamente bisogno di una riprogrammazione software. Ciò significa che una qualsiasi modifica del prodotto implica la sola preparazione di un file 3D, successivamente tradotto in una nuova sequenza di lavoro.

## 2.5 Evoluzione della catena di approvvigionamento

Nel capitolo 1 si è più volte indicata la possibilità di rivoluzionare la supply chain come uno degli aspetti potenzialmente più innovativi dell'adozione dell'additive manufacturing in ambito produttivo. Tuttavia, questo potenziale non è ancora stato esplorato e appare difficile da mettere a fuoco. Le dinamiche da sostituire sarebbero molte e, come sempre, una rivoluzione che riguarda un sistema modellato a “network” implica prima di tutto che sia presente un'infrastruttura capace di accoglierla e assimilarla.

Prima o poi, non sarà inverosimile che una rete capillare di centri produttivi possa soddisfare localmente le richieste di produzione di un certo tipo di prodotti. Oggi, tuttavia, gli unici macchinari abbastanza diffusi sul pianeta sono le stampanti a basso costo, di tipo consumer, acquistate nel corso degli ultimi 6 anni per cifre comprese tra le qualche centinaia e le poche migliaia di euro. Chi ne fosse sprovvisto, può decidere di affidarsi alle numerose piattaforme online che offrono servizi di stampa 3D o rivolgersi a molti piccoli produttori grazie a piattaforme di condivisione come 3D Hubs. Se dunque già esistono molte vie percorribili per ottenere un pezzo stampato ad un costo relativamente basso, perché non provare a progettare con in mente questo scenario?

“Manufacturing closer to point of use” e “Supply chain disintermediation” sono concetti molto interessanti da applicare su larga scala. Nella fase di progetto che interessa questa tesi cercheremo di applicarli su piccola scala, progettando un dispositivo auto-producibile, le cui eventuali parti non stampate risultino di facile reperibilità. L'intenzione è quella di provare a progettare immaginando un sistema diverso di produzione e reperimento delle parti, sia per quanto riguarda i componenti prodotti tramite additive manufacturing, sia per eventuale componentistica di altro tipo. La motivazione principale a sostegno di questa scelta risiede nella volontà di sviluppare un prototipo: le cui parti andranno quindi necessariamente reperite, testate ed assemblate. Una seconda motivazione deriva dalla volontà di mantenere “open” il progetto, almeno inizialmente, in modo tale che un'utenza di tipo evoluto possa effettivamente gestirne la realizzazione, occupandosi anche, qualora lo desiderasse, del reperimento delle parti.

## 2.6 Evoluzione dell'utente

L'integrazione delle tecnologie additive nel campo della produzione diretta aprirà la strada a prodotti concepiti per trarre massimo vantaggio da una fabbricazione di tipo digitale. A sua volta, una digitalizzazione della produzione potrà contribuire a una democratizzazione della capacità produttiva. Secondo questo scenario, ogni macchinario esistente potrà essere impiegato nella produzione di qualsivoglia oggetto e non è da escludere che una diffusione sempre maggiore di macchinari 3D anche tra i non addetti ai lavori, possa rendere quello della produzione un ambito interessante per sempre più persone.

In questa prospettiva, non è così improbabile che possano delinearsi le caratteristiche di un nuovo tipo di utente: in grado sì di "consumare", come è sempre stato, ma anche di produrre o quantomeno intervenire attivamente sul prodotto. Per prodotti molto complessi, questa previsione sarà sempre di difficile attuazione, ma nel caso di oggetti semplici e non destinati ai grandi numeri, potrebbe in qualche misura concretizzarsi.

Corollario: la diffusione capillare di macchinari per la stampa 3D e la disponibilità di servizi professionali raggiungibili via web formeranno un'utenza sempre più competente, non predominante in termini numerici ma ugualmente in grado di svolgere un ruolo attivo nella parte di ciclo vita del prodotto che riguarda la produzione, l'assemblaggio e l'utilizzo.

Si è deciso di progettare per un'utenza di questo tipo. Competente in un determinato ambito e desiderosa di intervenire sul prodotto, secondo modalità che si andranno via via definendo. In questo senso, progettare un oggetto che sia riproducibile con macchinari low-budget appare una scelta coerente e sicuramente da perseguire.

Infine, per la realizzazione del prototipo/prodotto, sarà interessante valutare la possibilità di servirsi di una componentistica accessibile, di livello consumer e non industriale; proprio per lasciare all'utente la possibilità di interagire con un progetto open. L'idea è quella di ottenere un prodotto finito, che possa coesistere in forma industriale e in forma auto prodotta e che in entrambe le varianti possa essere gestito, assemblato e configurato da un utente "empowered".

## 2.7 Logica "open"

Un prodotto realizzabile con diverse tecnologie di additive manufacturing, ugualmente producibile con macchinari di tipo professionale o con stampanti low-budget e in grado di servirsi di una componentistica accessibile, sarà molto probabilmente orientato ad una logica open-hardware.

Si è deciso di assumere questo tipo di impostazione poiché ritenuta adatta al concepimento di un progetto-guida che possa risultare un valido banco di prova per testare le reali potenzialità dell'adozione delle tecnologie additive nel campo della produzione di oggetti consumer. Inoltre, trattandosi di una tesi di laurea, appare più interessante sviluppare un progetto che possa essere valutato come caso di studio ed eventualmente sviluppato in fasi successive da chi ne fosse interessato, aziende o persone comuni. Il prodotto finale non sarà probabilmente adatto ad essere brevettato o protetto; sarà più che altro un punto di partenza, risultato di una ricerca volta a capire come l'AM potrà cambiare il concetto di "prodotto" che siamo abituati a concepire. Si tratta sostanzialmente di un esperimento.

Nonostante questo, però, non è da escludere che il prodotto finale possa essere interessato da una qualche forma di commercializzazione da parte di un'azienda. Volendo perseguire una progettazione il più possibile scalabile, il risultato finale potrebbe risultare ugualmente adatto all'autoproduzione così come ad un miglioramento che segua una logica più industriale. Le strade possibili, in questo senso, sono molteplici; l'unico vincolo sarà la natura particolare del prodotto, il quale riscuoterà più interesse agli occhi di un'utenza non numerosa piuttosto che di un pubblico allargato.

Volendo preferibilmente portare il progetto ad una fase di prototipo, è facile immaginare che quest'ultimo, una volta ultimato, possa risultare vicino a un modo di pensare tipicamente "maker", almeno per quanto riguarda l'adozione di soluzioni tecniche o di eventuali componenti elettro-meccanici. Tuttavia, si ha anche la volontà di superare questo modello: di non limitarsi a immaginare un oggetto "da hobbisti" ma di spingere la progettazione verso qualcosa di più evoluto, di più specialistico. Che esuli dal voler essere un progetto estetico, difficile da interpretare, complicato e adatto ad un pubblico di soli "geek".

## 2.8 Elenco degli obiettivi teorici

In quest'ultimo paragrafo si esporranno i punti chiave che guideranno la seconda parte della tesi.

1) Elaborare un progetto da portare possibilmente alla fase di prototipo. Funzionante e in grado di essere un valido banco di prova per sondare alcune delle potenzialità offerte dall'additive manufacturing nell'ambito di un'ipotetica produzione di oggetti di consumo. Si cercheranno di sfruttare quelle "key enabling additive manufacturing capabilities" individuate nella fase di ricerca ed esposte nei paragrafi precedenti. Si cercherà di capire come trarre vantaggio dalle tecnologie additive per elaborare un concetto di prodotto diverso dall'ordinario, che possa realmente esprimere il potenziale dell'additive manufacturing nell'ambito di nuovi possibili modelli di produzione.

2) Il prototipo non sarà finalizzato alla valutazione del prodotto in vista di una fase successiva di sviluppo ma sarà esso stesso il prodotto definitivo e ipoteticamente vendibile. Non essendoci la necessità di realizzare stampi, è un obiettivo apparentemente raggiungibile.

3) Il progetto sarà sviluppato nell'ottica di una produzione scalabile. Sarà possibile realizzare alcune parti sfruttando differenti tecnologie di additive manufacturing, con l'obiettivo di offrire prestazioni del prodotto dimensionabili alle esigenze del cliente. Una stessa geometria, quindi, sarà producibile con diversi macchinari, a fronte di modifiche possibilmente minime del modello originale. L'obiettivo è progettare per una molteplicità di soluzioni produttive, industriali e non; aspetto che è stato visto come una delle opportunità più interessanti di una produzione AM-based.

4) Il prodotto dovrà assolvere ad un impiego specialistico e risultare adatto a una produzione di media tiratura. Questo perché, come si è visto, l'additive manufacturing è attualmente più indicato per produzioni di questo tipo.

5) La possibilità di produrre alcune parti tramite manifattura additiva dovrà riguardare in modo equivalente contesti professionali e contesti amatoriali. Grazie alla scalabilità del progetto sarà possibile produrre alcune parti tramite macchinari low-budget. E nonostante prestazioni quasi sicuramente inferiori, anche la versione

"self-made" del prodotto dovrà permetterne un livello soddisfacente di utilizzo.

6) La selezione dei componenti avverrà prevalentemente attraverso il web; in modo tale da rendere semplice il reperimento di eventuale componentistica elettrica e meccanica. L'obiettivo è progettare per un'utenza competente, in grado di gestire l'assemblaggio del prodotto, sue eventuali modifiche e il reperimento delle parti. Si seguirà un'ottica tipicamente "maker" ma che allo stesso tempo non vuole escludere un pubblico meno esperto e meno avvezzo alla pratica del cosiddetto "hacking". La speranza è che per un progetto di questo tipo possa nascere una sorta di interesse collettivo, in grado di sostenerne un eventuale sviluppo in una fase successiva.

7) Il prodotto, almeno in fase di tesi, seguirà una logica open source. Sarà pensato per essere semplice, modificabile e sviluppabile. Più vicino ad una sorta di test che ad un prodotto industriale; un esercizio progettuale svolto per vagliare le opportunità di una produzione basata sull'additive manufacturing e per capire come l'adozione di questa tecnologia possa positivamente influenzare la progettazione di dispositivi consumer di complessità media.

8) Indagare le possibilità di impiego di tecnologie high-end (DMLS/SLS/EBM) per la realizzazione di prodotti consumer di fascia alta dedicati ad un pubblico con esigenze di performance elevate. In sostanza, verificare se questo tipo di tecnologie può avere un'applicazione (non solamente estetica) anche nel design di prodotto, distaccandosi dall'ambito ingegneristico o medicale.

Nel capitolo 3 si procederà a individuare un ambito progettuale che possa risultare adatto all'esplorazione dei punti proposti. È possibile che, durante la fase di progetto, alcuni si rivelino meno interessanti di altri. Ma lo scopo di una progettazione di tipo pratico, in questo caso, è proprio quello di individuare le potenzialità dell'AM più promettenti e scartare le meno interessanti. Nel prossimo capitolo si cercherà di rendere più pragmatica questa lista di elementi teorici e una volta individuato il tipo di prodotto sul quale concentrarsi, sarà più semplice assegnare un peso differente ad ogni obiettivo, e quindi tradurlo in un requisito concreto.

## 3 Definizione concept

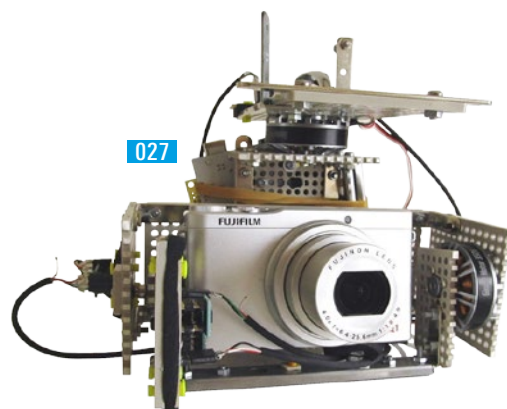
### 3.1 Ricerca di un'area progettuale

Prima di individuare un ambito di progetto, si sono posti dei requisiti di cui tenere conto per effettuare una scelta coerente con gli obiettivi della tesi. Primo requisito: volendo ideare un prodotto dalle prestazioni scalabili, si è ricercato un settore che imponesse la necessità di un livello prestazionale potenzialmente elevato. Secondo: l'adattabilità delle prestazioni ai bisogni degli utenti doveva essere possibile e giustificare la natura scalabile del prodotto.

Per questa ragione l'interesse è ricaduto nell'ambito sportivo; non inerente la pratica di una particolare disciplina bensì la ripresa di sequenze video amatoriali o semi-professionali. In ambito sportivo la richiesta di performance è sempre molto alta e il contenuto tecnologico richiesto da una ripresa "action" è mediamente elevato. Per questo motivo è parso interessante fondere i due mondi e cimentarsi in questo tipo di applicazione.

Una restrizione ulteriore del campo d'azione ha portato ad indagare la possibilità di muoversi nell'ambito della stabilizzazione video, ambito che infine è stato selezionato. Si è deciso di progettare un sistema di stabilizzazione per riprese sportive, adatto ad applicazioni di tipo outdoor ma utilizzabile anche in più normali situazioni di video-making.

Perché si è scelto questo ambito? La motivazione principale riguarda ancora una volta il livello prestazionale richiesto. Stabilizzare una ripresa in situazioni di movimento richiede un hardware capace di contrastare e sopportare accelerazioni dinamiche. Inoltre, un sistema di questo tipo potrebbe richiedere un certo grado di impermeabilizzazione, se utilizzato in condizioni di pioggia o in caso di sport acquatici. Caratteristiche come questa si prestano molto ad essere modulate: possono interessare un certo tipo di utenti e non riguardare altri. Chi fosse interessato alla possibilità di sfruttare il sistema per riprese più normali, ma ugualmente stabilizzate, potrebbe non avere bisogno di un dispositivo tropicalizzato o eccessivamente rigido. Potrebbe sfruttare tutti i potenziali vantaggi del prodotto e fare a meno di quelle caratteristiche derivate dall'impiego di una tecnologia high-end per la produzione delle scocche. In questo senso, la stabilizzazione video per riprese outdoor/sportive è parsa una scelta coerente



027

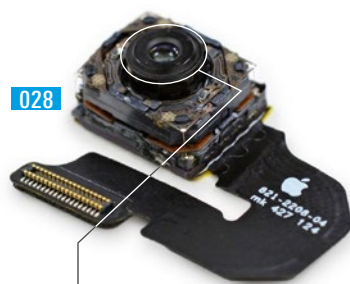
**027. DIY Brushless Gimbal** basato su processore Arduino by ArduinoDeXXX.

fonte: Instructables.com

**028. La fotocamera iSight di iPhone6 Plus** è dotata di uno stabilizzatore ottico di immagine in grado di eliminare le vibrazioni di in una ripresa manuale.

**029. DJI Zenmuse X5 Series** è una telecamera stabilizzata per droni dotata di gimbal e lenti intercambiabili. Filma in 4K ed è al momento una delle soluzioni più interessanti nell'ambito della fotografia aerea.

**030. Lanparte HHG-01** gimbal per riprese manuali compatibile con smartphone e GoPro.



028



029



030



031

con la premessa iniziale: bisogno di prestazioni ma possibilmente scalabili. In secondo luogo è un ambito in fermento per quanto riguarda l'esplorazione e la nascita di nuovi prodotti. Ad oggi, esistono diversi esempi di prodotti open-hardware nati grazie all'iniziativa di una community di utenti; prodotti che riguardano fondamentalmente la parte di elettronica di controllo necessaria a movimentare gli stabilizzatori e telai fai-da-te intorno ai quali costruirli.

Grazie alla popolarità crescente dei droni multirotores, si è verificata un'ampia diffusione di stabilizzatori progettati per operare in volo. Nel caso di riprese aeree, uno stabilizzatore risulta fondamentale per contrastare l'azione del vento e ottenere una sequenza ferma e priva di vibrazioni. Questa necessità ha portato alla comparsa di numerose soluzioni, integrate o fai-da-te, equipaggiate sulla quasi totalità dei droni oggi in commercio dedicati a video e fotografia.

Contemporaneamente sono nate varianti dedicate al mondo del digital filming (riprese con action camera o smartphone), derivate da soluzioni inizialmente dedicate a fotocamere di grandi dimensioni. Oggi, queste soluzioni sono numerose ma non sono pensate per lo sport: sono efficaci solo nel caso di riprese effettuate manualmente in condizioni tutto sommato controllate.

L'applicazione di stabilizzatori ottici di immagine all'interno delle fotocamere di smartphone di fascia alta indica un'interesse da parte del pubblico nell'ottenimento di riprese di più alto livello. Non a caso la produzione di media in ambito non professionale, consumer e prosumer, è un trend in crescita e una delle motivazioni che gioca a favore dell'acquisto di uno smartphone di fascia alta è proprio la possibilità di sfruttarlo come fotocamera o videocamera di qualità.

Esistono infine una serie di esperimenti progettuali che suggeriscono un interesse verso quest'area di progetto. In particolare, prove che riguardano la realizzazione di sistemi di stabilizzazione indossabili per action camera. Quest'ultima tendenza ha contribuito a restringere definitivamente il campo di interesse verso il mondo delle action camera. Una categoria di prodotto che al momento manca di una soluzione specificamente dedicata alle attività outdoor.

### 3.2 Selezione di una categoria di prodotto



Le action camera sono nate per dare il meglio di sé in condizioni estreme di utilizzo ma la mancanza di stabilizzatori specifici rende complicato ottenere una buona ripresa in caso di movimenti frenetici o di sport a stretto contatto con acqua, sporco e polvere.

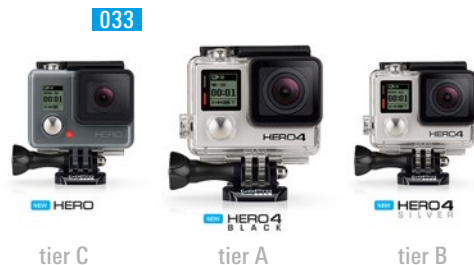
Confermato l'interesse per la categoria di prodotto, si è deciso di progettare per un modello specifico di action cam. La scelta è ricaduta sulla GoPro Hero 3+ Black Edition, dispositivo di punta della serie fino al 2014.

La decisione è stata influenzata da una serie di fattori. Innanzitutto, GoPro è leader in questo mercato e i suoi prodotti sono divenuti uno standard per quanto riguarda la documentazione di eventi sportivi. Importanti sponsorizzazioni, marketing virale, una qualità elevata del prodotto e un parco accessori dedicato alle più diverse attività, non solo sportive ma anche ricreative, hanno contribuito a trasformare il brand in un vero fenomeno commerciale, capace di impersonare uno stile di vita orientato alla ricerca di esperienze straordinarie. La seconda motivazione risiede nella popolarità dei prodotti GoPro. La commercializzazione di un accessorio dedicato a un dispositivo della serie, avrebbe un richiamo molto forte, con un bacino di utenti potenziali molto più elevato rispetto a quello di una qualsiasi altra marca. La terza motivazione è legata al target. Benché GoPro si rivolga a professionisti ed enthusiast i suoi prodotti restano fondamentalmente utilizzabili da tutti. La gamma 2015 è stata commercializzata in diversi tier, confermando la volontà di progettare per diverse tipologie di utente. Esistendo per questo progetto di tesi la medesima volontà, la scelta di lavorare su un prodotto del brand è parsa più che mai coerente.



**031. Sky Glide G3 Pro** è uno stabilizzatore multifunzionale che prevede la possibilità di essere montato su di un casco. L'ingombro del sistema è notevole poiché non si tratta di un progetto "ad hoc" ma di un adattamento di un gimbal per riprese manuali. In ogni caso è una delle prime applicazioni di gimbal per motocross e simili.

**032-033. GoPro Hero 3+ Black Edition** è il modello preso in considerazione per progettare il nuovo stabilizzatore. Sotto: i diversi tier in cui è stata commercializzata la gamma 2015: Hero, Hero 4 Silver e Hero 4 Black.



### 3.3 Dispositivi di stabilizzazione: funzionamento

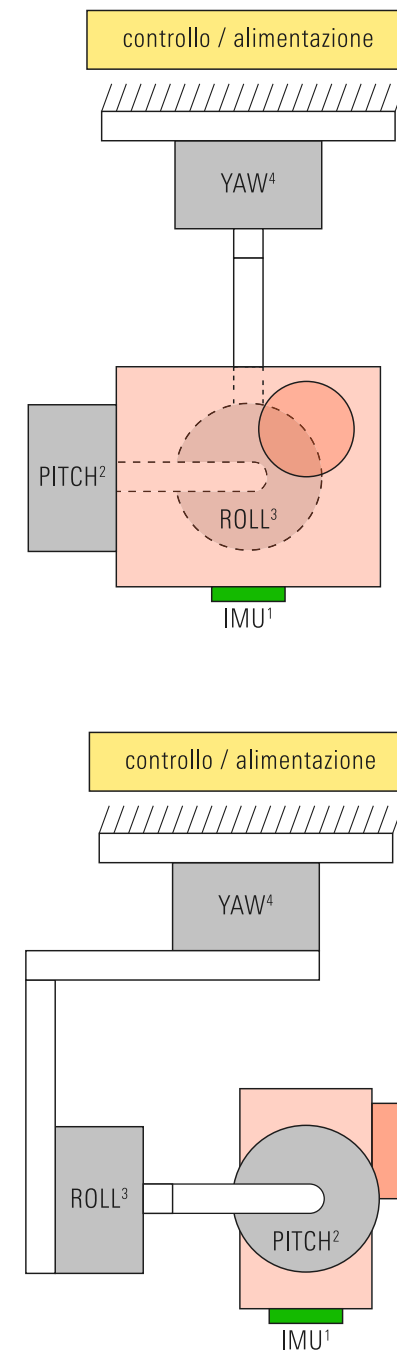
Nel paragrafo seguente descriveremo cos'è un gimbal e come funziona. Nel paragrafo successivo seguirà una comparazione tra alcuni dei prodotti attualmente disponibili sul mercato.

Nella sua forma più semplice uno stabilizzatore è composto da un braccio, una telecamera e un contrappeso. Telecamera e contrappeso sono posizionati alle due estremità mentre, al centro, un giunto sferico collegato a un'impugnatura permette al sistema di basculare in ogni direzione. L'azione combinata del giunto e del contrappeso permette di isolare la telecamera dai movimenti dell'operatore, smorzandone ogni possibile accelerazione non voluta. Si tratta di una stabilizzazione di tipo passivo: principio di funzionamento alla base dei sistemi steadycam cinematografici.

Un gimbal propriamente detto è uno stabilizzatore di tipo "attivo", che in questo caso significa di tipo elettronico. In uno stabilizzatore elettronico la compensazione dei movimenti non avviene mediante un sistema di pesi e contrappesi ma viene effettuata applicando una coppia motrice (erogata da motori elettrici) sugli snodi di un telaio articolato. I motori sono 2 nel caso di gimbal a 2 assi; 3 nel caso di gimbal a 3 assi. Il gimbal a 3 assi sono in grado di compensare ogni tipo di rotazione; nell'ordine: beccheggio, rollio ed imbardata (pitch, roll e yaw). I gimbal a 2 assi sono più limitati e correggono solo beccheggio e rollio (pitch e roll).

Il telaio di un gimbal, anche detto "frame", è suddiviso in segmenti: il primo sostiene la telecamera ed è collegato al motore di compensazione del beccheggio. Il secondo collega il motore 1 (pitch) al motore 2 (roll), incaricato di compensare i movimenti di rollio. "Pitch" è "imparentato" a "roll"; il che significa che se "roll" ruota, anche "pitch" subisce una rotazione lungo l'asse di "roll". Nel caso di dispositivi a 3 assi, il motore 2, "roll" è collegato al motore 3, "yaw", tramite un terzo segmento rigido. "Yaw" compensa i movimenti di imbardata e, ruotando, provoca una rotazione sia di "roll" che di "pitch" intorno al proprio asse. Le dipendenze relative dei motori possono essere schematizzate tramite questa equazione:

$$f(R_{tot}) = f(R_{yaw}) * \{f(R_{roll}) * [f(R_{pitch})]\}$$



La rotazione simultanea dei motori è regolata da un microprocessore, il quale agisce per mantenere la telecamera in una posizione prestabilita (di solito orizzontale). Per poter effettuare questa operazione, il processore acquisisce un flusso di dati proveniente da una o due unità IMU. "IMU" è l'acronimo di Inertial Measurement Unit: si tratta di un circuito stampato che comprende un accelerometro e un giroscopio. Le unità IMU forniscono al processore l'accelerazione istantanea e l'angolo di incidenza della telecamera e del telaio rispetto al piano orizzontale, lungo i 3 assi di rotazione.

Il processore interpreta questi dati e, grazie ad un ciclo iterativo di controllo, tende a riportare la telecamera nella posizione desiderata: eliminando l'errore tra P0, posizione target, e P1, posizione rilevata. Questa velocissima iterazione a ciclo chiuso si basa su calcoli matematici complessi ma il risultato è sorprendentemente semplice: il telaio su cui è montata la telecamera si muove per mantenere la telecamera ferma, isolandola da qualsiasi movimento esterno.

I gimbal presentano 2 requisiti fondamentali: 1) che i segmenti del telaio siano ben rigidi, in modo da limitare la propagazione di vibrazioni esterne e/o auto indotte; 2) che il baricentro del gruppo di componenti dipendenti, movimentati da ciascun motore, risulti in asse con la rotazione che lo interessa. Se questa condizione è soddisfatta il dispositivo è bilanciato; e se il dispositivo è bilanciato i motori possono esercitare una coppia inferiore, a parità di peso, per movimentare il telaio e la telecamera. Un gimbal sbilanciato, al contrario, deve esercitare una forza maggiore ed è soggetto all'azione di forze inerziali collaterali che possono indurre movimenti irregolari nel telaio ma che risultano ininfluenti nel caso di un buon bilanciamento.

**GIMBAL A 3 ASSI**

Vista di layout frontale e laterale.

Un gimbal a 3 assi è un dispositivo dotato di 3 motori elettrici DC brushless in grado di compensare variazioni d'angolo lungo i tre assi di rotazione.

Il risultato è una stabilizzazione di massima qualità in grado di annullare pressoché ogni movimento della camera.

<sup>1</sup> - Inertial Measurement Unit

<sup>2</sup> - motore di compensazione beccheggio

<sup>3</sup> - motore di compensazione rollio

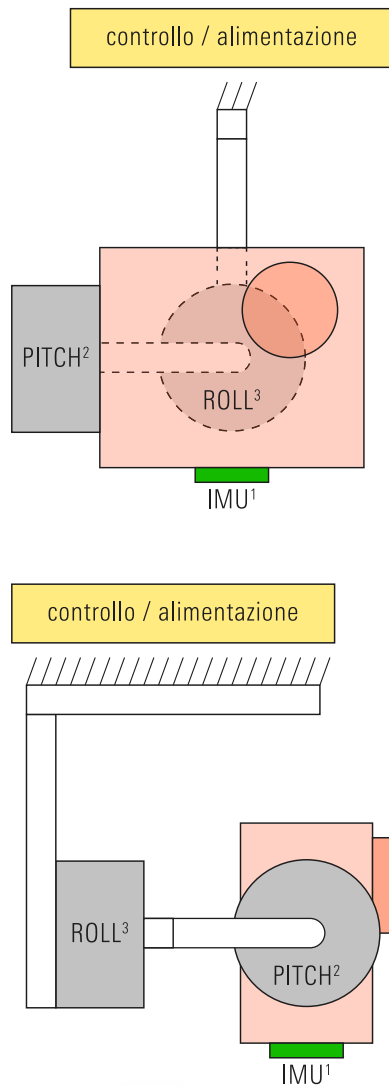
<sup>4</sup> - motore di compensazione imbardata

**GIMBAL A 2 ASSI**

Vista di layout frontale e laterale.

Un gimbal a 2 assi è un dispositivo dotato di 2 motori elettrici DC brushless in grado di compensare variazioni d'angolo lungo due assi di rotazione.

Il risultato è una ripresa stabilizzata in cui



STABILIZZATORI A 3 ASSI



STABILIZZATORI A 2 ASSI



### 3.4 Prodotti esistenti: stato dell'arte

Attualmente, gli stabilizzatori presenti sul mercato si dividono in due grandi famiglie, una comprendente i dispositivi dedicati alla cinematografia, l'altra quelli utilizzati per applicazioni di fotografia aerea, da montare su droni e multicotteri.

Il primo gruppo si divide in due sottogruppi: gimbal di grandi dimensioni, pensati per un uso prettamente professionale e gimbal di piccole dimensioni, pensati per un uso amatoriale o semi-professionale. Nel panorama attuale, salvo pochissime eccezioni, non esistono stabilizzatori dedicati ad un uso sportivo o sportivo-estremo. La progettazione non si è ancora spinta verso questo ambito di utilizzo; ambito che, al contrario, con questa tesi si è deciso di esplorare.

Ragionando sull'utilità di un confronto esaustivo tra i prodotti esistenti, si è optato per stilare una lista dei più interessanti. Esiste una moltitudine tale di dispositivi che è parso inopportuno addentrarsi in una ricerca che avesse come scopo una comparazione approfondita di una selezione ampia di prodotti: in molti casi, si somigliano tra loro, sono copie di altri modelli o adottano le medesime soluzioni hardware e software, senza presentare caratteristiche di rilievo.

Per questo motivo è sembrato più sensato riportare una descrizione dei dispositivi dalle caratteristiche più salienti: un'elenco dei prodotti allo stato dell'arte nelle rispettive categorie.



**034. CAME-8000 di CAME-TV** è un gimbal cinematografico per telecamere e fotocamere di grandi dimensioni: Black Magic Cinema Camera, videocamere Canon EOS Cinema C100/C300, telecamere RED EPIC e fotocamere full-frame.

È un gimbal di tipo "classico" in quanto rispetta l'ordine canonico dei motori: YAW>PITCH>ROLL. Può essere agganciato a un sistema ad armatura in grado di aiutare l'operatore a sostenerne il peso anche nelle situazioni di utilizzo più difficili.

Il prezzo attuale varia dai 1688 dollari ai 3086 dollari a seconda della dotazione.



**035. TERO di Freefly System** è una "chase car" in miniatura, sulla quale è montato un gimbal a 3 assi della serie MOVI, bestseller dell'azienda e diretto concorrente dei gimbal CAME. Il veicolo è radiocomandato e può raggiungere velocità notevoli.

Una delle sue caratteristiche più peculiari è il sistema di smorzamento che lo isola da sobbalzi e vibrazioni. Esso è costituito da un set di sospensioni e ammortizzatori e da un piatto di montaggio del gimbal mantenuto in sospensione da un sistema ad anelli in cavo d'acciaio. Il prezzo del solo veicolo è di 5000 dollari; i gimbal MOVI possono costare da 4000 a 12000 dollari.



**036-037. Helix Jr. di Letus** è la versione ridotta e aggiornata del più imponente Letus Helix. L'ambito di utilizzo di questo gimbal è sempre il cinema ma questo modello in particolare offre la possibilità di montare anche fotocamere mirrorless.

La particolarità dei gimbal Letus è il diverso ordine dei motori: non si tratta infatti del classico YAW>ROLL>PITCH ma di un innovativo PITCH>YAW>ROLL che permette di bilanciare il gimbal sul centro ottico della camera, riducendo al minimo i movimenti di traslazione del sensore d'immagine. Il prezzo della versione Jr. è di 2900 dollari mentre ne occorrono 1000 in più per l'Helix.



**038. Zenmuse X5 Series di DJI** è un sistema integrato di fotocamera+gimbal per droni della serie Inspire 1, prodotti dalla stessa azienda. È il primo a montare un sensore micro quattro terzi da 16 megapixel in grado di girare in formato 4k CinemaDNG Raw. Inoltre, le ottiche sono intercambiabili ed è possibile utilizzare obiettivi di terze parti (Panasonic, Summilux, Leica, Olympus, ...).

Il gimbal può essere utilizzato anche per riprese manuali se fissato ad un'apposita impugnatura. Il costo del sistema è di 4500 dollari in versione base (X5) e di 8000 dollari per la versione pro (X5R).



**041-042. Husky HY3M di Big Balance** è uno stabilizzatore a 3 assi consumer per riprese manuali; è utilizzabile sia con smartphone che con action camera GoPro. Risulta compatibile con molti dei telefoni attualmente in commercio.

Una delle caratteristiche che lo contraddistingue è la presenza di un joystick alla sommità dell'impugnatura; utile per regolare pan e tilt dell'inquadratura: rotazioni lungo l'asse verticale (yaw) e quello orizzontale trasversale (pitch).

Pesa 470 grammi e costa intorno ai 400 dollari.



**039. Solo Smart Drone di 3DRobotics** è un drone dotato di gimbal integrato, ottimizzato per essere utilizzato con una GoPro (Hero 3/3+/4). Si tratta del primo drone dotato di funzionalità "smart": è possibile impostare facilmente dei percorsi di volo e dedicarsi esclusivamente al controllo della fotocamera e alla cattura di immagini e video. È pensato per il mercato consumer e si rivolge anche a chi non è esperto di volo. È stato sviluppato in stretta collaborazione con GoPro, a seguito di un sondaggio in cui gli utenti hanno indicato una preferenza di sviluppo per questa piattaforma. Il prezzo è di 1000 dollari per il drone e 1400 dollari per il pacchetto drone+gimbal.



**043. FY-G4 di Feiyu Tech** è uno stabilizzatore a 3 assi consumer compatibile con vari modelli di action camera (a patto che non siano inserite all'interno di custodie waterproof). Costituisce un'evoluzione della serie G3, bestseller di Feiyu Tech.

Rispetto alla generazione precedente, il G4 integra i fili di controllo e alimentazione dei motori all'interno delle scocche dei vari segmenti. Introducendo angoli di lavoro molto ampi: 320 gradi per yaw e pitch e 100 gradi per il roll. Integra inoltre la possibilità di alimentare l'action camera montata alimentandola con le proprie batterie. Prezzo di vendita: 290 dollari.



**040. CGO3 4K 3-axis Gimbal Camera di Yuneec** è un sistema di fotocamera+gimbal per il drone Yuneec Typhoon q500 4K. È simile allo Zenmuse in quanto a funzionalità, anche se non presenta la possibilità di montare ottiche seppate. Possiede un design più compatto ed integrato.

Anche in questo caso è possibile utilizzarlo a terra, grazie ad un'apposita impugnatura. In più rispetto allo Zenmuse, suo diretto concorrente, ha la possibilità di girare video a 120 frame al secondo: il che lo rende particolarmente indicato nel caso di riprese molto movimentate. Il prezzo del drone e del gimbal è di 1500 dollari.



**044. FY-WG (Wearable Gimbal) di Feiyu Tech** è uno stabilizzatore a 3 assi indossabile. È un adattamento e una miniaturizzazione del G4 ed è attualmente l'unico dispositivo pensato appositamente per le riprese sportive.

Il peso del dispositivo è di soli 188 grammi, che lo rendono particolarmente adatto ad essere applicato su caschi e quant'altro.

Nonostante la sua innovatività, l'action camera risulta non protetta e in alcune video prove online il dispositivo ha dimostrato una certa fragilità. Il prezzo di vendita è di 300 dollari.



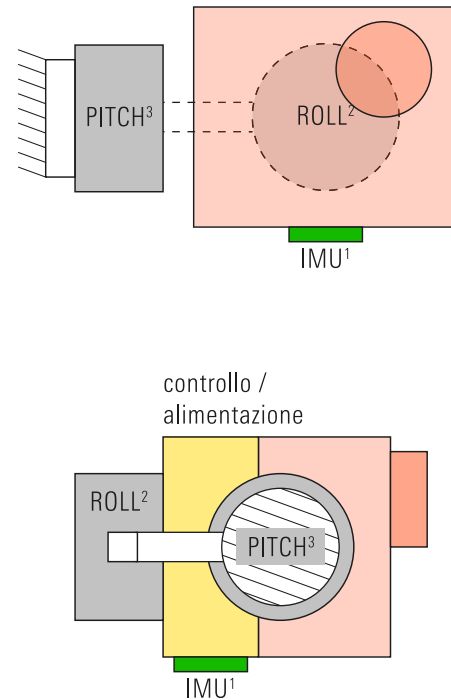
### 3.5 Stabilizzatore attivo per action camera GoPro

La ricerca effettuata sullo stato dell'arte dei prodotti esistenti ha permesso di estrapolare una serie di caratteristiche da cui prendere spunto per progettare il nuovo dispositivo.

Una prima interessante opportunità è stata individuata nella possibilità di invertire l'ordine dei motori, adottando una soluzione analoga a quella del Letus Helix (033, 034). Per questo motivo, è stata scelta una concatenazione dei motori di tipo PITCH>ROLL piuttosto che ROLL>PITCH, optando per la costruzione di un gimbal a 2 assi. Così facendo, si sono poste le premesse per la ricerca di un design compatto, che rendesse il gimbal adatto ad essere montato, anche su un casco, senza risultare intrusivo o troppo appariscente; e in secondo luogo si è prediletto un uso "asimmetrico" del prodotto, posizionando l'ipotetico aggancio in prossimità del motore pitch.

La decisione di progettare un gimbal a 2 assi è stata presa per due motivi. In primo luogo per una maggiore semplicità di sviluppo, soprattutto in vista della realizzazione di un prototipo finale. Dovendo "progettare da zero" è parso più opportuno e più fattibile, lavorare su una configurazione semplificata del dispositivo. In secondo luogo, si è osservato come riprese perfettamente stabilizzate togliessero totalmente quello spirito "off-road" che caratterizza le riprese "action", risultando in una perdita di identificazione del contesto. Questo fattore ci ha spinto a testare cosa potesse significare produrre una ripresa "semi-stabilizzata", che lasciasse ancorato uno degli assi di rotazione ai movimenti dell'atleta o del veicolo.

Alcuni dei modelli presi in analisi, in particolare la gimbal camera di Yuneec e lo smart drone Solo di 3DRobotics (036 e 037), hanno giocato un ruolo fondamentale nella decisione di optare per un design dalle forme integrate. In questo modo, si è posto l'obiettivo di una maggiore robustezza delle parti e di una migliore efficienza aerodinamica del volume complessivo del prodotto. È parso interessante muoversi in questa direzione anche da un punto di vista stilistico ed estetico, con la ricerca di un linguaggio tecnico-sportivo caratterizzato da superfici in continuità e dall'inserzione di linee tese sotto la pelle dell'oggetto.



**L'inversione dei motori PITCH e ROLL** gioca in favore di un layout più compatto. Per assicurare un corretto funzionamento del gimbal in tutte le condizioni di utilizzo, saranno forse necessarie alcune modifiche a livello software; ma le funzionalità di base del dispositivo dovrebbero essere garantite anche dagli algoritmi attuali.

Per ottenere un'ulteriore compattezza, lo schema ipotizzato prevede un'integrazione della parte di controllo e alimentazione all'interno di una scocca, che sostituirebbe lo sportellino posteriore del case della GoPro costituendo inoltre inoltre la parte iniziale del gimbal a cui andrebbe applicato il primo motore (ROLL).

Si tratta solamente di un'ipotesi, in quanto questa architettura sarà da verificare in fase di sviluppo. Tuttavia è stata considerata un buon punto di partenza; ed è a partire da questa idea che trarrà spunto la progettazione del nuovo dispositivo.

### 3.6 Brief di progetto

Al termine della fase di ricerca è stato definito un brief, per specificare esigenze e requisiti del progetto.

#### DEFINIZIONE

Oggetto della progettazione sarà un gimbal per fotocamera GoPro Hero 3+. Sarà di tipo a 2 assi; per rendere più semplice sviluppo e realizzazione del prototipo finale e indagare l'efficacia comunicativa di una ripresa semi stabilizzata nel caso di sequenze "action". Il dispositivo sarà dedicato ad un uso sportivo. Per questo dovrà essere possibile montarlo su ogni tipo di attrezzatura, sfruttando la gamma esistente di accessori GoPro. Dovrà avere ampia libertà di movimento e funzionare anche in situazioni frenetiche: in caso di loop, inversioni, ecc. Il focus del progetto resta la realizzazione tramite differenti tecnologie di stampa 3D, al momento ancora da definirsi.

#### ESIGENZE

- 1) Il prodotto dovrà essere realizzabile con più tecnologie di additive manufacturing, a fronte di modifiche minime della geometria 3D. Preferibilmente dovrà trattarsi di uno stesso modello, stampabile però con diversi macchinari.
- 2) Compattezza della soluzione finale per: ridurre al minimo l'ingombro del prodotto una volta montato; evitare interferenze con il resto dell'attrezzatura sportiva.
- 3) Scalabilità delle prestazioni e della durabilità del prodotto e possibilità di scegliere una configurazione che venga incontro alle proprie esigenze. Uno stesso prodotto disponibile in più varianti prestazionali.
- 4) Resistenza del prodotto a traumi e urti; possibilità di funzionare anche in situazioni di utilizzo che prevedano forti sollecitazioni o forti vibrazioni (ad esempio una ripresa in moto o un volo in deltaplano).
- 5) Funzionamento in presenza di forti accelerazioni; analogamente al punto 4) il prodotto dovrà funzionare in modo adeguato anche in caso di accelerazioni repentine o folate di vento.

6) Montaggio del prodotto semplice da effettuare su ogni tipo di attrezzatura; che sfrutti possibilmente i ganci e gli accessori GoPro attualmente presenti sul mercato.

7) Resistenza a condizioni d'ambiente relativamente ostili: schizzi d'acqua, pioggia, presenza di sporco, polvere e sabbia. L'ideale sarebbe raggiungere un livello di protezione IP67.

#### REQUISITI

- 1) I particolari tecnici del prodotto e i baricentri dei gruppi di componenti a valle dei motori dovranno essere compatibili con le tecnologie di stampa selezionate.
- 2) Inversione dei motori PITCH e ROLL e integrazione dell'elettronica di controllo e dell'alimentazione all'interno di un elemento della scocca che sostituirà lo sportellino posteriore del case della GoPro.
- 3) Adozione di una tecnologia di stampa entry level con la quale produrre una versione basilare del prodotto, adatta per un uso amatoriale, e utilizzo di una tecnologia high-end per la produzione delle varianti più prestazionali.
- 4) Forma integrata e monolitica del prodotto; priva di elementi di possibile appiglio, di sporgenze e di rientranze. Eventuali fili elettrici dovranno essere nascosti alla vista.
- 5) I motori dovranno erogare una coppia in grado di gestire un peso superiore rispetto a quello della sola GoPro. In questo modo, anche nel caso di forti accelerazioni, il sistema sarà in grado di funzionare.
- 6) Integrazione di un aggancio standard GoPro in grado di interfacciarsi con il parco accessori esistente. Il gancio dovrà essere posizionato a monte del secondo motore (PITCH).
- 7) Impermeabilizzazione delle scocche e degli snodi: le giunture dovranno essere il più possibile sigillate pur mantenendo un'attrito minimo tra i componenti in rotazione.



Parte 2<sup>a</sup>

# Sviluppo prodotto

4. Prototipo digitale A
5. Prototipo fisico B
6. Prototipo fisico C
7. Conclusioni

## 4 Prototipo digitale A

### 4.1 Ricerca tecnologica preliminare

Nella prima fase di sviluppo progettuale è stata effettuata una ricerca in ambito tecnologico; per capire quali soluzioni si potessero adottare all'interno del prodotto. Dal momento che le esigenze tecniche di un dispositivo di questo tipo sono numerose e di varia natura, si sono dovuti indagare diversi macro ambiti.

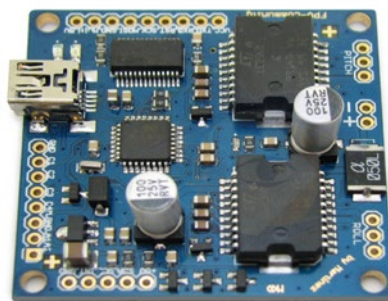
Innanzitutto si sono ricercate soluzioni che riguardassero il controllo del gimbal. Scartando a priori l'idea di progettare un'elettronica "ad hoc", non di nostra competenza, si è focalizzata l'attenzione sulle soluzioni già esistenti in grado di occuparsene. In secondo luogo, si è svolta una ricerca nell'ambito dei motori elettrici da modellismo; in particolare nella categoria che già si rivolge in modo specifico agli stabilizzatori gimbal. Terzo macro argomento della ricerca: le batterie. Scegliere quale soluzione adottare per alimentare il dispositivo ha richiesto precise valutazioni. Nei paragrafi seguenti si esporranno i risultati di questa fase preliminare, esponendoli punto per punto.

### 4.2 Gimbal controller

Il controller di un gimbal è l'elemento più importante del dispositivo. Il suo compito è acquisire i dati di posizionamento e accelerazione istantanea forniti dall'unità IMU, elaborarli e restituire un segnale elettrico ai motori. Questi, muovendosi in accordo con quanto stabilito dal controller, correggono la posizione della camera in un lasso di tempo infinitesimale. I cicli di correzione avvengono con una frequenza altissima, migliaia di volte al secondo, motivo per cui un processore più veloce è più adatto a condizioni di movimento rapido.

Dopo il processore, gli elementi più importanti presenti su un controller sono i cosiddetti mosfet: transistor adibiti alla conversione dei segnali di controllo a basso voltaggio, provenienti dal processore, in segnali a più alto voltaggio, cosiddetti "di potenza", che drenano energia dalla batteria in quantità più elevate, per vincere l'inerzia dei motori, compiere lavoro e generare coppia motrice.

Esistono molte tipologie di controller: soluzioni proprietarie, open hardware, open source, soluzioni ibride; di seguito i risultati della ricerca effettuata.



045

#### SOLUZIONI OPEN HARDWARE / SOFTWARE OPENSOURCE

**045. Martinez Board v3** è l'ultima versione di un controller per gimbal a 2 assi rilasciato con licenza open hardware. Si tratta di un progetto nato nel 2013 dall'iniziativa di due appassionati iscritti al forum web "fpv-community.de". Gli utenti del forum hanno supportato lo sviluppo del progetto contribuendo alla compilazione di un firmware opensource denominato BruGi (Brushless Gimbal), scritto con linguaggio Arduino. Attualmente il progetto è confluito nella scheda STORM32 (vedi 048).



046



047

**046-047. Arduino Mini Pro + mBGC v0.05** sono gli elementi di cui si è servito OlliW, nome in codice di un ingegnere tedesco appassionato di aerofotografia e droni, per creare il progetto mBGC: un controller per gimbal a 2 assi a 8-bit di dimensioni ridotte, basato su firmware BruGi e rilasciato con licenza open hardware.

A questa prima versione, in grado di erogare appena 150mA di corrente per motore, ne sono seguite altre due: mBGC v.1.05, una scheda capace di fornire 500mA per motore e mBGC v.1.08, utilizzabile con Arduino Nano (una versione del Mini Pro dotata di presa micro-usb e quindi leggermente più grande). Anche questo progetto è confluito nella scheda STORM32, un controller più sofisticato e performante.

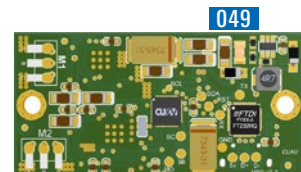


048

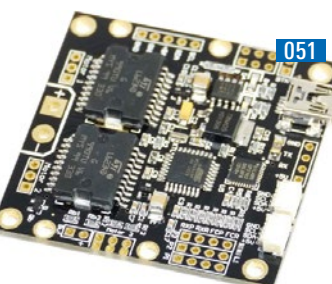
**048. STORM32-BGC v1.1** progettata da Martinez e OlliW. È un'espressione più sofisticata del progetto di gimbal opensource basato su firmware BruGi. Si tratta di una scheda per gimbal a 3 assi basata su processore ARM a 32bit.

La scheda, attualmente arrivata alla versione 1.31, misura 50x50 mm ma ne esiste una versione miniaturizzata denominata STORM32-S, di cui però sono disponibili ancora poche informazioni.

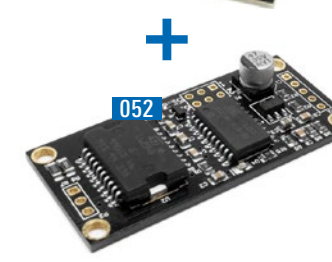
#### SOLUZIONI HARDWARE PROPRIETARIO / SOFTWARE OPENSOURCE



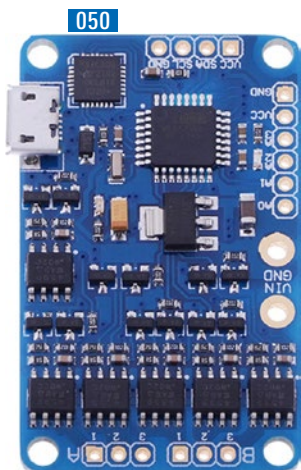
049



051



052

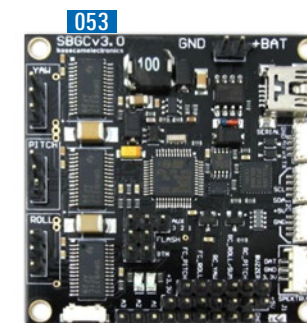


050

#### SOLUZIONI HARDWARE E SOFTWARE PROPRIETARIO

**051. BaseCam SimpleBGC 8-bit board** è la scheda capostipite della ricerca sui gimbal controller. È stata sviluppata da Aleksey Moskalenko nel 2012 e a differenza dei progetti Martinez e OlliW è divenuta una soluzione proprietaria. La scheda era inizialmente conosciuta con l'appellativo "AlexMos"; successivamente il suo creatore ha fondato la propria azienda, la BaseCam Electronics, oggi leader nel mercato dei gimbal controller.

**052. BaseCam SimpleBGC 3rd axis' extension board** espande le capacità della scheda simple BGC 8-bit, trasformandola in un controller per gimbal a 3 assi.



053

**053. BaseCam SimpleBGC 32-bit** è l'evoluzione della versione originale a 8-bit e compete direttamente con la scheda STORM32-BGC. Attualmente, l'adozione di questo controller è molto comune nei dispositivi di grandi dimensioni.

È dotata di processore ARM a 32 bit, in grado di svolgere i complessi calcoli per la stabilizzazione della camera 10 volte più velocemente rispetto alla versione originale. Le dimensioni sono di 50x50 mm e il costo rispetto alla scheda STORM32, è decisamente più elevato; il firmware, tuttavia, è dotato di maggiori funzionalità.



054

**054. BaseCam SimpleBGC 32-bit Tiny** è una versione miniaturizzata della scheda SimpleBGC 32-bit. Misura infatti la metà: 25x50 mm.

È particolarmente indicata per gimbal di piccole dimensioni. La corrente massima erogabile per ciascun motore è infatti di 600mA, un valore adeguato per stabilizzare action camera e macchine fotografiche compatte.

## 4.3 Motori

I gimbal utilizzano motori elettrici DC brushless. “DC” è acronimo di “direct current” (equivalente di corrente continua) e “brushless” è un termine che indica l’assenza di interruttori a spazzola tra il rotore e lo statore (i componenti principali di un motore elettrico). Nei motori DC classici, le spazzole sono utilizzate per invertire continuamente la polarità del rotore; e le interazioni tra il campo magnetico risultante e i magneti presenti all’interno dello statore mantengono il primo in rotazione rispetto al secondo. In un motore BLDC, invece, lo statore è situato all’interno del rotore e un circuito di controllo più sofisticato genera flussi di corrente che permettono di invertire automaticamente i campi magnetici generati, senza bisogno di interruttori fisici. La rotazione dei campi magnetici fa sì che il rotore, situato all’esterno, ruoti intorno allo statore, generando meno attrito e meno dispersione termica.

Lo statore è una sorta di ruota dentata costituita da fogli di acciaio al silicio, sagomati e sovrapposti uno sull’altro. Sui “raggi” della ruota sono presenti numerosi avvolgimenti in rame, che contribuiscono a determinare la coppia e la resistenza interna del motore elettrico. Un numero maggiore di avvolgimenti significa più coppia disponibile ma anche più resistenza; e troppa resistenza rischia di rendere il motore poco efficiente. Nel progetto di un motore BLDC deve essere utilizzato il giusto mix tra diametro del filo e numero di avvolgimenti, per raggiungere il valore di coppia desiderato e al contempo minimizzare la resistenza elettrica del motore. In generale, un maggior numero di denti e un diametro superiore dello statore indicano un motore più performante. Tuttavia, anche da un motore di piccole dimensioni è possibile ottenere una migliore prestazione impiegando un numero maggiore di avvolgimenti.

I denti dello statore avvolti dal filo altro non sono che elettromagneti, attivati o disattivati in “coppie opposte” a seconda della “fase” in cui si trova il motore, grazie naturalmente al passaggio di corrente. Ad agire da controparte è il rotore, un elemento cilindrico cavo la cui parete interna è rivestita da un certo numero di magneti al neodimio, magneti permanenti ottenuti legando neodimio, ferro e boro. Il rotore ospita al proprio interno lo statore, con il quale condivide il medesimo asse di rotazione.

La presenza di un numero di denti (N) leggermente inferiore rispetto al numero di magneti (P) permette al motore di ruotare “senza scatti”. Se il numero di denti e il numero di magneti fossero uguali, ciò non avverrebbe. Per fare un esempio: la dicitura 12N14P indica un motore dotato di 12 denti e 14 magneti, il cui rapporto T/P dà come risultato 1,16. Se il risultato di questo rapporto fosse 1 o molto più alto di 1, il motore non sarebbe in grado di muoversi, perché l’interazione tra i campi magnetici non avverrebbe nelle giuste condizioni.

I motori DC brushless sono molto comuni all’interno di lettori cd, stampanti ink-jet, frullatori o alla base delle eliche che fanno volare i droni. La loro caratteristica principale è quella di essere molto veloci. Tuttavia sono intrinsecamente poco precisi; e se la prima caratteristica risulta ideale per un gimbal, la seconda non lo è affatto. Per questo motivo i motori BLDC per gimbal sono in realtà una variante modificata dei motori BLDC. Sono dotati di più avvolgimenti, che permettono al motore di erogare più coppia, e funzionano solo se collegati ad appositi controller. Da qui l’importanza della scelta di un buon controller per la costruzione di un gimbal: l’unione di software e hardware permette di controllare i motori DC brushless come dei motori stepper, replicandone precisione e coppia ma a velocità molto maggiori.

Chiaramente esistono diverse misure di motori elettrici per gimbal, ognuna indicata per un carico differente. Un gimbal per GoPro generalmente utilizza motori di misura 2208, adatti per movimentare un peso di circa 200 grammi. Nella ricerca effettuata si sono incluse fino a tre misure superiori; salvo poi optare per un motore intermedio: di misura 3506 (vedi 05X).

Il motore adottato è indicato per un carico compreso tra i 200 e i 400 grammi, risultando leggermente sovradimensionato allo scopo. Si è presa questa decisione per garantire al gimbal una forza sufficiente per funzionare anche nel caso di forti accelerazioni, folate di vento e quant’altro; in accordo con il punto numero 5 del brief progettuale (vedi 3.6 a pagina 39). In secondo luogo è parsa una scelta più sicura optare per un motore leggermente più grande in vista di una serie di fattori fisici che caratterizzeranno il gimbal.



055. Turnigy 2206-140Kv

ingombro Ø28 x 19 mm  
peso 32 grammi  
configurazione 12N14P  
resistenza 11.25 Ohm  
carico 230 grammi  
prezzo 13 euro



056. Turnigy 2804-210Kv

ingombro Ø34 x 15 mm  
peso 35 grammi  
configurazione 12N14P  
resistenza 10.4 Ohm  
carico 240 grammi  
prezzo 16 euro



057. iPower GBM2208H-180T

ingombro Ø28 x 22 mm  
peso 43 grammi  
configurazione 12N14P  
resistenza 14.6 Ohm  
carico 100-200 grammi  
prezzo 23 euro



058. Turnigy HD 3508

ingombro Ø42 x 19 mm  
peso 78 grammi  
configurazione 12N14P  
resistenza 13.8 Ohm  
carico 400-900 grammi  
prezzo 24 euro



059. iPower GBM3506-130T

ingombro Ø42 x 14 mm  
peso 64 grammi  
configurazione 12N14P  
resistenza 14.3 Ohm  
carico 200-400 grammi  
prezzo 31 euro

Questo motore è parso il giusto compromesso tra prestazioni, caratteristiche tecniche e dimensioni. La scelta finale è però ricaduta sulla sua variante “hollow-shaft”, forata al centro. Il foro permette il passaggio di alcuni cavi elettrici; caratteristica utile a limitare l’azione vincolante che deriverebbe da un loro eventuale attorcigliamento.



060. iPower GBM4008H-150T

ingombro Ø50 x 17 mm  
peso 102 grammi  
configurazione 12N14P  
resistenza 16.3 Ohm  
carico 400-800 grammi  
prezzo 36 euro



061. iPower GBM3506H-130T

ingombro Ø42 x 14 mm  
peso 64 grammi  
configurazione 12N14P  
resistenza 14.3 Ohm  
carico 200-400 grammi  
prezzo 33 euro

Il diametro del foro centrale è di 7mm; sufficienti a permettere il passaggio di un tris di cavi identico a quello visibile in foto.

Come vedremo, questa caratteristica giocherà un ruolo fondamentale nell’impostazione globale del gimbal, permettendo il passaggio di alcuni fili elettrici all’interno di uno dei motori.

## 4.4 Batterie

Per alimentare un gimbal vengono utilizzate batterie agli ioni di litio. Sono batterie ormai piuttosto comuni ma non per questo ne esistono poche varianti. Esistono batterie per il modellismo, fatte per alimentare droni e modellini radiocomandati; ne esistono altre per alimentare macchine fotografiche e dispositivi elettronici, altre per gli antifurti e così via. Ciò che le differenzia è il cosiddetto "discharge rate", ovvero la capacità di perdere carica più o meno velocemente. Una batteria che alimenta un drone, ad esempio, deve avere un'elevata capacità di scarica, indispensabile per recuperare velocemente la posizione dopo una folata di vento o intraprendere una manovra ad alta velocità. In queste condizioni le eliche del drone hanno bisogno di molta energia in tempi rapidi e la batteria deve essere in grado di fornire la quantità di corrente richiesta in quel lasso di tempo. Una batteria al litio con bassa capacità di scarica, se messa nelle stesse condizioni, potrebbe bruciare.

Per un gimbal la capacità di scarica non deve essere alta: sono sufficienti batterie a capacità di scarica leggermente superiore alla norma, in grado di fornire l'intera propria carica in circa mezz'ora. Considerando che la capacità di carica di una batteria si misura in mAh (milli ampere/ora) una batteria in grado di fornire l'intera propria carica nella metà di un'ora può scaricarsi ad una "velocità" 2C. Ovvero, può fornire i suoi X ampere/ora nella metà di un'ora. Analogamente, una batteria con discharge rate 10C può fornire l'intera sua carica in un decimo di un'ora, e così via. Il drenaggio di energia da parte dei motori di un gimbal non è quasi mai elevato; per stabilizzare la piattaforma di una telecamera, in condizioni normali di movimento, sono necessarie solo minime correzioni da parte del gimbal. Il fabbisogno di energia si alza solo in quei momenti in cui lo stabilizzatore subisce accelerazioni veloci, per cui deve agire altrettanto rapidamente, applicando più coppia motrice.

La seconda importante caratteristica delle batterie al litio è il fatto che siano costruite collegando in serie celle da 3,7 volt ciascuna. Collegandone due in serie si ottiene una batteria da 7,4 volt; e così via. Il numero di celle di una batteria al litio ne definisce quindi la tensione complessiva. Questa si può indicare in modo alternativo con la dicitura 1S, 2S, 3S, 4S, ... ecc.

**Per dimensionare la batteria** si sono prese in considerazione la corrente massima erogabile dal controller per ogni motore e la resistenza interna dei motori selezionati.

La corrente massima erogabile dal controller (la cui scelta sarà discussa nel dettaglio più avanti) è di 500mA per motore. La resistenza dei motori è di 14,3 Ohm. Sfruttando la legge di Ohm (Corrente=Tensione/Resistenza) si ottiene che, nel caso di una batteria 2S, da 7,4 volt, la corrente massima erogabile a ciascun motore equivalga proprio a 500mA.

$$A = V / \Omega$$

$$A = 7,4 \text{ v} / 14,3 \Omega = 0,51 \text{ A}$$

Dato che i valori di corrente massima erogabile, dalla batteria e dal controller, praticamente coincidono, una batteria di tensione 2S risulta sufficiente ad alimentare i motori anche in condizioni di massimo sforzo.

A differenza di quanto fatto per motori e batterie, si è preferito evitare un'elenco di tutte le batterie prese in considerazione. Sono tutte molto simili e a parte i rispettivi dati tecnici non ci sarebbe nessuna caratteristica sulla quale soffermarsi. Ci limiteremo a descrivere il modello selezionato.



**062. Nitecore RCR123 (NL166) Li-ion** batterie ricaricabili agli ioni di litio. 650 mAh; 3,7v; 2A discharge rate; Ø17 x 34,5 mm. Nel prototipo ne sono state utilizzate due, collegate in serie, per raggiungere la tensione operativa di 7,4v (2S). Per il secondo prototipo, come si vedrà più avanti, è stato impiegato un modello di batteria di misura differente ma identico per marca e caratteristiche tecniche. Solamente la capacità sarà leggermente maggiore, passando da 650 a 750 mAh. La sostituzione è stata effettuata per via di un cambio nel layout dei componenti.

## 4.5 Reperimento dei materiali

Per rispettare il punto 6 a pagina 29, i materiali necessari alla costruzione del prototipo sono stati acquistati esclusivamente attraverso piattaforme di vendita online e siti specializzati. L'obiettivo è stato quello di mettere l'utente nelle condizioni di potersi procurare in modo autonomo i componenti necessari alla costruzione del prodotto. Rispettando quella logica "open" che guida l'intero progetto.

I motori sono stati acquistati da flyduino.com, un sito dedicato alla vendita di materiale per droni e multicopter. Da questo stesso sito è stata acquistata la scheda di controllo per la seconda versione del prototipo. Le batterie sono state acquistate da amazon, ma si tratta di componenti reperibili praticamente ovunque. Ancora, tutta la componentistica necessaria ad assemblare il primo controller è stata acquistata su Digikey.com; un immenso magazzino online di componenti elettrici ed elettronici. I componenti meccanici sono stati acqui-

stati da Misumi, azienda specializzata nella fornitura di componenti configurabili online. Insomma, ogni componente del gimbal proviene da qualche angolo del web.

Le scocche in FDM non sono state realizzate online ma "in-house", grazie alla gentile collaborazione del mio relatore e della Wasp Delta 2040 presente nel suo studio (corsirhino.it). Tuttavia, è chiaro che ognuna delle scocche del progetto potrà essere realizzata in mille modi: a casa, con la propria stampante, o affidandosi a uno dei molti service di stampa 3D presenti online.

Nella seconda parte del paragrafo si esporranno in modo più specifico i portali e le piattaforme utilizzate per reperire i componenti, questo perché la ricerca ha necessitato di un intenso lavoro di selezione, molte valutazioni e continui cambi di rotta. Vale la pena effettuare una carrellata dei servizi utilizzati per dare il giusto valore anche a questo aspetto della tesi.

064

**064**

**Componenti meccanici**

Viti, bulloni, rondelle, dadi

Materiali industriali

Componenti per stampi deformazione lamiera

Componenti per stampi iniezione plastica

**Ordina online!**

Nessun supplemento per minimi quantitativi d'ordine, ordine a partire da 1 pezzo.

Richiedi un preventivo / ordina ora

**I nostri prodotti economici**

**I nostri bestseller**

**Perché MISUMI?**

- Ampia gamma di prodotti**  
Ampia gamma con più di 9 milioni di prodotti tra standard, acquistati e configurabili. Disponibili e pronti per essere ordinati con l'online shop!
- Qualità affidabile**  
Prodotti di altissima qualità e consegne affidabili soddisfano i nostri clienti. Verificate voi stessi!
- Configurazione personalizzata**  
Componenti configurabili con incrementi fino a 0.01 mm - anche per prototipi e piccole serie - per soddisfare le vostre esigenze.
- Spedizione veloce**  
Più di 100.000 componenti configurabili in soli 4 giorni. Niente di più veloce!

Chi siamo Servizio clienti Bestseller Online shop Social media

065

**065**

**FP MODENA**

Entra nel negozio Home Azienda Condizioni di vendita Escl

O-Rings  
Corde O-Ring Estruse  
Corde O-Ring Calibrate  
O-Rings di grandi dimensioni  
Anelli di tenuta per alberi rotanti  
Anelli di tenuta per alta pressione  
Anelli di tenuta speciali tipo L  
Anelli paragrasso  
Anelli di tenuta frontali V-Rings  
Cappellotti di chiusura per fori  
Tenute per alberi rotanti ROTO  
FPGR, ROTO FPGR  
Anelli Antiusura BK, BKC, BKS  
Guarnizioni a labbro DE, DEM, DI, DIM, H, C, U, UM  
Guarnizioni per oleodinamica e pneumatica FPGR, FPGR, FPWTF  
Guarnizioni per oleodinamica e pneumatica LRC, LRP, RC, RP  
Guarnizioni per pistoni idraulici  
Guarnizioni per pistoni pneumatici  
Raschiatori per steli  
Antivibranti  
Fasce di guida  
CONFEZIONI ASSORTIMENTI O-RING  
Particolari a Disegno  
Norme di conservazione a magazzino

30.000  
dimensioni di O-Ring normalmente pronte a magazzino in HR, FKM, VMQ, EPDM in vari colori e duranze.

Scarica il catalogo in PDF

Particolari a disegno

Live CHAT supporto off-line

PayPal  
VISA

Via 1 Maggio 1/A - 41030 Bastola (MO) Italy - Ph. +39 059 81 51 21 - Fax. +39 059 81 51 40 R.E.A. di MO n. 239102 - Reg. Imprese di MO n. IT 01743550368 - Capitale sociale € 15.600 i.v. - Cod. Fisc. E Partita IVA n. IT 01743550368

066

**066**

Home Shared Projects Design Rules Pricing & Specs Support Cart Log in Register

**OSH Park**  
An electric ecosystem

Welcome to OSH Park!

OSH Park is a community printed circuit board (PCB) order.

We bring you high quality, lead free boards (ENIG finish), manufactured in the USA, and shipped for free to anywhere in the world.

2 layer boards are \$5 per square inch (with 3 copies of your board included in that price) and ship in under 12 calendar days from ordering.

4 layer boards are \$10 per square inch (also including 3 copies of your board), go to the fab once a week, and have a 2 week turn time from the fab.

We can also support larger runs. See the pricing page for a full list of offerings.

Get Started Now

This service grew out of the DorkbotPDX PCB Order and later grew to include BatchPCB. Take a look at some of our customer's projects on Flickr or check out the specifications.

Designed and developed by Resistor.

## 4.6 Assemblaggio del controller

Per il controller del primo prototipo si è deciso di optare per un Arduino mini pro e una scheda mBGC v1.08 (vedi 046. e 047. a pag. 42). L'ingombro complessivo del controller è risultato compatibile con le dimensioni del prodotto ipotizzate; e al momento della scelta, si trattava della soluzione più compatta in linea con le caratteristiche ricercate.

Trattandosi di un controller open hardware è stato indispensabile reperire i componenti necessari ad assemblarlo. La fabbricazione del pcb, ovvero la scheda contenente piste e piazzole per la saldatura dei componenti, è stata affidata ad oshpark, una piattaforma web che offre questo servizio a zero spese di spedizione, con un ordine minimo di soli 3 pezzi. Il disegno era già presente sul sito, caricato in precedenza da altri utenti, per cui si è dovuto semplicemente effettuare l'ordine e attendere un paio di settimane.

I componenti elettronici sono stati acquistati da Digikey, facendo riferimento a una "lista della spesa" messa a disposizione da alcuni utenti di rcgroup (un forum dedicato al modellismo radiocomandato) all'interno di un thread dedicato al progetto di OlliW, ideatore del mini controller.

La lista dei componenti acquistati è la seguente: 6 MOSFET driver TC4452 (3 per motore) sono i componenti incaricati di inviare i segnali di potenza ai motori; 1 condensatore Tantal SMD da 33 microfarad; 2 condensatori SMD da 100 nanofarad; 1 resistenza SMD da 10 kilohm; 2 resistenze SMD da 47 kilohm. Naturalmente, il cervello del gimbal sarà il processore a 8bit dell'Arduino mini pro, sul quale la scheda mBGC dovrà essere saldata. L'unità IMU, incaricata di inviare ad Arduino i dati di movimento e accelerazione, sarà invece un classico MPU6050 a 6 gradi di libertà.

La saldatura dei componenti ha richiesto l'acquisto di alcuni materiali secondari: un saldatore per componenti a montaggio superficiale (SMD), stagno e pasta saldante. Il tutto condito da una buona dose di manualità e acume visivo. Il procedimento ha richiesto circa un'ora, in due persone, per assemblare le 3 schede ordinate.

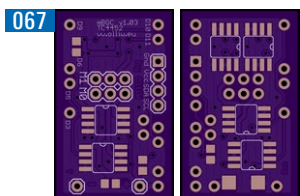
Nella pagina a fronte alcuni scatti delle operazioni di saldatura.

**063. Digikey** è un magazzino online di componentistica elettrica ed elettronica che vende in tutto il mondo ad aziende e privati. Mette a disposizione una vastissima quantità di articoli, la maggior parte dei quali acquistabili in singole quantità. Da digikey.it sono stati acquistati i componenti del controller e alcuni strumenti utili al montaggio del prototipo finale.

**064. Misumi** è un'azienda che ha investito nello sviluppo di una piattaforma web, in grado di mettere al servizio dei propri clienti l'estrema versatilità di un parco macchinari a controllo numerico.

Il sito presenta a catalogo componenti meccanici standard e componenti configurabili. Di questi ultimi è possibile personalizzare le dimensioni, scegliere il materiale e selezionare il grado di precisione (tolleranze e finitura superficiale). Al termine della configurazione si ottiene un preventivo istantaneo del pezzo ed è possibile effettuare un'ordine senza vincoli di quantità minima e senza spese di spedizione.

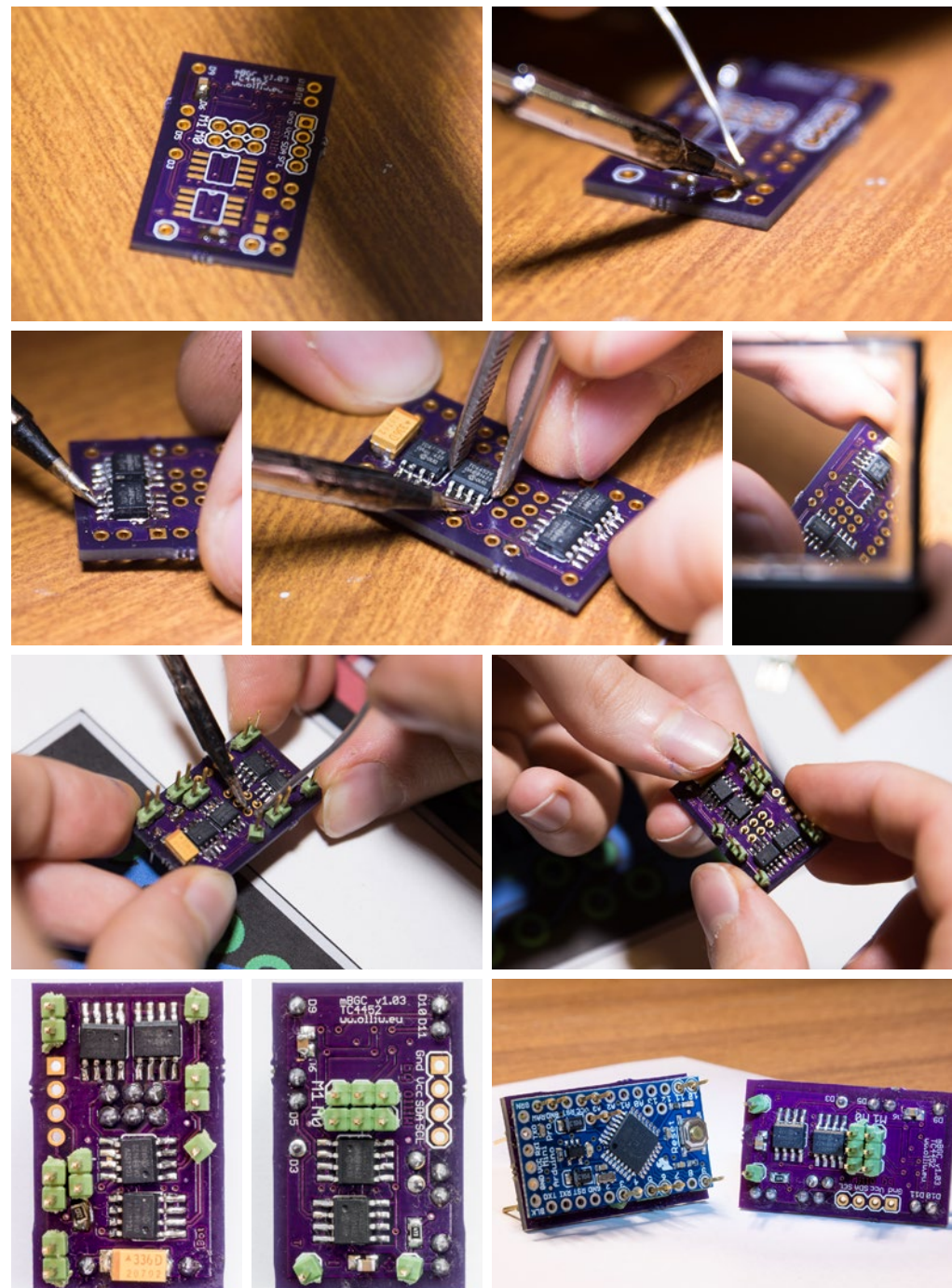
Attraverso misumi sono stati acquistati fasteners, rondelle, perni e tutto ciò che di meccanico è stato utilizzato nei prototipi del gimbal.



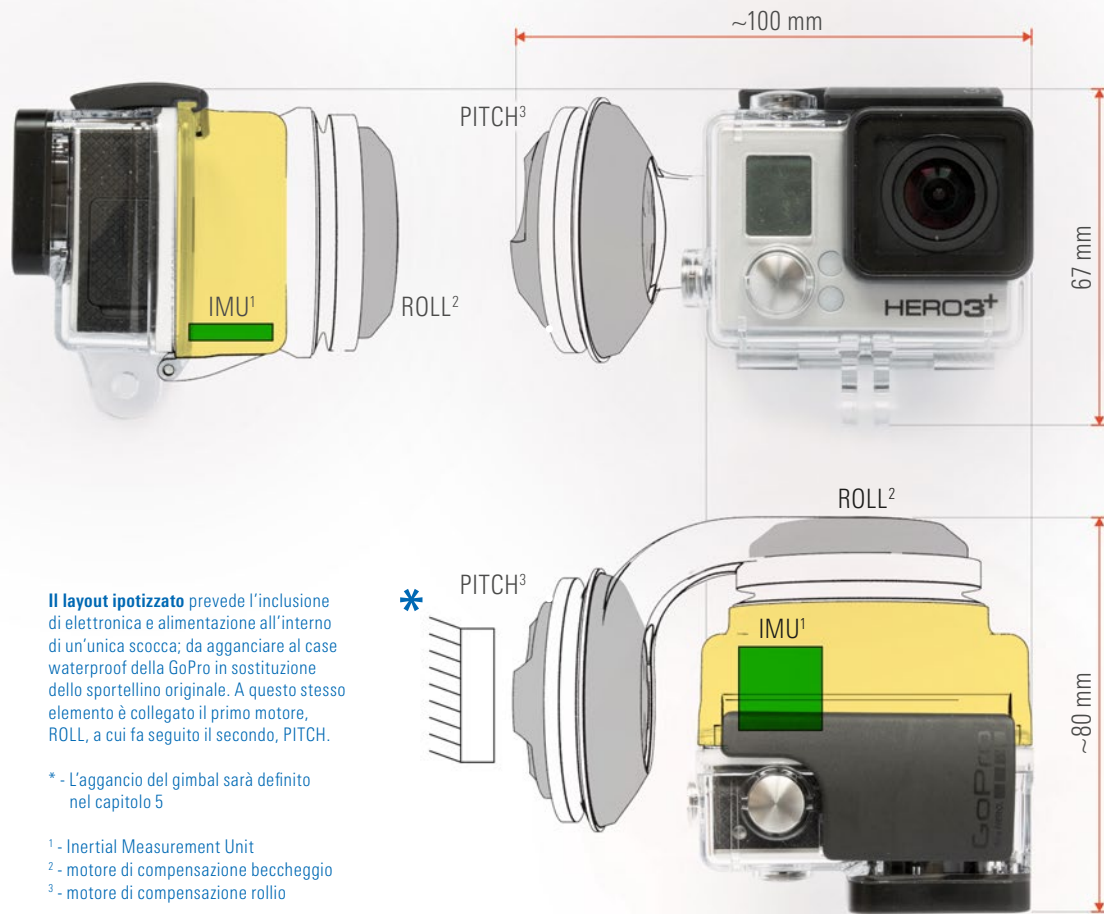
**065. FPModena** è un fornitore italiano di guarnizioni, per privati e aziende, da cui è possibile acquistare anche online. Il sito è stato utilizzato per l'acquisto di tutte le guarnizioni presenti nel gimbal.

**066. OSH Park** è un sito americano che offre ai propri clienti la possibilità di fabbricare pcb e schede elettroniche ad un prezzo vantaggioso, con una quantità minima d'ordinazione di soli 3 pezzi.

**067. Il disegno della mBGC v1.05**, si presenta così: nel caratteristico viola che identifica la produzione di OSH Park. Per 5 dollari ne sono stati prodotti 3 esemplari.



4.7 Layout generale e dimensioni



Il layout ipotizzato prevede l'inclusione di elettronica e alimentazione all'interno di un'unica scocca; da agganciare al case waterproof della GoPro in sostituzione dello sportellino originale. A questo stesso elemento è collegato il primo motore, ROLL, a cui fa seguito il secondo, PITCH.

\* - L'aggancio del gimbal sarà definito nel capitolo 5

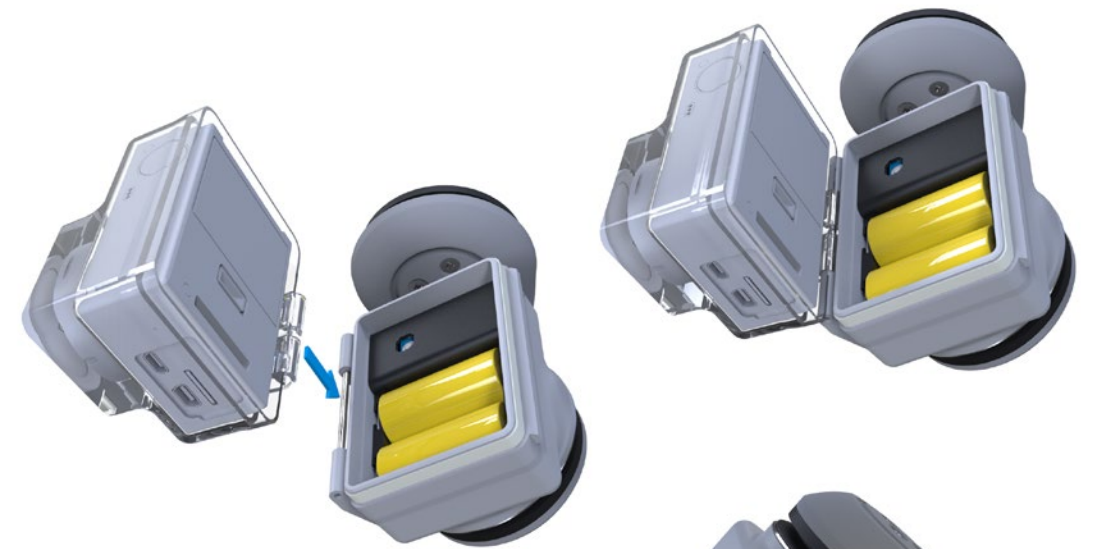
- ¹ - Inertial Measurement Unit
- ² - motore di compensazione beccheggio
- ³ - motore di compensazione rollio

Le immagini qui sopra illustrano l'ipotesi di layout adottata per il prodotto; con una generica indicazione delle relative dimensioni di massima.

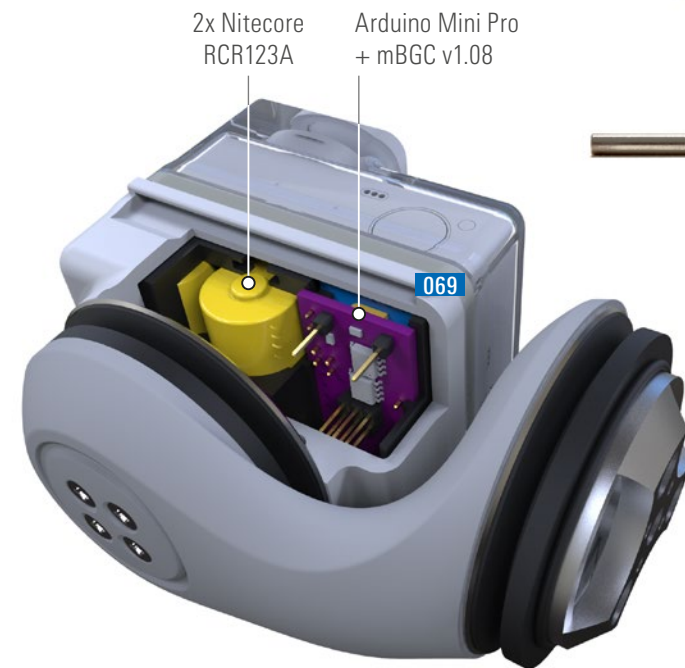
L'idea che sta alla base di questo setup prevede l'inserimento dell'elettronica e dell'alimentazione all'interno di un'unica scocca; che si interfaccia meccanicamente con il case della GoPro e da cui prende forma il resto del gimbal. Come è possibile notare, il primo motore, quello del rollio, collega la scocca principale al secondo motore, quello del beccheggio, tramite un braccio rigido ad angolo retto. Al di là del motore numero 2 è presente un'aggancio per il fissaggio del gimbal al resto

dell'attrezzatura, aggancio che, nelle immagini proposte, non è presente; poiché nella prima del progetto si è preferito risolvere dapprima la parte relativa al movimento, più densa di punti critici da sciogliere.

La scocca primaria non si aggancia direttamente alla GoPro ma alla custodia waterproof che la contiene. Si tratta di una custodia a tenuta, presente all'interno della confezione standard della fotocamera. Un oggetto, dunque, che sostanzialmente possiedono tutti. Rimuovendo lo sportellino del case, è possibile installare il gimbal al suo posto, fissandolo in modo del tutto analogo.



068. Minibarra in acciaio inossidabile (catalogo Misumi: MRSG2.0-55) AISI 304, simile a quella presente sullo sportellino di chiusura del case della GoPro. Si sfrutta in modo analogo per agganciare il gimbal.



069. Per fissare il gimbal è presente un incavo a "C" sul quale è possibile agganciare il meccanismo di chiusura a leva situato nella parte superiore del case della GoPro. Il gancio non è stato rappresentato nel rendering ma è visibile a pagina precedente nell'immagine in alto a sinistra.



## 4.8 Componenti

**070. APM Hexseal SFR M3x8mm**  
viti a testa svasata autobloccante a croce Philips, in acciaio inossidabile. Sono viti a tenuta, progettate per resistere alle infiltrazioni d'acqua. Sono state adottate per impedire all'acqua di raggiungere i motori, infiltrandosi attraverso i fori di montaggio presenti nel braccio.

**071. Viti a testa ultrabassa** (catalogo Misumi: CBSKE3-6) in acciaio al carbonio (JIS-SWCH12-18A) con trattamento di nichelatura brunita. La loro funzione sarà spiegata nel dettaglio al paragrafo 4.11.



**072. Rondelle in acciaio al carbonio** (EN 1.1191 Equiv.) con trattamento di nichelatura chimica (catalogo Misumi: FWSSM-D57-V41-T1). La loro funzione ha a che fare con l'impermeabilizzazione del prodotto; si rimanda al paragrafo 4.11 per una spiegazione più dettagliata.

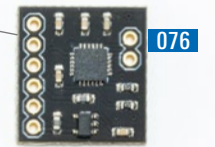


**073. Inserti automaschianti** in acciaio rapido cromato (catalogo Misumi: ENT3-6). Sono inseriti all'interno delle parti realizzate in additive manufacturing (scocca principale e braccio) per consentire il fissaggio delle rondelle in acciaio.

**074. Il controller** del gimbal: un Arduino Mini Pro saldato ad una scheda mBGC v1.08 (micro Brushless Gimbal Controller). È alloggiato all'interno di un telaio realizzato in stampa 3D.



Prototipo digitale A



**075. I contatti delle batterie** sono stati "cannibalizzati" da un porta batterie per pcb.

**076. IMU: Drotek MPU6050** è una breakout board dotata di accelerometro e giroscopio, in grado di registrare i dati di movimento relativi ai 6 gradi di libertà.

**077. Viti a testa piatta e cava esagonale** in acciaio inossidabile AISI 304 (catalogo Misumi: SFB3-8). Hanno la funzione di vincolare il primo motore alla scocca principale. Non sono a tenuta dal momento che sono rivolte verso l'interno.

**078. iPower GBM3506H-130T** sono i motori scelti per il gimbal. Leggermente sovradimensionati allo scopo, sono stati scelti per garantire una coppia adeguata anche in condizioni difficili di utilizzo.

**079. Guarnizioni V-ring VA40** sono l'elemento chiave del sistema di impermeabilizzazione: fermano le infiltrazioni d'acqua negli snodi dei motori. I dettagli specifici relativi al loro funzionamento saranno esposti nel paragrafo 4.11.

**080. Guarnizioni O-ring** di due misure differenti sono utilizzate all'interno del gimbal per garantire la tenuta. Nel paragrafo 4.11 saranno trattate nel dettaglio.



## 4.9 Funzionamento



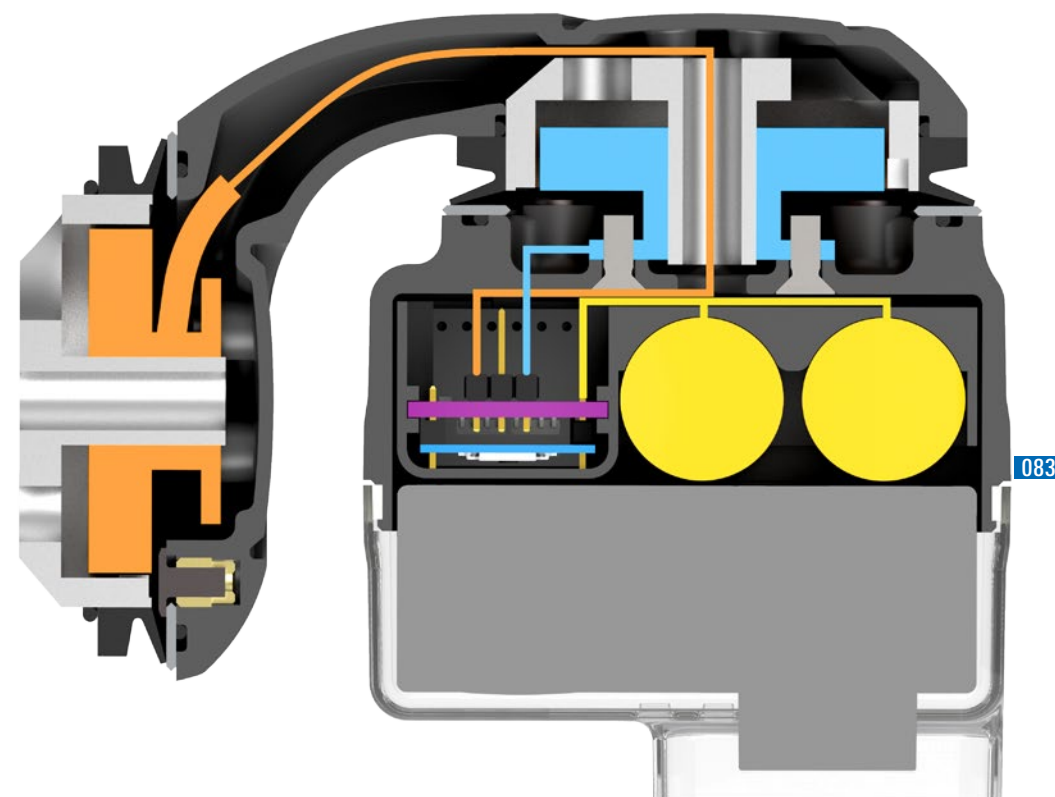
**081. Le correzioni lungo l'asse di rollio** avvengono grazie alla rotazione del motore 1, posto sul retro della scocca principale. Il controller ne regola l'angolo di rotazione, la velocità e l'accelerazione; in modo da mantenere l'unità IMU in posizione orizzontale e, di conseguenza, anche la GoPro.

L'asse di rotazione del rollio passa attraverso un punto, "G1", che rappresenta il baricentro, o centro di gravità, dell'insieme di componenti situati a valle del motore 1. La somma delle masse di questi componenti, a partire dalla custodia della GoPro "in su", restituisce un baricentro che si colloca

in G1. È una regola, per i gimbal, che gli assi di rotazione dei motori attraversino il baricentro dell'insieme di componenti che vanno a movimentare. In questo modo, la quantità di coppia da applicare allo spunto per vincere l'inerzia delle masse sospese si riduce considerevolmente ed il controller può essere programmato per fornire ai motori una quantità di energia inferiore; a tutto vantaggio della durata della batteria e del comportamento dinamico del gimbal. Un gimbal sbilanciato tende a muoversi in modo errato ed è più suscettibile alle forze inerziali causate da movimenti rapidi del sistema.

**082. Le correzioni lungo l'asse di beccheggio** sono gestite dal motore 2, grazie ai comandi inviati dal controller. Il baricentro dei componenti, in questo caso, è "G2"; risultato della somma delle masse dei componenti situati a valle del secondo motore.

Durante il funzionamento del gimbal, correzioni di ROLL e PITCH avvengono in modo simultaneo e i due motori lavorano sinergicamente per annullare i movimenti della telecamera, nel modo più rapido e stabile possibile.



## 4.10 Ipotesi impianto elettrico

Lo schema ipotizzato sfrutta la cavità centrale del primo motore, quello del rollio, per collegare al controller il motore laterale. I cavi attraversano l'asse centrale del primo motore, evitando che eventuali attorcigliamenti possano ostacolare la rotazione nel caso in cui il braccio del gimbal effettui delle rotazioni complete lungo l'asse di rollio (cosa che potrebbe capitare nel caso di inversioni e "360 gradi", non inusuali negli sport estremi).

Il primo motore, accede direttamente alla scatola principale, attraverso un passaggio situato nella parete posteriore della scocca. I fili, in questo caso, compiono un percorso assai più breve.

Le batterie sono collegate tra loro in serie e forniscono al controller una tensione di alimentazione di 7,4 volt.

**083. Layout dei collegamenti elettrici** sovrapposto a una sezione del dispositivo parallela al piano orizzontale.

Le linee gialle rappresentano i collegamenti relativi all'alimentazione: le batterie sono collegate in serie tra di loro e a loro volta al controller; a cui forniscono una tensione di 7,4 volt. Il controller alimenta l'unità IMU e i motori fornendo loro una tensione adeguata. Il collegamento tra il controller e lo statore del motore 1 è evidenziato in azzurro; il collegamento allo statore del motore 2, in arancione. Le linee arancioni e azzurre rappresentano ognuna tre fili, numero necessario al comando dei motori.

Il collegamento al motore 2 attraverso l'asse centrale del motore 1, attraversando il perno cavo che contraddistingue i motori utilizzati. In questo modo, la rotazione del motore 1 non viene ostacolata.



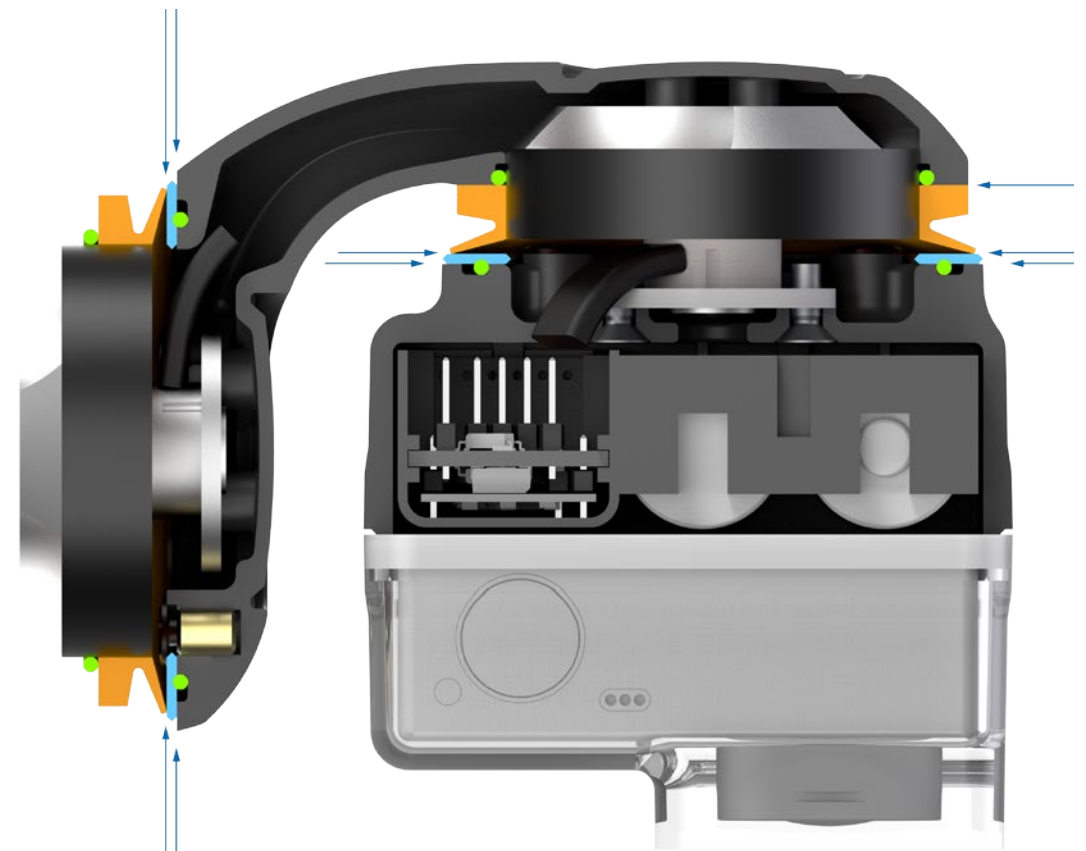
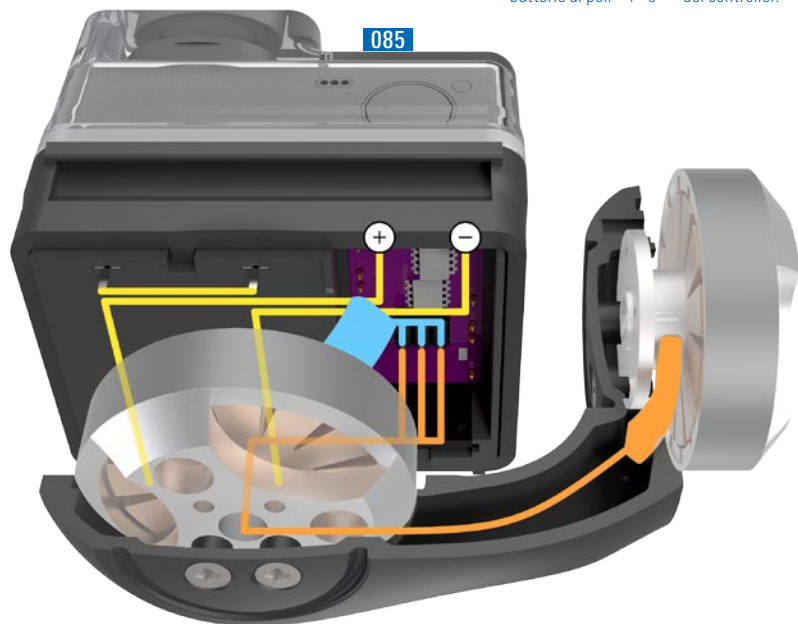
084

**083.** Grazie alla cavità centrale dei motori e al passaggio dei fili di collegamento al motore 2 attraverso il motore 1, il braccio del gimbal può effettuare diverse rotazioni lungo l'asse di rollio prima che i fili possano attorcigliarsi. Questo rende il gimbal utilizzabile anche in caso di inversioni e loop.

**084.** Particolare relativo al collegamento del motore 1: i cavi necessari al comando del motore entrano direttamente nella scatola dell'elettronica per mezzo di una lieve flessione della guaina che li avvolge (evidenziata in azzurro).

**085.** Collegamenti elettrici del gimbal da una vista alternativa. In quest'immagine è più evidente il passaggio dei fili attraverso il primo motore ed è visualizzato più correttamente lo schema di collegamento delle batterie ai poli "+" e "-" del controller.

085



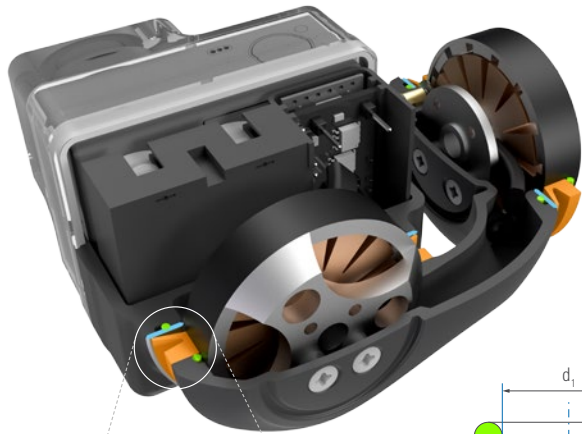
#### 4.11 Ipotesi sistema di impermeabilizzazione

L'impermeabilizzazione del dispositivo ha richiesto la ricerca di una soluzione che fosse in grado di fermare le infiltrazioni d'acqua e, contemporaneamente, ridurre al minimo l'attrito introdotto nella rotazione dei motori dal possibile impiego di guarnizioni. Un attrito eccessivo può infatti ostacolare o impedire la rotazione del gimbal.

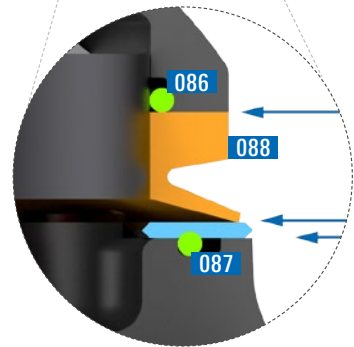
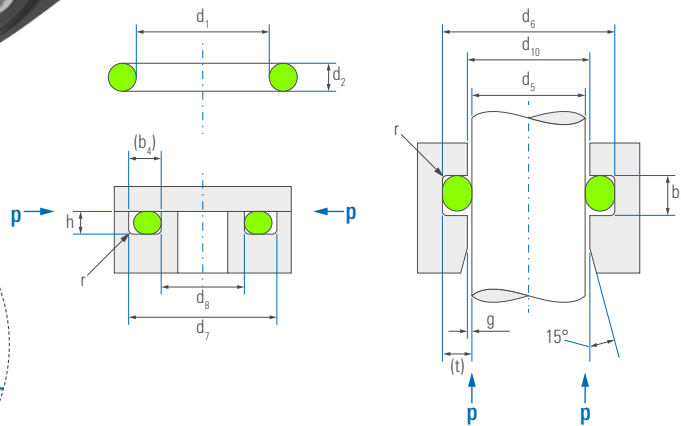
Per risolvere il problema si è pensato di utilizzare una coppia di guarnizioni V-ring, calzate, a pressione, su ognuno dei motori, il cui labbro circolare è stato fatto appoggiare a una rondella in acciaio tagliata a misura, dello spessore di 1mm. Scivolando su questa superficie, il labbro flessibile impedisce l'ingresso di acqua e polvere, minimizzando la superficie di contatto tra le parti in movimento. La scelta di introdurre un elemento in

acciaio è stata dettata dalla necessità, per questo tipo di guarnizioni, di scorrere su una superficie il più possibile priva di irregolarità: un materiale duro presenta a livello microscopico una superficie molto regolare e permette una tenuta più efficace della guarnizione.

Ogni rondella è stata fissata alle scocche tramite inserti filettati automaschianti, inseriti nella plastica. Sotto le rondelle, un O-ring in compressione ferma le infiltrazioni d'acqua lungo la faccia inferiore; e, analogamente, sopra il V-ring, un secondo O-ring ferma la pressione coassiale dell'acqua, tra la faccia superiore del V-Ring e la parete del rotore. Per quanto riguarda la custodia della GoPro, è stata utilizzata una guarnizione identica a quella in dotazione, posizionata sul nuovo case come nello sportellino originale (vedi 090.).



Per la scelta delle guarnizioni O-ring è stato utilizzato un software per il dimensionamento di guarnizioni e relative sedi; il programma è a disposizione sul sito web di Trelleborg, un grande fornitore di guarnizioni e componentistica per l'industria.



INPUT	[mm]	Lower tolerance limit [mm]	Upper tolerance limit [mm]
Groove Outside-Ø (d <sub>7</sub> )	51.000	0.000	0.074
Groove Inside-Ø (d <sub>9</sub> )	45.500	-0.062	0.000
Seal housing height (h)	1.100	0.000	0.100
Groove Radius (r)	0.500	-0.100	0.100
O-Ring Outside-Ø (d <sub>1</sub> )	45.00	-0.44	0.44
Cross-Section-Ø (d <sub>2</sub> )	1.50	-0.08	0.08

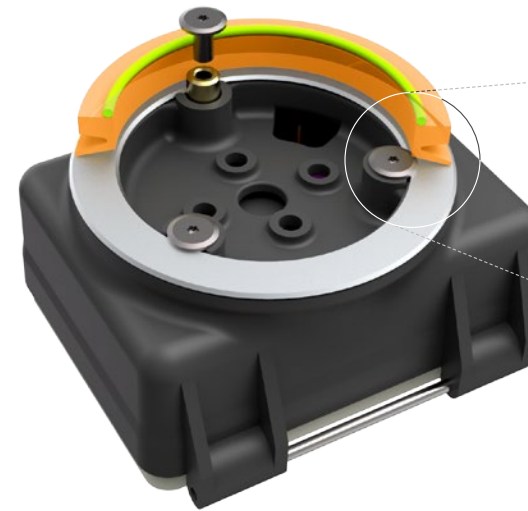
CALCULATION RESULTS			
Compression incl. R	min = 15.49 <> max = 30.38	[%]	
Compression incl. R	min = 0.22 <> max = 0.48	[mm]	
Groove Fill	min = 45.55 <> max = 66.56	[%]	
Stretch OR Inside-Ø	min = no <> max = 2.11	[%]	
Compression OR Outside-Ø	min = no <> max = no	[%]	
Groove Width (b <sub>1</sub> )	min = 2.75 <> max = 2.82	[mm]	

Selected O-Ring **087** 45.00 x 1.50 [mm]

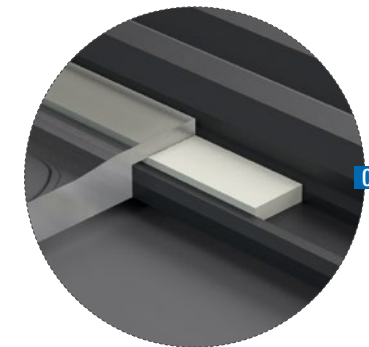
INPUT	[mm]	Lower tolerance limit [mm]	Upper tolerance limit [mm]
Bore-Ø (d <sub>10</sub> )	42.100	0.000	0.039
Rod-Ø (d <sub>5</sub> )	42.000	-0.050	-0.025
Groove-Ø (d <sub>6</sub> )	44.200	0.000	0.062
Groove Width (b <sub>1</sub> )	2.200	-0.000	0.250
Groove Radius (r)	0.300	-0.100	0.100
O-Ring Inside-Ø (d <sub>1</sub> )	42.00	-0.42	0.42
Cross-Section-Ø (d <sub>2</sub> )	1.50	-0.08	0.08

CALCULATION RESULTS			
Compression incl. R	min = 17.67 <> max = 29.59	[%]	
Compression incl. R	min = 0.25 <> max = 0.47	[mm]	
Gap (g)	min = 0.063 <> max = 0.095	[mm]	
Groove Fill	min = 56.13 <> max = 84.29	[%]	
Stretch OR Inside-Ø	min = no <> max = 0.95	[%]	
Reduction in Cross-Section (R)	min = 0.00 <> max = 1.12	[%]	
OR Cross-Section-Ø	min = 1.40 <> max = 1.58	[mm]	
Radial Housing Depth (t)	min = 1.11 <> max = 1.16	[mm]	
Compression OR Outside-Ø	min = 0.36 <> max = 3.03	[%]	

Selected O-Ring **086** 42.00 x 1.50 [mm]

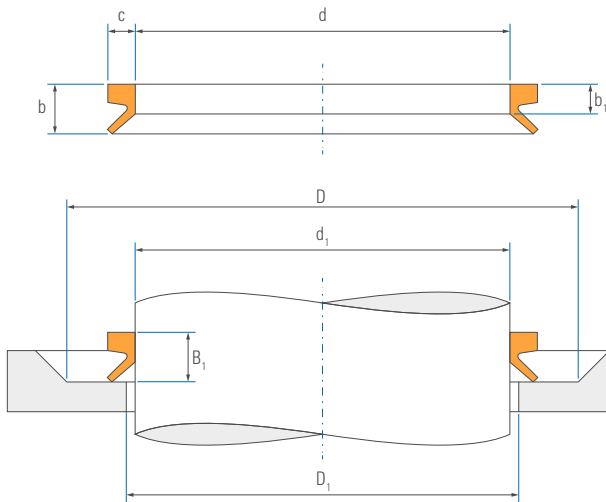


089. Il movimento del labbro del V-ring lungo la rondella potrà essere coadiuvato da un olio lubrificante, per minimizzare ulteriormente l'attrito tra le parti in rotazione. Nell'ingrandimento è possibile notare come l'impiego di viti a testa ultrabassa (vedi 071. a pag. 54) sia funzionale alla



non-interferenza con la rotazione della guarnizione a "V". Il diametro della rondella è stato definito rispettando i requisiti tecnici del datasheet: vedasi "D" minimo, consigliato nella tabella in fondo alla pagina; dove d<sub>1</sub> è il diametro esterno dei motori (42 mm).

090. La guarnizione della custodia della GoPro è identica a quella in dotazione: semplicemente è stata spostata dallo sportellino originale alla scatola del gimbal.



Dimensions									
Shaft diameter range	Seal inside diameter, free state	Seal seat width	Nominal seal width	Nominal seal height	Clearance	Counterface	Seal fitted width	Designation	
d <sub>1</sub> over	d	b <sub>1</sub>	b	c	D <sub>1</sub> max	D min	B <sub>1</sub>		
mm									
38	43	36	5,5	9	5	d <sub>1</sub> + 2	d <sub>1</sub> + 15	7 ± 1	40 VA <b>088</b>

## 5 Prototipo fisico B

### 5.1 Criticità evidenziate nel prototipo A

Il prototipo digitale è stato utile per evidenziare alcune lacune progettuali.

Un primo problema è stato individuato nell'impossibilità di programmare l'Arduino una volta agganciato il dispositivo alla GoPro. Si tratta di un'operazione fondamentale, dal momento che alcuni parametri del firmware vanno regolati in base all'hardware e per farlo è fondamentale che lo stabilizzatore sia in funzione e libero di muoversi.

Per ovviare al problema sarebbe stato necessario prevedere un'uscita dei cavi necessari al caricamento del firmware dalla scocca principale. Una soluzione che avrebbe comportato un problema di tenuta, probabilmente non risolvibile con l'aggiunta di un tappo a tenuta stagna (per via delle dimensioni ridotte delle pareti della scatola e dell'impossibilità di progettare particolari troppo piccoli, incompatibili con la tecnologia di produzione delle scocche). Anche l'ipotesi di far passare i cavi attraverso entrambi i motori, e farli uscire dal motore 2, è parsa difficoltosa. Attraverso il primo motore sarebbero passati un totale di 8 cavi, decisamente troppi per evitare di introdurre una certa resistenza alla rotazione.

Ogni soluzione ipotizzata per rendere disponibile all'esterno la programmazione della scheda è parsa impraticabile e per questo motivo è risultato necessario rivoluzionare il comparto elettronico.

L'aggiunta di un modulo Bluetooth, in grado di gestire le comunicazioni con la scheda, è parsa l'ipotesi più interessante. Tuttavia, è risultata impraticabile, a causa della mancanza di pin liberi sulla scheda Arduino. Con 8 pin già occupati dalla scheda mBGC, i restanti 5 sarebbero stati insufficienti a collegare un altro modulo. Dunque, non è bastato ipotizzare una nuova disposizione degli elementi all'interno della scatola: il sandwich Arduino/scheda mBGC è risultato incompatibile con qualsiasi aggiunta innanzitutto per una mancanza di pin, prima ancora che per una questione di ingombri.

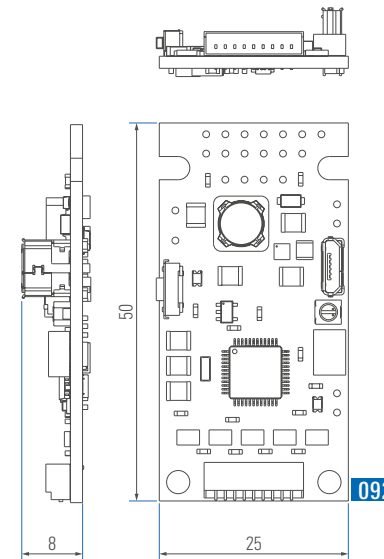
Per questo motivo si è deciso di optare per una sostituzione del controller, in favore di una soluzione che prevedesse nativamente la possibilità di aggiungere un modulo bluetooth per le comunicazioni verso l'esterno.



**091. Sparkfun FTDI basic breakout** è una scheda utilizzata per supplire alla mancanza di una porta usb sull'Arduino mini pro. La sua funzione è quella di mettere in collegamento il microcontrollore con un qualsiasi pc dotato di presa usb, permettendo in questo modo di caricarvi nuovo firmware.

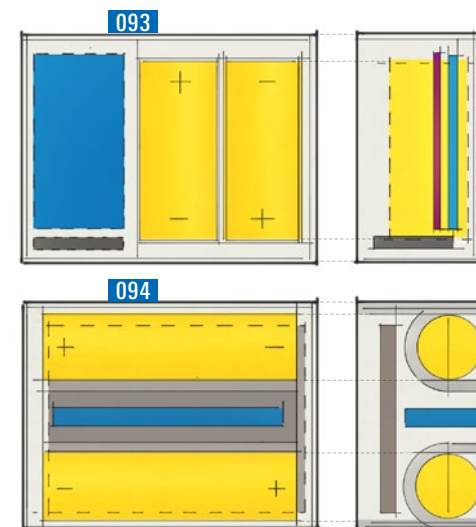
Programmare il controller della prima versione del prototipo avrebbe richiesto che i fili necessari al collegamento con la scheda FTDI fossero portati all'esterno, in modo da rendere disponibile l'ingresso seriale per un collegamento diretto al pc. La cosa è parsa difficoltosa dal momento che le soluzioni ipotizzate sono risultate incompatibili con l'impostazione generale del dispositivo.

**092. Simple BGC 32-bit Tiny** è la scheda adottata per la seconda versione del gimbal. Misura 25x50x8 mm; la metà rispetto alla SimpleBGC 32-bit originale. Al contrario dell'Arduino mini pro, è dotata di presa usb ed è predisposta per il collegamento di un modulo bluetooth.



**093. Layout attuale** dei componenti elettrici ed elettronici situati all'interno della scocca principale.

**094. Nuovo Layout** ipotizzato per il comparto elettronica/alimentazione. In grigio scuro il nuovo controller, collocato dietro le batterie. Tra le batterie, posizionate orizzontalmente, trova posto il modulo Bluetooth (evidenziato in blu) incaricato di gestire le comunicazioni verso l'esterno e il caricamento/settaggio del firmware.



### 5.2 Controller proprietario

Il controller selezionato per il secondo prototipo non era ancora disponibile al momento della scelta effettuata per il primo. Si tratta di un'evoluzione della scheda SimpleBGC 32-bit in favore di una soluzione più compatta, grande esattamente la metà.

La scheda SimpleBGC 32-bit Tiny è un controller per gimbal a 3 assi di dimensioni ridotte. L'ingombro della scheda è di 25x50 mm, è predisposta per il controllo di tre motori ma è utilizzabile anche per due, eroga una corrente massima di 600mA per motore, presenta un'unità IMU on board e l'ingresso per un'IMU secondaria (utile a migliorare il rilevamento dei dati di movimento). La sua caratteristica più importante è il processore ARM a 32 bit, praticamente 10 volte più veloce rispetto all'Arduino mini pro scelto in precedenza.

Purtroppo si tratta di una soluzione proprietaria, ma questo non deve essere considerato un fallimento rispetto alle intenzioni originali della tesi. Infatti, anche Olliw e Martinez, inventori delle rispettive soluzioni opensource, stanno lavorando allo sviluppo di un controller a 32-bit delle stesse dimensioni. Probabilmente tra qualche mese esisterà una versione analoga della scheda SimpleBGC Tiny anche per il mondo open hardware.

Dal momento che la realizzazione di un prototipo funzionante è un obiettivo prioritario, l'adozione di una scheda proprietaria è stata una scelta in qualche modo obbligata. Sicuramente sarà molto più difficile implementare le modifiche del firmware ipotizzate fino a questo momento, tuttavia, si tratta di un obiettivo non fondamentale ai fini del progetto.

L'adozione del nuovo controller è stata accompagnata da una riorganizzazione dei componenti all'interno della scatola. È stato progettato un nuovo alloggiamento dei componenti elettronici e delle pile. La presenza di un'unità IMU all'interno del case non è più stata necessaria; per questo motivo è stata spostata all'esterno, oltre il motore 2, per fornire dati di posizionamento più accurati e fungere da secondo accelerometro. All'interno del case è stato inserito un modulo di comunicazione bluetooth, acquistato per circa 12 euro su flyduino.com e predisposto per lavorare in coppia con la nuova scheda.

## 5.3 Componenti

**La seconda versione del prototipo** presenta differenze che riguardano principalmente l'elettronica.

Nella scocca principale è presente una nuova scheda di controllo, nuove batterie e un modulo di comunicazione bluetooth. Questi elementi sono fissati ad un telaio estraibile, realizzato in additive manufacturing e pensato per essere collegato e scollegato facilmente. Dal punto di vista meccanico non sono state effettuate modifiche importanti. Il sistema di impermeabilizzazione rimane identico e l'unica aggiunta di rilievo è il sistema di aggancio e chiusura dello stabilizzatore, collocato subito dopo il motore laterale.

Nell'esploso sono indicati e descritti solo gli elementi che differiscono rispetto alla prima versione. Per una descrizione degli altri componenti si faccia riferimento al paragrafo 4.8 a pag. 54.

L'aggancio del gimbal è stato aggiunto in questa seconda versione. È composto da un elemento di copertura, che chiude il dispositivo e lo rende impermeabile, e da un attacco compatibile con gli accessori GoPro. Il primo elemento, oltre a chiudere il dispositivo, ospita al suo interno un'unità IMU secondaria.

**095. Frame IMU per SimpleBGC 32.** questa unità IMU, costituita da un accelerometro e un giroscopio, è predisposta per lavorare in combinazione con l'unità integrata nel controller. Serve a rilevare i movimenti del frame, il telaio del gimbal, per consentire un miglioramento della stabilizzazione.



095

**096. Inserti automaschianti** in acciaio rapido cromato (catalogo Misumi: ENT4-8). Servono ad avvitare l'attacco del gimbal.

**097. Viti a testa piatta con intaglio a croce** in acciaio formato a freddo cromato (catalogo Misumi: SFBJ4-10). Fissano l'attacco intercambiabile al gimbal.



096



097



101

**098. Dadi esagonali JIS classe 3** in acciaio cromato (catalogo Misumi: KNTR-3). Fissano la scheda di controllo al telaio di sostegno dell'elettronica e dell'alimentazione.

**099. Viti a testa piatta esagonale** in acciaio inossidabile AISI 304 (catalogo Misumi: SFB3-6). Insieme ai dadi, fissano il controller al telaio dell'elettronica.

**100. Adattatore seriale bluetooth HC-06** permette di connettersi al controller per il setup delle variabili del software. Si tratta di un'operazione da effettuare tramite pc, almeno una volta, necessaria all'impostazione del comportamento del gimbal e alla regolazione dei parametri che governano l'algoritmo di stabilizzazione. Poterlo fare senza necessariamente utilizzare un cavo usb, permette un setup del gimbal "on-the-go". Potenzialmente, questo modulo potrebbe consentire il controllo del gimbal anche da uno smartphone.

**101. Nitecore 14500 (NL147) Li-ion** batterie ricaricabili agli ioni di litio. 750 mAh; 3,7V; 2A discharge rate; Ø14 x 50 mm. Sostituiscono le precedenti batterie, per una migliore disposizione degli elementi.

## 5.4 Ipotesi di setup

Durante lo sviluppo del secondo prototipo è stato fatto un ragionamento sulle possibilità di aggancio del dispositivo al resto dell'attrezzatura. L'attacco ipotizzato è stato progettato per essere compatibile con gli accessori GoPro, così come stabilito nel brief. Si compone principalmente di due parti: un elemento di chiusura, che avvitandosi al secondo motore rende impermeabile il gimbal, e il gancio vero e proprio, che per mezzo di 4 viti si fissa al primo elemento. Le due parti svolgono funzioni differenti. La prima garantisce la tenuta del dispositivo; la seconda ne favorisce l'espandibilità, trattandosi di un pezzo intercambiabile. L'aggancio, infatti, è stato pensato per essere compatibile con gli accessori GoPro ma anche per offrire una soluzione di fissaggio il più possibile universale. I 4 inserti filettati incastonati nel primo elemento, quello di copertura, rendono possibile il montaggio di agganci personalizzati, che abbiano in comune con quello proposto solamente i fori per le viti. Con questa soluzione si aprono molte possibilità per il montaggio dello stabilizzatore; e data la natura "open" del prodotto, orientata ad una produzione in additive manufacturing, la progettazione e realizzazione di agganci su misura, pensati per la propria attrezzatura, è un'opzione più che percorribile.

Per quanto riguarda il setup del prodotto, saranno possibili almeno due modalità di utilizzo: una "asimmetrica" e una "simmetrica". La prima è la modalità di utilizzo considerata primaria, dal momento che il software per il controllo dei motori sarà predisposto per questo setup. La seconda dovrebbe prevedere una modifica del software e per questo motivo sarà solamente ipotizzata. Il montaggio del gimbal in posizione orizzontale, ad esempio sul lato di un casco, di un'automobile o di una moto, lo pone in una condizione di lavoro asimmetrica. In questa situazione i movimenti di rollio e di beccheggio vengono stabilizzati mentre l'imbardata resta dipendente dai movimenti esterni. La versione attuale del firmware è pensata per questa modalità di funzionamento, ma trattandosi di un codice in continua evoluzione, è possibile che in futuro possa implementare una funzione di riconoscimento della posizione di montaggio del gimbal; che faccia sì che il motore 2, normalmente adibito al controllo del beccheggio, si occupi dei movimenti di imbardata, rendendo possibile un montaggio "simmetrico" del dispositivo: ad esempio sopra un casco, in posizione verticale.



**102. L'attacco del gimbal** è stato pensato per essere sostituibile e favorire l'utilizzo di agganci personalizzati, modellati per soddisfare esigenze particolari. Quello proposto è compatibile con i molti accessori della gamma GoPro e per questo motivo può essere montato praticamente ovunque.

**103. L'elemento di copertura** svolge diverse funzioni. Avvitandosi al secondo motore rende impermeabile il dispositivo. Ospita al proprio interno l'unità IMU secondaria per il rilevamento dei movimenti del frame. Presenta nella sua parte esterna quattro poppette, al cui interno sono inseriti altrettanti inserti automaschianti, utilizzati per assicurare l'aggancio.

Il fissaggio al motore avviene per mezzo di quattro viti APM Hexseal (vedi 070. a pag. 54) che garantiscono la tenuta del componente. Una guarnizione O-ring, identica a quella presente sul primo motore, impedisce le infiltrazioni tra la faccia superiore del V-ring e la parete interna dell'elemento (quella che delimita lo spazio circolare per l'inserimento del motore).

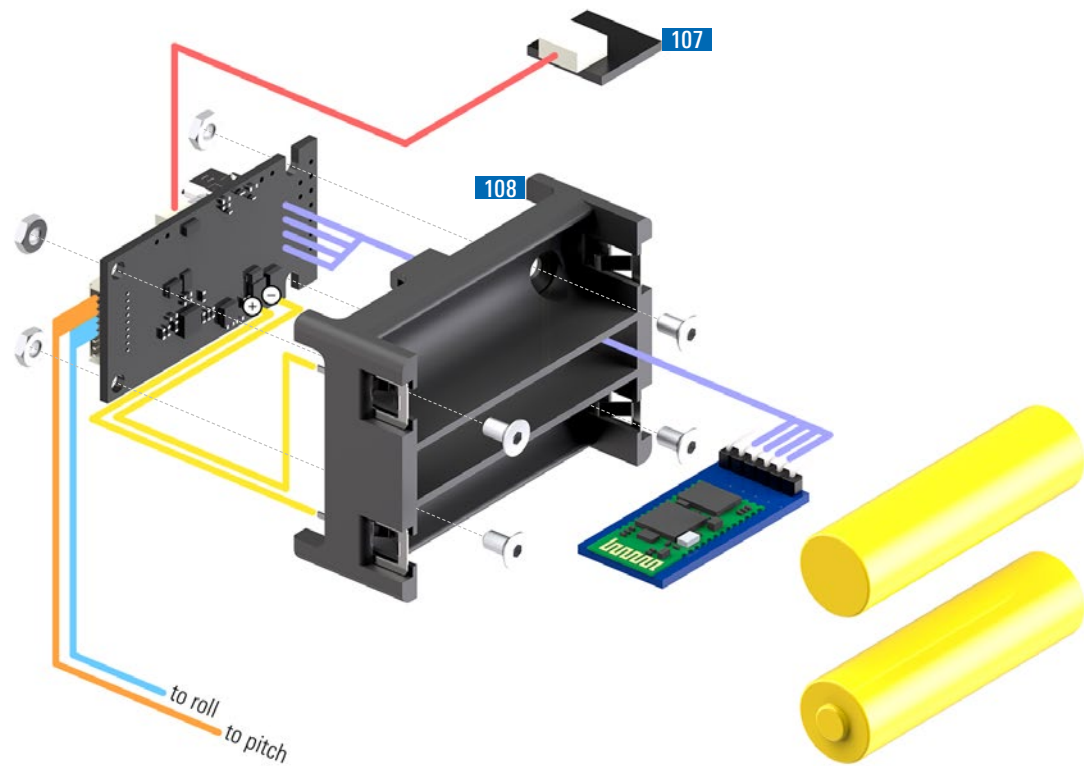


**104. Lo snodo regolabile a tre vie GoPro** è solamente uno degli accessori utilizzabili per il montaggio del gimbal (qui rappresentato a titolo esemplificativo).

**105. Le placche adesive GoPro**, in abbinamento allo snap-fit apposito, permetterebbero di assicurare il gimbal ad un casco o ad uno skateboard.

**106. La posizione di funzionamento standard** del dispositivo è quella pensata per un uso asimmetrico, in posizione laterale.





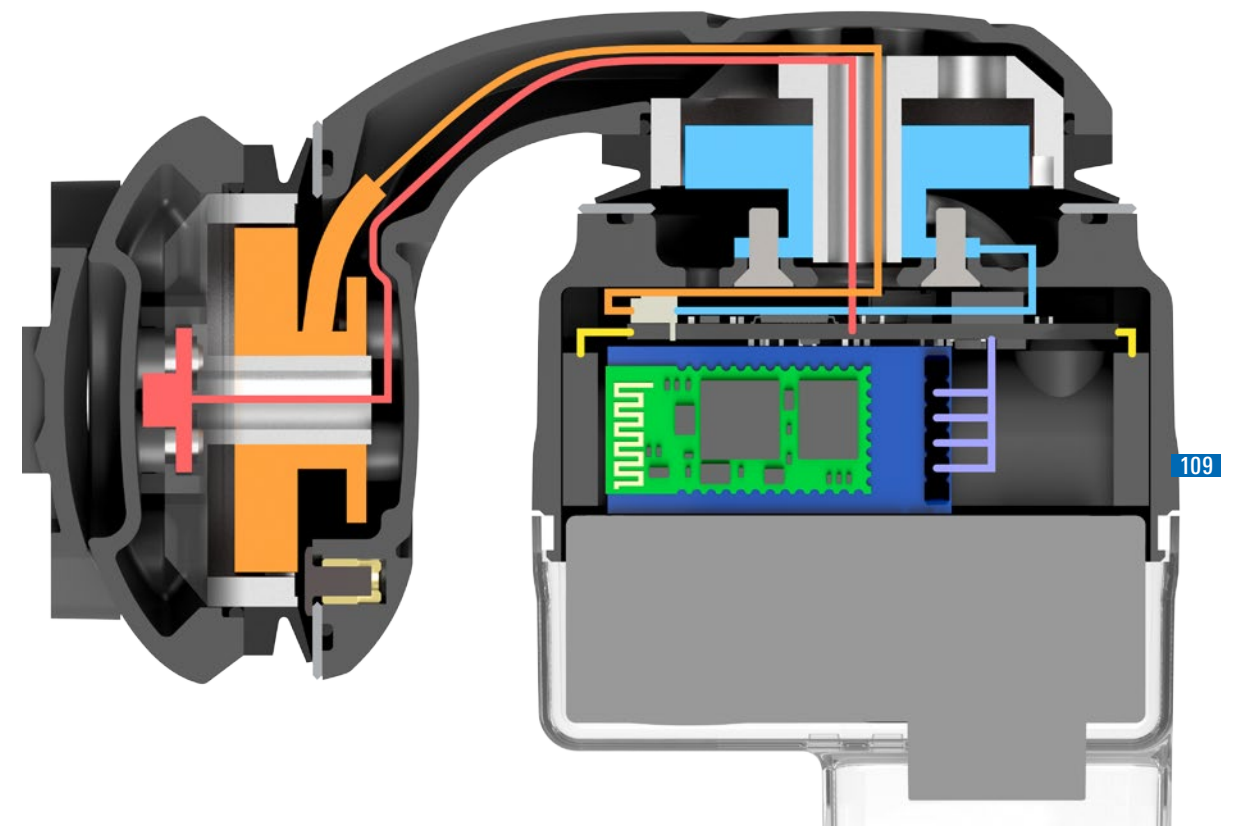
## 5.5 Elettronica

L'elettronica utilizzata nella seconda versione del gimbal ha richiesto una riorganizzazione dello schema dei componenti. Il nuovo controller, alloggiato in posizione verticale, sul fondo della scatola, è avvitato ad un telaio che sostiene anche il modulo bluetooth e le batterie. Queste sono state sostituite rispetto alla prima versione ma, dimensioni a parte, presentano le stesse caratteristiche. Sono posizionate orizzontalmente, sopra e sotto, in modo che la distribuzione del loro peso risulti più omogenea, e simmetrica rispetto al centro. Tra di esse è stato possibile alloggiare il nuovo modulo bluetooth. Un'ultima modifica riguarda l'aggiunta di una seconda unità IMU, che dal controller raggiunge l'elemento di chiusura del gimbal, quello situato prima del gancio. Da questa posizione, fornisce i dati di inclinazione e accelerazione del frame, utili a migliorare la valutazione del posizionamento relativo della camera.

**107. Unità IMU secondaria**, collocata all'esterno del secondo motore, subito prima dell'attacco. Per raggiungere la posizione in cui è montata, i cavi per la connessione dati attraversano entrambi i motori.

**108. Schema di collegamento ed esplosione dei componenti elettrici ed elettronici;** ne riassume a livello grafico la posizione e le relative connessioni.

I contatti delle batterie sono assemblati a pressione, mentre il controller è fissato al telaio con viti e dadi. Il modulo Bluetooth è solamente appoggiato tra le batterie ma lo spazio è sufficientemente ridotto da evitare che possa muoversi. Il telaio è stato ipotizzato in questo modo per consentire una facile estrazione dalla scatola di tutta la parte elettrica.



## 5.6 Collegamenti elettrici

I collegamenti elettrici ai motori sono simili a quelli ipotizzati nella prima versione: il primo motore ha accesso diretto alla scatola mentre il secondo viene raggiunto attraversando il primo motore. La novità principale riguarda l'aggiunta della seconda unità IMU, collocata all'esterno del secondo motore. Per raggiungerla, è stato adottato uno stratagemma simile: i suoi cavi attraversano entrambi i motori e raggiungono in questo modo la scatola. Il nuovo controller è dotato di un accelerometro e un giroscopio integrati, per cui la seconda unità fornisce informazioni sulla posizione del frame (ovvero del braccio del gimbal) rispetto al controller e alla GoPro.

In viola, il collegamento tra il controller e il modulo bluetooth: i 4 fili, trasmissione, ricezione, alimentazione e massa, sono saldati sul retro della scheda.

**109. Layout dei collegamenti elettrici** sovrapposto a una sezione del dispositivo parallela al piano orizzontale.

Rispetto alla sezione 083, a pagina 57 è possibile notare alcune importanti differenze. I gruppi di cavi che attraversano il primo motore sono due: come nella prima versione, un gruppo è adibito al controllo del secondo motore. L'altro, presente solo in questa seconda versione, è adibito al trasferimento dei dati provenienti dall'unità IMU secondaria. I fili di collegamento del modulo bluetooth (in viola) sono alloggiati tra le batterie, nello stesso spazio a disposizione del modulo.

Anche in questo caso, le batterie sono collegate in serie: una tensione in ingresso di 7,4 volt è compatibile infatti anche con il nuovo controller.



## 5.7 Produzione dei componenti



**Per la stampa dei componenti** è stata impiegata una Wasp Delta 2040, una stampante FDM di medio-grande formato.

Una prima serie di componenti è stata prodotta in PLA, materiale molto comune oggi nell'ambito delle stampanti consumer e semi-professionali. I primi pezzi stampati sono stati il case, la scatola contenente l'elettronica, e una primissima versione del braccio. Ad entrambi sono state apportate diverse modifiche prima di giungere alle rispettive soluzioni finali.

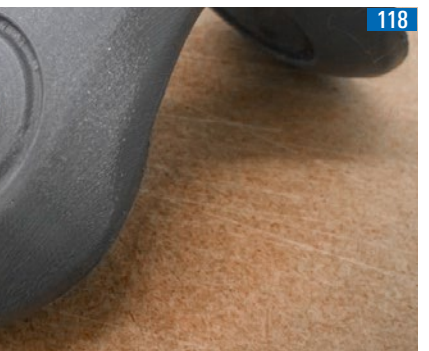
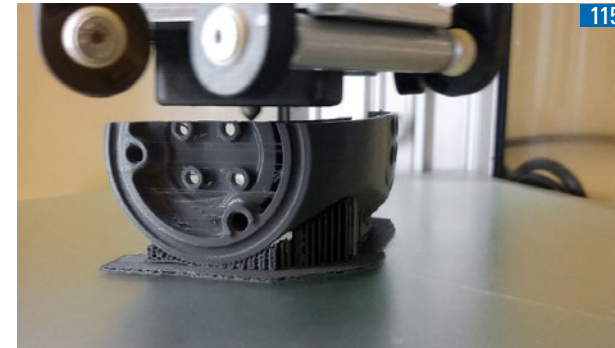
**110-111. Il case nella camera di stampa** è stato posizionato verticalmente per aumentare la resistenza di uno dei punti più sollecitati del gimbal: i supporti del perno in acciaio utilizzato per agganciare il dispositivo al case della GoPro. Gli strati di materiale, orientati parallelamente rispetto all'incavo cilindrico (vedi 113.), ne irrigidiscono la struttura, evitandone in questo modo la rottura.

**112. Il case ultimato** ripulito dal materiale di supporto.

**113. Le sedi di inserimento del perno:** è possibile notare gli strati paralleli alle nervature.

**114. Dettaglio della parete posteriore** in cui è possibile notare l'incavo per la guarnizione O-ring, le sedi per gli inserti filettati, i fori di montaggio del motore (rialzati, al centro) e i fori per l'aerazione del controller, previsti in via precauzionale.

**115. Il braccio in fase di stampa** orientato orizzontalmente rispetto al piano.



**116. I supporti esterni del braccio** sostengono la superficie curva alla base del pezzo. In questa prima stampa, si tratta degli unici supporti realizzati. All'interno della cavità del braccio, come si vedrà anche più avanti, non sono necessari, perché la geometria si auto sostiene. Tuttavia, nelle zone di inserimento dei motori la mancanza di materiale di supporto ha generato difetti non trascurabili (vedi 119-120.).

**117-118. Differenze nella qualità della**

**superficie stampata** visibili nel confronto tra la parte superiore e quella inferiore. Quest'ultima (117.) risulta più grossolana a causa del contatto tra il materiale di supporto e la superficie. La superficie superiore, al contrario, non presenta difetti.

**119. Difetti nella parte interna superiore** dovuti alla mancanza di materiale di supporto durante la costruzione della sede del motore. Come è facile notare, la sommità della sede della guarnizione O-ring risulta compromessa.

**120. I difetti sono minori nella sede del motore laterale** tuttavia la sede dell'inserto superiore presenta alcune deformazioni.

**Nella seconda fase di stampa** è stato impiegato un materiale differente: una variante sperimentale di PLA denominato "PLA Layer". La scelta è stata effettuata in virtù di una migliore predisposizione del materiale alla resa dei dettagli. Inoltre, la colorazione nera è stata ritenuta adatta alla tipologia di prodotto, molto in linea con un linguaggio tecnico e sportivo.



121



122



123



124



125

**121. Il braccio nella camera di stampa;** i supporti, questa volta, riempiono le sedi dei motori sostenendone la parete interna nella parte superiore.

**122-123. La parte superiore del braccio** presenta una superficie di qualità molto omogenea.

Nella parte inferiore, sono ancora presenti i difetti dovuti al contatto con la struttura di supporto. Tuttavia, rispetto alla prima versione, risultano meno evidenti.

**124. Per la seconda stampa della scatola** non sono stati apportati cambiamenti significativi. Le uniche modifiche effettuate hanno riguardato la distribuzione dei fori di aerazione nella parete posteriore. L'orientamento dei layer è rimasto invariato rispetto alla versione precedente.

**125. Dettaglio della parete posteriore** che denota una migliore qualità nella stampa dei particolari di piccole dimensioni. Si veda, per un confronto, l'immagine 114, a pagina precedente.

**126. L'elemento di chiusura del secondo motore** è stato orientato parallelamente rispetto al piano di stampa. In questo modo, i supporti hanno poggiano solo internamente, evitando di generare imperfezioni sulla superficie esterna.

**127. Sede dell'unità IMU** secondaria: posizionamento all'interno della scocca.

**128. Unità IMU secondaria**, sensore posizionato. Una volta inserito, non interferisce in alcun modo con la rotazione del motore.



126



127



128



130



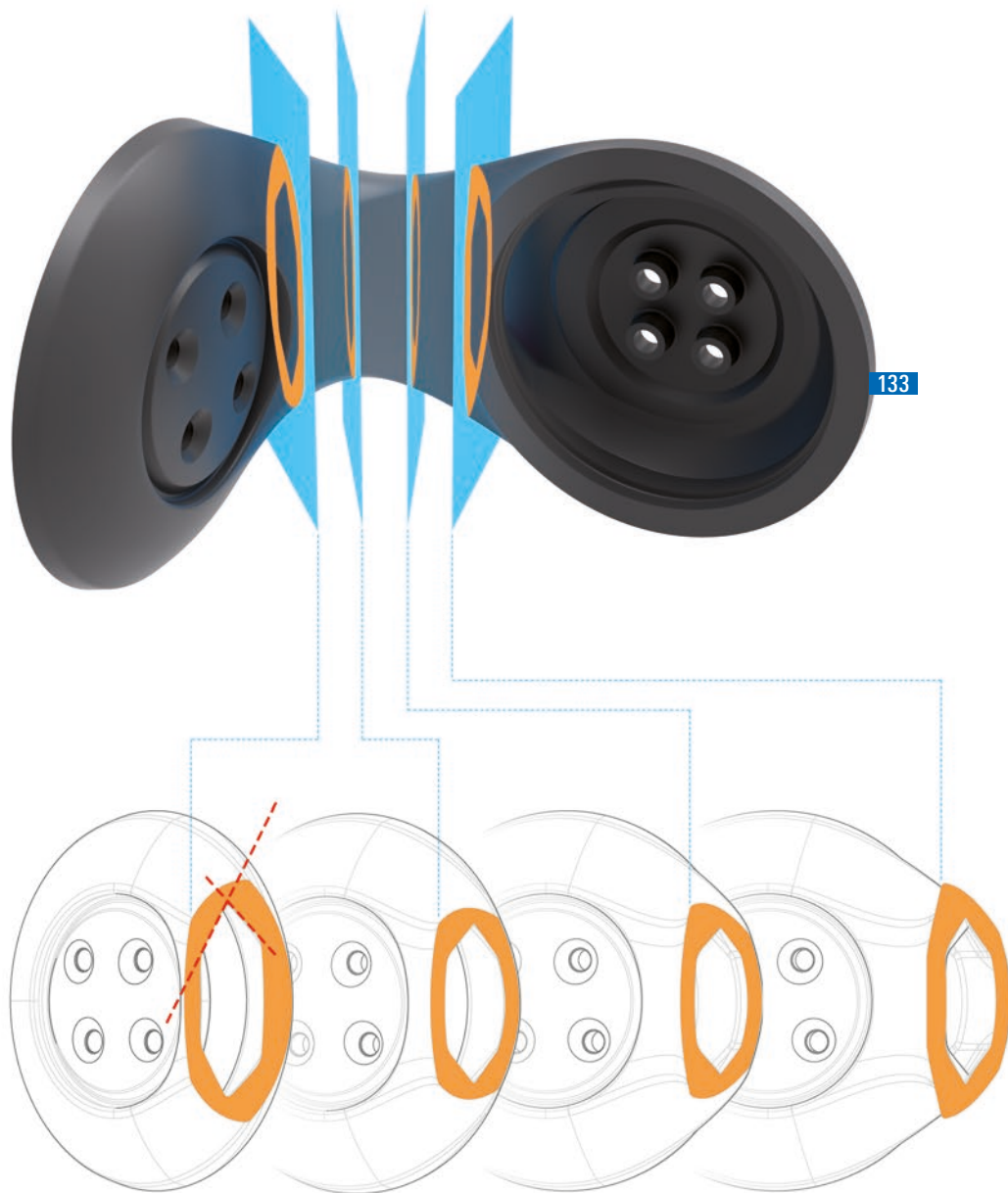
129



131



132



**129. L'aggancio intercambiabile** è stato stampato in orizzontale. Il sistema di nervature lo rende rigido; i lobi del gancio risultano leggermente flessibili ma non per questo deboli.

**130-134. Il telaio porta batterie** è stato orientato verticalmente rispetto al piano di stampa. Ciò ha permesso di inserire una coppia di supporti a "L" molto sottili, utilizzati per posizionare i connettori dei motori in una posizione prestabilita all'interno della scatola (vedi 136.).

**133. Il braccio di collegamento tra i motori** è un esempio di maggiore funzionalità raggiunta tramite l'impiego di una geometria complessa. Si tratta di un pezzo monolitico cavo, non realizzabile con metodi di produzione tradizionali. Un elemento chiuso avrebbe semplificato l'assemblaggio e garantito naturalmente la propria impermeabilità. Non vi sarebbe stato bisogno di impiegare guarnizioni e snap-fit per unire due o più scocche complementari. Per questa motivazione, e per sperimentare la validità dell'impiego di una

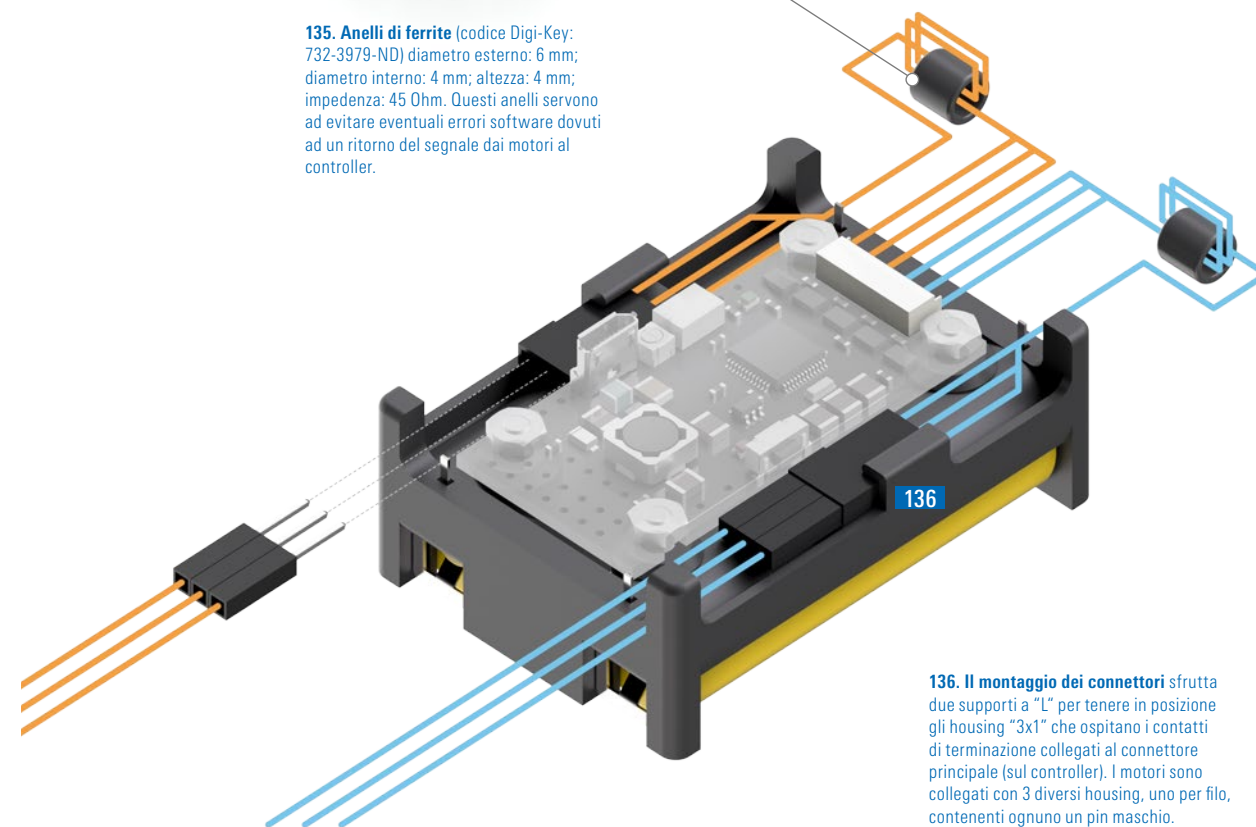
geometria così complessa nell'ambito di una produzione in stampa 3D, si è optato per questa soluzione. Ciò ha richiesto una serie di adattamenti; il più importante, la necessità di occuparsi della progettazione della geometria interna del componente. La sezione mostra come sia stata adottata una geometria in grado di auto-sostenersi, stampabile senza l'ausilio di supporti, altrimenti impossibili da rimuovere. Le linee rosse evidenziano un angolo di sbalzo compatibile con una "crescita" del pezzo non adjuvata da strutture supplementari.



**134. La sede dell'unità IMU** è stata ricavata nel bordo interno dell'elemento che sostiene il motore del pitch. Trovare un posizionamento adeguato per il sensore ha richiesto numerose prove. La sua posizione avrebbe dovuto risultare compatibile con la presenza, praticamente nello stesso spazio, del motore e delle poppette per l'inserimento delle viti di fissaggio. La soluzione ipotizzata prevede che il sensore occupi una delle anse che caratterizzano l'esterno del rotore, la quale circonda uno spazio vuoto sufficiente ad ospitarlo.

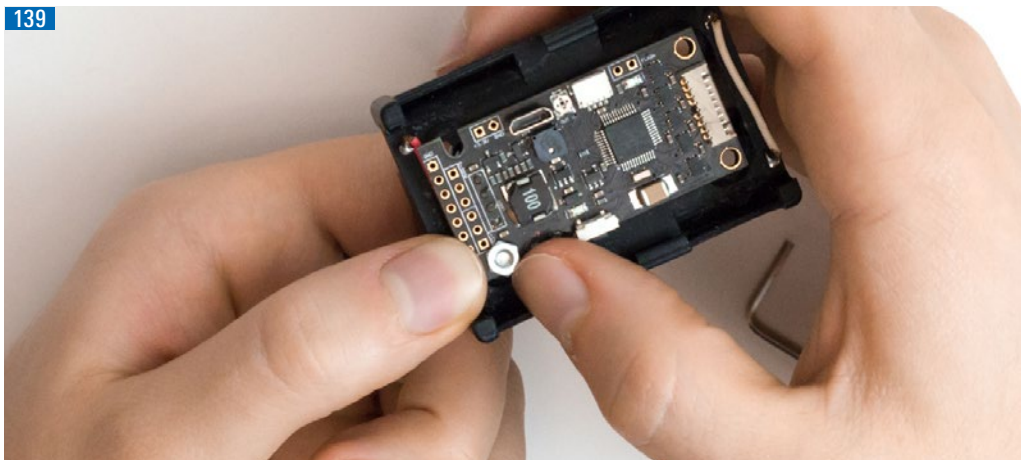
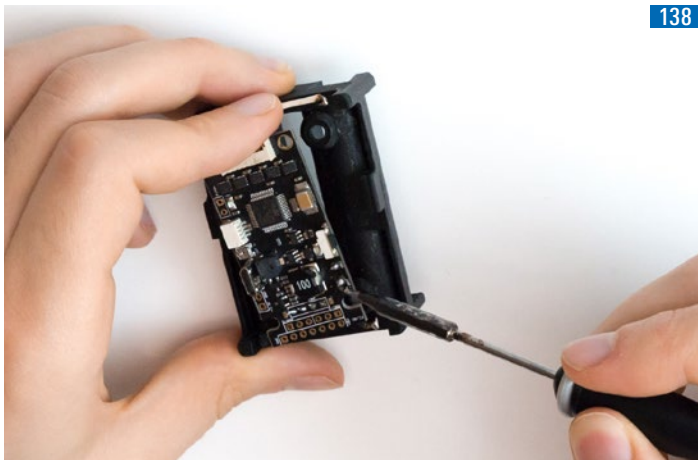
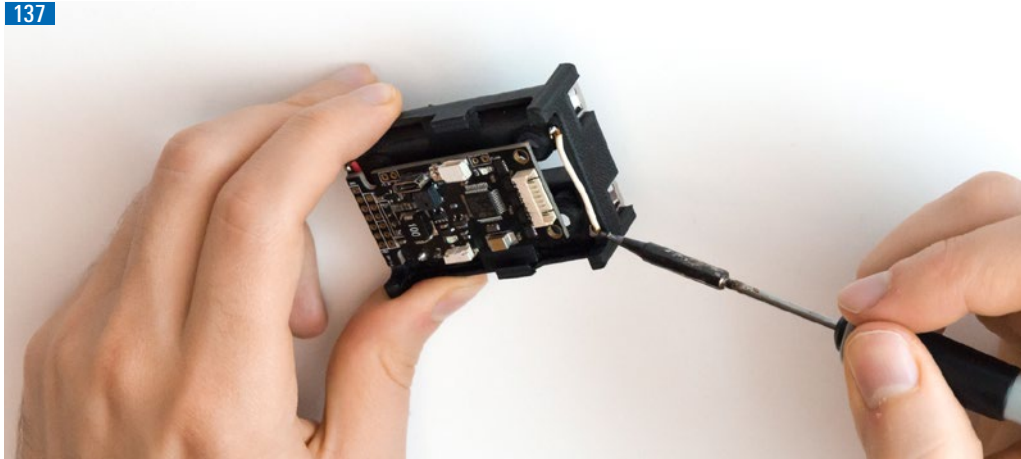


**135. Anelli di ferrite** (codice Digi-Key: 732-3979-ND) diametro esterno: 6 mm; diametro interno: 4 mm; altezza: 4 mm; impedenza: 45 Ohm. Questi anelli servono ad evitare eventuali errori software dovuti ad un ritorno del segnale dai motori al controller.



**136. Il montaggio dei connettori** sfrutta due supporti a "L" per tenere in posizione gli housing "3x1" che ospitano i contatti di terminazione collegati al connettore principale (sul controller). I motori sono collegati con 3 diversi housing, uno per filo, contenenti ognuno un pin maschio.

## 5.8 Assemblaggio dell'elettronica



139

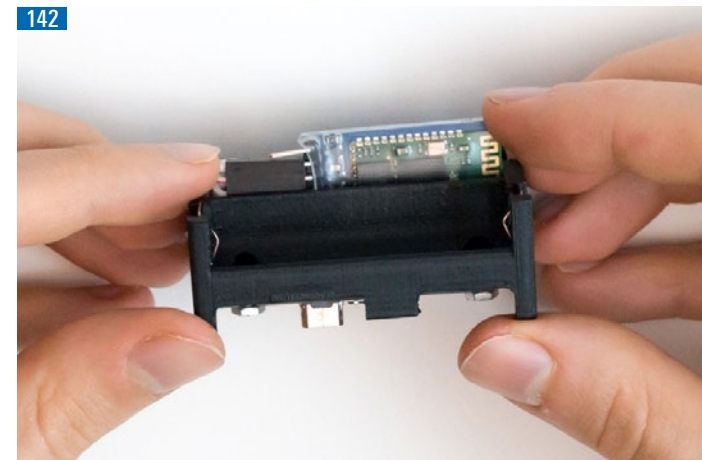
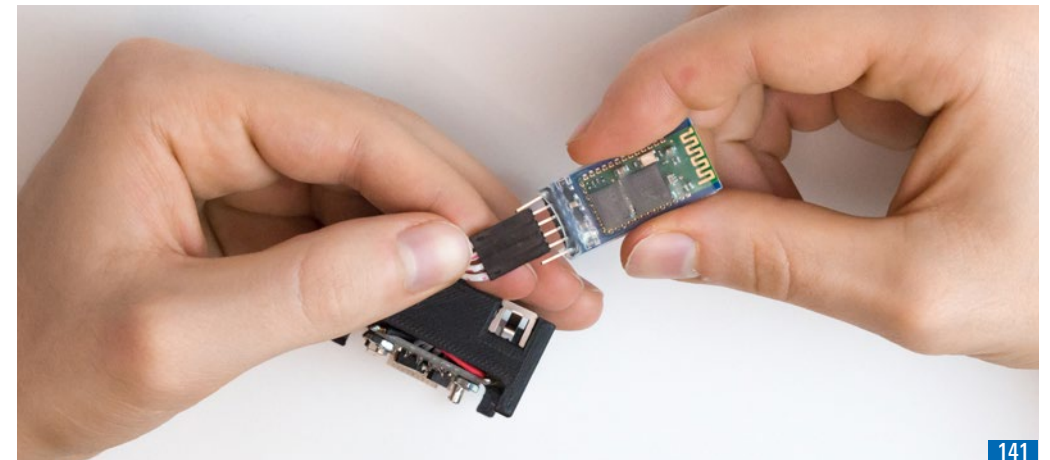
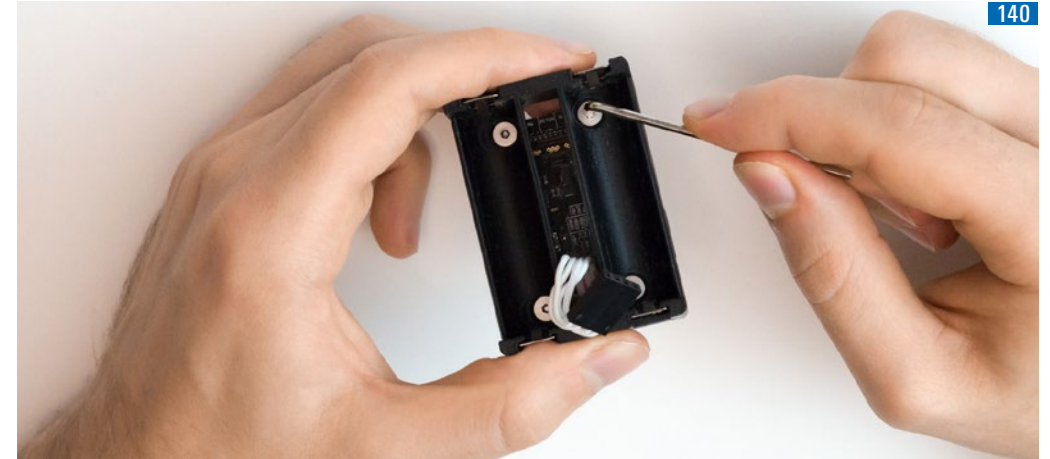
138

Nel paragrafo seguente saranno descritti i principali passaggi inerenti il montaggio della parte elettrica.

**137. Saldatura del ponte** che collega i contatti delle batterie: operazione necessaria per operare il collegamento in serie e raggiungere una tensione di alimentazione di 7,4 volt.

**138. Saldatura degli spezzoni di filo** che portano l'alimentazione dal circuito delle batterie al controller.

**139. Il fissaggio della scheda elettronica** al telaio avviene mediante l'utilizzo di 4 viti M3 a testa svasata e altrettanti dadi. Nella foto è visibile il primo dado mentre viene avvitato.



142

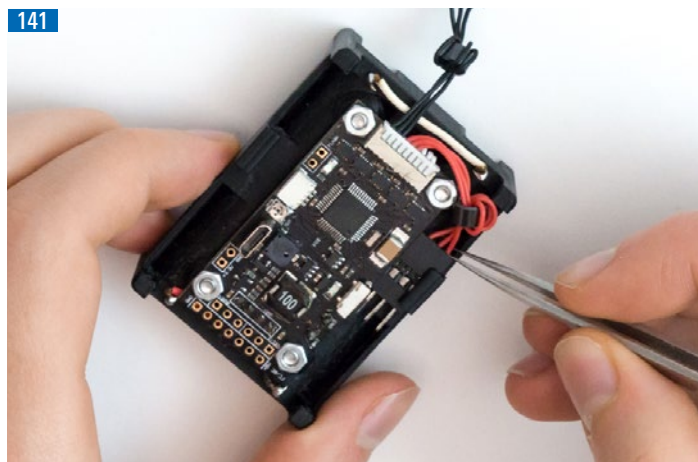
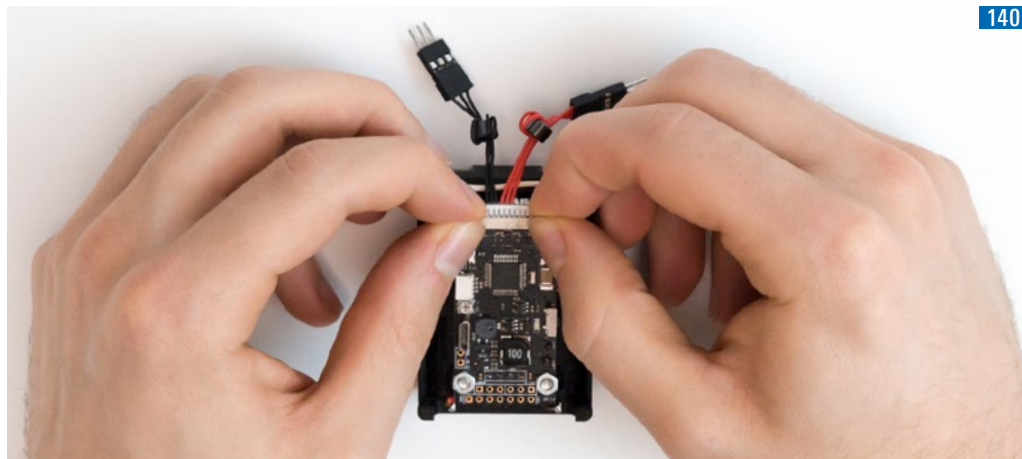
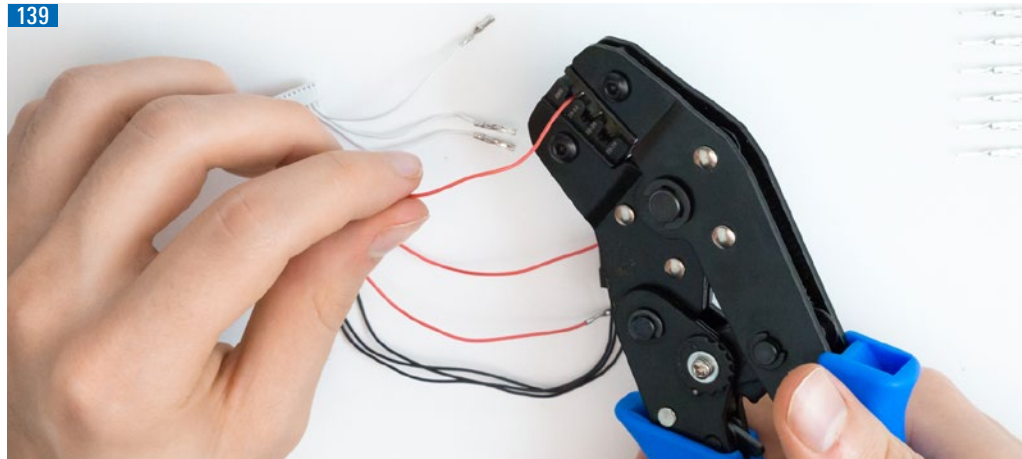
140

141

**140. Serraggio delle viti** per il fissaggio della scheda. La testa delle viti è svasata: scomparendo al di sotto della plastica non interferisce con le batterie.

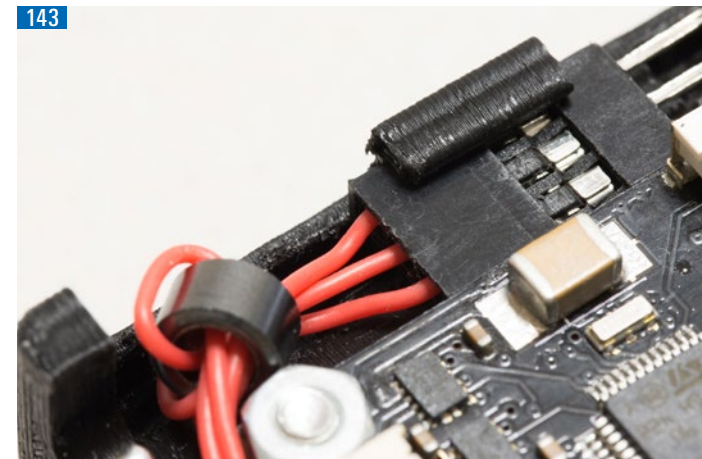
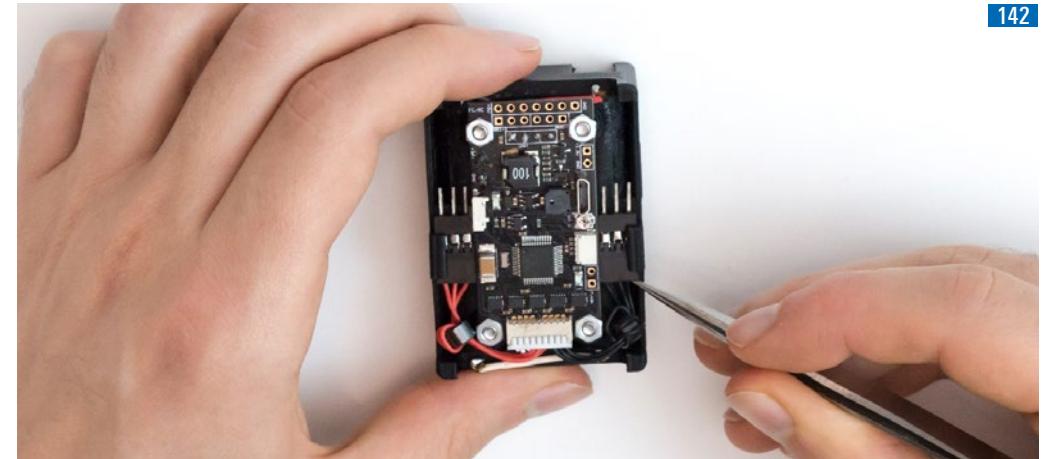
**141. Collegamento del modulo Bluetooth** alla scheda mediante un classico connettore Dupont a 4 slot. I cavi del connettore sono stati precedentemente saldati al controller, prima che venisse fissato al telaio e collegato al circuito di alimentazione.

**142. Inserimento del modulo Bluetooth** nell'intercapedine presente tra le batterie. Nello spazio a disposizione vengono alloggiati anche i cavi di collegamento: occupando una parte del volume disponibile, contribuiscono a tenere fermo il modulo all'interno della cavità.



**139. La preparazione del connettore** è avvenuta in diversi passaggi. I fili adibiti al controllo del terzo motore, non necessari in questo progetto, sono stati troncati. Quelli adibiti al controllo dei motori effettivamente utilizzati, invece, sono stati inseriti negli anelli di ferrite, effettuando per ognuno un paio di avvolgimenti intorno all'anima toroidale del componente. Successivamente, sono stati aggiunti agli estremi di ogni filo i contatti a crimpare, con l'ausilio di una pinza specialistica (vedi foto). Ogni terminazione, infine, è stata inserita nell'apposita sede del rispettivo housing.

**140. Il connettore assemblato** è stato inserito nell'apposito alloggiamento, collocato su uno dei lati corti del controller.



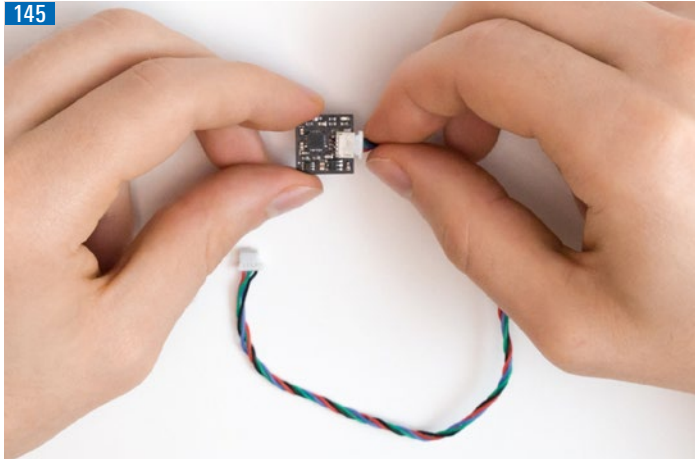
**141-142. Inserimento dei connettori** Dupont nei supporti a "L" laterali. Fermare i connettori in una posizione prestabilita era una condizione indispensabile per inserire il telaio all'interno della scatola principale mantenendo un certo ordine nella disposizione interna dei cavi.

**143. Vista di dettaglio** di uno dei connettori in posizione. È possibile notare gli avvolgimenti dei cavi intorno all'anima toroidale di ferrite.

**144. L'inserimento delle pile** andrebbe effettuato dopo aver posizionato un nastro di stoffa alla base degli alloggiamenti. In questo modo, l'estrazione viene facilitata, specialmente quando il telaio si trova già all'interno della scatola del gimbal.



## 5.9 Assemblaggio del gimbal



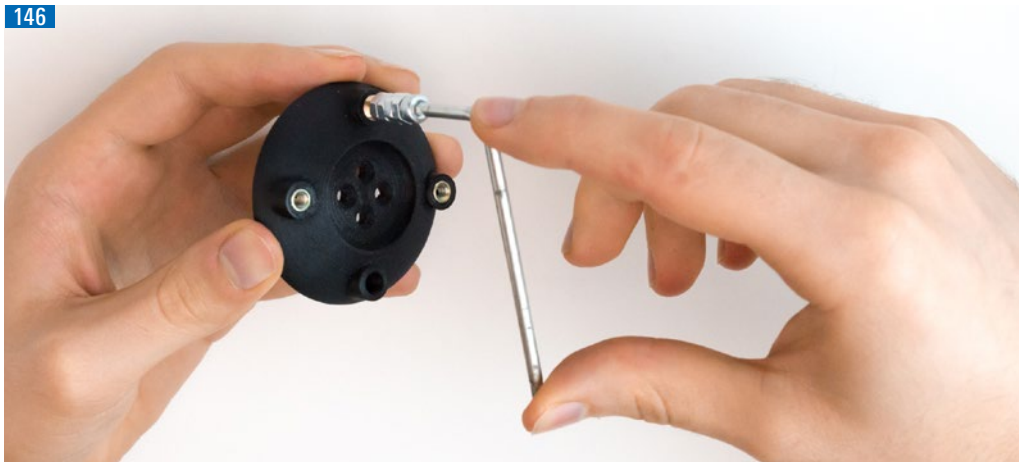
145

Nel paragrafo seguente sarà descritto il montaggio passo passo del dispositivo.

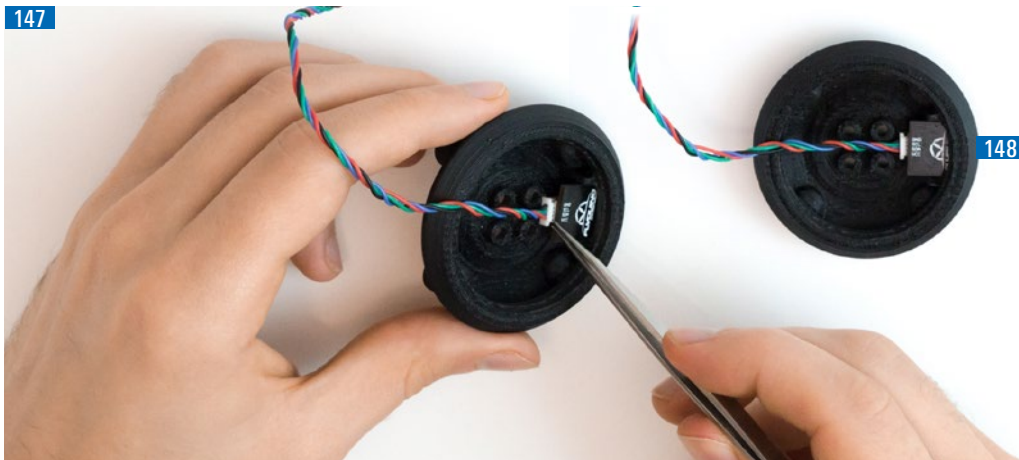
**145. Inserimento dello spinotto** del cavo dell'accelerometro. Il cavo è stato attorcigliato per schermare il segnale dalla possibile azione di disturbo dei fili di controllo dei motori (molto vicini all'interno della cavità del braccio).

**146. Inserimento degli inserti auto-maschianti** necessari all'assemblaggio del gancio esterno. Questa operazione è stata effettuata servendosi di una vite e quattro dadi; indispensabili per impedire la rotazione dell'inserto lungo la filettatura.

**147-148. Inserimento dell'unità IMU** nella sua sede, con lo spinotto già inserito.



146



147

148



149



150

**149. Posizionamento della guarnizione V-ring** intorno al secondo motore (pitch). La sua elasticità la fa aderire alle pareti del rotore. Evitando che tra i due possa infiltrarsi dell'acqua.

**150. La guarnizione V-ring** calzata ad elastico sul motore.

**151. Passaggio del connettore** dell'unità IMU attraverso il motore.

L'operazione è da compiere servendosi di un cacciavite o di un punteruolo, per spingere il connettore dall'altra parte del foro.



151

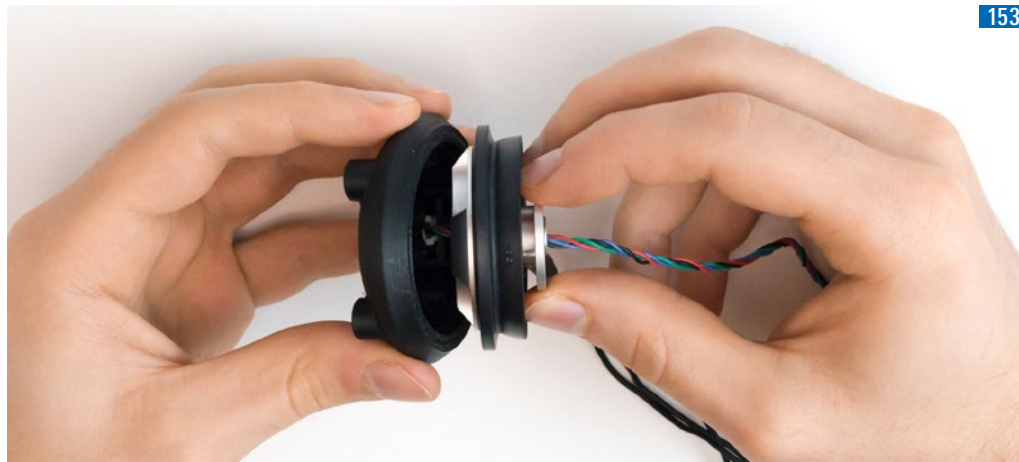
**152. Estrazione del connettore** dall'altro lato del perno. Il motore è pronto per essere unito al proprio elemento di copertura, collocando il sensore in uno degli spazi vuoti del rotore.

**153. Accoppiamento del motore** con il proprio elemento di copertura e sostegno. Per assicurarsi di effettuare un buon accoppiamento occorre effettuare delle piccole rotazioni del motore per verificare che il sensore sia posizionato correttamente nello spazio a lui dedicato.

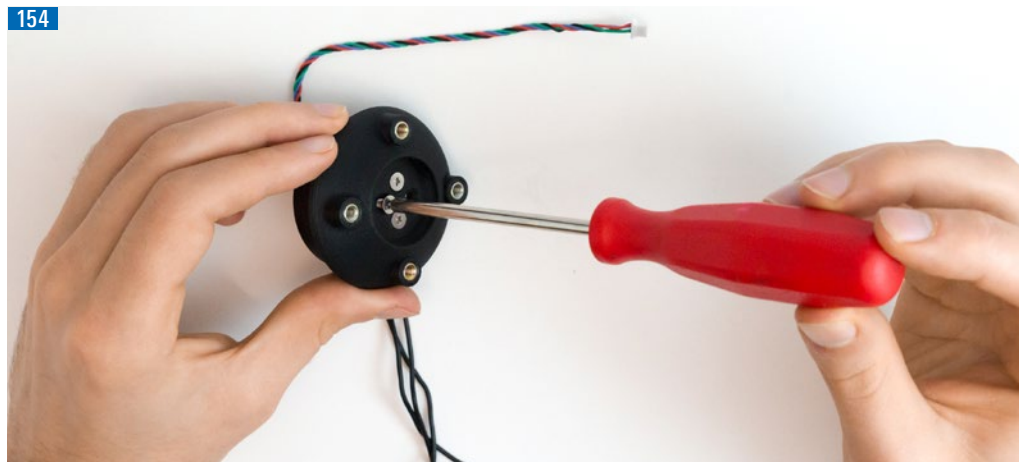
**154. Fissaggio del motore** all'elemento di copertura. Per l'assemblaggio sono state impiegate 4 viti a tenuta APM Hexseal di misura M3x8 (mm) (vedi 070. a pag. 54).



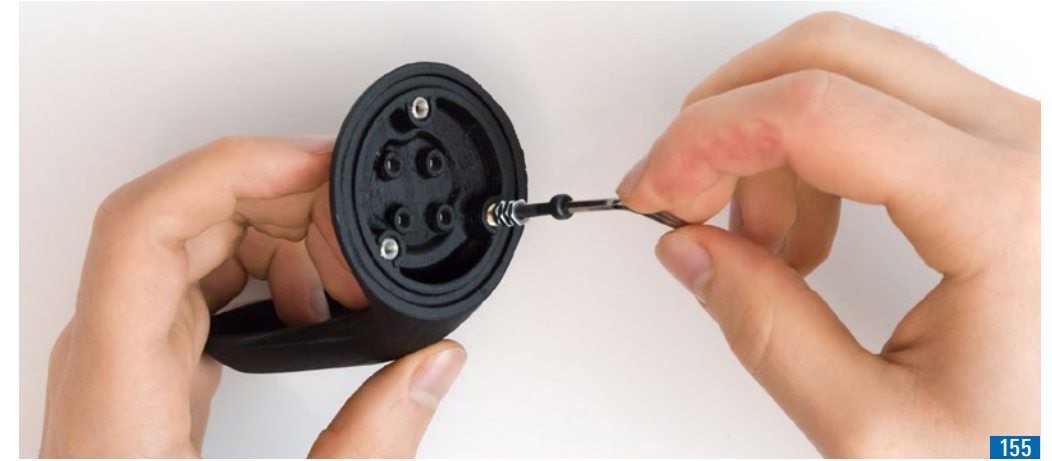
152



153



154



155



156



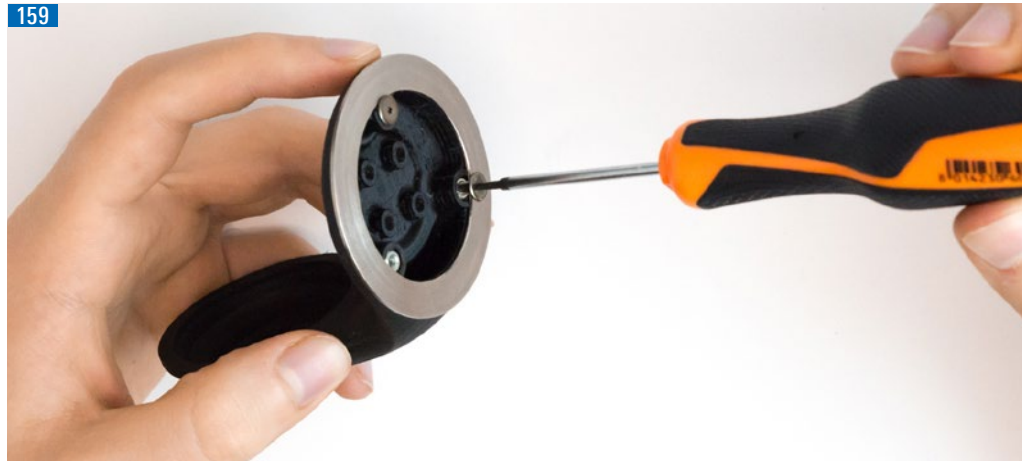
157

158

**155. Inserimento degli inserti auto-maschianti** nel braccio del gimbal.

**156-157. Posizionamento della rondella in acciaio** funzionale allo scorrimento delle guarnizioni V-ring.

**158. L'assieme provvisorio del braccio** con gli inserti già posizionati e la rondella pronta per essere fissata.



159

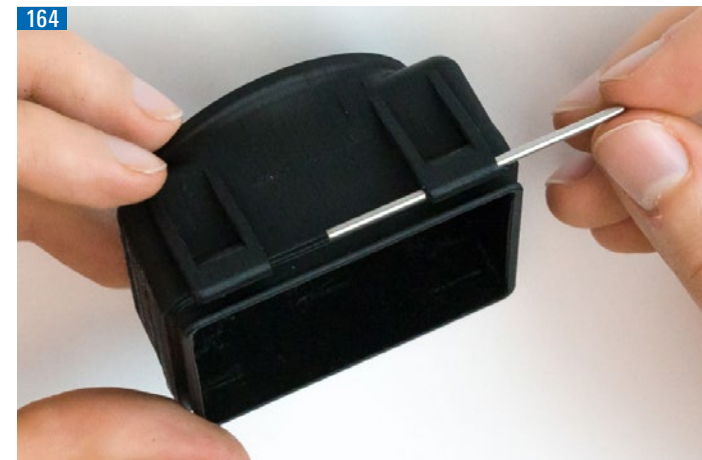
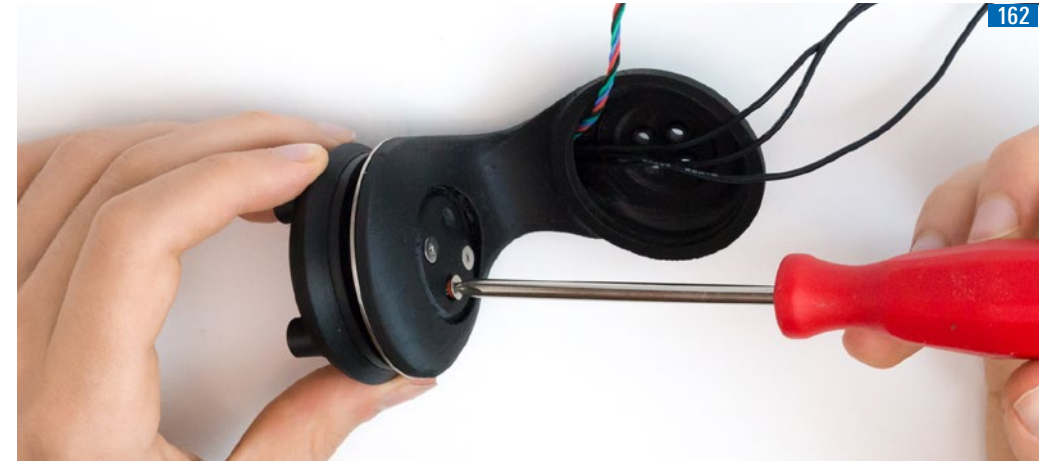
160

**159. Per fissare le rondelle** sono state impiegate viti a testa ultrabassa. Come visto in precedenza (vedi 089. a pag.61), questa vite è in grado di non ostacolare la rotazione del motore e della guarnizione V-ring, che rimane sempre in contatto con la superficie metallica, senza subire interferenze.

**160. Passaggio dei cavi all'interno del braccio;** sia quelli del sensore, sia quelli del motore.

**161. Accoppiamento dei due sub-assiemi** durante il quale occorre posizionare il cavo dell'unità IMU tra le poppette delle viti di fissaggio del motore. La guaina isolante che raggruppa i fili dei motori deve essere inserita nella cavità del braccio.

161



162

163

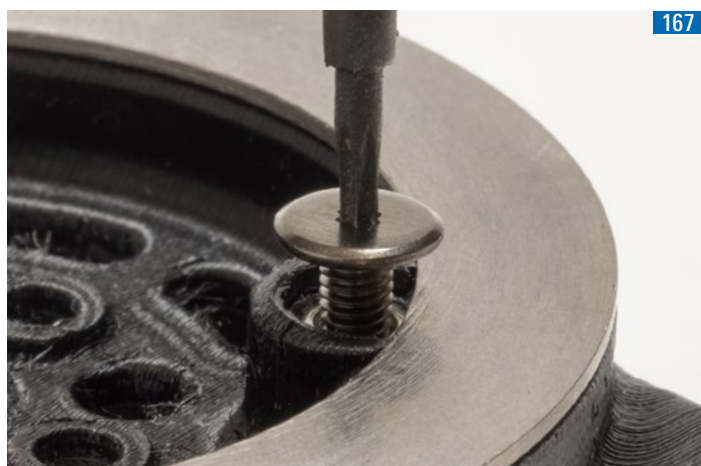
164

**162. Fissaggio del motore** al braccio. Per l'assemblaggio sono state impiegate 4 viti a tenuta APM Hexseal di misura M3x8 (mm) (vedi 070. a pag. 54).

**163. Inserimento degli inserti filettati** nelle sedi collocate nella parte posteriore della scatola principale in corrispondenza della sede del primo motore. Per avvitarli è stato utilizzato lo stesso metodo adottato in precedenza.

**164. Inserimento del perno metallico** nelle staffe di sostegno. Prima di inserirlo, i fori sono stati puliti dai residui della stampa, passandovi all'interno una punta da trapano da 2 mm.





165

166

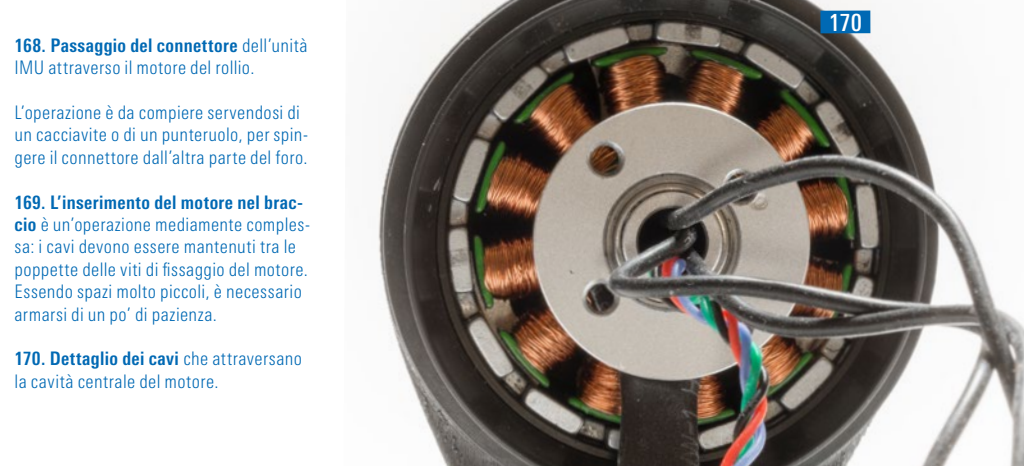
167

**165. Accoppiamento della seconda rondella** alla scatola del gimbal.

**166. Per fissare la rondella** sono state utilizzate le stesse viti a testa ultrabassa impiegate per la rondella del braccio.

**167. Dettaglio dell'inserimento della vite** nell'inserto filettato. Il diametro abbondante della testa della vite, fa sì che vada a sovrapporsi alla rondella, esercitando su di essa una pressione.

Le sedi degli inserti filettati presentano, in alto, una sorta di "C" rilevata, che evita possibili traslazioni della rondella. Il vincolo di traslazione imposto dalle "C" e la pressione esercitata dalle viti tengono ferma la rondella.



**168. Passaggio del connettore** dell'unità IMU attraverso il motore del rollio.

L'operazione è da compiere servendosi di un cacciavite o di un punteruolo, per spingere il connettore dall'altra parte del foro.

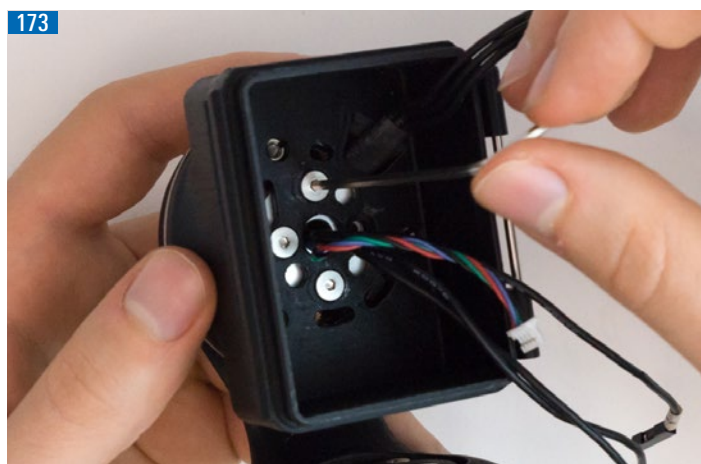
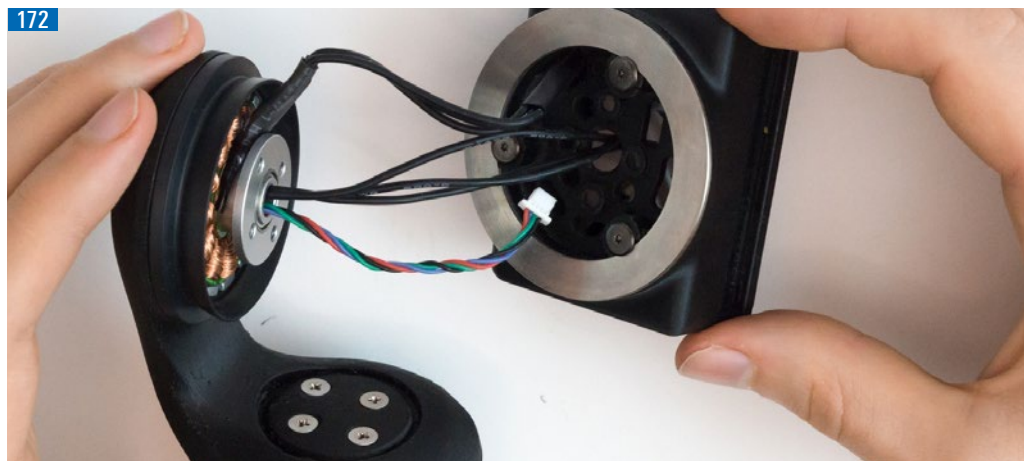
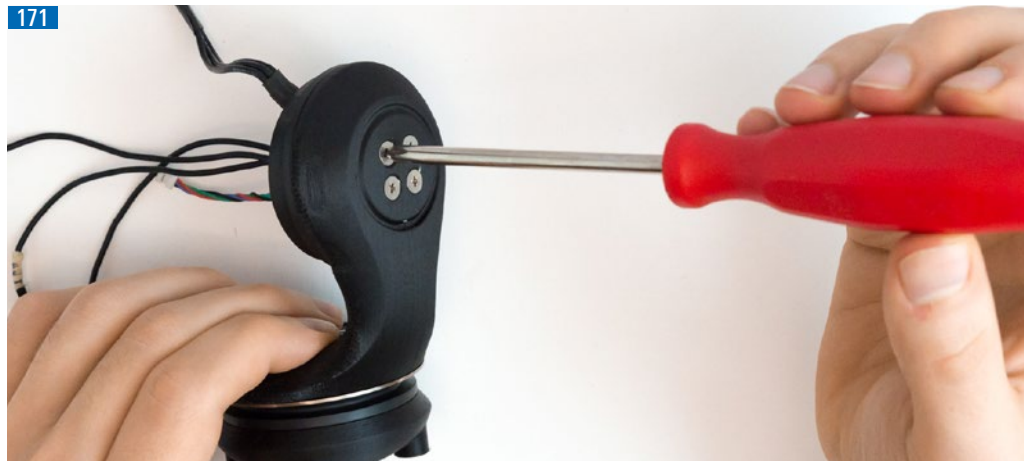
**169. L'inserimento del motore nel braccio** è un'operazione mediamente complessa: i cavi devono essere mantenuti tra le poppette delle viti di fissaggio del motore. Essendo spazi molto piccoli, è necessario armarsi di un po' di pazienza.

**170. Dettaglio dei cavi** che attraversano la cavità centrale del motore.

168

169

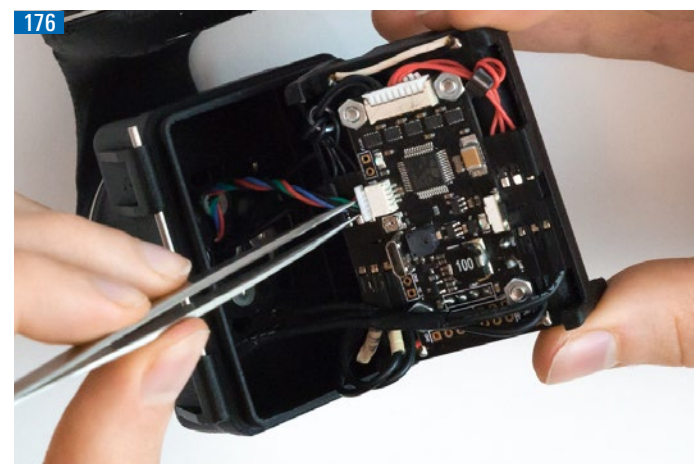
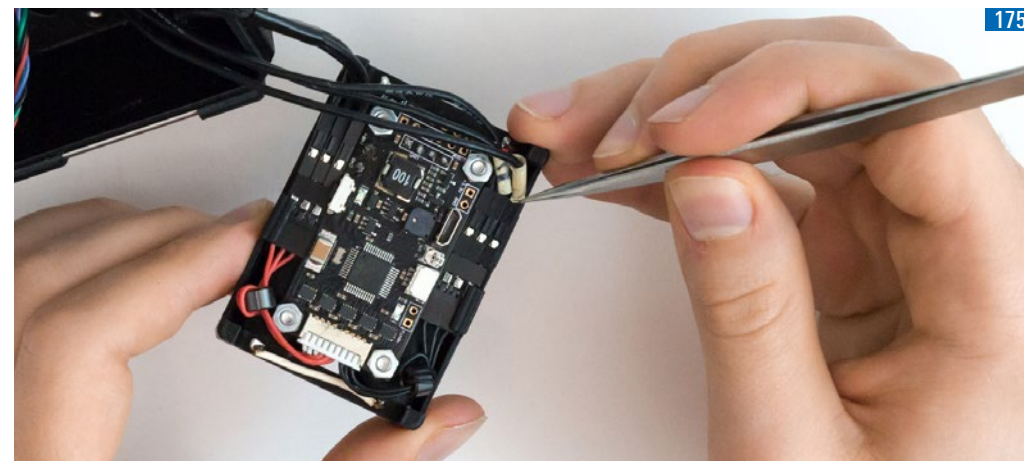
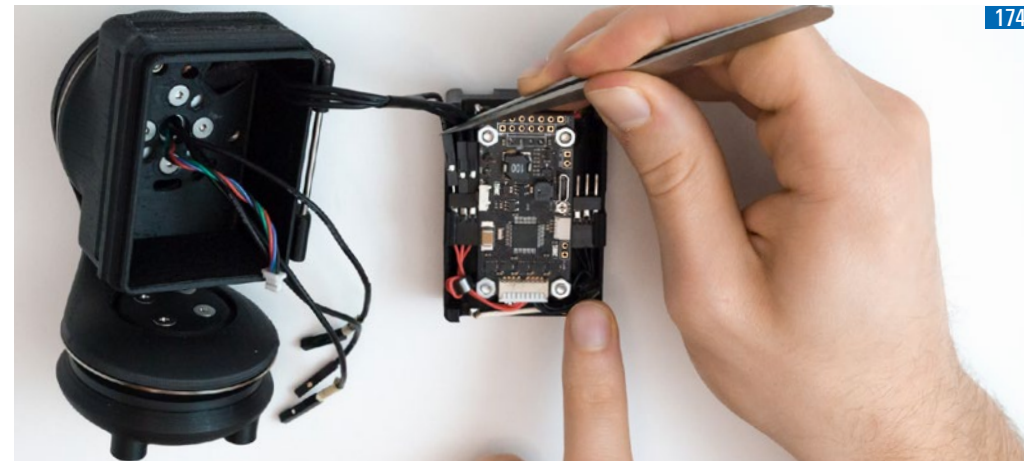
170



**171. Fissaggio del motore al braccio.** Per l'assemblaggio sono state impiegate 4 viti a tenuta APM Hexseal di misura M3x8 (mm) (vedi 070. a pag. 54).

**172. Inserimento dei cavi all'interno della scatola principale.** I cavi del sensore secondario e del secondo motore passano attraverso un foro centrale mentre quelli del motore 1 da un foro decentrato. Per consentirne l'inserimento, la guaina termorestringente che raggruppa i cavi del primo motore deve piegare verso l'interno.

**173. Accoppiamento della scatola e del braccio.** Per l'assemblaggio sono state impiegate 4 viti a testa piatta e cava esagonale di misura M3x8 (vedi 077. a pag. 55).



**174. Collegamento del primo motore.** I fili sono stati intestati con un contatto maschio, successivamente inserito all'interno di un alloggiamento 1x1. L'ordine di collegamento degli estremi è ininfluente: è sufficiente che sia collegato al centro il filo mediano (è il firmware a stabilire il senso della rotazione, indipendentemente dall'ordine seguito).

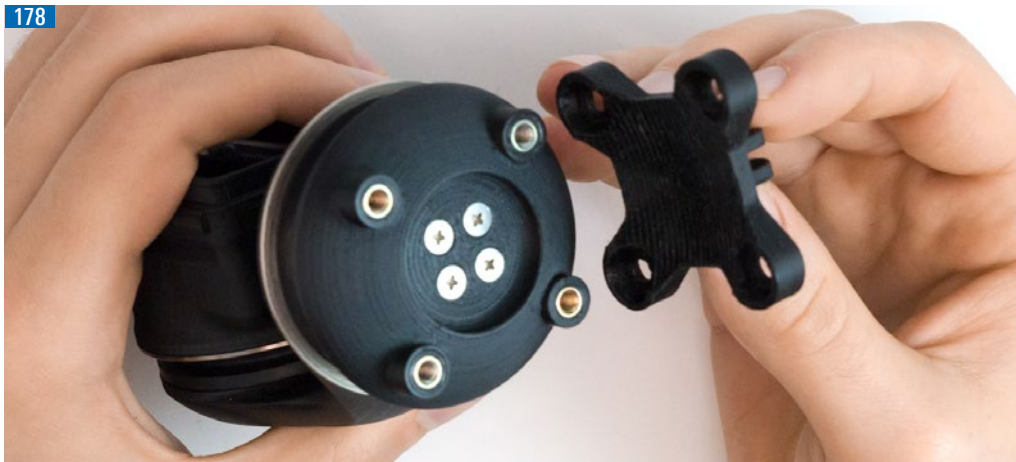
**175. Collegamento del secondo motore.** I fili sono stati segnati per poter individuare quello centrale.

**176. Inserimento del connettore del sensore supplementare.** Si tratta di un connettore piuttosto piccolo; l'operazione, quindi, può richiedere un po' di pazienza e qualche tentativo.

177



178



179



**177. Una volta collegati i cavi è possibile inserire il blocco dell'elettronica all'interno del gimbal. Per questa versione del prototipo la lunghezza dei cavi non è stata regolata in modo preciso. Per questo motivo l'eccedenza dei fili può causare qualche resistenza.**

**178. Accoppiamento del gancio esterno all'elemento di chiusura del gimbal, in prossimità del secondo motore.**

**179. Fissaggio del gancio al dispositivo. Per l'assemblaggio sono state impiegate 4 viti a testa piatta con intaglio a croce di misura M4x10 (mm) (vedi 097. a pag. 65).**

180



181



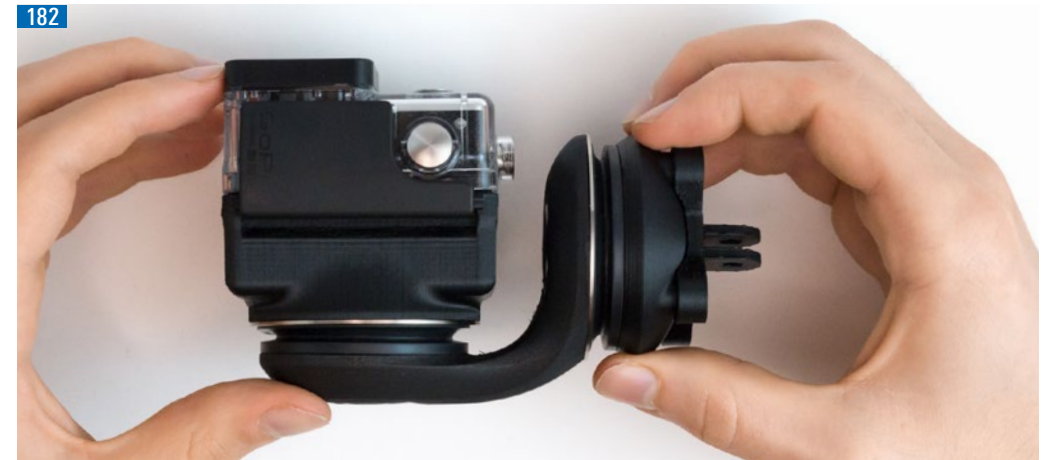
**180. Accoppiamento del gimbal al case waterproof della GoPro. Il perno metallico si inserisce negli snapfit situati alla base della custodia.**

**181. Inserimento della GoPro all'interno del case protettivo.**

**182. Assemblaggio del dispositivo completo. Per accenderlo è indispensabile chiuderlo con le batterie già inserite.**

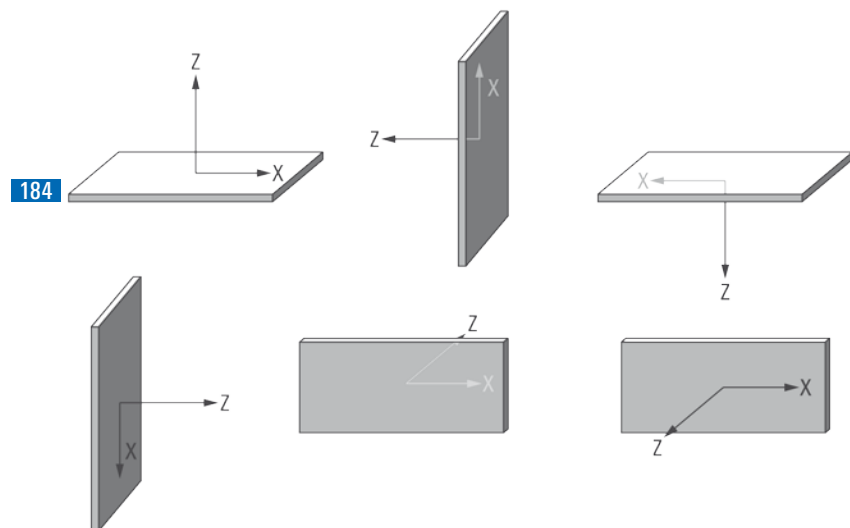
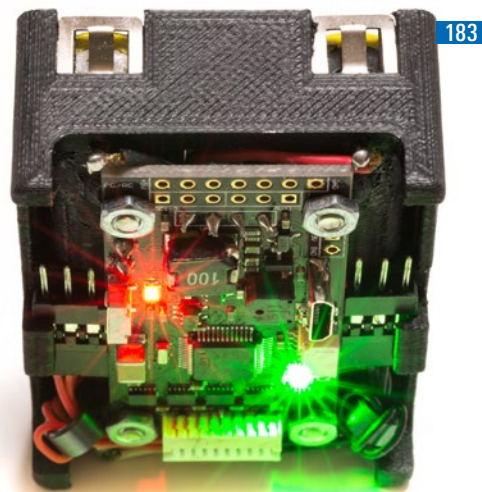
**Nota:** nelle fasi descritte non sono state mai menzionate le guarnizioni O-ring. Le tolleranze adottate non sono risultate compatibili con la tecnologia di produzione scelta. Per poterle montare sarebbe stato necessario aumentare alcune delle dimensioni fin qui ipotizzate.

182



## 5.10 Calibrazione IMU

Una volta completato l'assemblaggio, si è passati alla fase di test. Far funzionare il dispositivo ha richiesto una serie di settaggi: la calibrazione delle unità IMU è stata il primo passaggio da effettuare. Si tratta di una procedura guidata il cui scopo è determinare l'orientamento dei sensori. Una volta definito, il controller può impostare una posizione di partenza; un riferimento per avviare la stabilizzazione. Per il sensore integrato nel controller, l'operazione va effettuata con la scheda collegata al computer, via bluetooth o via usb, ma con il blocco dell'elettronica separato dal gimbal. Tutti i passaggi sono gestiti attraverso un software fornito dall'azienda produttrice della scheda. Per effettuare la calibrazione occorre posizionare il controller immaginando di appoggiarlo alle 6 facce di un cubo, dando conferma dopo ogni step. L'operazione si conclude con la definizione delle direzioni "su" e "destra". Gli stessi passaggi vanno poi effettuati per il secondo sensore.



**183. La calibrazione delle unità IMU** va effettuata previa estrazione del blocco dell'elettronica dal gimbal. Per questo motivo è stato progettato per essere facilmente scollegabile ed estraibile.

Una volta separato, può essere collegato ad un computer attraverso un cavo usb, con le pile disinserite; oppure attraverso il bluetooth, a batterie collegate. La forma a parallelepipedo rende semplice appoggiarlo al piano nelle sei posizioni richieste; passaggio fondamentale per determinare

l'orientamento nello spazio del giroscopio. Per quanto riguarda l'unità IMU esterna, può essere fissata ad un cubetto, o semplicemente appoggiata ad ogni faccia, dando un "ok" dopo ogni cambio di posizione.

L'importante è che il sensore sia sempre collegato al controller durante questa fase. Vi sono molte opzioni per una calibrazione precisa dei sensori; ad esempio dipendente dalla temperatura esterna. Questa descritta è la procedura base, di norma sufficiente per un corretto funzionamento.

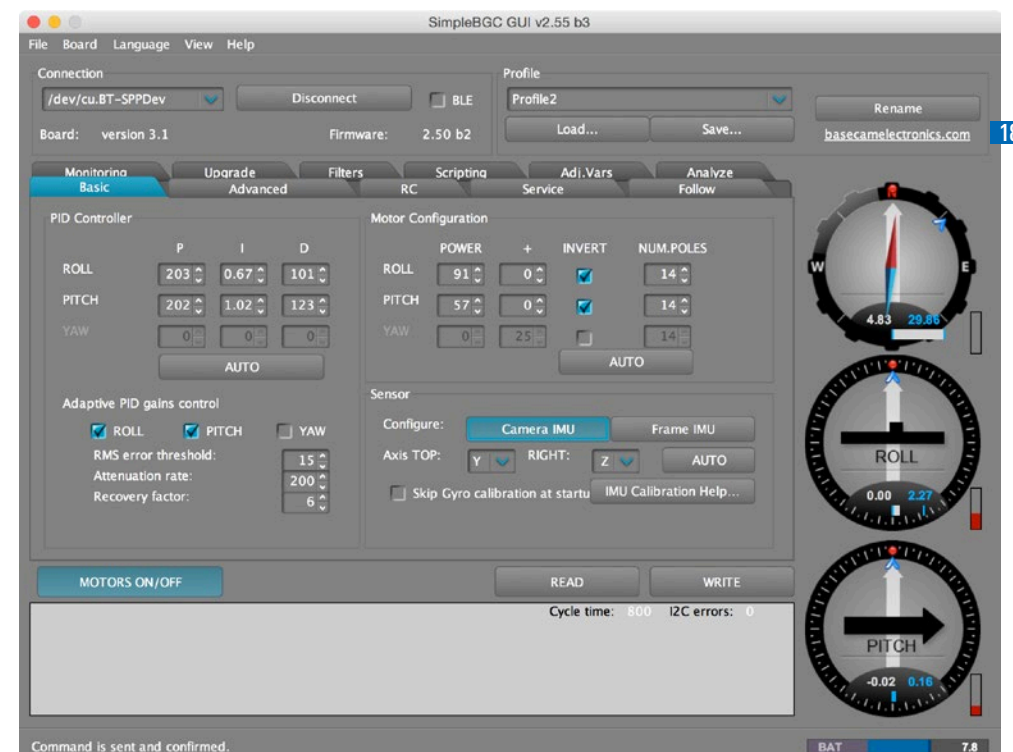
**184. Schema delle posizioni** da seguire per la calibrazione di entrambe le unità IMU. Ad ogni step va data una conferma via software, premendo un tasto di avvenuta lettura.

**185. L'interfaccia utente del software** Simple BGC (lato pc). I settaggi che è possibile effettuare sono numerosi e organizzati in molti tab. Le variabili P, I e D sono visibili a sinistra; la definizione dei rispettivi valori va effettuata per ogni motore collegato.

## 5.11 Setup del firmware

Il setup del firmware è un passaggio più articolato ed è fondamentale per ottenere un buon funzionamento del gimbal. Il cuore del setup è costituito dalla determinazione dei valori di un tris di variabili, "P" "I" e "D". Prima però, occorre comunicare al controller il numero di poli dei motori collegati, la loro direzione di rotazione e la potenza che si desidera fornirgli. Il primo valore è un dato; i motori scelti per il progetto, ad esempio, hanno 12 magneti e 14 poli. Il secondo valore viene determinato in modo automatico, attraverso una breve procedura che fa ruotare i motori e ne deduce i collegamenti: il controller, in questo modo, capisce in che modo comandarli, come farli ruotare in senso orario e antiorario. Il terzo parametro, la potenza, più è basso, meglio è, perché fa durare di più le batterie; tuttavia deve essere sufficientemente alto per movimentare le parti del gimbal nelle condizioni di utilizzo previste. È un parametro che può essere modificato in ogni momento, a seconda delle situazioni.

P, I e D sono abbreviazioni di "proportional", "integral" e "derivative". Sono i tre parametri fondamentali che regolano l'algoritmo di stabilizzazione. L'algoritmo prevede che ad ogni ciclo sia valutato l'errore tra la posizione rilevata e la posizione "ideale", il target. Questo errore viene corretto, di un valore molto piccolo, ad ogni ciclo; e la determinazione di questo valore avviene per la combinazione delle tre operazioni matematiche citate sopra: proporzione, integrale e derivata. Ad ogni ciclo, la differenza tra il valore Px, rilevato, e P0 si assottiglia, fino ad annullarsi. Concretamente, P, I e D, correttamente assegnati, fanno sì che la stabilizzazione avvenga senza tremolii, incertezze ed error. Fortunatamente, da alcune versioni del firmware la procedura per determinare queste variabili è stata automatizzata. Il software si preoccupa di scandagliare tutti i valori possibili individuando la terzina migliore nel giro di un paio di minuti. A seguito di questa operazione il gimbal può essere utilizzato.



## 5.12 Test e criticità evidenziate

A causa di alcune criticità emerse, la fase di setup del firmware ha interessato solamente il primo motore. Prima di proseguire, è stato necessario interrompere i test e ipotizzare nuove modifiche, da integrare in un terzo prototipo. In questa prima fase, quindi, non è stato possibile verificare il funzionamento di entrambi i motori ma solo valutare la solidità delle soluzioni ipotizzate e stilare un elenco delle modifiche da apportare.

Il principale problema evidenziato ha riguardato il sistema di guarnizioni V-ring e l'accoppiamento labbro flessibile-rondella. L'attrito generato dallo sfregamento tra la gomma e l'acciaio è risultato troppo elevato per essere vinto dalla coppia dei motori. In un primo momento, si è tentato di risolvere il problema applicando dei grassi lubrificanti, di varie viscosità, sia alla rondella che alla guarnizione. Sono state fatte un paio di prove, con diversi prodotti, ma la situazione è rimasta sostanzialmente invariata. Impiegando un lubrificante, i motori erano in grado di vincere l'attrito, ma non di farlo con la rapidità necessaria. Per questo motivo si è deciso di rivedere la zona relativa alle intercederini tra i motori e le scocche. V-ring e rondella metallica non hanno rappresentato una valida soluzione al problema delle infiltrazioni d'acqua.

La seconda problematica individuata è stata l'impossibilità di posizionare correttamente le guarnizioni O-ring collocate sopra i motori (vedi 086. a pag. 60). Le sedi ricavate nel braccio e nell'elemento di copertura non ne hanno permesso l'inserimento dal momento che le tolleranze del processo di stampa 3D FDM, di tipo non-professionale, hanno causato un restringimento delle sedi. Per risolvere l'inconveniente, probabilmente, sarebbe stato sufficiente adeguare le dimensioni alle tolleranze di stampa.

In ogni caso, l'impermeabilità del prodotto è una caratteristica riservata alle versioni del dispositivo realizzate con tecnologie di stampa più professionali. Probabilmente, nel caso di un fotopolimero stampato tramite Polyjet, il problema non sarebbe emerso.

la terza problematica ha riguardato il centro di gravità del dispositivo. All'interno del software, nel modello tridimensionale del progetto, ogni elemento è stato caratterizzato da un valore di densità vicino al reale.

Utilizzando una bilancia per orafi, tutti i componenti acquistati sono stati pesati e le rispettive densità sono state riportate all'interno del programma (servendosi del volume per applicare la formula inversa:  $d = m/v$ ). Così facendo, l'oggetto virtuale avrebbe presentato proprietà di massa simili alla realtà e avuto un peso e un centro di gravità pressoché identici alla controparte realizzata.

Così è stato per il primo motore. Il baricentro del gruppo costituito da custodia impermeabile, GoPro, scocca principale e blocco dell'elettronica è effettivamente caduto là dove previsto: sull'asse di rotazione del primo motore. Per il secondo motore non è stato così; il baricentro è risultato piuttosto distante dalle coordinate previste dal software. Questo ha causato un disequilibrio e uno sbilanciamento del gimbal. Se lasciato libero, privo di V-ring e non sorretto da alcun ausilio, il dispositivo tendeva a cadere in avanti. Una delle condizioni fondamentali per il buon funzionamento di un gimbal era venuta meno.

Per risolvere l'inconveniente, è stato preparato un modello tridimensionale identico a quello reale. Senza V-ring, quindi libero di ruotare senza attrito. Il prototipo reale è stato ri-bilanciato tramite l'applicazione di una zavorra da pesca, da 20 grammi. Un peso identico è stato aggiunto nel modello CAD ed, effettivamente, il nuovo baricentro software è caduto nella posizione corretta, proprio sull'asse di rotazione del secondo motore. Lo sbilanciamento del prototipo reale, dunque, non è stato causato da un errore di valutazione del software ma dall'impossibilità di effettuare un assemblaggio completo nella realtà, non potendo montare i V-ring per via del troppo attrito. Nel software, il baricentro originale era stato lasciato più avanti di 1 mm rispetto all'asse di rotazione del beccheggio (per diversi motivi, che non ha importanza esporre in questa pagina). La scelta si è rivelata scorretta e l'inconveniente è stato risolto con l'allungamento del braccio di sostegno, nel prototipo 3.

La problematica del baricentro ha evidenziato una forte correlazione tra il funzionamento del dispositivo e il centro di gravità dei suoi componenti. Ci si è interrogati su come poter conciliare gli obiettivi di una progettazione scalabile, multi-materiale, con tale caratteristica.



**185. Il contatto tra la guarnizione V-ring e la rondella** ha generato un attrito troppo grande per poter essere vinto dai motori. La situazione è solamente in parte migliorata con l'aggiunta di lubrificanti a base siliconica, che tuttavia non hanno rappresentato una valida soluzione.

**186. Impossibilità di inserire le guarnizioni O-ring;** nella foto è possibile osservare come la guarnizione resti fuori dalla propria sede, anche dopo aver stretto le viti di fissaggio del motore. A sua volta, anche la guarnizione V-ring viene spinta in avanti.

La decisione presa è stata quella di rivedere la zona di contatto, eliminando qualsiasi interferenza tra le parti in movimento e la guarnizione.

Anche in questo caso è possibile che l'impiego degli O-ring possa essere messo in discussione, in favore di una diversa soluzione.



**187. Sbilanciamento in avanti del gimbal** effetto di un baricentro fuori asse relativamente alla rotazione di beccheggio. La causa di questo errore non è univoca. Probabilmente è da imputare a scelte prese in momenti diversi della modellazione. Una fra tutte, la decisione di accettare un baricentro fuori asse di 1 mm, in virtù dell'attrito tra le guarnizioni e le rondelle, che avrebbe mantenuto orizzontale il gimbal anche in caso di piccoli disequilibri.

**188. Gimbal ri-bilanciato** grazie all'aggiunta di una zavorra da pesca da 20 grammi, nella zona posteriore.

Nel modello CAD, è stato aggiunto un peso virtuale identico, utile per valutare nuovamente, e con più precisione, dove far cadere il baricentro del nuovo prototipo. Come si vedrà più avanti, lo stratagemma si è rivelato vincente.



## 6 Prototipo fisico C

### 6.1 Applicazione della progettazione scalabile

I cambiamenti da apportare alla versione B costituiscono solo una parte del lavoro necessario alla definizione di un prototipo pienamente funzionante. Fino ad ora, lo sviluppo del prodotto non ha tenuto conto della scalabilità del progetto: il gimbal è stato ipotizzato con scocche di un solo materiale, il PLA. Uno degli obiettivi della tesi, probabilmente il più importante, è quello di verificare le potenzialità di una produzione additiva che faccia uso di tecnologie diverse, ognuna in grado di offrire un vantaggio in termini di prestazioni del prodotto che possa giustificarne l'utilizzo.

Nella prima parte dello sviluppo questo obiettivo è stato momentaneamente messo da parte, per concentrarsi prima di tutto sulla riuscita del progetto a livello funzionale. Dal momento in cui il dispositivo ipotizzato presenta un certo grado di complessità, prima di dedicarsi alla scalabilità del prodotto, è stato ritenuto opportuno completarlo almeno in una versione, la più semplice, funzionante al 100%. Il prototipo B, al momento di iniziare la fase di sviluppo del terzo prototipo, non era completamente funzionante, ma si è deciso comunque di apportare le modifiche necessarie e, contemporaneamente, di ragionare su un modello scalabile, realizzabile con più tecnologie. L'obiettivo è rimasto quello di offrire un prodotto stampabile con diversi materiali e con diversi macchinari: hobbystici, semi-professionali e professionali.

In quali termini però? L'idea di partenza era di rendere l'impermeabilizzazione del dispositivo un obiettivo chiave. Tuttavia, un gimbal realizzato tramite FDM, pur presentando un sistema di guarnizioni a tenuta, non sarebbe mai stato impermeabile per via di una caratteristica intrinseca della tecnologia utilizzata: gli strati. La stratificazione dei livelli di materiale, infatti, non garantisce la tenuta dei componenti realizzati in FDM. Tra ogni strato e il successivo sono presenti microscopiche intercedine che favoriscono l'infiltrazione dei liquidi. Inoltre, l'interno delle pareti è riempito con una trama parziale che ne rende vuota la maggior parte: anche attraverso un aumento dello spessore di parete non sarebbe stato possibile realizzare in FDM una scocca completamente stagna. Il PLA stesso è una plastica biodegradabile, molto resistente a livello meccanico ma poco resistente a livello chimico, specialmente se a contatto con acqua.

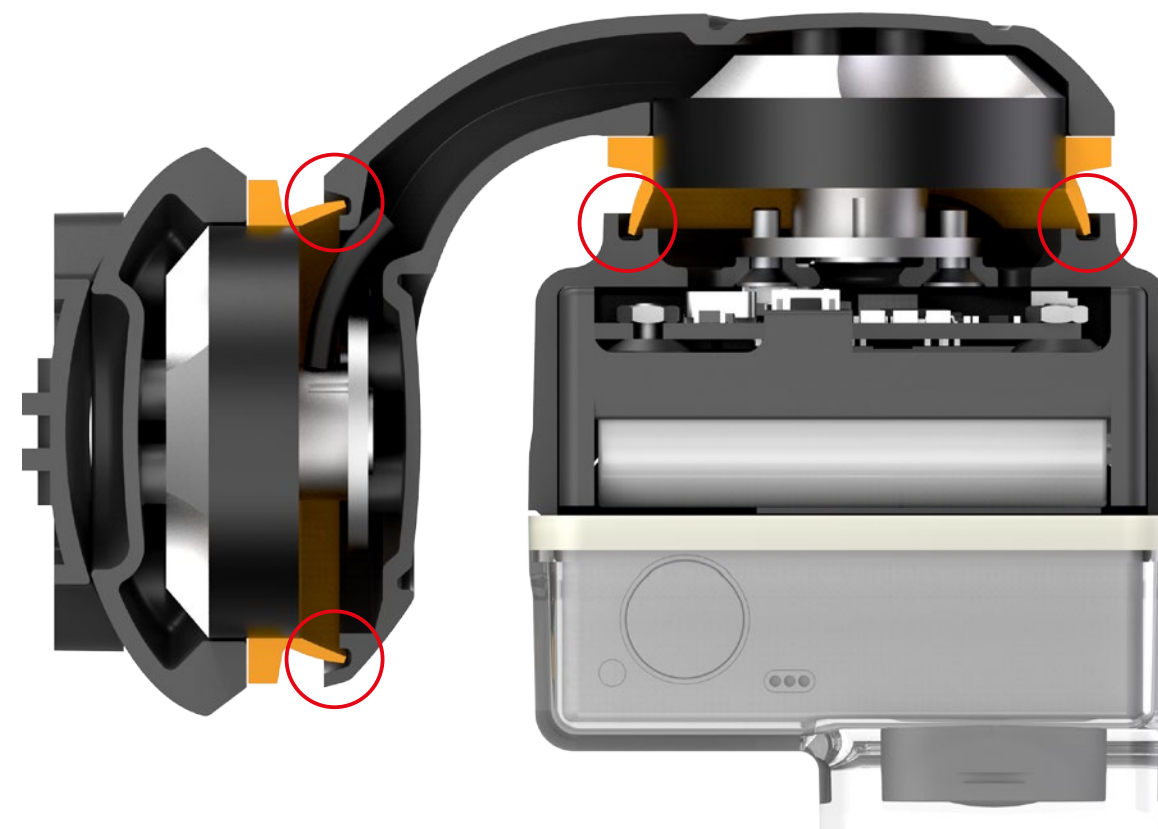
Una versione in fotopolimero Polyjet avrebbe reso il gimbal più resistente alle intemperie, meno tenace ma più adatto all'uso subacqueo e agli sport acquatici. La realizzazione delle scocche del prodotto con questa diversa tecnologia avrebbe rappresentato un vantaggio nel caso di questa specifica destinazione di utilizzo. Inoltre, una realizzazione delle scocche in sinterizzato di alluminio avrebbe rappresentato una somma dei vantaggi di entrambe le tecnologie, caratterizzandosi per leggerezza, resistenza meccanica e resistenza chimica.

Tuttavia, il sistema di tenuta ipotizzato, basato sull'impiego di guarnizioni V-ring a contatto con una superficie metallica, si è rivelato inefficace. Per questo motivo tutta la parte relativa all'impermeabilizzazione del dispositivo è stata rimessa in discussione.

Come si vedrà nello specifico nel prossimo paragrafo, per risolvere la situazione è stata rimossa la rondella metallica ed evitato qualsiasi contatto tra la guarnizione e le parti in movimento. Ogni tipo di attrito è stato eliminato per dare priorità al funzionamento del gimbal. Tuttavia, la mancanza di contatto tra le parti in rotazione ha escluso la possibilità che tra di esse non vi fossero infiltrazioni. La guarnizione è stata mantenuta ma il livello di protezione, da un ipotetico IP 67, è sceso a un ipotetico IP 42, ovvero protezione da caduta di gocce d'acqua con inclinazione massima di 15° e da corpi solidi di dimensioni superiori a 1 mm.

La scalabilità del prodotto sarà indagata in due modi: attraverso la progettazione e la realizzazione di una versione in PLA, stampata con una tecnologia compatibile con l'ambiente domestico, e attraverso la progettazione, ed eventuale realizzazione, di una versione in sinterizzato di alluminio (DMLS). Così facendo, sarà verificata la possibilità di realizzare uno stesso prodotto impiegando tecnologie dalle caratteristiche opposte che utilizzano materiali di densità doppia l'una rispetto all'altra, in un progetto dove la variazione di peso costituisce un parametro molto influente per quanto riguarda il corretto funzionamento del dispositivo.

L'obiettivo finale sarà verificare la possibilità di realizzare un unico modello tridimensionale, valevole per entrambe le versioni e in grado di garantire, in entrambi i casi, il corretto funzionamento del prodotto.



### 6.2 Modifiche apportate al prototipo B

Le modifiche al prototipo B hanno rappresentato un passaggio fondamentale per lo sviluppo di un valido step conclusivo del progetto. Il prototipo C, risultato di queste stesse modifiche, è stato pensato per una progettazione scalabile e per risolvere le criticità emerse con il prototipo precedente.

La maggior parte delle modifiche ha interessato il sistema di guarnizioni: è stata presa la decisione di sacrificare l'impermeabilità del prodotto e di abbassare il livello di protezione da IP 67 a IP 42. In questo modo è stato possibile eliminare le rondelle metalliche e con esse l'attrito causato dal contatto con le guarnizioni durante la rotazione. La sola eliminazione delle rondelle, però, non è stata risolutiva: è stato necessario rivedere la zona di contatto tra i V-ring e le rispettive scocche

posizionate frontalmente. Laddove prima erano presenti le rondelle, sono stati ricavati dei solchi, grazie ai quali il labbro di entrambe le guarnizioni non è stato più a contatto con il materiale plastico, eliminando ogni tipo di attrito. Si è ipotizzata una sorta di tenuta a labirinto, con un minimo spazio tra l'estremo della guarnizione e la superficie sottostante, sufficiente ad impedire l'ingresso di frammenti macroscopici di polvere e di pioggia leggera.

Tutti gli elementi funzionali al fissaggio delle rondelle, sono stati eliminati (inserti filettati, viti, ...) con una riduzione del peso di circa 35 grammi. Nella sezione (vedi immagine sopra) sono state evidenziate le aree di intervento ed è possibile notare come i diametri delle superfici frontali rispetto ai V-ring siano stati ridotti.

## 6.3 Componenti

La terza versione del prototipo presenta gli stessi componenti della versione precedente: le uniche differenze riguardano l'assenza delle rondelle (e dei componenti che contribuivano a tenerle in posizione) e una revisione di tutti gli elementi della scocca, ad esclusione del telaio porta batterie rimasto identico al precedente.

L'altra caratteristica di questo prototipo è la scalabilità per quanto riguarda la produzione dei componenti. Nell'esploso sono stati rappresentati anche i componenti "alternativi".

**189. Braccio in versione DMLS** alleggerito e modificato rispetto alla versione per FDM stampata in PLA.

Le differenze rispetto alla versione FDM di ogni componente saranno descritte nello specifico al paragrafo 6.5.

**190. Case in versione DMLS** anch'esso alleggerito e ridotto negli spessori. Ogni modifica è stata effettuata per cercare di mantenere in asse i baricentri di entrambe le versioni.

Da questa angolazione le differenze non sono evidenti, dal momento che riguardano prevalentemente l'interno dei componenti.



## 6.4 Adattamento della scalabilità alla problematica di un baricentro variabile

Fin dall'inizio, la possibilità di modellare un'unica versione delle scocche, valida sia nel caso di una produzione in FDM che nel caso di una produzione in DMLS, è parsa difficilmente percorribile. In uno dei due casi, infatti, sarebbe stato impossibile mantenere i baricentri G1 e G2 sui rispettivi assi di rotazione (vedi 081. e 082. a pag. 56). Il PLA ha una densità media di 1,45 g/cm<sup>3</sup>, mentre la lega di alluminio scelta per i componenti della versione DMLS, di 2,67 g/cm<sup>3</sup>; quasi il doppio. Nel caso di un progetto non altrettanto sensibile alle variazioni di peso, non vi sarebbe stato problema: l'unico requisito per ottenere un modello 3D universale, sarebbe stato rispettare tutti vincoli costruttivi di tutte le tecnologie prese in considerazione; questo avrebbe comportato un peso maggiore del prodotto finito ma senza dubbio il modello CAD sarebbe stato univoco. Nel nostro caso però, questa alternativa non è stata presa in considerazione. La sensibilità del dispositivo alle variazioni del baricentro avrebbe reso il gimbal inutilizzabile oltre che molto più pesante.

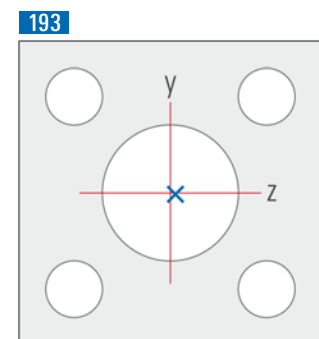
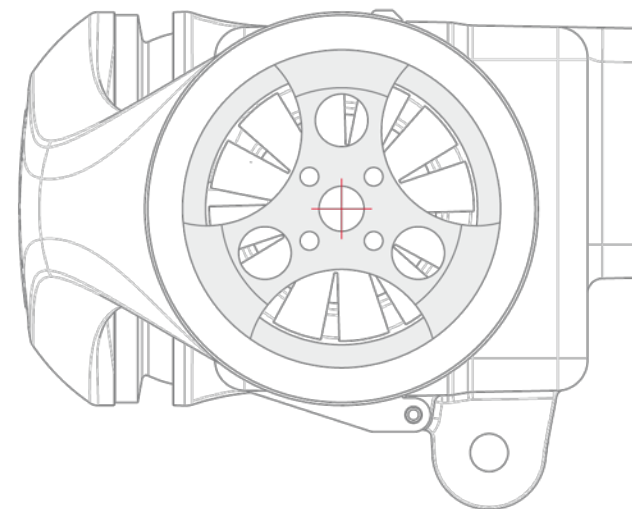
La decisione presa è stata quella di modellare due versioni delle scocche: una per FDM e una per DMLS. Come è stato fatto, nello specifico, è materia del prossimo paragrafo. In linea generale, si è cercato di ridurre il peso dei componenti destinati alla produzione in lega di alluminio, in modo da avvicinarlo il più possibile a quello dei componenti in PLA. Tuttavia, nonostante la riduzione degli spessori e l'alleggerimento di alcuni particolari, non è stato possibile raggiungere un peso perfettamente identico delle due versioni. La versione in alluminio è rimasta infatti la più pesante, con un baricentro diverso rispetto a quella in plastica. I problemi maggiori sono stati riscontrati per G2, il baricentro delle masse sospese movimentate dal secondo motore: guardando il dispositivo da destra, sono state osservate, a partire dal braccio "in giù" verso la GoPro, variazioni della massa complessiva di questo gruppo di elementi che muovevano il baricentro avanti e indietro rispetto all'asse di rotazione del beccheggio. Per compensare questi spostamenti e far rientrare in asse il baricentro, sono stati operati dei successivi aggiustamenti alla lunghezza del braccio in modo tale da spostare più avanti o più indietro il secondo motore rispetto alla GoPro. La forma definitiva del braccio ha permesso di raggiungere, per il baricentro G2, una

posizione di compromesso, compatibile con il funzionamento del dispositivo in entrambe le versioni. Ciò nonostante, non si tratta di una posizione univoca ma piuttosto di un posizionamento ambivalente: se in un caso G2 cade a +X rispetto all'asse centrale, nell'altro caso cade a -X. In pratica si è misurata la differenza di coordinate lungo X dei due baricentri e si è modificata la lunghezza del braccio in modo tale che fosse distribuita equamente a cavallo dell'asse di rotazione.

Il valore di X finale, è pari a circa 2 decimi di millimetro. Ciò significa che, teoricamente, entrambe le versioni dovrebbero essere bilanciate sull'asse di beccheggio. L'asse di rollio ha presentato molte meno difficoltà, perciò non sono stati necessari particolari interventi per equiparare le differenze di coordinate di G1 lungo Z. Il motivo è semplice: per il motore 1, il gruppo di masse sospese è costituito da meno elementi e perlopiù uguali tra le due versioni; il telaio dell'elettronica e delle batterie rimane identico e così pure la GoPro e la sua custodia. La differenza di peso tra la scatola principale in alluminio e quella in PLA è di pochi grammi: dunque la differenza tra i due baricentri, in questo caso, è stata ininfluente, almeno a livello software.

È stato scelto di realizzare una versione del prototipo in lega di alluminio, non tanto per una sua reale utilità, quanto per verificare quanti e quali inconvenienti, a livello progettuale, avrebbe comportato la scelta di lavorare per la scalabilità del prodotto su due tecnologie così diverse. Sarebbe stato molto più semplice ipotizzare una versione in fotopolimero Polyjet, in quanto la differenza di densità tra i due materiali è pressoché inesistente. Una volta sviluppata una geometria in grado di auto sostenersi, almeno internamente, per facilitare la pulizia del pezzo, l'obiettivo sarebbe stato facilmente alla portata. Come il resto del progetto, si è trattato di un esperimento volto a comprendere le potenzialità di una progettazione basata sull'additive manufacturing e in grado di generare prodotti adatti a una produzione con diverse tecnologie.

Nel prossimo paragrafo saranno descritte nello specifico le differenze tra le rispettive versioni di ognuno dei componenti; si tratterà perlopiù di modifiche interne che non compromettono l'estetica del prodotto.



193. Posizione del baricentro: CASO 1

massa sospesa 366 grammi

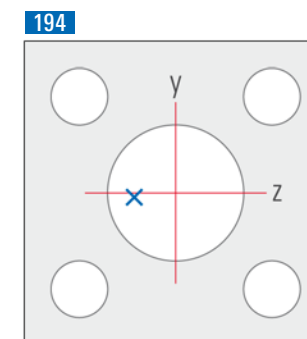
$$Y_G = -0,06 \text{ mm}$$

$$Z_G = 0,22 \text{ mm (accettabile)}$$

Nell'immagine è mostrata la posizione del baricentro rispetto all'asse di beccheggio.

Nel caso 1 le scocche sono in PLA (densità media X,XX g/cm<sup>3</sup>). Lo spessore medio di parete dei componenti destinati alla stampa FDM è di 2 mm; un valore circa doppio rispetto a quello minimo consigliato.

Rispetto alla versione B del prototipo, il braccio è stato allungato per riportare in asse il baricentro e bilanciare i movimenti di beccheggio.



194. Posizione del baricentro: CASO 2a

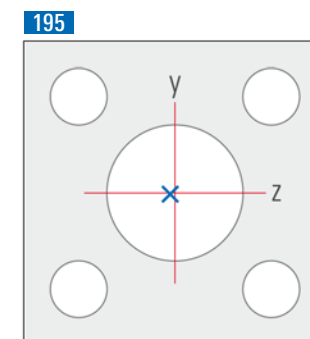
massa sospesa 429 grammi

$$Y_G = -0,19 \text{ mm}$$

$$Z_G = -1,82 \text{ mm (non accettabile)}$$

Nel caso 2a è mostrata la posizione del baricentro qualora si fosse applicata una sostituzione del PLA con la lega di alluminio AIS10Mg (densità 2,67 g/cm<sup>3</sup>), senza apportare modifiche alla geometria delle scocche.

Questa eventualità avrebbe comportato un aumento di peso, da 366 a 429 grammi, e causato uno sbilanciamento in avanti del gimbal (trovandosi il baricentro arretrato rispetto al centro di rotazione di quasi 2 mm).



195. Posizione del baricentro: CASO 2b

massa sospesa 386 grammi

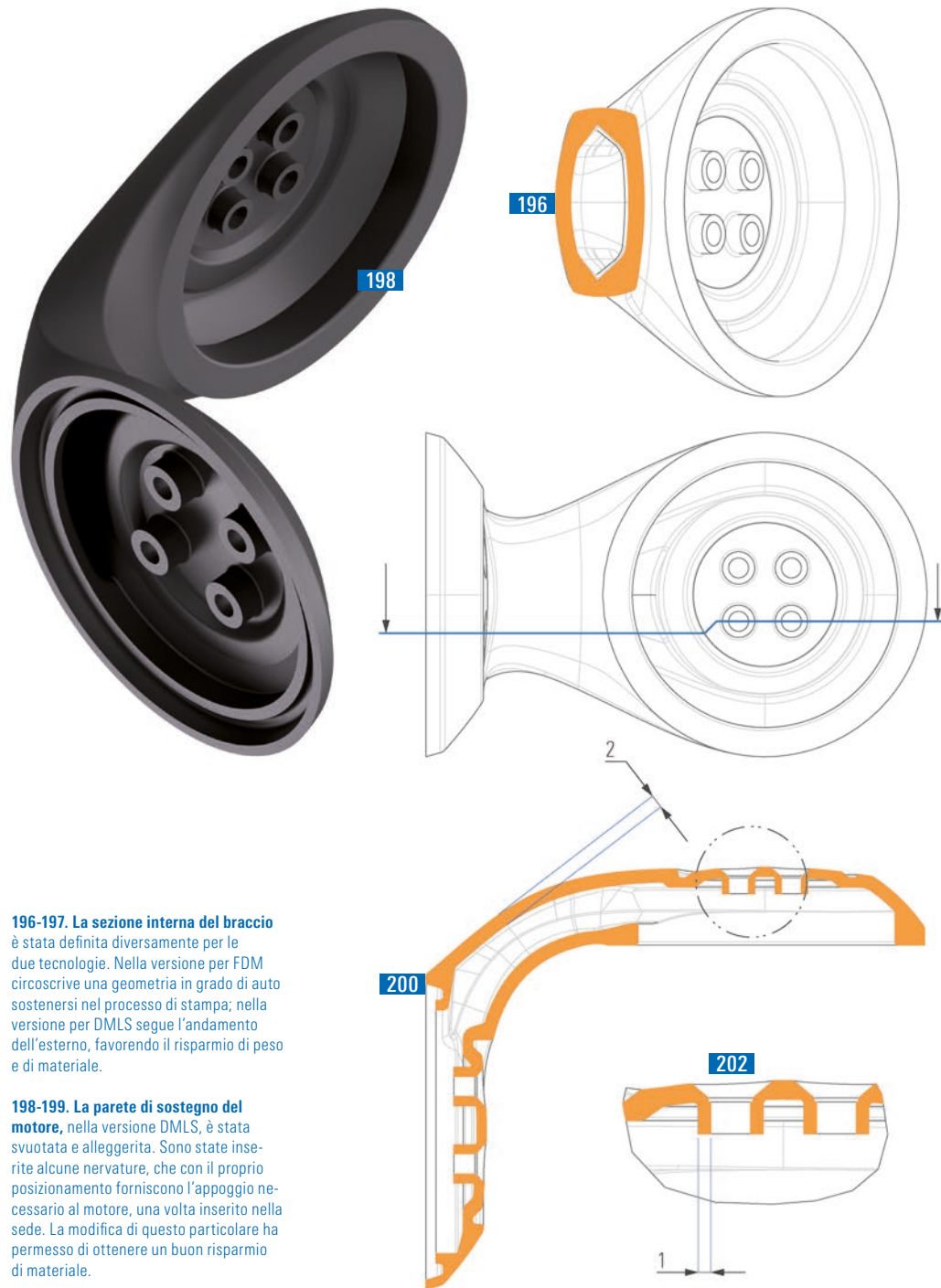
$$Y_G = -0,05 \text{ mm}$$

$$Z_G = -0,21 \text{ mm (accettabile)}$$

Nel caso 2b è mostrata la posizione del baricentro a seguito delle modifiche effettuate alla geometria delle scocche (sempre ipoteticamente realizzate in lega di alluminio). Lo spessore medio di parete è stato portato da 2 a 0,85 mm; un valore sempre doppio rispetto a quello minimo consigliato. Inoltre, sono stati apportati cambiamenti ad alcuni particolari tecnici. Il peso finale è di 386 grammi, solo 20 in più rispetto al caso 1, e il baricentro risulta in una posizione compatibile con il corretto funzionamento del dispositivo.

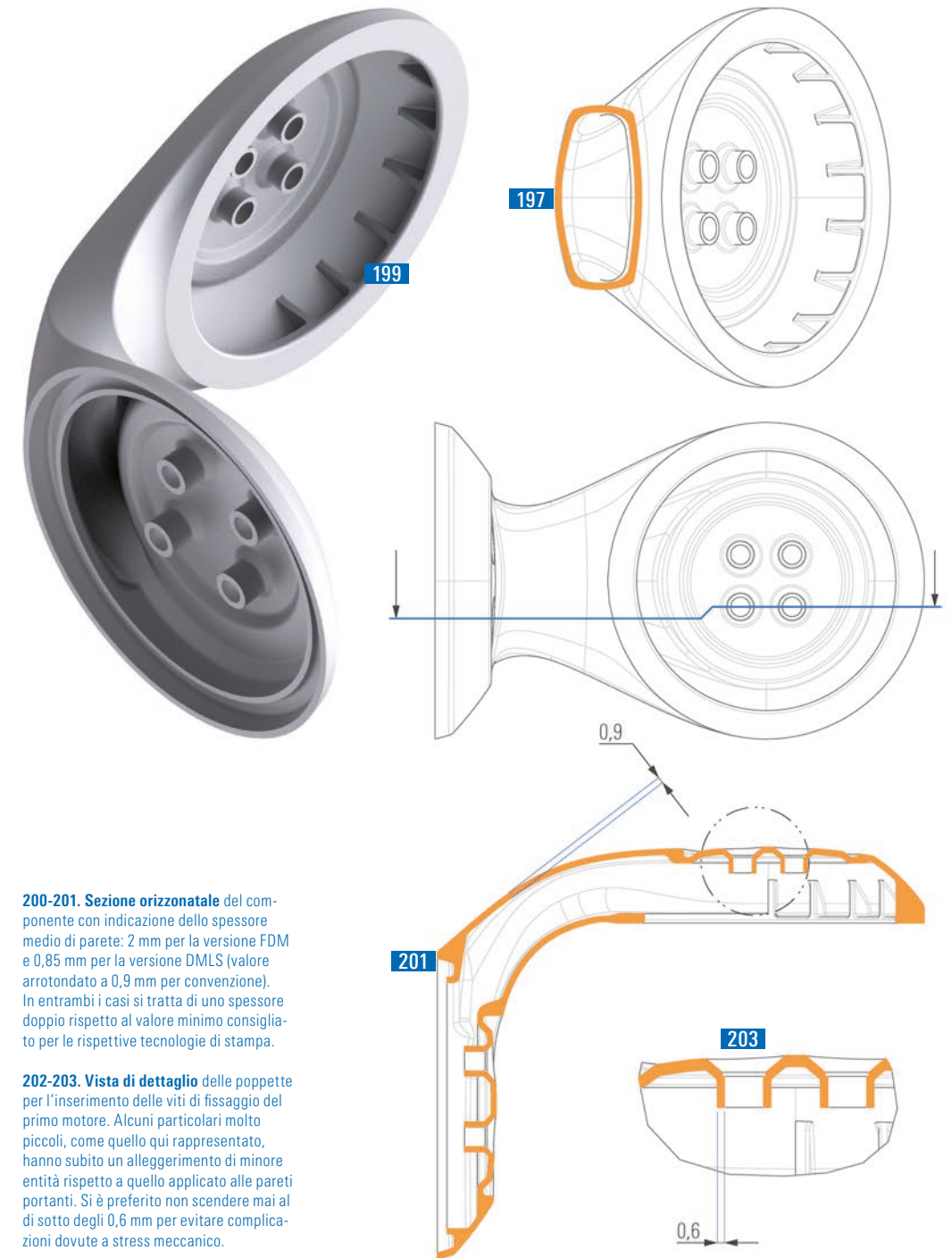


## 6.5 Differenze tra le ipotesi di prototipo



**196-197. La sezione interna del braccio** è stata definita diversamente per le due tecnologie. Nella versione per FDM circoscrive una geometria in grado di auto sostenersi nel processo di stampa; nella versione per DMLS segue l'andamento dell'esterno, favorendo il risparmio di peso e di materiale.

**198-199. La parete di sostegno del motore**, nella versione DMLS, è stata svuotata e alleggerita. Sono state inserite alcune nervature, che con il proprio posizionamento forniscono l'appoggio necessario al motore, una volta inserito nella sede. La modifica di questo particolare ha permesso di ottenere un buon risparmio di materiale.



**200-201. Sezione orizzontale** del componente con indicazione dello spessore medio di parete: 2 mm per la versione FDM e 0,85 mm per la versione DMLS (valore arrotondato a 0,9 mm per convenzione). In entrambi i casi si tratta di uno spessore doppio rispetto al valore minimo consigliato per le rispettive tecnologie di stampa.

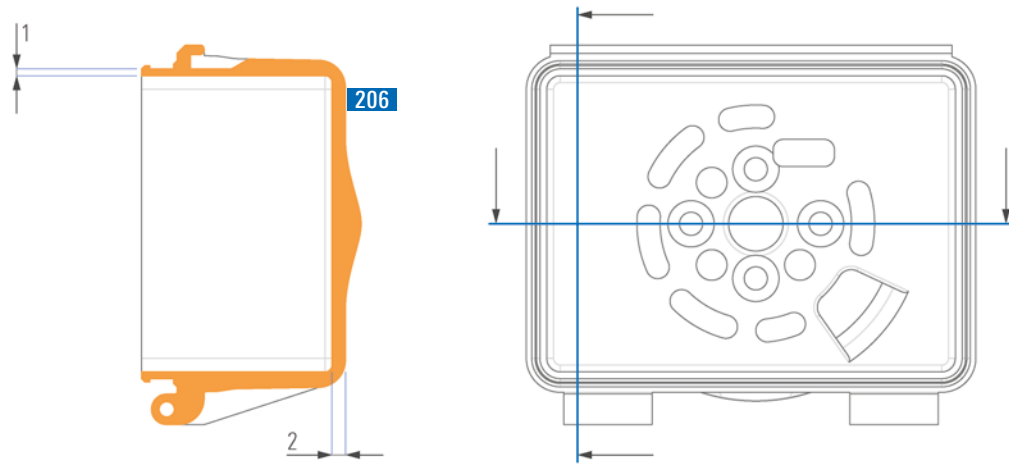
**202-203. Vista di dettaglio** delle poppette per l'inserimento delle viti di fissaggio del primo motore. Alcuni particolari molto piccoli, come quello qui rappresentato, hanno subito un alleggerimento di minore entità rispetto a quello applicato alle pareti portanti. Si è preferito non scendere mai al di sotto degli 0,6 mm per evitare complicazioni dovute a stress meccanico.



204



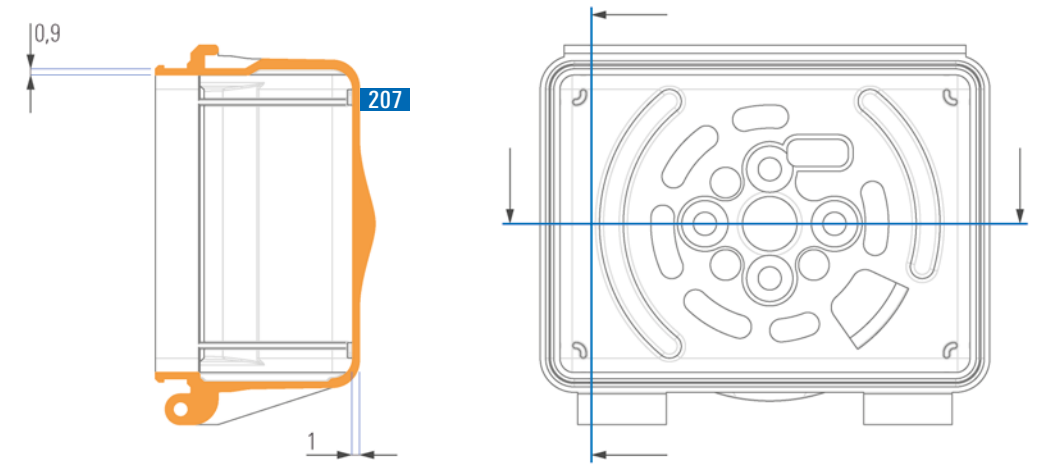
205



206

208

**204-205. Vista prospettica** della scatola principale in entrambe le versioni. La variante per la stampa in alluminio è stata scavata internamente per ridurre il peso complessivo del componente. Per mantenere in posizione il telaio dell'elettronica nonostante l'aumento del volume interno, sono state aggiunte alcune nervature ai quattro angoli. Gli scavi semicircolari presenti sul fondo sono stati praticati per ottenere un ulteriore risparmio di peso.



207

209

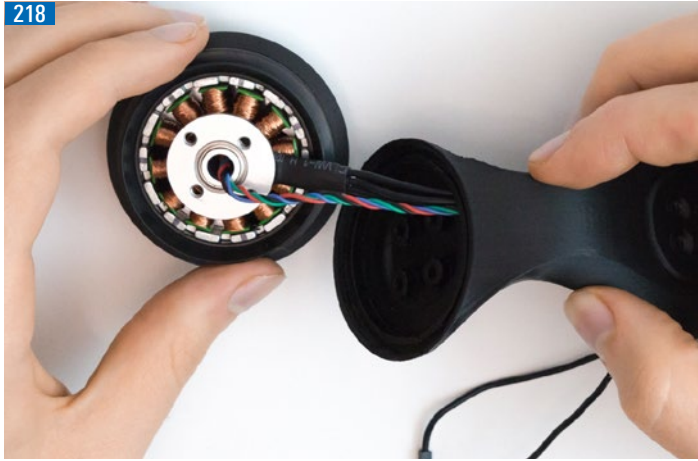
**206-209. Sezione laterale e orizzontale** del case, con indicazione dei valori medi degli spessori di parete. Gli spessori adottati sono analoghi a quelli assegnati per il braccio.

Nella versione in alluminio l'interno della scocca segue l'andamento della superficie esterna mentre nella variante per FDM definisce un volume più regolare e indipendente.



## 6.6 Assemblaggio prototipo FDM

218



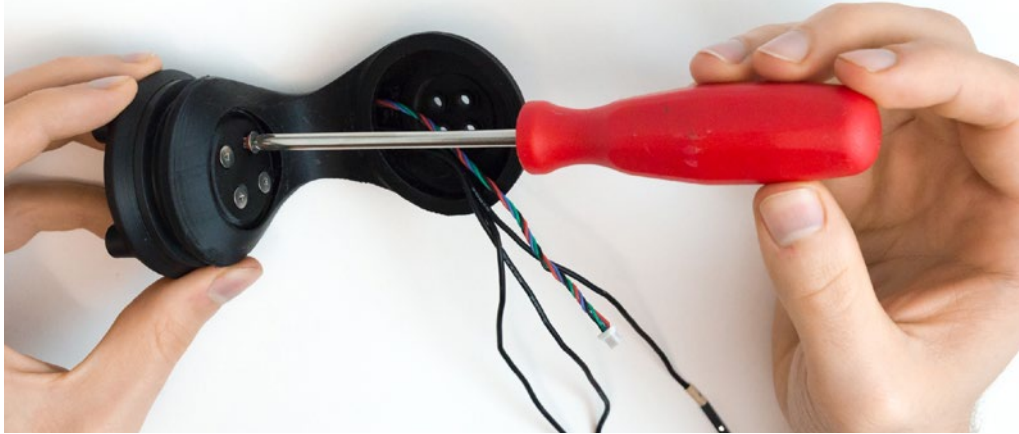
L'assemblaggio della versione finale del prototipo è molto simile a quello descritto nel paragrafo 5.9. Nella lista di immagini proposte, sono stati omessi i passaggi inerenti l'inserimento dell'accelerometro nell'elemento di copertura in quanto il procedimento non ha subito modifiche.

**218. Inserimento dei cavi** del sensore e del motore all'interno del braccio e accoppiamento dei due sub-assiemi.

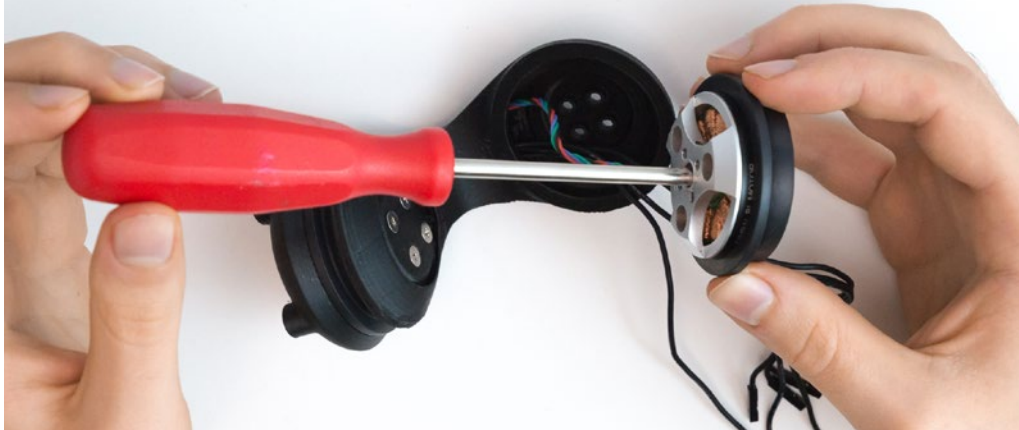
**219. Fissaggio del motore** al braccio. Per l'assemblaggio sono state impiegate 4 viti a tenuta APM Hexseal di misura M3x8 (mm) (vedi 070, a pag. 54).

**220. Passaggio del connettore** dell'unità IMU attraverso il motore del rollo.

219



220



221



222

223



**221. L'inserimento del motore nel braccio** è un'operazione mediamente complessa: i cavi devono essere mantenuti tra le poppette delle viti di fissaggio del motore. Essendo spazi molto piccoli è necessario armarsi di un po' di pazienza.

**222. Fissaggio del motore** al braccio. Per l'assemblaggio sono state impiegate 4 viti a tenuta APM Hexseal di misura M3x8 (mm) (vedi 070, a pag. 54).

**223. Inserimento dei cavi** all'interno della scatola principale. I cavi del sensore secondario e del secondo motore passano attraverso un foro centrale mentre quelli del motore 1 da un foro decentrato. Per consentirne l'inserimento, la guaina restringente che raggruppa i cavi del primo motore deve piegare verso l'interno.

224

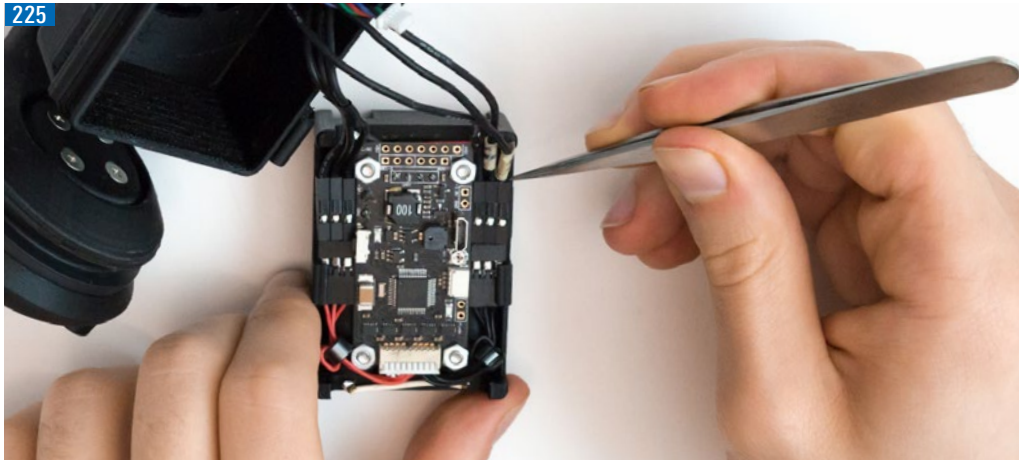


**224. Accoppiamento della scatola e del braccio.** Per l'assemblaggio sono state impiegate 4 viti a testa piatta e cava esagonale di misura M3x8 (vedi 077, a pag. 55).

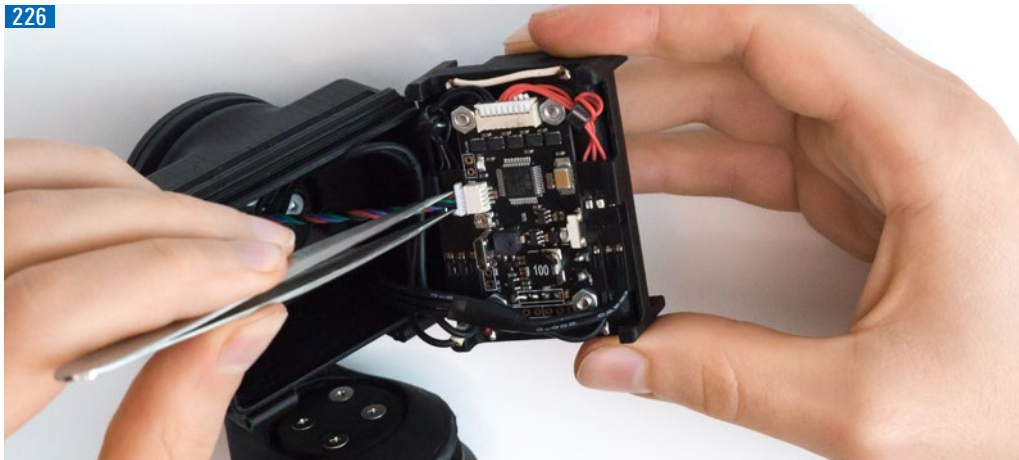
**225. Collegamento dei motori al controller.** I fili sono stati intestati con un contatto maschio ed ognuno è stato inserito all'interno di un alloggiamento 1x1. L'ordine di collegamento degli estremi è influente, è sufficiente il filo mediano sia collegato allo slot centrale.

**226. Inserimento del connettore del sensore supplementare.** Si tratta di un connettore piuttosto piccolo; l'operazione, quindi, può richiedere un po' di pazienza e qualche tentativo.

225



226



**227. Inserimento del blocco dell'elettronica** all'interno della scatola. L'eccedenza dei fili può causare qualche resistenza.

**228. Inserimento del perno metallico** nelle staffe di sostegno. Prima di inserirlo, i fori sono stati puliti dai residui della stampa, passandovi all'interno una punta da trapano da 2 mm.

**229. Accoppiamento del gimbal** al case waterproof della GoPro. Il perno metallico si inserisce negli snapfit situati alla base della custodia.

227

228



229





230



231

**230. Inserimento della GoPro e serraggio dell'aggancio a leva della custodia protettiva.**

**231. Accoppiamento e fissaggio dell'aggancio all'elemento di chiusura del gimbal, in prossimità del secondo motore.**

**232. Assemblaggio del dispositivo completato.** Per accenderlo è indispensabile chiuderlo con le batterie già inserite.



232

## 6.7 Realizzazione prototipo DMLS

Volendo prendere in considerazione la possibilità di realizzare un esemplare del prototipo in alluminio, per verificarne validità ed effettivo funzionamento, insieme al relatore si è deciso di inoltrare una proposta di collaborazione ad un'azienda specializzata nel settore della produzione additiva. L'azienda a cui ci siamo rivolti è EOS, leader di mercato nella produzione di sistemi e macchinari per la sinterizzazione. Dopo aver inviato una presentazione introduttiva del progetto e alcuni scatti relativi alla versione B del prototipo, già prodotto e assemblato, la proposta è stata accettata e la collaborazione ha avuto inizio. All'inizio del mese di settembre (2015) sono stati inviati i file definitivi per la produzione delle parti.

Il materiale scelto per la produzione dei componenti è una lega Alluminio-Silicio-Magnesio denominata AlSi10Mg. Si tratta di un materiale leggero, indicato per la produzione di parti definitive, dotato di buone caratteristiche termiche e meccaniche e adatto alla realizzazione di geometrie complesse, dagli spessori sottili. Generalmente, viene impiegato per realizzare prototipi funzionanti, parti definitive di produzione, componenti per il settore motorsports, automotive e aerospaziale. Il materiale è stato selezionato dal catalogo EOS, dopo che l'azienda ha dimostrato un interesse nella realizzazione del prototipo. Le scocche del prodotto sono state modellate facendo riferimento alla densità di questo materiale.

Attualmente, l'azienda sta provvedendo alla realizzazione delle parti. Molto probabilmente, per una questione di tempistiche ristrette ed esigenze di tesi, non sarà possibile inserire nello scritto fotografie del prototipo assemblato in questa versione. Ci riserveremo di mostrare le parti realizzate tramite DMLS in sede di discussione. Se invece arriveranno in tempo, si farà il possibile per aggiungere alcune considerazioni a proposito della validità degli adattamenti ipotizzati per garantire il funzionamento del dispositivo anche a seguito del cambio di materiale. La scelta di realizzare questa versione del prototipo, ancora una volta, è stata dettata da finalità sperimentali; non per un reale interesse in una eventuale commercializzazione del prodotto così realizzato. Lo scopo dell'operazione rimane quello di sondare possibilità e conseguenze di una progettazione di tipo scalabile applicata agli oggetti di consumo.

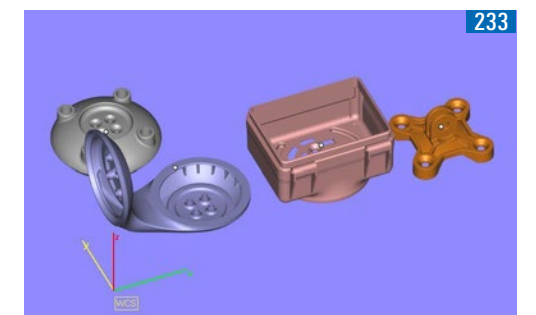


232

**232. EOSINT M290, macchinario utilizzato per realizzare i componenti in alluminio del prototipo.**

La scheda tecnica fornita dall'azienda produttrice lo definisce "The Additive Manufacturing System for the Production of Serial Components, Spare Parts and Functional Prototypes Directly in Metal".

Ha un volume di stampa di 250 x 250 x 325 mm e un vasto catalogo di materiali processabili. Il cuore della macchina è un laser a fibra da 400 watt; elemento indispensabile per innescare la fusione delle polveri nel processo di Direct Metal Laser Sintering.



233

**233. I componenti dei gimbal disposti sul piano della camera di stampa per una valutazione dei tempi e dei costi di produzione.**

## 6.8 Test prototipo FDM



**234. Risposta ai movimenti di rollio** da parte del dispositivo. Una volta completata la fase di setup, il nuovo prototipo è risultato funzionante. Le immagini sono state sovrapposte senza modifiche.

234



**235. Risposta del gimbal ai movimenti di beccheggio** in un secondo set di scatti sovrapposti.

Benchè i due movimenti siano stati rappresentati separatamente, i motori agiscono contemporaneamente per compensare entrambe le rotazioni. Pertanto, la posizione del telaio rispetto alla fotocamera può essere una combinazione dei due movimenti, come mostrato nella pagina a fronte.

235



236

**236. Gli angoli operativi del dispositivo** rappresentati in una serie di immagini. Le rotazioni possibili lungo l'asse di beccheggio coprono i 360 gradi. Per quanto riguarda il rollio, sono limitate a circa  $\pm 80$  gradi. Superata questa soglia, il motore del beccheggio si viene a trovare in una posizione incompatibile con il firmware. In un gimbal a 2 assi, il motore del beccheggio deve restare accanto alla telecamera: una sua angolazione eccessiva rispetto all'asse di rollio gli impedisce di operare nel modo corretto.



6.9 Galleria fotografica e ingombri







## 6.10 Costi effettivi prototipo FDM

Parte	Provenienza	Costo unitario	Quantità	Costo tot.		
<b>elettronica</b>						
SimpleBGC x32 Tiny	<a href="http://flyduino.com">flyduino.com</a>	99,00 €	1	99,00 €		
serial BT adapter	<a href="http://flyduino.com">flyduino.com</a>	13,90 €	1	13,90 €		
frame IMU	<a href="http://flyduino.com">flyduino.com</a>	18,90 €	1	18,90 €	<b>SUBTOT</b>	<b>131,80 €</b>
<b>componenti elettrici</b>						
Nitecore Li-ion 14500	<a href="http://amazon.it">amazon.it</a>	12,99 €	2	25,98 €		
ferrite core 6 mm	<a href="http://digikey.it">digikey.it</a>	1,05 €	2	2,10 €		
holder battery AA	<a href="http://digikey.it">digikey.it</a>	0,97 €	2	1,94 €		
contatto maschio Dupont	<a href="http://ebay.it">ebay.it</a>	0,10 €	6	0,60 €		
contatto femmina Dupont	<a href="http://ebay.it">ebay.it</a>	0,10 €	6	0,60 €		
connettore Dupont 1 slot	<a href="http://ebay.it">ebay.it</a>	0,10 €	6	0,60 €	<b>SUBTOT</b>	<b>31,82 €</b>
<b>motori</b>						
GBM3506h 130T	<a href="http://flyduino.com">flyduino.com</a>	42,90 €	2	85,80 €	<b>SUBTOT</b>	<b>85,80 €</b>
<b>componenti meccanici</b>						
V-RING VA40 NBR	<a href="http://fpmodena.it">fpmodena.it</a>	0,62 €	2	1,24 €		
MRS62.0-55	<a href="http://misumi-europe.com">misumi-europe.com</a>	2,60 €	1	2,60 €		
KNTR3	<a href="http://misumi-europe.com">misumi-europe.com</a>	0,41 €	4	1,64 €		
SFB3-6	<a href="http://misumi-europe.com">misumi-europe.com</a>	0,27 €	6	1,62 €		
SFB3-8	<a href="http://misumi-europe.com">misumi-europe.com</a>	0,27 €	2	0,54 €		
SFBJ4-10	<a href="http://misumi-europe.com">misumi-europe.com</a>	0,40 €	4	1,60 €		
ENT4-8	<a href="http://misumi-europe.com">misumi-europe.com</a>	0,98 €	4	3,92 €		
APM Hexseal M3x8	<a href="http://conrad.it">conrad.it</a>	0,72 €	12	8,64 €	<b>SUBTOT</b>	<b>21,80 €</b>
<b>componenti AM</b>						
<b>grammi</b>						
produzione (PLA/FDM)	<a href="http://corsirhino.it">corsirhino.it</a>	0,05 €/gr	140	7,00 €	<b>SUBTOT</b>	<b>7,00 €</b>
					<b>TOT</b>	<b>278,22 €</b>

Nella tabella sopra sono state riportate le voci di spesa riguardanti la produzione del prototipo finale. Ogni cifra indica la spesa effettiva, spedizioni escluse, effettuata presso i siti di vendita elencati. Per quanto riguarda le parti realizzate in additive manufacturing, è stato considerato solamente il costo del materiale grezzo: i componenti sono stati realizzati presso lo studio del prof. Gatti, relatore di questa tesi, ipotizzando una sorta di produzione in-house delle parti in plastica.

La cifra risultante è mediamente alta. A prima vista, potrebbe sembrare inappropriata per la categoria di prodotto specifica. Trattandosi di un dispositivo ideato per un'utenza non professionale, il costo dei soli componenti eccede, e di molto, un target di prezzo ipotetico adeguato alla tipologia di oggetto. Per questo motivo

è stata fatta una seconda valutazione di costo, immaginando una produzione del dispositivo in piccola serie di mille esemplari. La cifra finale, in questo caso, è più in linea con le esigenze di mercato e più economicamente sostenibile. La tabella a pagina seguente riassume le voci di costo di questa prima produzione, probabilmente sarebbe in linea con le esigenze di una start-up nel primo anno di produzione. Per elaborare la cifra finale, sono stati presi in considerazione due differenti valori di riduzione da applicare al prezzo al dettaglio dei singoli componenti, scorporato dalle tasse. È stata ipotizzata una riduzione del 75% per i componenti proprietari e i motori e del 90% per la minuteria e i componenti comuni. Sono stati stimati anche i costi di produzione delle parti in PLA; la cifra finale è visibile nella seconda tabella, in basso a destra.

## 6.11 Ipotesi di costo per 1000 esemplari

Parte	Costo iniziale no tax.	Riduzione ip.	Costo unitario	Quantità	Costo tot.			
<b>elettronica</b>								
SimpleBGC x32 Tiny	79,20 €	60%	31,68 €	1000	31680,00 €			
serial BT adapter	3,60 €	90%	0,36 €	1000	360,00 €			
frame IMU	15,12 €	60%	6,05 €	1000	6048,00 €	<b>SUBTOT</b>	<b>38090,00 €</b>	
<b>componenti elettrici</b>								
Li-ion 14500 3,7 v	-	-	0,50 €	2000	1000,00 €			
ferrite core 6 mm	0,88 €	90%	0,09 €	2000	180,00 €			
holder battery AA	-	-	0,01 €	2000	20,00 €			
contatto maschio Dupont	0,08 €	90%	0,01 €	6000	60,00 €			
contatto femmina Dupont	0,08 €	90%	0,01 €	6000	60,00 €			
connettore Dupont 1 slot	0,08 €	90%	0,01 €	6000	60,00 €	<b>SUBTOT</b>	<b>1380,00 €</b>	
<b>motori</b>								
GBM3506h 130T	34,32 €	60%	13,73 €	2000	27456,00 €	<b>SUBTOT</b>	<b>27460,00 €</b>	
<b>componenti meccanici</b>								
V-RING VA40 NBR	0,50 €	90%	0,05 €	2000	100,00 €			
MRS62.0-55	-	-	2,13 €	1000	2130,60 €			
KNTR3	-	-	0,12 €	4000	480,00 €			
SFB3-6	-	-	0,15 €	6000	900,00 €			
SFB3-8	-	-	0,15 €	2000	300,00 €			
SFBJ4-10	-	-	0,04 €	4000	160,00 €			
ENT4-8	-	-	0,78 €	4000	3120,00 €			
APM Hexseal M3x8	0,73 €	60%	0,23 €	12000	2760,00 €	<b>SUBTOT</b>	<b>9950,00 €</b>	
<b>componenti in AM</b>								
produzione (PLA/FDM)				1000 set	22910,00 €* SUBTOT	<b>22910,00 €</b>		
					<b>TOT</b>		<b>99790,00 €</b>	
							<b>costo cad. (1000 pcs.)</b>	<b>99,79 €</b>

\* costi stimati per la produzione dei componenti in AM (PLA/FDM)

macchinario	Wasp Delta 2040
ore macchina / set	23 h
tiratura	1000 pcs.
<b>TOT ore macchina</b>	<b>23000 h</b>
costo macchinario	1500,00 €
numero di macchinari	10
giorni di produzione	95,8 g
<b>mesi di produzione</b>	<b>3,2 mesi</b>
costo materiale / set	7,00 €
consumo energetico	0,18 kW/h
<b>TOT consumo energetico</b>	<b>4140 kW/h</b>
costo al kW/h	0,22 €

<b>costo energetico</b>	<b>910,80 €</b>
<b>costo materiale</b>	<b>7000,00 €</b>
<b>costo macchinari</b>	<b>15000,00 €</b>
costo stampi / attrezzature	0,00 €
costo assemblaggio	-,-- €
costo operatore	-,-- €
<b>TOT investimento</b>	<b>22910,80 €</b>
<b>costo cad. (1000 pcs.)</b>	<b>22,91 €</b>

## 7 Conclusioni

### 7.1 Progettazione scalabile: obiettivi raggiunti e limiti osservati

Nei paragrafi 2.1 e 2.2 è stato dichiarato l'obiettivo di sperimentare un nuovo approccio alla progettazione fondato sull'elaborazione di un singolo modello tridimensionale, adatto, però, ad essere riprodotto con differenti tecnologie di stampa. Questa possibilità è stata interpretata a partire dal concetto di "customization to customer requirements" individuato nella ricerca preliminare sul contesto progettuale. La ricerca è stata effettuata per comprendere i reali vantaggi di un'ipotetica implementazione dell'additive manufacturing nella catena produttiva e per individuare i punti di forza della tecnologia sui quali fare leva per raggiungere un nuovo livello di innovazione, distaccandosi dalle logiche tradizionali di produzione. Una volta compresi questi principi fondamentali, si è cercato di applicarli alla progettazione di un prodotto consumer, più vicino all'universo dell'industrial design piuttosto che ad applicazioni di ingegneria, che solitamente monopolizzano l'impiego dell'additive manufacturing in ambito produttivo.

Il primo step è stato stato individuare una categoria di prodotto che si prestasse a una diversificazione delle prestazioni del prodotto finale funzionale al soddisfacimento delle esigenze di un'utenza altrettanto differenziata. Per raggiungere un particolare livello di performance, una determinata tecnologia e uno specifico materiale sarebbero stati più indicati rispetto ad altri. Si sono ipotizzate differenti versioni del dispositivo. La prima rivolta ad un'utenza amatoriale, realizzabile anche in ambiente domestico con l'ausilio di una stampante 3D low-budget. Dotata di scocche in ABS o PLA, avrebbe differito da un'ipotetica variante realizzata in fotopolimero Polyjet per via della non impermeabilità della prima soluzione. Infine, una variante in sinterizzato di alluminio avrebbe presentato caratteristiche meccaniche superiori ad entrambe le soluzioni precedenti e garantito un'impermeabilizzazione totale del dispositivo: una somma delle proprietà dei precedenti materiali a un costo superiore, per un'utenza professionale.

Tuttavia, l'obiettivo di impermeabilizzare il dispositivo è stato accantonato a causa di un grave malfunzionamento del sistema di tenuta. L'inconveniente, come è stato descritto nel capitolo precedente, avrebbe

compromesso il funzionamento del prodotto; dunque si è trattato di una scelta inevitabile.

Il concetto di progettazione scalabile, però, è stato esplorato ugualmente, con l'obiettivo di valutarne i vantaggi e gli svantaggi a partire da un tentativo reale, concretamente messo in atto. La variante del prodotto realizzata in alluminio, con una tecnologia più sofisticata e costosa, è stata sviluppata con il solo obiettivo di verificare le potenzialità e le controindicazioni di una progettazione "multi-target" nell'ambito della produzione additiva; non per dimostrare una superiorità prestazionale del prototipo in alluminio rispetto alla variante in pla. Nella seconda parte del paragrafo si commenteranno risultati ottenuti e limiti osservati.

La dipendenza del funzionamento del prodotto da una corretta centratura dei baricentri sugli assi di rotazione ha impedito, di fatto, che si potesse mettere in pratica l'idea di utilizzare uno stesso modello tridimensionale per entrambi i prototipi. Uno dei limiti maggiori della progettazione scalabile pare essere proprio questo. Nel caso di progetti fortemente dipendenti da una corretta distribuzione delle masse, non appare un'alternativa direttamente applicabile. L'impiego dell'alluminio, probabilmente, è un caso estremo, in quanto se al posto del metallo si fosse utilizzata un'altra plastica (Polyjet, ad esempio) la differenza di densità avrebbe potuto essere trascurabile. Tuttavia, per estrapolare una regola generale, una sostituzione 1:1 del materiale, per una stessa geometria 3D, pur compatibile a livello di vincoli produttivi, non è consigliabile; specialmente nel caso di prodotti dal comportamento dinamico.

Come è stato verificato, anche nel caso della stampa 3D, ogni tecnologia necessita di una progettazione dedicata. Che si tratti di modifiche importanti o di piccoli adattamenti, non è vero che una stessa geometria, previo soddisfacimento dei vincoli costruttivi di tutte le tecnologie prese in considerazione, sia sempre processabile e con ogni macchinario. O meglio, probabilmente lo è; ma la sua interazione con gli altri componenti del prodotto cambia e ciò può ostacolare il funzionamento complessivo del prodotto. Le tecnologie di additive manufacturing vanno trattate come una qualsiasi altra tecnologia produttiva: possiedono i propri vincoli

costruttivi, ma questo era già noto, e necessitano di una progettazione dedicata. Inoltre, anche per l'additive manufacturing le caratteristiche dei materiali, prima ancora della forma che gli si desidera far assumere, giocano un ruolo imprescindibile. In questo senso la stampa 3D non differisce rispetto ai metodi tradizionali di produzione.

Ciò che cambia è la possibilità di spingere la progettazione verso geometrie infinitamente più complesse. La possibilità di progettare anche l'interno di un componente permette di contrastare gli effetti potenzialmente negativi dovuti a una sostituzione del materiale, per produrre una stessa geometria, anche nel caso di densità molto diverse rispetto a quello di partenza.

Ciò che è stato fatto, nel nostro caso, è proprio questo. La modellazione dell'interno delle parti ha costituito un progetto a sé stante. Il caso del braccetto è emblematico. La geometria interna del componente è stata adattata alle esigenze di stampa sia nel caso della stampa FDM che per la sinterizzazione. Entrambe le varianti sono state funzionali alla produzione del pezzo nei rispettivi casi. Uno degli obiettivi raggiunti nell'applicazione della progettazione scalabile è stato quello di ottenere una geometria esterna identica a fronte di modifiche effettuate solo internamente. Nel caso di una produzione tradizionale, ciò sarebbe stato impossibile: sarebbe stato necessario progettare uno stampo diverso che comunque non avrebbe garantito la certezza di ottenere uno stesso componente, in plastica o in metallo, con la stessa forma esteriore e la medesima funzionalità.

Dal punto di vista del design, pur non essendo una metodologia priva di controindicazioni, questo approccio potrebbe costituire, per progetti particolari, un punto a favore della scelta di una tecnologia di produzione additiva. Nel caso specifico del progetto di questa tesi, non ha rappresentato un vero successo dal momento che le performance del prodotto non sono state realmente diversificate. Ciò che è stato interessante osservare è stata la possibilità di adattare un progetto inizialmente concepito per un materiale plastico ad una produzione in sinterizzato di alluminio, mantenendone inalterata l'estetica e la funzionalità.



237

**237-238. Il telaio porta batterie realizzato in poliammide (nylon)** è stato prodotto per la variante in alluminio del prototipo. La stampa è stata commissionata online tramite Shapeways.com. È l'unico componente che non ha subito modifiche rispetto alla geometria di partenza. Le densità del nylon e del PLA, infatti, sono simili: circa 1,2 g/cm<sup>3</sup>. Il peso dei componenti stampati differisce di circa 3 grammi; una differenza dovuta al processo di deposizione/solidificazione del materiale piuttosto che alla densità del materiale grezzo. La stampa FDM, infatti, crea dei vuoti all'interno delle parti piene, mentre il nylon è depositato e sinterizzato in maniera uniforme.



238

## 7.2 Verifica degli obiettivi teorici del progetto

Tra gli obiettivi teorici proposti al termine della fase di ricerca, la progettazione scalabile è stato quello maggiormente indagato: ha mostrato di avere alcune potenzialità ma anche limiti oggettivi. La stessa cosa, in linea di massima, si può dire per gli altri obiettivi di ricerca (considerati globalmente).

Si è rivelata particolarmente interessante la possibilità di sperimentare geometrie complesse con l'obiettivo di una maggiore funzionalità del prodotto a parità di numero di componenti. Il braccetto del gimbal è il componente che più di altri ha costituito un valido test per questo tipo di approccio; averne progettato l'interno lo rende unicamente realizzabile con la tecnologia additiva e ciò costituisce un punto di approdo significativo per le intenzioni di ricerca della tesi. Probabilmente, come molti componenti cavi, avrebbe potuto essere realizzato tramite stampaggio a iniezione gas-assistito, ma l'impiego di tale tecnologia avrebbe comportato uno studio di fattibilità elaborato. La versione in additive manufacturing, lungi dall'essere perfetta o migliore rispetto a una sua controparte stampata, offre degli spunti interessanti sul fronte della progettazione dell'interno dei componenti.

Per quanto riguarda il reperimento delle parti, l'obiettivo di utilizzare una componentistica facilmente reperibile, possibilmente online, è stato raggiunto. Ciò significa che una duplice natura del prodotto, industriale e "instructable" allo stesso tempo, può avere una qualche ragione di esistere. Alla luce di questo esperimento potrebbe essere interessante ragionare sulla possibilità di progettare oggetti che possano essere acquistati "in kit", completi o parziali, che lascino la possibilità all'utente di reperire in prima persona alcuni dei componenti necessari. Potendo intervenire attivamente nelle fasi di montaggio, di personalizzazione e di modifica, l'utente ha un ruolo di primaria importanza. Nel caso di una eventuale commercializzazione del dispositivo, sorgerebbe una questione importante a proposito della distribuzione dei file esecutivi per la stampa dei componenti plastici. Si tratterebbe di una scelta di tipo politico, oltre che economico, intorno alla quale probabilmente dovrebbero affinarsi nuovi modelli di vendita adatti a una tipologia di prodotto che si configura come semi-industrializzato.

Il prototipo finale, a differenza di quanto dichiarato prima di intraprenderne lo sviluppo, non è completamente open source: la scheda di controllo utilizzata nel prodotto è infatti proprietaria. Ciò rende il dispositivo molto più vicino a un accessorio progettato e commercializzato come un prodotto tradizionale, magari da parte di una giovane start-up, piuttosto che a un prodotto "open", scaricabile gratuitamente online da piattaforme di condivisione quali Thingiverse o simili.

Su questo fronte si potrebbero ipotizzare due modalità di vendita: una più tradizionale, con l'introduzione sul mercato di un "kit" contenente sia la componentistica standard che le parti stampate in 3D; l'altra in un certo senso più ibrida, che preveda la vendita dei file 3D in formato digitale (preparati per una specifica tecnologia di stampa o per uno specifico modello di stampante) insieme a un box contenente la componentistica non open. Questa seconda opzione potrebbe essere una strada percorribile per conciliare le logiche dell'open source con la necessità di ottenere un profitto dalla vendita del prodotto.

La fase di progetto si è concretizzata nella realizzazione di un prototipo funzionante in grado di assolvere un uso specialistico. Il prodotto finale, in linea teorica, sembrerebbe adatto a una produzione di media tiratura: 5000-10000 esemplari. Rimane da capire se per produrli sia più conveniente cimentarsi in una produzione in additive manufacturing o se affidarsi al più tradizionale injection molding, anche in variante gas-assistita (per queste valutazioni si rimanda al paragrafo 7.4).

Per quanto riguarda l'indagine a proposito dell'utilizzo delle tecnologie di sinterizzazione per la produzione di oggetti specialistici dedicati al mondo professionale, l'obiettivo è stato raggiunto solamente in parte, per due ragioni. Prima di tutto, perché non è stato possibile, almeno finora, effettuare dei test approfonditi sulla riuscita del prodotto anche nella variante DMLS. In secondo luogo, perché i costi di realizzazione delle scocche in alluminio sono risultati incompatibili con la produzione di un oggetto che è tutto sommato semplice rispetto a soluzioni più professionali. Probabilmente, l'impiego di queste tecnologie è ancora prerogativa di applicazioni di più alto livello.

## 7.3 Verifica degli obiettivi del brief progettuale

Da un punto di vista strettamente progettuale il dispositivo ha raggiunto la maggior parte degli obiettivi elencati nel brief (paragrafo 3.6 a pag. 39).

Per raggiungere l'obiettivo della scalabilità, la realizzazione dei componenti del prodotto destinati a una produzione additiva ha richiesto delle modifiche alle rispettive geometrie di partenza. Queste modifiche hanno portato alla realizzazione di due diversi modelli 3D, ognuno sviluppato appositamente per l'una o l'altra tecnologia di produzione. Nonostante questo, l'obiettivo della scalabilità, per quanto riguarda le tecnologie considerate, può considerarsi raggiunto; pur con gli svantaggi in termini di tempo di sviluppo che ne sono conseguiti. Occorre considerare che nel caso fosse stata impiegata una tecnologia di stampa in materiale plastico per entrambe le varianti del prodotto probabilmente questi adattamenti non sarebbero stati necessari e un unico modello tridimensionale sarebbe stato valido per entrambe le versioni.

L'obiettivo di utilizzare una tecnologia di stampa high-end per la produzione di una variante prestazionale del prodotto non è stato raggiunto. La versione in alluminio, per via delle difficoltà riscontrate nel sistema di impermeabilizzazione, è rimasta una prova effettuata esclusivamente a fini di ricerca, per verificare pro e contro di un approccio scalabile alla progettazione.

Per quanto riguarda il design del dispositivo, l'obiettivo della compattezza è stato raggiunto. L'inversione dei motori pitch e roll non ha comportato difficoltà dal punto di vista del funzionamento. L'inclusione dell'elettronica di controllo e delle batterie in una scocca sostitutiva dello sportello posteriore del case della GoPro è riuscita. Le superfici esterne definiscono una forma integrata che allo stesso tempo comunica il comportamento dinamico del prodotto. Non sono presenti sporgenze o elementi di potenziale disturbo nei confronti dell'attrezzatura esterna e i fili elettrici sono completamente nascosti alla vista. La forma del braccio è stata concepita per essere rigida e resistente agli urti; e benché non sia stato possibile verificare sperimentalmente questa condizione, la geometria cava del componente dovrebbe avergli conferito caratteristiche meccaniche adeguate allo scopo.

I motori selezionati sono stati scelti volutamente sovradimensionati rispetto al peso della fotocamera. Nel caso del secondo motore la scelta è stata fatta per via del peso maggiore sostenuto dal componente ma nel caso del primo motore, probabilmente, si sarebbe potuta scegliere un'unità più compatta. In ogni caso, entrambi erogano una quantità di coppia sufficiente a gestire i movimenti del gimbal anche in situazioni frenetiche.

La potenza erogata dai motori dipende dalle impostazioni del firmware e stando a quanto osservato nelle prove effettuate, anche una potenza del 20-25%, rispetto alla potenza teorica totale erogabile dal controller, ha permesso di muovere il gimbal senza difficoltà. Se ne deduce che sarebbero stato possibile selezionare dei motori meno potenti e meno ingombranti.

L'integrazione di un aggancio standard GoPro non ha presentato particolari problematiche e può considerarsi un'obiettivo raggiunto. Inoltre, la possibilità di montare agganci personalizzati ha aumentato ulteriormente le opzioni di montaggio dello stabilizzatore.

La criticità più evidente dell'intero progetto riguarda la mancata implementazione di un sistema di tenuta compatibile con lo standard IP67. L'impiego di guarnizioni ha generato una quantità di attrito non conciliabile con la libertà di rotazione richiesta da uno stabilizzatore elettronico.

Il funzionamento del dispositivo ha mostrato prestazioni adeguate per un gimbal a 2 assi. Sarebbe stata auspicabile una maggiore compatibilità del setup a 2 motori con una gamma più ampia di movimenti. Il braccio del dispositivo, infatti, non può essere ruotato lungo l'asse di rollio per più di 80 gradi, verso l'alto o verso il basso rispetto alla posizione orizzontale. A causa della scelta di un controller proprietario, non è stato possibile implementare un'istruzione in grado di dirottare il motore del beccheggio sui movimenti di imbardata nel caso di un posizionamento verticale del braccio. Di conseguenza lo stabilizzatore svolge bene il suo lavoro per angoli che non si discostano eccessivamente dal piano orizzontale, almeno per quanto riguarda la rotazione del secondo motore rispetto al primo.

## 7.4 Considerazioni economiche sulle tecnologie di produzione

Nell'eventualità che un progetto di questo tipo entrasse in produzione, sarebbe interessante poter individuare la tecnologia più conveniente per la realizzazione dei componenti plastici. Il grafico presentato nel paragrafo 1.11 a pagina 20 metteva a confronto i costi di produzione di un componente plastico con diverse ipotesi di tiratura, nel caso di una sua realizzazione in additive manufacturing o in injection molding. Un ragionamento analogo è stato fatto per il gimbal, con le dovute semplificazioni.

Il caso ipotizzato riguarda la produzione del prodotto in un numero di esemplari compreso tra le 1000 e le 5000 unità, che potrebbe coinvolgere, ad esempio, una start-up interessata al lancio del proprio prodotto sul mercato. Per effettuare la valutazione sono state prese in considerazione solo alcune delle voci di costo che contribuiscono a definire il totale dei costi di produzione, ovvero quelle più incidenti (ipotizzando di affidarsi a un fornitore esterno che già possieda i macchinari necessari).

Per la produzione di mille esemplari in FDM il costo totale stimato è di circa 23000 euro. Con un investimento di questa entità, una produzione di mille esemplari sarebbe conclusa in 3 mesi, un tempo compatibile con un lancio sul mercato del prodotto nel medio termine. Le voci di spesa che definiscono il totale sono state elencate nel paragrafo 6.11, a pagina 121. Come è possibile osservare nella tabella in alto, con una cifra di questo tipo il costo di un singolo set di componenti si aggirerebbe intorno ai 23 euro.

Per calcolare i costi di produzione di un set di componenti analoghi realizzati in stampaggio a iniezione (standard e gas-assistito), è stato stimato un costo totale degli stampi, per tutti e 5 i componenti, pari a 100000 euro. Il costo del materiale è stato ridotto del 70% rispetto al PLA, giungendo alla cifra di circa 2 euro per ogni set.

Come si può evincere dalle tabelle a fianco, al di sotto dei 5000 esemplari l'additive manufacturing risulta essere la tecnologia più conveniente; al di sopra di questa cifra, lo stampaggio a iniezione torna ad essere l'opzione più economica.

Produzione FDM 1000 pcs.	
costo energetico	910,80 €
costo materiale	7000,00 €
costo macchinari	15000,00 €
costo stampi / attrezzature	0,00 €
costo assemblaggio	-,- €
costo operatore	-,- €
<b>TOT investimento</b>	<b>22910,80 €</b>
<b>costo cad. (1000 pcs.)</b>	<b>22,91 €</b>

Produzione IM 1000 pcs.	
costo energetico	-,- €
costo materiale	2000,00 €
costo macchinari	-,- €
costo stampi / attrezzature	100000,00 €
costo assemblaggio	-,- €
costo operatore	-,- €
<b>TOT investimento</b>	<b>102000,00 €</b>
<b>costo cad. (1000 pcs.)</b>	<b>102,00 €</b>

Produzione IM 5000 pcs.	
costo energetico	-,- €
costo materiale	10000,00 €
costo macchinari	-,- €
costo stampi / attrezzature	100000,00 €
costo assemblaggio	-,- €
costo operatore	-,- €
<b>TOT investimento</b>	<b>110000,00 €</b>
<b>costo cad. (5000 pcs.)</b>	<b>22,00 €</b>

**Confronto dei costi di produzione** per una tiratura di 1000 e 5000 esemplari, in additive manufacturing e in stampaggio a iniezione.

Nel caso di una produzione inferiore alle 5000 unità, l'impiego della stampa 3D FDM risulta vantaggioso. Oltre questa cifra è più conveniente servirsi di una tecnologia maggiormente orientata alla produzione seriale.

## 7.5 Commenti conclusivi e scenari futuri

Aver individuato nella produzione in additive manufacturing un'alternativa economicamente più conveniente rispetto alle tecnologie tradizionali di produzione è un dato significativo. Mentre per alcune applicazioni ingegneristiche (componenti plastici, collettori, pale di motori a turbina, ecc.) è una possibilità già ampiamente sperimentata in ambito industriale, nel caso di prodotti consumer, di media complessità, non è ancora stata presa altrettanto in considerazione.

Il progetto realizzato vuole essere un invito a sperimentare in questa direzione, adottando una modalità progettuale che sia in grado di sfruttare i punti di forza della tecnologia additiva per creare prodotti ad alto potenziale innovativo. Progettare componenti dalle geometrie complesse, con l'obiettivo di ridurre il numero di parti e i tempi di assemblaggio, è solamente una delle strade percorribili. L'impiego di tecnologie differenti potrebbe condurre a nuovi vantaggi, come il raggiungimento di obiettivi particolari per il prodotto o una disintermediazione della catena produttiva.

La qualità delle scocche realizzate con la tecnologia FDM non è paragonabile a quella garantita dallo stampaggio a iniezione. Tuttavia, la progressiva evoluzione dei macchinari potrebbe definitivamente eliminare una eventuale peggiore finitura superficiale dei componenti stampati in 3D. Le future stampanti MultiJet Fusion di HP (vedi 005. e 006. a pag. 5) o le stampanti CLIP di Carbon 3D (007. a pag. 6) potrebbero infatti colmare questo gap e raggiungere contemporaneamente una velocità di stampa compatibile con le esigenze di una produzione seriale.

Con il rapido avanzamento delle tecnologie correlate, è lecito intravedere nell'additive manufacturing un potenziale mezzo per la produzione di prodotti definitivi anche in ambito consumer. L'adozione di macchinari additivi per la produzione in piccola serie di prodotti a bassa complessità è una soluzione già utilizzata. Nel caso di prodotti mediamente più complessi, si tratta invece di una possibilità che non è ancora stata esplorata. Per raggiungere questo obiettivo sarà indispensabile innanzitutto conoscere i limiti delle nuove tecnologie e agire entro questi margini, adattare i prodotti ai limiti tecnologici e infine sfruttare i vantaggi derivanti

dalle caratteristiche del processo additivo.

Con ovvie limitazioni, il progetto di tesi ha mirato proprio a questo: progettare nel contesto dell'additive manufacturing cercando di allontanarsi dai cliché dell'oggetto "stampato in 3D" e sfruttando, invece, il potenziale più nascosto della tecnologia additiva.

Il risultato della progettazione è un oggetto probabilmente ancora legato all'universo "maker" ma progettato e ingegnerizzato con l'attenzione e la cura che contraddistinguono l'industrial design. Si tratta di un prodotto sperimentale che a livello di performance non è in grado di competere con alcuni prodotti sviluppati recentemente e in arrivo sul mercato. A differenza di questi, però, è un progetto che suggerisce una visione più ampia, che prova a disintermediare la catena produttiva, mettendo nelle mani di chi possiede una stampante 3D la possibilità di produrre e assemblare un oggetto evoluto.

Senza immaginare scenari troppo ambiziosi, è auspicabile che il possesso di macchinari sempre più evoluti da parte di un numero crescente di individui venga accompagnato dalla disponibilità di progetti altrettanto elaborati che ne giustificano l'acquisto come mezzi personali e capillari di produzione. A questo proposito la possibilità di accedere a una varietà di modelli tridimensionali ufficialmente supportati dalle case produttrici e ottimizzati per la stampa 3D costituirebbe un valido incentivo all'acquisto. Se fosse possibile realizzare autonomamente parti di ricambio, scocche sostitutive o accessori specialistici, potrebbe accadere qualcosa di simile a quanto avvenuto in ambito informatico con l'affiancamento di applicazioni mobili semi-professionali a controparti desktop per uso professionale. Le aziende potrebbero vendere contemporaneamente sia i prodotti tradizionalmente realizzati che una serie di modelli tridimensionali ad essi correlati.

Rimanendo in tema, GoPro stessa potrebbe vendere i modelli di una gamma di accessori che completino e migliorino l'utilizzo della sua famiglia di prodotti. In questo modo verrebbero colmati quei vuoti che spesso richiedono soluzioni particolari a problematiche più specifiche, "nell'ordine delle migliaia di unità".

.....

### Bibliografia:

*Beyond 2014: Evolving Opportunities in Technology*, curated by M.J. Moskowitz, J. C. Beard, Wells Fargo Wealth Management, 2014, Gartner, 2013

*3D opportunity for production: Additive manufacturing makes its (business) case*, Deloitte University Press, 2014, <http://dupress.com/articles/>, (12 agosto 2015)

3D printing and the new shape of industrial manufacturing, PricewaterhouseCoopers, USA, 2014

*Roundup Of 3D Printing Market Forecasts And Estimates*, Forbes, 2014

<http://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2014/08/09/>, (12 agosto 2015)

D. Colombo, *Pensare studiare e fare in 3d*, in "3d Printing Creative", n°1, 2014, pp. 32-35

D. Bollani, *Il design del futuro*, in "3d Printing Creative", n°2, 2014, pp. 13-15

L. Moroni, *Muoversi in 3d*, in "3d Printing Creative", n°3, 2014, pp. 4-7

F. Vacher, *La stampa 3d crea nuovi spazi*, in "3d Printing Creative", n°3, 2014, pp. 18-21

R. Busetto, D. Colombo, *Stamperemo in grafene*, in "3d Printing Creative", n°3, 2014, pp. 61-6

M.T. Della Mura, *HP miscela la realtà*, in "3d Printing Creative", n°3, 2014, pp. 68-69

D. Colombo, M.T. Della Mura, *Una macchina cambia il mondo*, in "3d Printing Creative", n°4, 2015, p. 16

M. Soppelsa, D. Colombo, *Vola alto la stampa 3d*, in "3d Printing Creative", n°6, 2015, pp. 4-8

M. Soppelsa, *Stampa 3d - il lavoro che cambia*, in "Le guide pratiche di 3d Printing Creative", n°1, 2014

F. Pignatelli, *Come la stampa 3d cambia il mondo del design*, in "Le guide pratiche di 3d Printing Creative", n°6, 2014

Collection Book 2015, Exnovo, 2015, <http://www.exnovo-italia.com/catalogues/>, (16 agosto 2015)

### Webgrafia:

[www.basecamelectronics.com](http://www.basecamelectronics.com); sito dell'azienda produttrice del controller SimpleBGC 32-bit Tiny

[www.blackmagic3d.com](http://www.blackmagic3d.com); sito di vendita dei materiali per stampa 3D sviluppati da Graphene 3D Labs

[www.core77.com](http://www.core77.com); nota rivista/blog dedicata all'industrial design

[www.exnovo-italia.com](http://www.exnovo-italia.com); sito dell'azienda italiana Exnovo, pioniera nella produzione di manufatti in stampa 3D

[www.forbes.com](http://www.forbes.com); testata online della nota rivista statunitense di economia e finanza

[www.graphene3dlab.com](http://www.graphene3dlab.com); sito di Graphene 3D Labs, azienda dedita allo sviluppo di nuovi materiali per la stampa 3D

[www.misumi-europe.com](http://www.misumi-europe.com); piattaforma di vendita di componenti meccanici standard e personalizzati

[www.olliw.eu](http://www.olliw.eu); sito di riferimento di OlliW, ideatore del progetto "mBGC", controller per gimbal open hardware

[www.rcgroups.com](http://www.rcgroups.com); forum dedicato al modellismo radiocomandato

[www.tctmagazine.com](http://www.tctmagazine.com); rivista/blog online dedicata all'additive manufacturing e alla stampa 3D

[www.wired.com](http://www.wired.com); testata online della nota rivista di divulgazione scientifico-tecnologica

[www.wohlersassociates.com](http://www.wohlersassociates.com); sito di riferimento dell'agenzia di consulenza Wohlers Associates, specializzata nella pubblicazione di studi di settore dedicati all'additive manufacturing

### Ringraziamenti:

Si ringraziano, per il contributo fondamentale alla realizzazione del prototipo finale e dei prototipi intermedi, Riccardo Gatti, Stefano Airoidi e Fabio Caresi. Un ringraziamento particolare a Stefano Airoidi per il supporto nella produzione dei componenti e i consigli sullo sviluppo del progetto.

Ringrazio Laura e la mia famiglia, per avermi aiutato, in tanti modi, a raggiungere il traguardo di questo lungo percorso.

