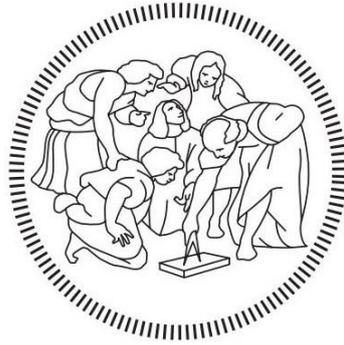


**Politecnico di Milano**



**Scuola di Ingegneria Industriale  
e dell'informazione**

***Sviluppo del sistema PRISM FABtotum  
per stampa 3D stereolitografica***

**Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica di**

**Berardino Puglielli**

**Matricola 817553**

**Anno Accademico 2014-2015**

**Relatore: Ing. Paolo Magni**

**Tutor Aziendale: Giovanni Grieco**

## Sommario

Indice delle figure .....	3
Indice delle tabelle .....	5
Ringraziamenti .....	6
Abstract .....	7
1. Introduzione alla manifattura additiva .....	9
1.1 Terminologia .....	9
1.2 Cenni Storici.....	10
1.3 Principali impieghi .....	12
1.4 Panoramica sulle tecnologie AM .....	13
1.4.1 Processi di fotopolimerizzazione .....	19
2. Panoramica su FABtotum .....	24
2.1 Additive 3D Printing .....	24
2.2 3D scanning.....	25
2.3 CNC machining.....	25
3. Progetto FABtotum PRISM .....	26
3.1 Sorgente luminosa e sistema ottico .....	30
3.1.1 Laser vs LED .....	32
3.1.2 Sperimentazione e test .....	36
3.2 Sistema di movimentazione della sorgente luminosa.....	43
3.2.1 Analisi preliminare di fattibilità.....	43
3.2.2 Diverse Configurazioni .....	47
3.2.3 Configurazione definitiva .....	52
3.3 Sistema di dissipazione .....	54
3.3.1 Simulazione tramite Autodesk Fusion 360 .....	61
3.4 VAT.....	64
3.4.1 PDMS vs FEP .....	65
3.5 Piano di stampa .....	67
3.6 Prototipo fisico .....	68
4. Conclusioni e sviluppi futuri.....	75
Appendice A – Sperimentazione sulle lenti dei diodi LED .....	76
Appendice B – Dimensionamento di dettaglio del dissipatore termico.....	79
Appendice C – Simulazione termica del sistema.....	83
Appendice D – Commento dell’azienda sui risultati del tirocinio.....	93
Bibliografia e sitografia .....	94

## Indice delle figure

<b>Figura 1 - Il primo apparato stereolitografico sviluppato da Charles Hull .....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 2 - Articolo dell'Austin American Newspaper datato 1987 sulla registrazione della licenza del primo apparato per sinterizzazione laser selettiva.....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 3 - Schema dell'apparato progettato da Scott Crump, estratto dal brevetto US 5121329 .....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 4 - Adrian Bowyer (a sinistra) e Vik Olliver (a destra) fondatore e membro del progetto RepRap .....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 5 - Classificazione dei processi di manifattura additiva proposta da D. T. Pham.....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 6 - Classificazione dei processi di AM attraverso lo stato fisico del materiale base utilizzato.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 7 - Schema di funzionamento della tecnologia FDM.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 8 - Schema di funzionamento della tecnologia LOM .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 9 - Schema di funzionamento della tecnologia SLS .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 10 - Schema di funzionamento della tecnologia 3D Print .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 11 - Schema di funzionamento della tecnologia MJM .....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 12 - Schema di funzionamento della tecnologia DOP.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 13 - Schema di funzionamento della tecnologia SLA .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 14 - Schema di funzionamento della tecnologia SGC.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 15 - Schema di funzionamento generale della tecnologia di MPSL .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 16 - Legami cross-link tra catene polimeriche .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 17 - Struttura molecolare dei monomeri delle resine acriliche ed epossidiche per la SL .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 18 - Spettro elettromagnetico .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 19 - FABtotum.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 20 - Schema di funzionamento del progetto PRISM .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 21 - Alpha concept del sistema PRISM.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 22 - Alpha concept del modulo PRISM al lavoro all'interno di un personal fabricator .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 23 - Spettro di emissione luminosa di un proiettore DLP .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 24 - Modulo laser .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 25 - Mancata polimerizzazione di una porzione dell'oggetto .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 26 - Sistema di movimentazione omega drive .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 27 - Spettro di assorbimento della resina FunToDo.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 28 - Diagramma a colonne relativo all'assorbimento della resina Spot-GP.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 29 - Esempio di lente prismatica generatrice di linea laser .....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 30 - Specifiche dimensionali del diodo LASER T0-38.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 31 - Schema costruttivo di un diodo LED .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 32 - Confronto tra luce laser e luce LED .....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 33 - Modello di fascio lambertiano .....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 34 - Esempio di lenti e relativi supporti.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 35 - Sistema di sperimentazione per la misura della temperatura dell'array di LED ..</b>	<b>36</b>
<b>Figura 36 - Andamento della temperatura nel tempo per la configurazione 1 .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 37 - Andamento della temperatura nel tempo per la configurazione 2 .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 38 - Andamento della temperatura nel tempo per la configurazione 3 .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 39 - Andamento della temperatura nel tempo per la configurazione 4 .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 40 - Sistema per la sperimentazione della distanza dal LCD e della lente ideale per l'applicazione richiesta .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 41 - Confronto a parità di distanza (23 mm) tra le lenti con angolo di apertura pari a 10° (a), 25° (b) e senza lente, ovvero 130° (c) .....</b>	<b>40</b>

<b>Figura 42 – Struttura interna di un pixel del display a cristalli liquidi (LCD)</b> .....	42
<b>Figura 43 - Esempi di motori passo-passo NEMA di diverse dimensioni</b> .....	44
<b>Figura 44 - Esempio di attuatore lineare non-captive</b> .....	45
<b>Figura 45 - Esempio di attuatore lineare esterno</b> .....	45
<b>Figura 46 - Esempio di sistema preassemblato preso in considerazione</b> .....	46
<b>Figura 47 - Esempio di cuscinetto scanalato a V che scorre su rotaia</b> .....	47
<b>Figura 48 - Esempio di cuscinetto lineare</b> .....	47
<b>Figura 49 - Configurazione con display orizzontale, barre con d = 10 mm e SC10UU</b> .....	48
<b>Figura 50 - Configurazione con display verticale, barre con d = 10 mm e SC10UU</b> .....	48
<b>Figura 51 - Configurazione con display orizzontale, barre con d = 6 mm e SC6UU</b> .....	49
<b>Figura 52 - Configurazione con display verticale, barre con d = 6 mm e SC6UU</b> .....	49
<b>Figura 53 - Dettaglio dei bracci di sostegno del piatto, i quali risultano a sbalzo rispetto al fondo della macchina</b> .....	50
<b>Figura 54 - Configurazione con motore verticale centrato rispetto al piatto</b> .....	50
<b>Figura 55 - Configurazione con motore verticale disassato rispetto al piatto</b> .....	51
<b>Figura 56 - Configurazione con motore orizzontale disassato rispetto al piatto</b> .....	52
<b>Figura 57 - Configurazione definitiva</b> .....	53
<b>Figura 58 - Sistema di mozione</b> .....	53
<b>Figura 59 - Sistema di scorrimento</b> .....	53
<b>Figura 60 - Equivalente elettrico del modello termico relativo alla dissipazione di potenza</b> ....	55
<b>Figura 61 - Diagramma della ventilazione forzata che esprime il fattore a in funzione della velocità dell'aria</b> .....	58
<b>Figura 62 - Diagramma della convezione forzata estrapolato ed approssimato</b> .....	58
<b>Figura 63 - Estratto dal catalogo della Fischer Elektronik per quel che riguarda le dimensioni e la resistenza termica del dissipatore SK 463</b> .....	59
<b>Figura 64 - Grafico per interpolazione della resistenza termica sul reciproco della lunghezza di estrusione</b> .....	59
<b>Figura 65 - Confronto tra le resistenze termiche ricavate dal catalogo e quelle calcolate</b> .....	60
<b>Figura 66 - Sistema PRISM comprensivo di contenitore esterno e ventole per il raffreddamento in convezione forzata</b> .....	61
<b>Figura 67 - Estratto della tabella dei materiali assegnati</b> .....	62
<b>Figura 68 - Internal Heat: carico termico applicato nella simulazione agli elementi finiti</b> .....	62
<b>Figura 69 - Convection: carico termico applicato nella simulazione agli elementi finiti</b> .....	63
<b>Figura 70 - Mesh settings</b> .....	63
<b>Figura 71 – Risultato grafico ottenuto dalla simulazione termica</b> .....	64
<b>Figura 72 - Vista assemblata ed esplosa del sistema di supporto del display a cristalli liquidi</b> .....	65
<b>Figura 73 - Foglio di PDMS</b> .....	65
<b>Figura 74 - Foglio di FEP</b> .....	66
<b>Figura 75 - Vat con fondo in PDMS sottoposto alle sperimentazioni</b> .....	66
<b>Figura 76 - Vista assemblata ed esplosa del sistema vat</b> .....	67
<b>Figura 77 – Vista assemblata ed esplosa del sistema di aggancio-sgancio</b> .....	68
<b>Figura 78 - Vista assemblata ed esplosa del sistema di sostegno e regolazione del piatto di stampa</b> .....	68
<b>Figura 79 - Vista dell'assieme importato in Autodesk Fusion 360, con aggiunta del driver con relativo supporto e mappa di colore propria di Fusion 360</b> .....	69
<b>Figura 80 - Lamiera in alluminio fresata per ottenere componenti del prototipo fisico</b> .....	69
<b>Figura 81 - Preparazione alla stampa di alcuni componenti necessari alla costruzione del prototipo fisico</b> .....	70
<b>Figura 82 - Vista della faccia superiore del sistema piatto</b> .....	70
<b>Figura 83 - Vista della faccia inferiore del sistema piatto</b> .....	71
<b>Figura 84 - Building plate montato sul personal fabricator FABtotum</b> .....	71

<b>Figura 85 - Piatto con sistema di movimentazione del fascio luminoso montato sul personal fabricator FABtotum .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 86 – Vat e building plate montati sul personal fabricator FABtotum .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 87 – 3 LED saldati su PCB .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 88 - Personal fabricator FABtotum con assemblato il prototipo del modulo PRISM ..</b>	<b>74</b>
<b>Figura 89 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 3 mm .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 90 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 13 mm .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 91 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 23 mm .....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 92 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 33 mm .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 93 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 43 mm .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 94 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 53 mm .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 95 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 63 mm .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 96 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 73 mm .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 97 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 83 mm .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 98 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 93 mm .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 99 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 103 mm .....</b>	<b>78</b>
<b>Figura 100 - Foglio di Excel per il calcolo della resistenza termica massima ammissibile .....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 101 - Foglio di calcolo Excel per il dimensionamento del dissipatore .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 102 - Relazione di tirocinio redatta da FABtotum .....</b>	<b>93</b>

## Indice delle tabelle

<b>Tabella 1- Specifiche del modulo laser .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabella 2 - Specifiche dei LED con <math>\lambda = 400</math> nm .....</b>	<b>35</b>
<b>Tabella 3 – Configurazioni degli esperimenti di temperatura svolti sui LED .....</b>	<b>37</b>
<b>Tabella 4 - Specifiche dei LED con <math>\lambda = 365</math> nm .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabella 5 - Specifiche dei LED con <math>\lambda = 380</math> nm .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabella 6 - Condizioni e limiti per il calcolo della resistenza termica .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabella 7 - Valori di potenza e resistenza termica più indicativi per il caso A (a secco) .....</b>	<b>56</b>
<b>Tabella 8 - Valori di potenza e resistenza termica più indicativi per il caso B (con thermal compound) .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabella 9 - Risultati fondamentali legati al dimensionamento e alla scelta del dissipatore nei due diversi casi di lunghezza L .....</b>	<b>60</b>

## Ringraziamenti

Desidero prima di tutto ringraziare l'Ing. Paolo Magni, relatore di questa tesi, per essersi reso disponibile, per la sua cortesia e per avermi dato la possibilità di lavorare su una tematica a mio avviso molto interessante e stimolante.

Desidero poi ringraziare tutti i ragazzi di FABtotum, in particolare l'Ing. Angelo D'Angelo, per avermi sopportato, avermi permesso di lavorare in un clima sereno e informale ed essersi sempre dimostrati disponibili per consigliarmi e soddisfare le mie curiosità durante tutto il periodo del tirocinio. Tutto ciò mi ha permesso di imparare tantissimo e di trarre un grande beneficio da questa esperienza.

Non posso fare poi a meno di rivolgere un grandissimo ringraziamento ai miei genitori, che mi hanno dato la possibilità di affrontare questo percorso di studi, non senza sacrifici, credendo in me e sostenendomi sempre, anche nei fallimenti, a mio fratello minore, il quale, a sua insaputa, mi sprona a dare sempre di più, e a tutto il resto della mia famiglia che è mi è sempre stata accanto.

Un ulteriore ringraziamento va a tutti i compagni di una vita, da quelli di "Ape al Luna" a quelli di "Mucchio Selvaggio", che mi hanno insegnato cosa sia l'amicizia ed hanno sempre saputo aiutarmi nei momenti del bisogno, ma soprattutto regalarmi più di un sorriso. Desidero ringraziare anche i compagni di corso, che mi hanno accompagnato durante tutto il periodo universitario ed hanno arricchito la mia vita con tanti momenti degni di nota, riscoprendo amicizie datate e trovandone di nuove sincere.

L'ultimo ringraziamento, ma non per importanza, va a Giulia, la ragazza che da 6 anni a questa parte sopporta le mie stranezze, mi consola e consiglia nei momenti più bui e che riesce a farmi sentire una persona ogni giorno migliore.

## Abstract

Questo *report* ha lo scopo di esporre passo dopo passo l'esperienza di tirocinio formativo svolta nell'azienda FABtotum, *start-up* produttrice di elettronica di consumo, in particolare di un *personal fabricator* in grado di stampare in 3D, eseguire scansioni 3D (laser e tattili) ed asportare materiale come un CNC. L'esperienza è stata mirata alla progettazione del modulo PRISM, ovvero un *add-on* (modulo aggiuntivo) che consentisse alla macchina di aggiungere alla funzione di stampa 3D un nuovo metodo di creazione di artefatti, la stereolitografia.

La stereolitografia è la prima tecnologia di manifattura additiva sviluppata e brevettata; consiste nella solidificazione di una specifica resina liquida grazie a un processo fotopolimerico, legato cioè alla luce, in particolare alla luce ultravioletta. Questo processo, polimerizzando uno strato di materiale per volta, consente di ottenere un oggetto di geometria complessa in tempi rapidi e con buona finitura superficiale.

Nel caso del progetto PRISM, il fascio luminoso, dopo aver attraversato una maschera dinamica (LCD), arriva alla camera di costruzione, contenente la resina, dal basso, comportando diversi vantaggi, per lo più dimensionali, e necessitando di un sistema che non deflettesse o modificasse il fascio di luce, ovvero il più trasparente possibile. Questo sistema viene comunemente definito *Mask Projection Stereolithography*.

La progettazione ha riguardato prima di tutto il sistema di movimentazione del fascio luminoso, ma è stata comunque svolta in parallelo con quella degli altri sistemi (dissipativo, della camera di costruzione e del piano di stampa) e con le sperimentazioni sulla sorgente luminosa, che hanno comportato diverse scelte progettuali. Infatti il progetto del sistema di movimentazione e dissipazione, oltre a dover tenere in considerazione i vincoli progettuali di ingombro e costi imposti dall'azienda, è stato pensato prima per una soluzione con modulo o diodo laser e poi modificato per sostenere un *array* di 11 LED, disposti su due file e sfalsati, in seguito alle sperimentazioni effettuate sulle sorgenti luminose. Anche il progetto della camera di costruzione, in gergo *vat*, ha tenuto conto delle sperimentazioni svolte sul PDMS (polimero siliconico) e sul FEP (foglio di fluoropolimero) per implementare il fondo di un apparato in grado di contenere la resina e permetterne la solidificazione senza modificare il fascio luminoso. Il sistema di sostegno del *building plate* è stato anch'esso dimensionato rispettando dei vincoli di progetto, ossia la necessità di essere montato sul carrello x-y del *personal fabricator* FABtotum, ed è stato anche progettato con delle asole al fine di poterne regolare manualmente l'inclinazione e l'altezza rispetto agli altri componenti della macchina, in particolar modo per far sì che fosse parallelo al fondo del *vat*.

Una volta ritenuta conclusa la prototipazione virtuale, si è proceduto alla realizzazione del prototipo fisico, al fine di assicurare l'effettivo funzionamento del sistema meccanico e procedere con una nuova sperimentazione su quello ottico-polimerico (sorgente luminosa con rispettive lenti, LCD, *vat* e resine). Per poter far funzionare il prototipo all'interno di un *personal fabricator* opportunamente modificato, si è provveduto a prototipare un sistema elettronico provvisorio e il reparto informatico ha generato uno *script* Processing (basato sul linguaggio Java).

La sperimentazione sul prototipo è tutt'ora in corso per quel che riguarda la componente ottica, mentre la parte meccanica e termica può considerarsi completa; successivamente sarà necessario sviluppare un codice informatico che si adatti a quello già presente per il *personal fabricator* FABtotum e rivolgere l'attenzione allo sviluppo di un'elettronica dedicata necessaria al funzionamento del modulo PRISM.

The aim of this report is to show step by step the internship experience done at FABtotum, a start-up company that produces consumer electronics, particularly a personal fabricator able to 3D print, 3D scan (laser and tactile) and CNC machining. The experience was targeted to the design of the PRISM module, that is a new module that allowed the machine to add to the 3D print function a new artifacts creation method, the stereolithography.

The stereolithography is the first additive developed and patented manufacturing technology; it consists in the solidification of a specific liquid resin thanks to a photopolymerization process, that is related to the light, especially ultraviolet light. This process, polymerizing layer by layer, allows to fabricate rapid complex geometric 3D objects with good surface finishing.

Specifically for the PRISM project, the light beam, after passing through the dynamic mask (LCD), comes to the construction chamber, the tank of the resin, from the bottom, it involves some dimensional advantages and requires a system that doesn't deflect or change the light beam, which must be as diaphanous as possible. This system is commonly called Mask Projection Stereolithography.

First of all the design has involved the light beam motion system, but it was carried out in parallel with the designing of other systems (dissipative system, construction chamber system and building plate system) and with light source experimentations that have involved various design choices. In fact the motion and dissipative system design, besides the size and costs project constraints imposed by the company, was first implemented for a laser module or laser diode solution, than to move a 11 LED array, staggered on two rows, afterwards the light source experiments. Also the construction chamber design, typically called vat, has considered the PDMS (siliconic polymer) and FEP (fluoropolymer sheet) experimentations to implement the bottom of a resin tank that allow the solidification of the resin without modifying the light beam. The building plate support system was also dimensioned by respecting the project constraints, especially the need to mount it on the x-y carriage of the FABtotum personal fabricator, and it was also designed with slots in order to manually adjust the inclination and the height as regards the other components, so that it was parallel to the bottom of the vat.

After having considered the virtual prototyping, you have proceeded to the realization of the physical prototyping, in order to ensure the effective working of the mechanical system and to go on with a new experimentation on the optical-polymer system (light source with optical lens, LCD, vat and resins). In order to operate the prototype within a suitably modified personal fabricator, you have decided to prototype a provisional electronic system and the IT department has generated a Processing script (based on Java language).

The testing on the prototype is still going on as regards the optical component, while the mechanical and thermal design may be considered completed; subsequently it will be necessary to develop a computer code that fits the current one on FABtotum personal fabricator and to turn the attention to the development of a dedicated electronic that is necessary for the operation of the PRISM module.

## 1. Introduzione alla manifattura additiva

*Il 3D è la prossima grande cosa [the next big thing], alla stregua del motore a vapore e del computer.* Abraham “Abe” Reichenal, CEO di 3D Systems.

A partire dagli anni ottanta si è sviluppato, ed è tuttora in corso, un nuovo insieme di tecnologie, che ha dato vita a ciò che alcuni definiscono l’elemento trainante della “terza rivoluzione industriale”, ovvero ciò che è generalmente conosciuto con il nome di stampa 3D.

### 1.1 Terminologia

Una gran varietà di termini è stata, e viene tuttora utilizzata, per descrivere questo processo tecnologico innovativo che permette la realizzazione di un *mock-up* fisico tridimensionale partendo da un modello virtuale 3D.

- **3D Printing o Stereolithography:** inizialmente questi due termini venivano utilizzati per descrivere due specifiche tipologie di macchine, in realtà entrambi i termini, conosciuti rispettivamente dal *Massachusetts Institute of Technology (MIT)* e dall’azienda *3D Systems*, alludono all’estensione nella terza dimensione di processi 2D, la stampa e la litografia; non a caso, specialmente il primo termine, è entrato nella cultura comune ed è il termine più utilizzato e riconosciuto dal “grande pubblico”.
- **Automated Fabrication (Autofab):** questo termine, coniato da Marshall Burns nel suo libro omonimo, pone l’enfasi sull’automazione per la manifattura del prodotto, implicando un intervento minimo o nullo da parte di un addetto; di contro non c’è un diretto riferimento al metodo in cui le parti vengono costruite, tanto che anche le tecniche sottrattive, controllate da un Centro a Controllo Numerico (CNC), possono essere descritte da questa espressione.
- **Solid Freeform Fabrication (SFF):** la fabbricazione di solidi di forma libera basa il proprio nome sulla capacità del sistema di generare modelli tridimensionali di geometria arbitrariamente complessa, cioè essere in grado di generare profili di diversa forma senza che questa influisca sulla difficoltà di realizzazione dell’oggetto; ciò rappresenta un grande vantaggio rispetto ai processi manifatturieri tradizionali, la cui complessità aumenta all’aumentare della complessità geometrica.
- **Digital Fabrication o Fabbng:** la fabbricazione digitale fa riferimento a un processo dove l’aspetto progettuale e quello produttivo diventano un unico soggetto, permettendo quindi la perfetta integrazione tra i processi di gestione, progettazione, fabbricazione e post-vendita di un manufatto; quindi la distanza che separa il momento progettuale e quello realizzativo viene ridotta al minimo, tuttavia, come per l’*Autofab*, questa definizione non prescinde dalla fabbricazione sottrattiva.
- **Rapid Prototyping (RP):** è l’espressione più frequentemente utilizzata all’interno delle industrie per descrivere quel processo che consente di creare, in tempi brevissimi rispetto alle tecnologie tradizionali, un prototipo, ovvero la rappresentazione di un sistema o una parte, prima della commercializzazione o del rilascio finale del prodotto; ciò consente l’adozione da parte dell’azienda di una logica *Just in Time*, l’obiettivo dell’azienda diventa quindi quello di far sì che la velocità di progettazione tenda a coincidere con la velocità di produzione, rendendola più competitiva sul mercato. Questo termine però risulta ormai inadeguato a descrivere le più recenti applicazioni, in quanto i miglioramenti riguardanti la precisione e le proprietà dei materiali, e quindi la qualità del prodotto finale, hanno portato l’utilizzo al di fuori della sfera della semplice prototipazione, mostrando uno stretto legame con il prodotto finale, non essendo più possibile etichettare questi prodotti solo come

prototipi. A conferma hanno già preso piede nuovi termini quali **Direct Digital Manufacturing (DDM)** e **Rapid Manufacturing (RM)**.

- **Additive Manufacturing (AM) o Layer-Based Manufacturing:** a fronte del fatto che i termini elencati precedentemente non riflettono appieno tutte le caratteristiche di questa tecnologia, il Comitato Tecnico F42 insieme all'*American Society for Testing and Materials International (ASTM International)* si sono riuniti riguardo l'assunzione di una nuova terminologia che venga universalmente adottata; mentre il dibattito è tuttora in corso, l'*ASTM International* ha deciso consensualmente di adottare come standard il termine *Additive Manufacturing*, con la definizione di tecnologia in grado di produrre direttamente un modello, inizialmente generato utilizzando un sistema CAD 3D, senza il bisogno di *process planning*. Questa risulta chiaramente una definizione alquanto semplicistica, ma pone l'accento sulla possibilità di semplificare il processo di fabbricazione di un oggetto tridimensionale, partendo da un file CAD, aggiungendo materiale per strati (*layers*), senza necessità di studiare accuratamente il processo (ordine di generazione delle *features*, utensili e attrezzaggio).

## 1.2 Cenni Storici

Per poter arrivare a comprendere l'apporto significativo che questo nuovo processo sta dando ai giorni nostri, è necessario fare alcuni importanti accenni alla storia di questa tecnologia. Le origini risalgono ai primi anni ottanta, quando contemporaneamente in Giappone, Francia e Stati Uniti si iniziano a mettere in atto processi in grado di fabbricare un oggetto 3D aggiungendo selettivamente materiale strato dopo strato; il lavoro più influente e decisivo risale al 1983, quando Charles W. Hull inventa un sistema in grado di solidificare selettivamente un fotopolimero al fine di costruire un oggetto tridimensionale per strati successivi. Nel 1986 definisce la stereolitografia (SL) nel brevetto US 4575330 A dal titolo "*Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*" e fonda, insieme a R. Fried, una delle più grandi aziende di questo settore: la *3D Systems, Inc.*



Figura 1 - Il primo apparato stereolitografico sviluppato da Charles Hull

Nel 1984, Joe Beaman e Carl R. Deckard cominciano a lavorare sulla sinterizzazione laser selettiva (SLS) e tre anni più tardi fonderanno *Desk Top Manufacturing (DTM) Corp.* Nel 1989 Scott Crump inventa la modellazione a deposizione fusa (Fused Deposition Modeling, FDM) e fonda la *Stratasys, Ltd.* registrando il brevetto US 5121329 A dal titolo "*Apparatus and method for creating*

*three-dimensional objects*". Contemporaneamente Michael Feygin definisce il processo Laminate Object Manufacturing (LOM) e fonda *Helisys Inc.* Qualche anno più tardi un gruppo di ricercatori del *MIT* brevetta il processo chiamato 3D Print (3DP), che venderà a diverse aziende, tra le quali la *Z Corporation*.

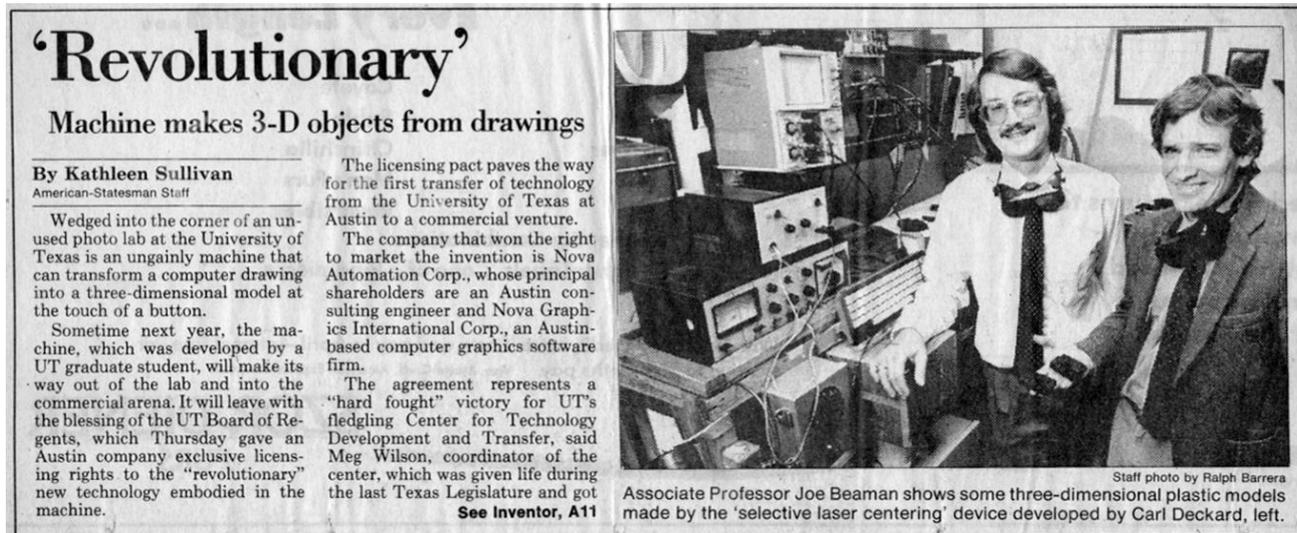


Figura 2 - Articolo dell'Austin American Newspaper datato 1987 sulla registrazione della licenza del primo apparato per sinterizzazione laser selettiva

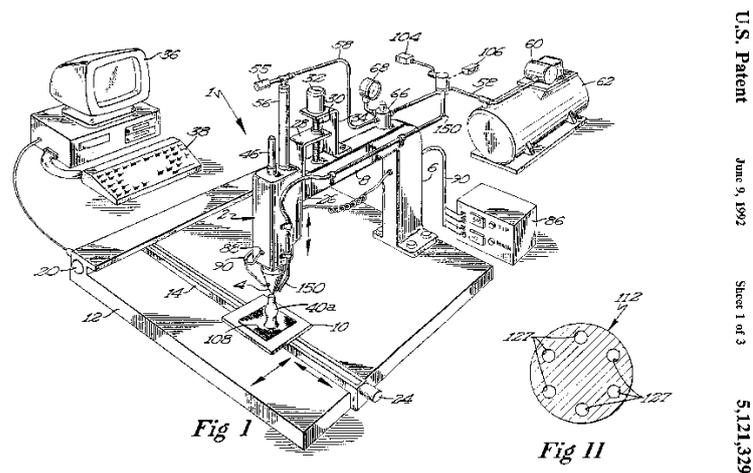


Figura 3 - Schema dell'apparato progettato da Scott Crump, estratto dal brevetto US 5121329

Durante gli anni novanta si assiste alla nascita di nuove aziende che iniziano a commercializzare macchine rivolte al settore industriale, un esempio tra queste è la società israeliana *Cubital Ltd.* che sviluppa il processo di Solid Ground Curing (SGC) e l'azienda tedesca *EOS GmbH* che sfrutta la tecnologia SLA. Oltre ai numerosi successi in questo campo ci sono stati anche un gran numero di fallimenti; è interessante notare che l'insuccesso di molte tecnologie è stato riscontrato per lo più in modelli di business scadenti o nella scarsa tempistica piuttosto che nella qualità mediocre del processo stesso.

Ma la vera svolta arriva nel 2005, quando Adrian Bowyer, ingegnere e matematico britannico, fonda il progetto *RepRap* (*Replicating Rapid Prototyper*, ossia creatore di prototipi a replicazione rapida), il quale introduce anche in questo ambito il concetto di *open-source*. Questa iniziativa si basa sull'idea di realizzare una stampante in grado di riprodurre da sé la maggior parte dei suoi stessi componenti e far sì che il web diventi un veicolo accelerante per la diffusione e sviluppo della tecnologia stessa grazie alla possibilità di condivisione consentita dalla *GNU-GPL* (*General Public License*).

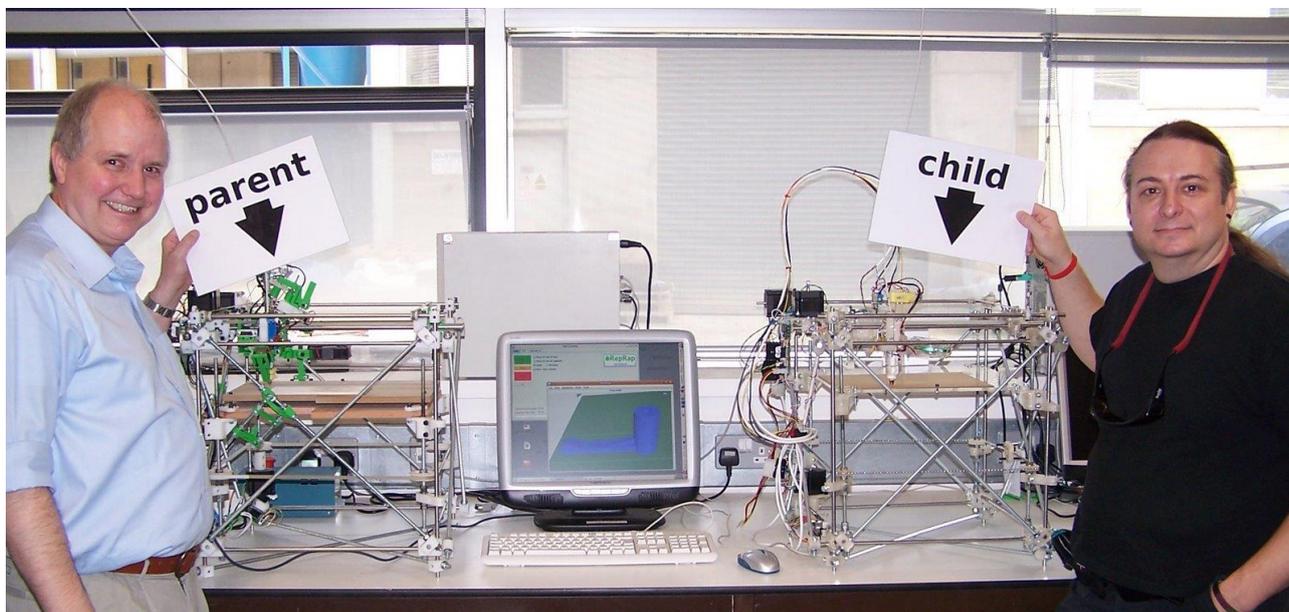


Figura 4 - Adrian Bowyer (a sinistra) e Vik Olliver (a destra) fondatore e membro del progetto RepRap

Tutto ciò, favorito anche dalla scadenza di alcuni brevetti legati a questa tecnologia, ha permesso l'emergere di nuove aziende produttrici di macchinari di piccole dimensioni (formato *desktop*), le quali insieme alle aziende leader hanno cominciato a sviluppare stampanti 3D ad un costo sempre inferiore, rendendo questo prodotto accessibile anche a medie e piccole imprese; fino ad arrivare ai giorni nostri, dove questa tecnologia è diventata alla portata anche di utenti privati.

### 1.3 Principali impieghi

Il continuo sviluppo tecnologico, sospinto dalla facile diffusività dell'informazione digitale, ha portato l'AM a vivere un periodo di crescita esponenziale con il ruolo di nuova frontiera produttiva, affermandosi nei principali settori industriali.

Questo insieme di tecnologie, il cui processo produttivo si basa sulla rapida creazione, per mezzo di un processo additivo, di un sistema o di una parte, anche di forma complessa, in tempi brevi, partendo da un modello virtuale 3D, senza bisogno di *process planning*, dell'uso di utensili e dell'abilità manuale di un addetto, suddivide le sue principali applicazioni in quattro macro aree:

- Verifiche formali: i modelli fisici consentono di verificare ogni aspetto estetico dell'oggetto ideato, dalla forma all'ergonomia; consentono inoltre di migliorare la comunicazione tra i reparti produttivi e quelli commerciali o con il cliente, favorendo perciò la riduzione del *Time to Market* (*T2M*).
- Test funzionali: i prototipi vengono realizzati per essere sottoposti a prove tecniche, quali test di resistenza agli sforzi e analisi fluidodinamiche, o di assemblaggio o verifiche di

durata e rispondenza alle normative di sicurezza, così da poter verificare ed analizzare ingegneristicamente la qualità della progettazione effettuata.

- Master per stampi: l'AM in questo campo viene utilizzato sia per la realizzazione diretta degli stampi, ovvero matrici, punzoni e inserti, che indirettamente, per generare modelli sacrificali; in questo ambito queste tecnologie vengono raggruppate nei campi definitivi *rapid casting* (fusione rapida) e *rapid tooling* (attrezzaggio rapido).
- Prodotti finiti: gli sviluppi nel campo dei materiali, della velocità e della precisione di macchina ha portato ad un miglioramento delle qualità delle tecniche di AM permettendo di stampare direttamente nel materiale definitivo in tempi brevi, da piccole a grandi serie, con possibilità di personalizzazione elevata e puntuale; in questa situazione vengono introdotti nuovi termini, identificanti un'attività industriale vera e propria in grado di produrre oggetti di geometria qualsiasi, con un'ampia gamma di materiali, anche in serie di numero elevato, senza ausilio di stampi o attrezzature: **Rapid Manufacturing (RM)** e/o **Direct Digital Manufacturing (DDM)**.

#### 1.4 Panoramica sulle tecnologie AM

Come già anticipato, il termine *Additive Manufacturing* raggruppa al suo interno una vasta gamma di tecnologie, tutte con lo scopo di creare un oggetto tridimensionale, ma altrettanto differenti tra loro per quanto riguarda il materiale utilizzato e le sue relative proprietà, il metodo di fabbricazione e l'utilizzo del prodotto realizzato; infatti il confronto diretto tra le varie tecnologie non sempre risulta possibile, in quanto ogni processo presenta vantaggi, applicazioni e finalità differenti.

Esistono numerosi metodi per classificare le tecnologie di AM:

- il metodo più adottato ed immediato consiste nel suddividere i vari processi in base allo stato fisico del materiale base utilizzato per la creazione di un artefatto;
- un altro metodo classifica secondo la tecnologia alla base del processo;
- un ulteriore metodo, abbastanza soddisfacente, risulta essere quello proposto dal Professor D. T. Pham, il quale utilizza un modello di classificazione bidimensionale (Figura 5), dove la prima dimensione si basa sulla tecnica attraverso la quale ogni *layer* viene generato e la seconda è legata al materiale grezzo che viene utilizzato;

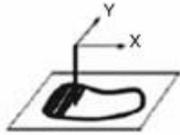
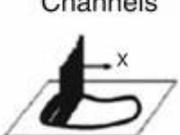
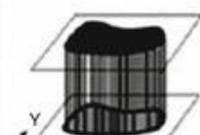
	1D Channel 	Array of 1D Channels 	2D Channel 
Liquid Polymer	SLA (3D Sys)	Objet	Envisiontech MicroTEC
Discrete Particles	SLS (3D Sys), LST (EOS), LENS Phenix, SDM	3D Printing	DPS
Molten Mat.	FDM, Solidscape	ThermoJet	
Solid Sheets	Solido PLT (KIRA)		

Figura 5 - Classificazione dei processi di manifattura additiva proposta da D. T. Pham

- infine è possibile un'ennesima classificazione, proposta da B. E. Stucker e G. D. Janaki Ram, che raggruppa le diverse tecnologie in sette diverse categorie in base all'architettura della macchina e alla trasformazione fisica di materiali simili.

Per questa trattazione è ritenuto più opportuno il primo metodo di classificazione, in quanto più immediato da comprendere e sufficiente per quel che riguarda l'introduzione alle varie tecnologie; si riporta nella figura seguente lo schema dove si distinguono processi a polvere, a liquido e a solido.

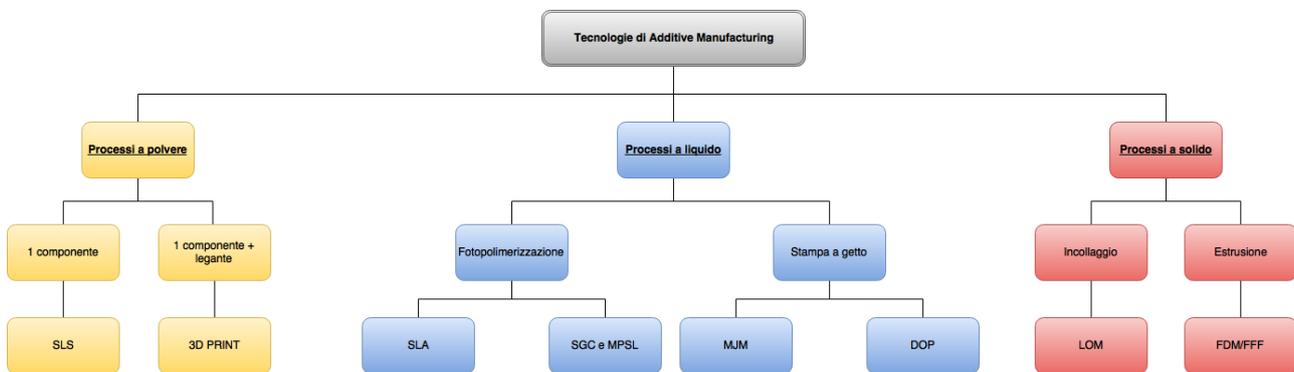


Figura 6 - Classificazione dei processi di AM attraverso lo stato fisico del materiale base utilizzato

Il processo **FDM** (*Fused Deposition Modeling*), a volte identificato con il nome di *Fused Filament Fabrication* (FFF), è sicuramente il più utilizzato dai maker e più conosciuto in ambito consumer, ossia quella delle stampanti a basso costo. Il processo tecnologico prevede l'estrusione di un materiale plastico attraverso un *nozzle* (ugello), riscaldato grazie ad una resistenza, e la sua susseguente deposizione su un piatto, in alcuni casi riscaldato. I materiali più comunemente utilizzati sono:

- ABS (Acrylonitrile Butadiene Stirene), una plastica a base di petrolio con temperatura di fusione intorno ai 230°C, consente di produrre oggetti robusti e resistenti a temperature ambientali elevate, tuttavia i suoi vapori sono considerati nocivi per la salute ed è quindi consigliato utilizzare sistemi di aspirazione;
- PLA (Acido Polilattico), polimero termoplastico biodegradabile ed ecocompatibile ricavato dal mais con temperatura di fusione intorno ai 180°C, gli oggetti generati hanno buona robustezza seppur più fragili di quelli in ABS e scarsa resistenza alle alte temperature;
- Nylon, materiale termoplastico, estruso tra i 240°C e i 270°C e consente di avere prodotti con elevata resistenza;
- PVA (Alcol Polivinilico), polimero idrosolubile, utilizzato a temperature comprese tra i 180°C e i 200°C, solitamente per generare i supporti e in presenza di un secondo estrusore.

È una tecnologia che permette una buona precisione con altezza degli strati dagli 0.12 mm ai 0.3 mm ed una buona accuratezza con tolleranze a partire da 0.2 mm, le parti costruite presentano buona resistenza al calore, agli agenti chimici, allo stress meccanico e alle variabili ambientali (umidità e secchezza).

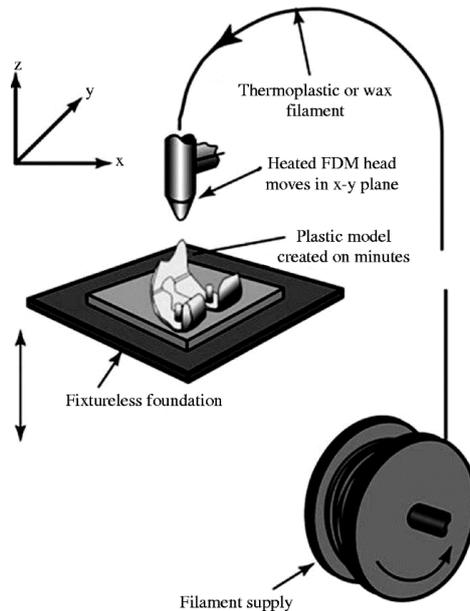


Figura 7 - Schema di funzionamento della tecnologia FDM

La tecnologia **LOM** (*Laminate Object Manufacturing*) è una tecnica che prevede l'incollaggio di fogli di carta o simili, rivestiti precedentemente di resine termo-attivanti. I fogli vengono tagliati per mezzo di un laser, opportunamente controllato dal punto di vista della potenza per non intaccare gli strati inferiori, e successivamente un rullo riscaldato passa sullo strato appena creato attivando la resina che funge da adesivo. I punti di forza di questa tecnologia sono la non necessità di generare supporti, la velocità del processo, la possibilità di costruire oggetti di dimensioni più elevate rispetto alle altre tecnologie, nessuna deformazione dovuta a tensioni interne residue e potenzialmente elevata finitura superficiale; d'altro canto il prodotto finale ha stessa consistenza del compensato, proprietà fisiche disomogenee ed anisotrope e deve essere impermeabilizzato e trattato con carta abrasiva, inoltre si ha il rischio di delaminazione e il *post-processing* risulta più complesso e delicato rispetto alle altre tecnologie.

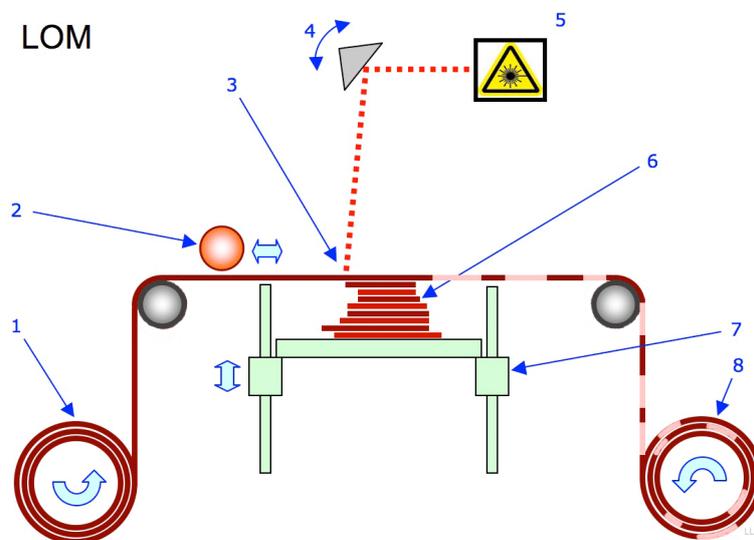
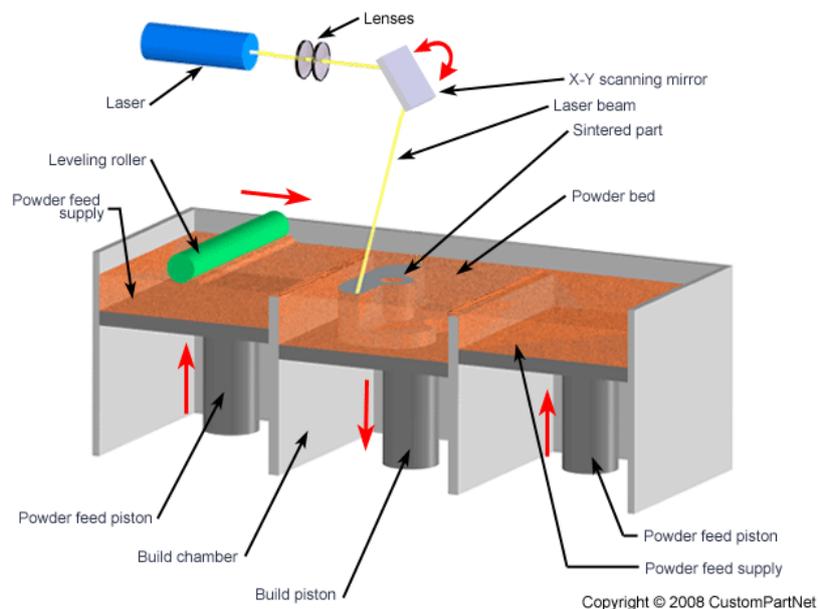


Figura 8 - Schema di funzionamento della tecnologia LOM

La **SLS** (*Selective Laser Sintering*) è un processo che utilizza come materiale base le polveri termoplastiche, metalliche o silicee che vengono fuse (sinterizzate) tra loro dopo essere state colpite da un fascio di luce laser infrarossa (IR) opportunamente indirizzato e sufficientemente potente lungo il percorso prestabilito tramite *slicing*; l'energia del laser (solitamente a CO<sub>2</sub>) permette anche di legare un *layer* al precedente. Dopo aver completato uno strato, il piatto (direzione z) si abbassa e un rullo controrotante o una tramoggia (soluzioni adottate rispettivamente da *DTM* e *EOS*) livella e sparge il nuovo strato di polvere pronto ad una nuova passata selettiva del laser. Sotto questa tecnologia si distinguono *Direct Laser Sintering* (DLS) se la sinterizzazione avviene durante la creazione del processo e *Indirect Laser Sintering* (ILS) se il vero e proprio processo chimico avviene dopo la creazione del prodotto in un forno apposito. I vantaggi offerti dall'utilizzo della sinterizzazione laser selettiva sono molteplici: primo fra tutti la possibilità di usare materiali di tipo diverso, che permette di ottenere oggetti finiti, non per forza prototipi, con elevate rese meccaniche e termiche; in più questo processo non necessita della progettazione e creazione di supporti, in quanto la polvere non sinterizzata funge essa stessa da supporto, permettendo quindi la generazione senza difficoltà di parti a sbalzo; inoltre permette di ottenere prodotti molto precisi, vista la possibilità di generare *layer* di spessore fino a 20 µm, e oggetti multi-parte funzionanti, ovvero che non necessitano di successivo assemblaggio. Tuttavia questo processo comporta anche degli svantaggi, infatti gli oggetti generati presentano una finitura superficiale scarsa, una porosità elevata (specialmente per i materiali amorfi) e per l'intero processo vi è la necessità di riempire la camera di costruzione con gas inerte, lasciando circa l'1% di ossigeno, al fine di diminuire il rischio di esplosioni ed evitare la contaminazione delle superfici. Inoltre la fase di *post-processing* è molto articolata, dalla rimozione della polvere in eccesso, che viene poi riciclata, all'eventuale trattamento termico per migliorare le proprietà meccaniche dei materiali metallici e ceramici, fino alla fase di stuccatura e verniciatura per migliorare l'aspetto estetico del prodotto.



**Figura 9 - Schema di funzionamento della tecnologia SLS**

Il **3D Print** è una tecnica che consiste nel depositare selettivamente del legante su uno strato di polvere, il quale incolla insieme le particelle tra loro; per la creazione di uno strato, un piatto si abbassa e una tramoggia distribuisce la polvere, la quale viene spianata da un rullo, quindi un ugello deposita piccole gocce di legante caricato elettricamente su specifiche regioni sulla polvere, questo processo viene controllato tramite segnali elettrici, scremando e deflettendo le gocce in eccesso prima che raggiungano il letto di polvere. Le polveri tipicamente più utilizzate vanno dai semplici polimeri fino a metalli leggeri o materiali ceramici, mentre per quel che riguarda i leganti si

impiegano polimeri termoindurenti, ovvero resine epossidiche; inizialmente si utilizzavano polveri refrattarie come silice ed allumina ed un legante silico-colloidale liquido. I benefici forniti da questa tecnologia sono: l'elevata velocità di realizzazione di un prodotto, tanto da essere ritenuta la tecnologia più rapida, la discreta precisione (strati fino a 80  $\mu\text{m}$ ), che consente ottimi dettagli e finitura superficiale notevole, l'estrema facilità d'uso, in quanto il sistema (semplice ed affidabile) è analogo a quello di una stampante a getto d'inchiostro, e la quasi totale assenza di materiale di scarto, poiché non vi è necessità di generare supporti (ruolo svolto dalla polvere non incollata) e inoltre la polvere non utilizzata può essere riutilizzata totalmente; il principale svantaggio di questa tecnologia risiede negli spesso necessari post-trattamenti termici e chimici, al fine di migliorare le caratteristiche formali e strutturali, facendo avvenire una vera e propria sinterizzazione.

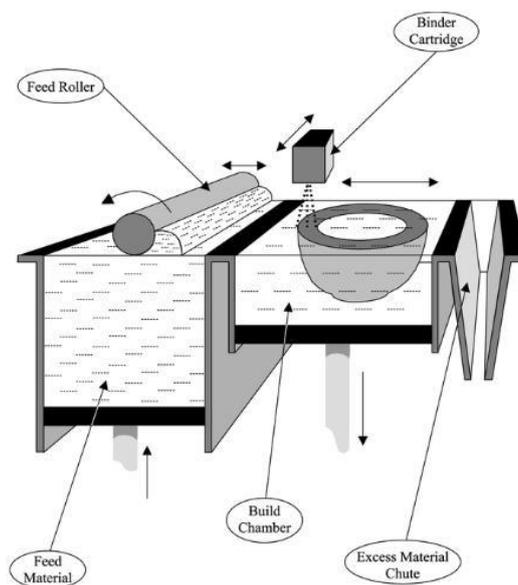


Figura 10 - Schema di funzionamento della tecnologia 3D Print

Il processo **MJM** (*Multi-Jet Modeling*) è concettualmente molto simile alla stampa a getto d'inchiostro, soltanto che il materiale liquido contenuto nella testina di stampa è un termopolimero, una cera, che fusa ad 80°C presenta bassa viscosità permettendole di essere spruzzata. Questa tecnologia prevede la traslazione della testina lungo gli assi x e y per depositare la cera, anche gli eventuali supporti vengono generati con questo materiale, e una volta completato uno strato il piatto si abbassa in direzione z. Questo processo consente un'elevata velocità di stampa, una buona fondibilità del prototipo, ideale quindi per processi "a perdere", la possibilità di utilizzo senza bisogno di particolari accortezze in ambiente d'ufficio, una elevata definizione e ottima finitura superficiale, dovuta alla tendenza della cera di diminuire l'energia superficiale inglobando le particelle spruzzate. Lo svantaggio principale è che la resistenza meccanica dei prodotti generati è molto scarsa, al punto che i modelli vengono utilizzati al massimo per verifiche formali o estetiche.

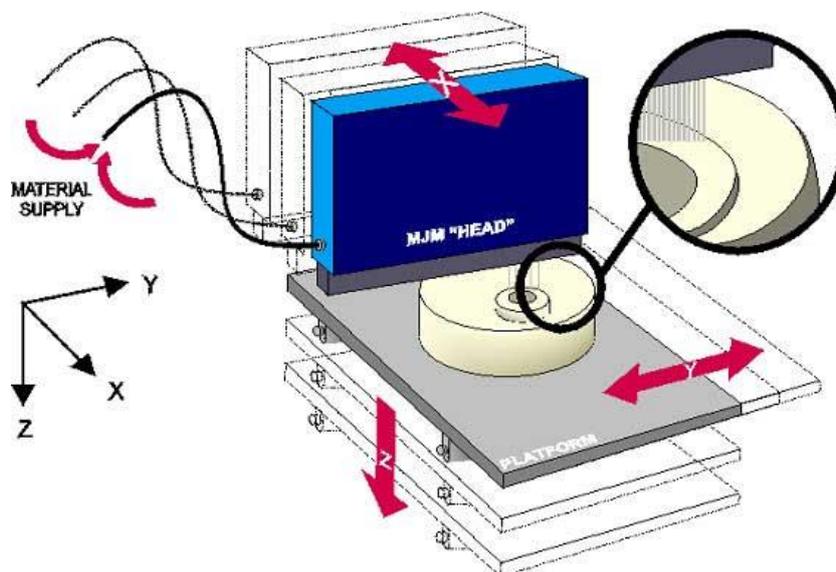


Figura 11 - Schema di funzionamento della tecnologia MJM

Il **DOP** (*Drop on Demand*) è una tecnologia ibrida, additivo-sottrattiva, brevettata dalla *Sanders Prototype, Inc.* (oggi *Solidscape, Inc.*), che consiste nel depositare gocce micrometriche, che solidificano rapidamente a contatto con l'aria, tramite due testine a getto separate per la creazione del modello: una testina deposita materiale termoplastico di costruzione (denominato *protobuild*) e l'altra un materiale ceramico di supporto (*protosupport*) facilmente eliminabile con trattamento in solvente. La peculiarità di questa tecnologia risiede nel fatto che in aggiunta all'appena citato processo additivo, ve n'è anche uno sottrattivo in cui una fresa elicoidale svolge il compito di spianare il *layer* appena costruito asportando il materiale in eccesso. Il punto di forza di questa tecnologia risiede quindi nell'estrema precisione e accuratezza dei modelli, tanto che presenta 13  $\mu\text{m}$  su 230 mm in direzione z e 25  $\mu\text{m}$  su 150 mm sugli assi x e y; inoltre l'utilizzo risulta semplice e affidabile, con elevata flessibilità per quanto riguarda la scelta della risoluzione. La pecca di questo processo consiste nel fatto che la produzione di un modello è piuttosto lenta.

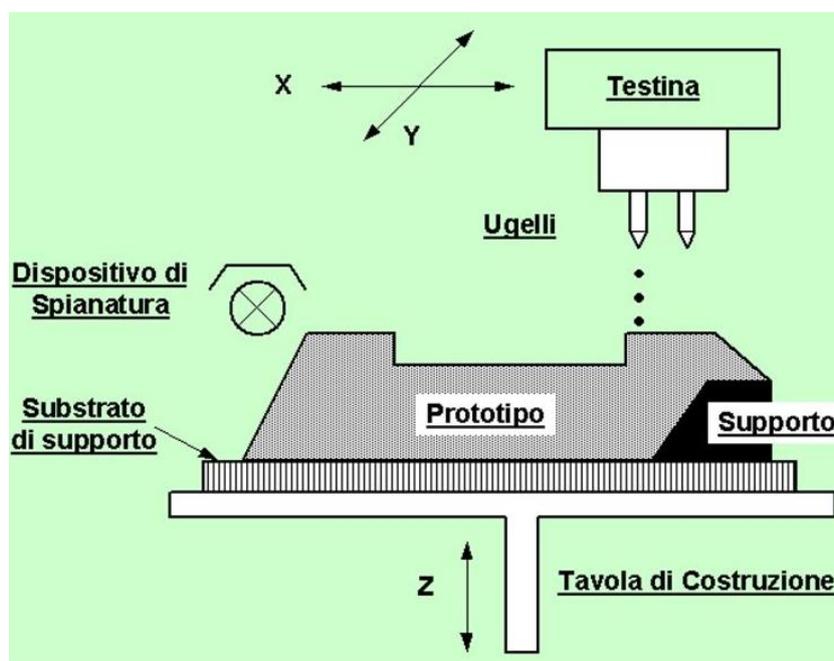


Figura 12 - Schema di funzionamento della tecnologia DOP

### 1.4.1 Processi di fotopolimerizzazione

Un particolare riguardo tra i processi a base liquida meritano quelli basati sulla fotopolimerizzazione per mezzo di onde luminose, poiché proprio una variante di questi processi sarà alla base del progetto FABtotum PRISM, che verrà presentato nei capitoli successivi. Le tecnologie di questa categoria si suddividono a loro volta in sistemi che sfruttano un fascio luminoso generato da un modulo o un diodo laser, denominati *Vector Scan*, e quelli che utilizzano una lampada, che può essere un proiettore DLP (*Digital Light Processing*) oppure un *array* di LED (*Light Emitting Diode*), denominati *Mask projection*.

Nella prima tra le due categorie, la tecnologia più significativa e rappresentativa è la **SLA** (*StereoLithography Apparatus*); questo processo, come già anticipato, sfrutta un fascio di luce laser, il quale viene modificato e opportunamente indirizzato per mezzo di sistemi ottici e specchi galvanometrici servocontrollati, facendo sì che il raggio luminoso arrivi sul pelo libero della resina, contenuta in una vasca, detta anche *vat* o camera di costruzione, solidificandola selettivamente; una volta completato uno strato, la piattaforma di stampa si abbassa permettendo a un nuovo strato di polimero liquido di ricoprire la sezione costruita e il processo può ripetersi fino alla completa creazione dell'oggetto. Per un corretto ricoprimento dello strato successivi sono spesso necessari dei meccanismi appositi: il più diffuso tra questi è quello chiamato *bagno profondo* che consiste nell'abbassare il pezzo di una quantità maggiore dello spessore desiderato per permetterne il ricoprimento da parte della resina, quindi la piattaforma viene nuovamente sollevata all'altezza voluta e una lama procede asportando il materiale viscoso in eccesso; un altro metodo è quello ad *U invertita*, dove un dispositivo per il riempimento scorre sullo strato appena creato e deposita resina liquida; ancora un altro sistema, chiamato a *ritenzione viscosa*, usa una maglia o una spazzola tra due bisturi per prelevare per gravità il materiale dalla vasca e distribuirlo sull'ultimo *layer*; infine si può utilizzare una *pompa a dislocamento positivo* per portare materiale al nuovo strato. I vantaggi legati a questo processo sono una buona accuratezza e precisione dimensionale (strati da 25  $\mu\text{m}$  a 50  $\mu\text{m}$  e precisione al di sotto di 0.1 mm sul piano x-y), la possibilità di generare geometrie complesse e l'eventuale possibilità di utilizzare materiali semitrasparenti che consentano la vista interna degli oggetti, così da migliorare la valutazione al controllo visivo. Per contro, i pezzi ottenuti sono più delicati rispetto a quelli realizzati con altre tecnologie o con resine industriali e quindi non particolarmente adatte a verifiche funzionali, inoltre il processo di polimerizzazione prosegue anche con la normale luce ambiente rendendo i pezzi fragili nel tempo.

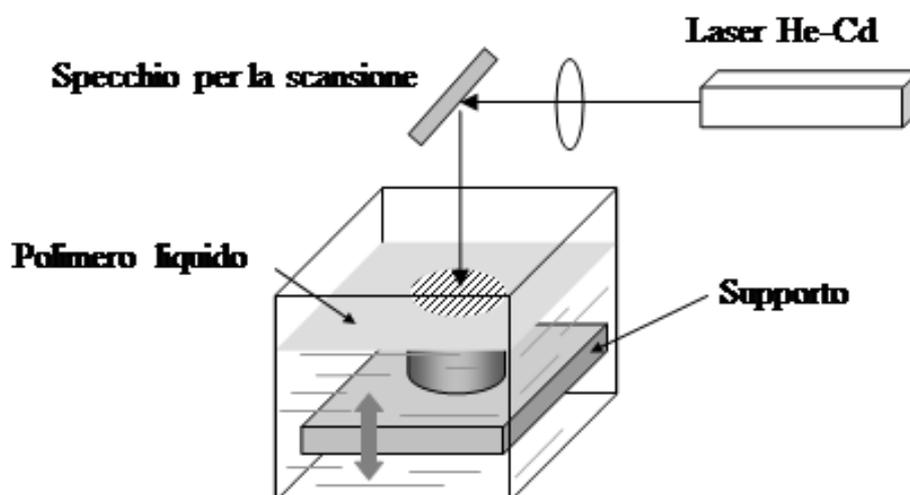


Figura 13 - Schema di funzionamento della tecnologia SLA

Nel secondo gruppo di tecnologie, il primo metodo apparso, e al giorno d'oggi abbandonato, fu quello **SGC** (*Solid Ground Curing*), il quale consentiva di creare un'intera sezione trasversale in una singola operazione per mezzo di fotomaskere, irradiando uno strato di resina con una lampada UV al mercurio. Le maschere utilizzate erano costruite su uno schermo di vetro, sul quale, analogamente al processo xenografico, veniva caricata un'immagine per mezzo di un processo ionografico e ricoperta con un toner elettrostatico, quindi venivano esposte alla luce UV per il processo di polimerizzazione e infine cancellato il *layer* deposto, rendendo lo schermo di vetro nuovamente disponibile al ricoprimento elettrostatico. Il processo di stampa vero e proprio si caratterizzava di cinque fasi: la preparazione dello strato di fotopolimero, deposto uniformemente; l'esposizione alla luce UV per mezzo di una lampada; la pulizia della resina non solidificata per mezzo di una spazzola a coltello d'aria; il riempimento dei vuoti generati per mezzo di una cera idrosolubile; la fresatura dello strato di cera e polimero al fine di ottenere lo spessore corretto. Come detto in precedenza questa tecnologia è stata accantonata in seguito al fallimento della *Cubital*, azienda israeliana sviluppatrice, nel 2002, in quanto nonostante i vantaggi di elevata precisione e accuratezza dimensionale in direzione z, possibilità di costruire un elevato numero di pezzi contemporaneamente senza bisogno di supporti e possibilità di fornire agli oggetti ottima resistenza meccanica senza necessità di *post-processing*, essa presentava eccessivi punti deboli tra i quali l'eccessiva lentezza del processo, l'eccessivo costo e l'impossibilità di recuperare la resina non solidificata in quanto una parte del fascio UV riusciva comunque a raggiungerla, nonostante la presenza della maschera, rendendola più viscosa, inoltre questa macchina presentava un elevato numero di sotto assiemi e parti in movimento necessitando di una supervisione regolare della produzione da parte di un operatore.

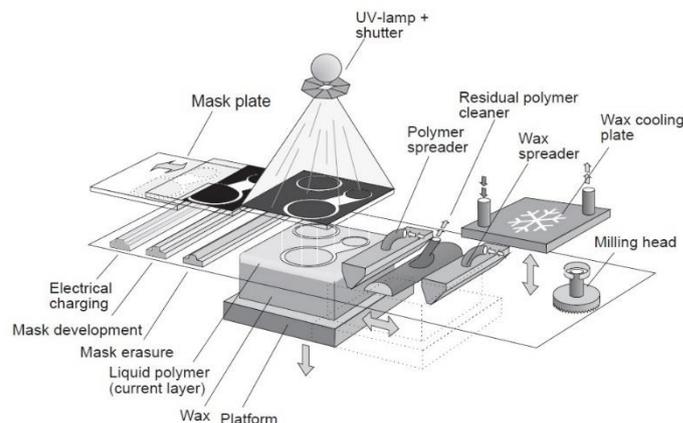


Figura 14 - Schema di funzionamento della tecnologia SGC

La tecnologia **MPSL** (*Mask Projection StereoLithography*) rappresenta un insieme di tecnologie, ciascuna caratterizzato dall'utilizzo di diversi strumenti e soluzioni; infatti negli anni si è assistito allo sviluppo di diverse varianti, che sfruttano come maschera dinamica un LCD (*Liquid Crystal Display*), un SLM (*Spatial Light Modulator*) oppure un microchip DMD (*Digital Micromirror Device*) e come sorgente di luce un proiettore DLP, piuttosto che una lampada UV o un *array* di LED. Questo gruppo di tecnologie presenta quindi un notevole vantaggio rispetto al sistema SLA, ovvero la possibilità di realizzare un singolo *layer* in un tempo decisamente ridotto, rendendo così più veloce l'intero processo di costruzione di un oggetto. Buona parte di queste varianti hanno in comune il fatto di polimerizzare una resina contenuta in una camera di costruzione dal basso, facendo passare quindi i raggi luminosi in una "finestra" (fondo della vasca) e costruendo quindi il

modello capovolto. Si riporta in Figura 15 lo schema di funzionamento generico su cui il sistema si basa, in quanto, come già accennato, sono possibili diverse varianti.

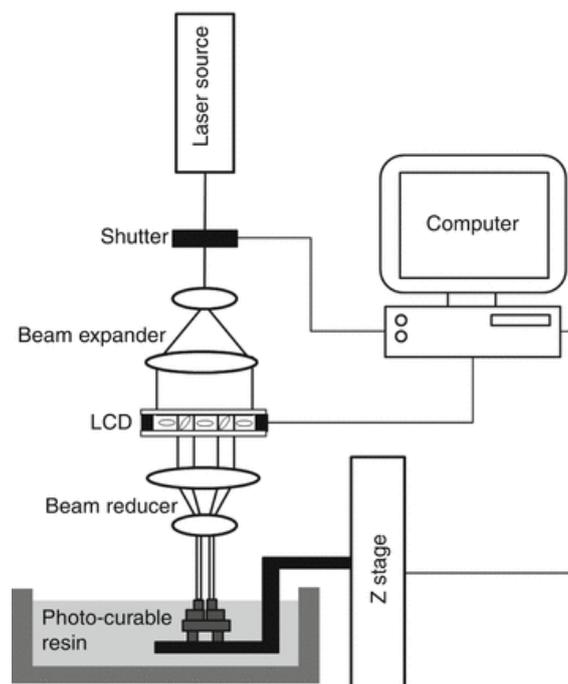


Figura 15 - Schema di funzionamento generale della tecnologia di MPSL

Entrambi questi gruppi di tecnologie utilizzano delle resine fotopolimeriche, sviluppate sul finire degli anni '60 per applicazioni fotoresistive nell'industria microelettronica, che, a differenza dei tipici materiali termoplastici, presentano una struttura molecolare *cross-linked*, ovvero caratterizzata da legami forti, covalenti o ionici, che tengono insieme le catene polimeriche tra loro, come mostrato in Figura 16; questa struttura ha il vantaggio che non fonde e mostra un minor comportamento di *creep* e *stress relaxation*.

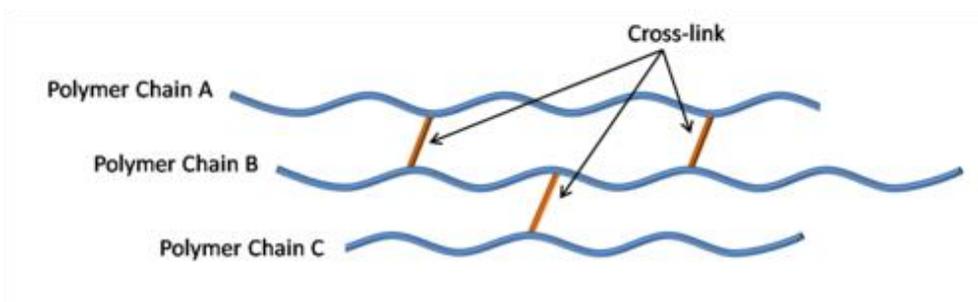


Figura 16 - Legami cross-link tra catene polimeriche

La polimerizzazione è quel processo che collega tra loro piccole molecole, chiamate monomeri, per formare molecole più grandi composte da diverse unità di monomeri, per l'appunto i polimeri. Il processo polimerico si suddivide in diverse tipologie a seconda della specie attiva, per quanto riguarda la stereolitografia, si distingue: polimerizzazione radicalica (o del radicale libero) e polimerizzazione cationica; entrambi i processi seguono 4 passaggi principali: la formazione del radicale libero o del catione (in base al tipo di reazione polimerica), l'attivazione, la propagazione e la terminazione.

Esistono tre diversi tipi di polimeri UV fotocurabili:

- resine acriliche: caratterizzate da elevata reattività, ma tipicamente producono parti poco resistenti a causa dell'imprecisione dovuta a *shrinkage* e *curling* (contrazione e raggrinzimento), in quanto incrementano gli sforzi all'interno dell'oggetto realizzato;
- resine epossidiche: le parti prodotte con questo materiale risultano più accurate, resistenti e dure di quelle ottenute con le resine acriliche; inoltre grazie alla presenza dell'anello epossidico si ottiene un restringimento di gran lunga inferiore (1-2%) a quello delle resine acriliche (5-20%), permettendo quindi un'eccellente adesione e riducendo la tendenza a formare grinze; tuttavia queste resine necessitano di una lenta velocità di passata da parte del fascio luminoso, presentano fragilità negli oggetti prodotti e sono estremamente sensibili all'umidità, che inibisce la polimerizzazione;
- resine ibride: la maggior parte delle resine tutt'ora in commercio sono di questo tipo; prevedono un'aggiunta di resina acrilica a quella epossidica, ciò comporta una combinazione dei benefici forniti da entrambe; infatti è possibile costruire rapidamente parti resistenti al punto da avere sufficiente integrità strutturale tale da evitare distorsioni durante la fabbricazione, inoltre gli acrilati riducono la fragilità delle parti costruite rispetto a quelle prodotte solamente in resina epossidica; un ulteriore vantaggio di queste resine risiede nell'aver permesso un miglioramento nella precisione, facendo fare alla stereolitografia un incredibile passo avanti.

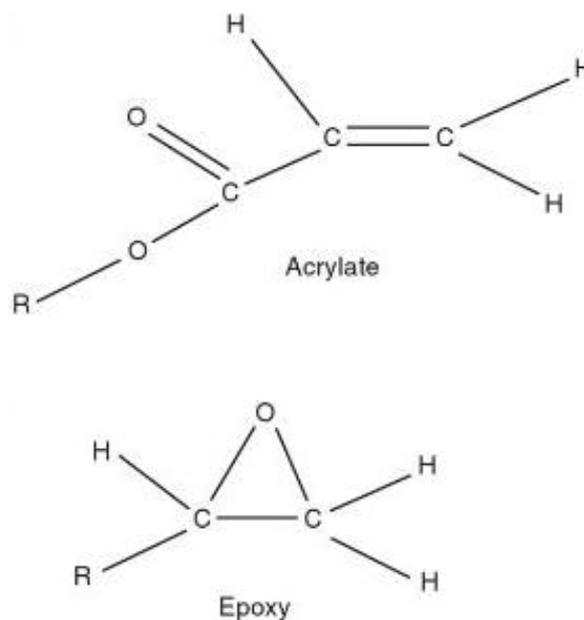
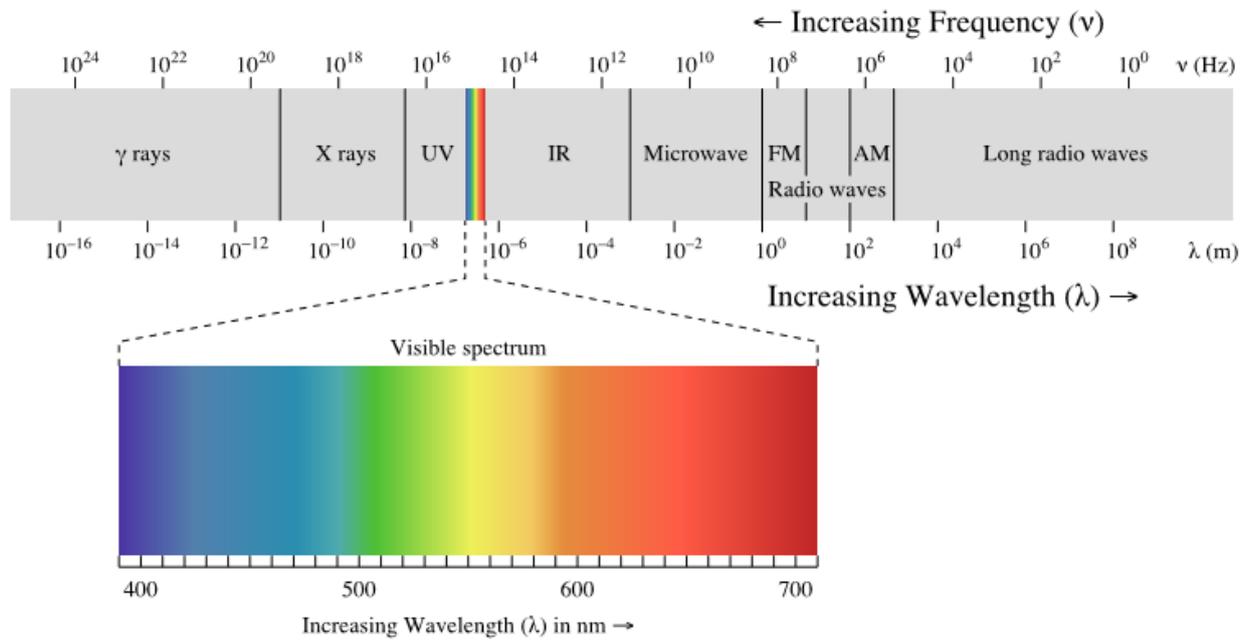


Figura 17 - Struttura molecolare dei monomeri delle resine acriliche ed epossidiche per la SL

Il processo polimerico più adatto alle resine acriliche risulta quello radicalico, mentre per le epossidiche si sfrutta la polimerizzazione cationica; per quanto riguarda invece le resine ibride acriliche-epossidiche, la polimerizzazione si svolge indipendentemente per ciascuna delle due, salvo casi particolari in cui si incorre nella copolimerizzazione, la quale consente di collegare insieme i due reticoli. L'elemento nella resina che permette che questa reazione avvenga è chiamato fotoiniziatore, il quale colpito dalla radiazione luminosa diventa "reattivo" con i monomeri liquidi e dà inizio allo sviluppo della catena polimerica. Dopodiché reazioni successive concorrono alla costruzione della catena polimerica e quindi alla creazione dei legami *cross link* tra le catene.

La luce necessaria a far sì che si svolga questo processo è tipicamente ultravioletta (UV), in particolare *near-UV*, con un range di lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) compreso tra 300 nm e 380 nm, anche se nel corso degli anni sono state sviluppate resine polimeriche in grado di polimerizzare con

lunghezze d'onda all'interno del campo del visibile (380-720 nm), in quello *far-UV* (122-200 nm), dei raggi X ( $10^{-3}$ -10 nm) e dei raggi  $\gamma$  (al di sotto di  $10^{-3}$  nm = 1 pm); anche se a livello industriale si utilizzano solo radiazioni UV e luce visibile.



**Figura 18 - Spettro elettromagnetico**

## 2. Panoramica su FABtotum

FABtotum nasce dall'idea di due studenti di architettura del Politecnico di Milano, Marco Rizzuto e Giovanni Grieco, i quali nel 2009 si avvicinano al mercato delle stampanti 3D, momento nel quale quest'ultimo era in forte espansione trainato da *MakerBot Industries* e *Ultimaker BV*, sospinti soprattutto dalla curiosità e dalla necessità di realizzare i modellini per i propri progetti universitari.

Negli anni 2012 e 2013, all'interno del PoliHub, lo *Startup District&Incubator* sostenuto dalla Fondazione Politecnico di Milano, il progetto FABtotum inizia a prendere vita: ottenendo i primi investimenti/finanziamenti, vincendo il contest *Switch2Product* e ottenendo il record europeo di finanziamento tramite *crowdfunding* sulla piattaforma Indiegogo, raggiungendo il valore di 589,564 \$ sui 50,000 \$ prefissati, ovvero il 1179% della quota minima prestabilita.

L'idea alla base di FABtotum non è semplicemente quella di essere una stampante 3D, per meglio dire "una delle tante", ma si propone come *Multipurpose Desktop Personal Fabrication Device*, ovvero una piattaforma di fabbricazione personale polivalente, in quanto la macchina si propone di essere *all-in-one*, cioè stampante 3D *open-source*, scanner 3D e CNC per asportazione di materiale.

Un altro importante punto di forza è il costo, infatti l'intero pacchetto FABtotum è acquistabile per soli 999 \$, prezzo che pone tale macchina tra le più accessibili sul mercato, promuovendosi quindi per un'utenza perlopiù *consumer* e *prosumer*, composizione di *producer* e *consumer*.



Figura 19 - FABtotum

### 2.1 Additive 3D Printing

La macchina è in grado di generare artefatti per mezzo della tecnologia FDM, sfruttando quindi la stratificazione per livelli e utilizzando materiali plastici, è infatti ottimizzata per stampare PLA e ABS, ma è in grado di stampare con una buona precisione e accuratezza anche Nylon, PETG (Polietilene tereftalato), HIPS (Polistirene ad alto impatto) e PC (Policarbonato). Presenta un volume di stampa pari a 214 mm di larghezza, 236 mm di profondità e 242 mm di altezza; il piatto di stampa, riscaldabile in meno di un minuto fino a 100°C, permette una migliore adesione dei

materiali stampati e attenua il ritiro in fase di raffreddamento, migliorando così la precisione nella deposizione ed adesione dei *layer* successivi.

## 2.2 3D scanning

Un ulteriore punto di forza di questo prodotto risiede nella possibilità di effettuare il *Reverse Engineering* (RE), ovvero essere in grado di scansionare oggetti già esistenti per poterne ricavare un file digitale in grado di essere analizzato, manipolato, modificato, esportato ed eventualmente riprodurli tridimensionalmente per mezzo di processi additivi o sottrattivi.

L'acquisizione digitale di questi prodotti è possibile grazie a due differenti tecniche, una prima tecnica più precisa e lenta basata sullo *z-probing*, ovvero effettuata per mezzo di un tastatore, ed una seconda più rapida e di media qualità che sfrutta una luce laser. La presenza di entrambe queste tecniche consente di poter acquisire sia oggetti piccoli o scuri o trasparenti, che il laser non riuscirebbe a scansionare, che oggetti di forma complessa, per i quali sarebbe necessario un quarto asse affinché il tastatore possa acquisirlo.

## 2.3 CNC machining

L'ultima tecnologia, ma non per importanza, che contraddistingue FABtotum è la possibilità di effettuare lavorazioni di fabbricazione sottrattiva a 3 assi, ma anche a 4 assi sfruttando il mozzo nella parte posteriore della macchina. Ed è tutt'ora in corso lo sviluppo di un quinto asse.

La macchina può infatti tagliare, fresare, incidere e forare diversi materiali quali schiume, compensato, alluminio e leghe di ottone sfruttando la rotazione imposta da un motore *Brushless* da 200W e utilizzando gli utensili in dotazione; ma presenta anche la possibilità di montare altri utensili per asportazione di materiale oltre a quelli forniti che consentano di lavorare con altri materiali.

### 3. Progetto FABtotum PRISM

*While there can be "better" manufacturing technologies. There is no "better" manufacturing technique.* Campagna PRISM sulla piattaforma Indiegogo.

Ciò vuol dire non esiste una tecnica di AM in grado di soddisfare ogni necessità dell'utente, ma che in ogni settore scientifico e tecnologico ci sarà una tecnica che meglio risponderà alle necessità del cliente e di conseguenza del prodotto da realizzare.

Proprio su questo paradigma tecnico-scientifico poggia l'idea alla base del progetto FABtotum PRISM, ovvero l'intenzione di aggiungere alla macchina *all-in-one* preesistente un *upgrade*, ossia un aggiornamento, compatibile quindi con qualsiasi *personal fabricator* FABtotum già esistente, con lo scopo di ampliare i settori ai quali FABtotum possa rivolgersi. Infatti grazie a questo *add-on* si aggiunge all'utente la possibilità di ottenere un prodotto fotopolimerizzando, per mezzo di radiazione UV, una resina liquida, con i conseguenti benefici che ciò comporta: miglior finitura, maggior livello di dettaglio, maggior complessità e possibilità di stampare in dimensioni molto più ridotte rispetto alle possibilità e funzionalità esibite finora dal sistema FDM.

Il processo di AM che questo prodotto vuole mettere in atto rientra nel campo MPSL; si ha quindi un sistema in cui una sorgente luminosa UV attraversa una maschera dinamica, la quale propone dopo ogni "passata" del fascio di luce il *layer* successivo, e indurisce la resina contenuta in un recipiente (*vat*), come si può osservare in Figura 20. La sostanziale differenza dai primi sistemi MPSL costruiti, ed in linea con la maggioranza di quelli attualmente realizzati, è che il pezzo viene fabbricato sottosopra in uscita dalla vasca di resina, ciò comporta due sostanziali vantaggi: non c'è bisogno di un meccanismo di ricopertura in quanto la resina fluisce per gravità tra la sorgente luminosa e l'ultimo strato polimerizzato riempiendo gli spazi vuoti; irradiando, non più il pelo libero della resina, ma essendo questa tra il *layer* precedente e la superficie piatta del fondo del *vat*, la finitura superficiale di ciascuno strato migliora notevolmente. D'altro canto questa configurazione comporta anche lo svantaggio dovuto alla forza di adesione che si genera tra il fondo della camera di costruzione (*vat*) ed il piano di stampa (*building plate*), che rischia di portare al danneggiamento della parte quando l'ultimo *layer* indurito viene separato dal fondo per far posto al *layer* successivo.

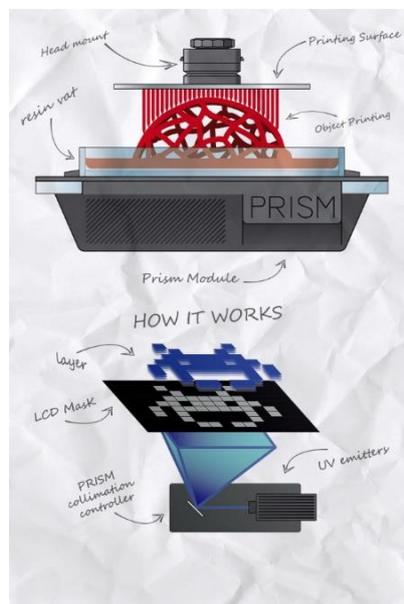


Figura 20 - Schema di funzionamento del progetto PRISM

Tutto ciò è stato presentato, così come era accaduto per il progetto del *personal fabricator*, sulla piattaforma Indiegogo, sulla quale il progetto è riuscito a raggiungere un finanziamento pari a 155,818 \$, raggiungendo l'obiettivo proposto e superandolo del 256%; nelle figure seguenti si può osservare l'*alpha concept* del sistema e il suo impiego all'interno della macchina.

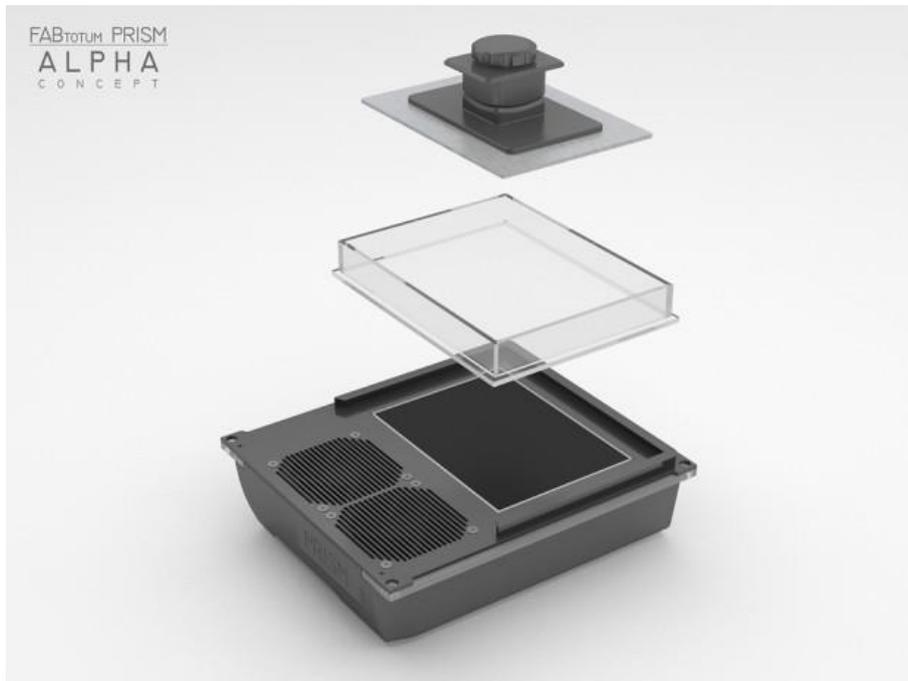


Figura 21 - Alpha concept del sistema PRISM

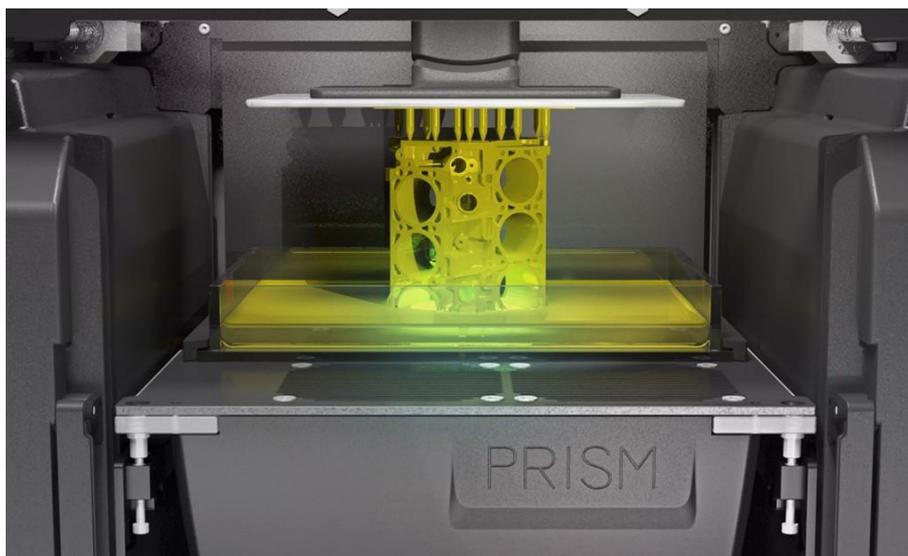


Figura 22 - Alpha concept del modulo PRISM al lavoro all'interno di un personal fabricator

Il problema che mi è stato posto/presentatomi dai responsabili aziendali del reparto di Ricerca e Sviluppo (*Research and Development, R&D*) mirava alla progettazione del sistema nella sua totalità, concentrandosi in particolar modo sulla parte *hardware*; ovvero sulla progettazione di un sistema di movimentazione della sorgente luminosa andando poi ad approfondire altri aspetti quali la scelta della sorgente luminosa, lo sviluppo di un contenitore per la resina (*vat*) e la realizzazione di un sistema in grado di sostenere ed eventualmente movimentare il *building plate*. L'attenzione verso la progettazione della parte *software* ed elettronica è stata lasciata dall'azienda come ultimo

step, in quanto la prima necessità era verificare l'effettivo funzionamento della tecnica di stampa tramite LCD.

All'inizio del mio stage formativo la sperimentazione sul progetto PRISM era già iniziata ed alcune decisioni aziendali e di prodotto erano già state prese. Diverse soluzioni si erano susseguite, il primo prototipo funzionante realizzato sfruttava la luce emessa da un videoproiettore DLP (*Digital Light Processing*), che quindi svolgeva contemporaneamente il ruolo di sorgente UV e maschera inviando selettivamente alla resina la luce; tuttavia questo sistema risultava eccessivo in termini di ingombro e soprattutto di rapporto tra energia luminosa emessa e quella effettivamente utile all'indurimento della resina, come si può vedere in Figura 23.

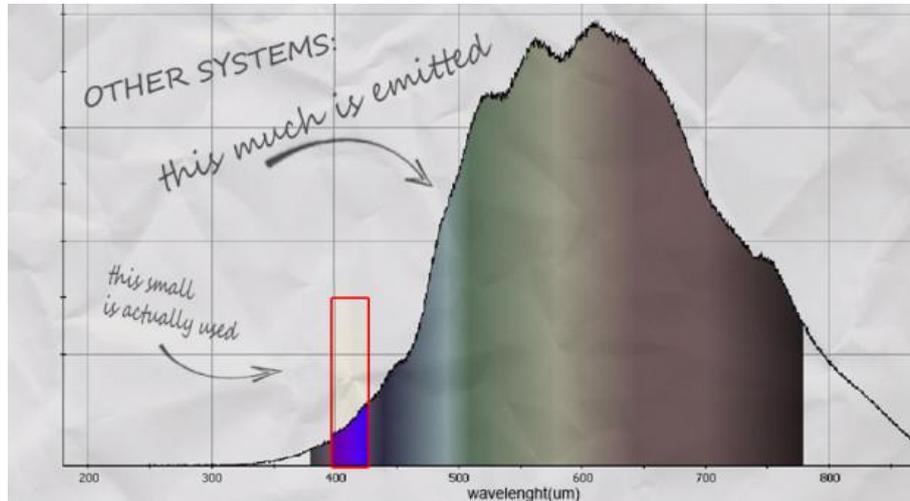


Figura 23 - Spettro di emissione luminosa di un proiettore DLP

Il reparto di progettazione e prototipazione aveva quindi spostato la sua attenzione su un altro sistema in grado di fotopolimerizzare la resina: il LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Si è quindi proceduto con il campionamento di alcuni moduli laser di luce UV, come quello mostrato in Figura 24, con caratteristiche elettriche e ottiche che saranno riportate nel capitolo seguente.



Figura 24 - Modulo laser

A questo punto si è resa necessaria la presenza di una maschera dinamica, la scelta è ricaduta su uno schermo LCD, che permette di visualizzare un profilo bidimensionale sfruttando i propri pixel; ciò si collega direttamente alla risoluzione sul piano x-y che è possibile ottenere durante la realizzazione di un oggetto, pari all'incirca a 80  $\mu\text{m}$ . La scelta è ricaduta sullo schermo di un Apple iPad mini 2, che presente le seguenti caratteristiche di progetto:

- volume d'ingombro 129 x 171.05 x 2.06 mm;
- area attiva 119.802 x 159.717 mm;
- Risoluzione 1536 x 2048 pixels;
- contrasto 804:1.

Per quanto riguarda invece la risoluzione in direzione z, si prevede un valore al minimo pari a 0.47  $\mu\text{m}$ , ossia 0.00047 mm.

La prima versione implementata con lo schema modulo laser-LCD prevedeva la rotazione del laser grazie al quarto asse presente nella macchina, mandrino posteriore dell'asse z; tuttavia, oltre un certo angolo rispetto alla verticale, ciò non permetteva di avere una completa focalizzazione del fascio, in quanto il piano focale variava con l'angolo di rotazione, e non tutto il fascio luminoso riusciva ad attraversare lo schermo a cristalli liquidi, a causa della sua struttura interna, comportando una perdita di potenza luminosa; di conseguenza tutto ciò non garantiva la completa polimerizzazione del profilo visualizzato dallo schermo LCD, dando risultati incompleti come quello mostrato in Figura 25.



**Figura 25 - Mancata polimerizzazione di una porzione dell'oggetto**

Una seconda versione invece, dalla quale sono partite le mie ricerche e sperimentazioni, prevedeva un sistema come quello mostrato in Figura 26, ovvero si componeva di un motore passo-passo (*stepper motor*) NEMA 17 che sfruttava due cuscinetti volventi e una cinghia 2GT per riprodurre un sistema di movimentazione omega (*omega drive*), il tutto montato su due cuscinetti lineari calettati su due alberi. Questo sistema, sul quale era fissato il modulo laser, ne consentiva la movimentazione al di sotto dello schermo LCD mantenendo il fascio sempre ortogonale allo schermo e il piano focale nella stessa posizione.



Figura 26 - Sistema di movimentazione omega drive

Insieme a quanto richiesto sono stati anche posti determinati vincoli:

- gli ingombri di larghezza e profondità devono rispettare le dimensioni imposte dall'architettura della macchina;
- il sistema ottico, comprensivo dell'apparato di dissipazione, posto al di sotto del piatto, deve avere un ingombro massimo in altezza pari a 64 mm;
- il *building plate* deve essere sviluppato per essere sostenuto dal carrello x-y che movimentava la *printing head* dei sistemi FDM e CNC;
- cercare, nei limiti del possibile, di ridurre i costi, anche utilizzando componenti già presenti nella Distinta Base (in gergo DiBa, in inglese BOM, *Bill Of Materials*) del *personal fabricator*.

È importante sottolineare che la progettazione dei sistemi non si è susseguita nell'ordine presentato di seguito, ma è avvenuta in parallelo; pertanto le dimensioni delle parti meccaniche disegnate si accordano al sistema dissipativo, così come la scelta della sorgente luminosa si lega direttamente alla verifica dimensionale dell'area di stampa attiva, e così via.

### 3.1 Sorgente luminosa e sistema ottico

Il sistema ottico è ciò che permette effettivamente di realizzare un oggetto tridimensionale sfruttando il processo di fotopolimerizzazione della resina. Negli anni di sperimentazione e ricerca sono emerse diverse soluzioni in grado di far indurire la resina colpita da un fascio luminoso; talune sfruttando sorgenti DLP, altre utilizzando un emettitore di luce laser e altre ancora utilizzando lampade di luce UV.

La scelta della sorgente luminosa risulta quindi essere una delle scelte più critiche, in quanto rappresenta l'elemento chiave attorno al quale ruota tutta la progettazione; infatti il fascio di luce generato da questa sorgente, oltre a dover avere particolari caratteristiche ottiche (lunghezza d'onda adeguata, fascio di luce omogeneo, ecc.), deve essere in grado di raggiungere la resina ed avere sufficiente energia luminosa per poter fotopolimerizzare la resina liquida.

Affinché le scelte effettuate per il dimensionamento della sorgente luminosa risultino più chiare, può risultare utile fare una breve presentazione per quanto riguarda le due resine che sono state campionate:

- la prima è un prodotto appartenente alla serie delle miscele standard (*Standard Blend, SB*) prodotta dall'azienda olandese *FunToDo*; questa è una resina acrilica che presenta elevata reattività all'interno di un ampio range di lunghezza d'onda (225-415 nm), una bassa percentuale di *shrinkage* (~0.5%) e un'elevata resistenza ad acqua e agenti chimici; nella figura si può osservare lo spettro d'assorbimento nell'intorno del limite destro del campo di funzionamento della lunghezza d'onda;

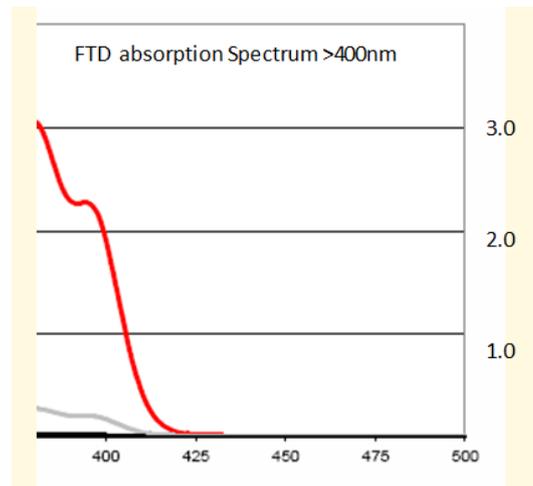


Figura 27 - Spettro di assorbimento della resina FunToDo

- l'altra resina testata è quella all'interno della gamma di prodotti Spot-GP (*General Purpose*) prodotta dall'azienda spagnola *Spot-A Materials*; questa resina garantisce la polimerizzazione se sottoposta ad una luce con  $\lambda$  al massimo pari a 405 nm, oltre questo valore sono ancora in corso sperimentazioni da parte della società produttrice; in figura si riporta il diagramma a colonne che rappresenta l'assorbimento della luce da parte della resina alle differenti lunghezze d'onda.

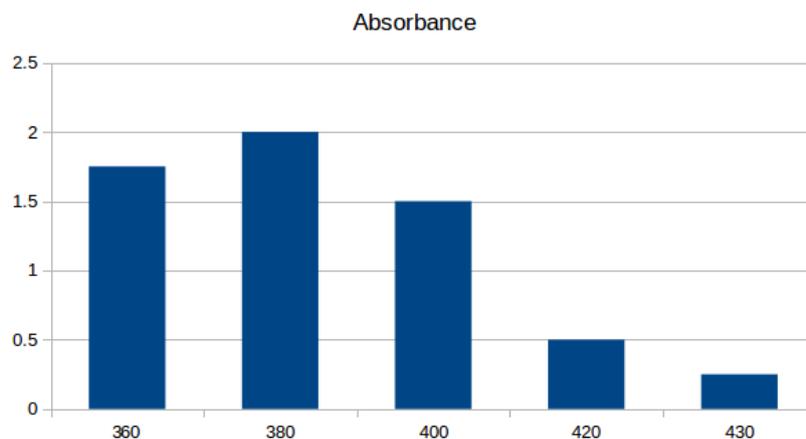


Figura 28 - Diagramma a colonne relativo all'assorbimento della resina Spot-GP

### 3.1.1 Laser vs LED

Dopo aver effettuato le prime sperimentazioni con un proiettore DLP, i cui svantaggi sono già stati descritti precedentemente, si è deciso di rivolgere l'attenzione su sorgenti luminose di dimensioni più moderate, con una maggiore potenza ottica per unità di superficie e che concentrassero il proprio funzionamento in un intervallo di lunghezza d'onda adeguato alla resina. Si è quindi proceduto al campionamento di diversi moduli laser.

Il laser selezionato si componeva di un diodo laser GaN (nitruro di gallio), sistema dissipativo in alluminio a ventilazione forzata (ventola assiale) e possibilità di regolare la messa a fuoco tramite rotazione di una lente K9; inoltre presentava le seguenti caratteristiche elettriche ed ottiche:

Tabella 1- Specifiche del modulo laser

Caratteristica	Simbolo	Valore	Unità di misura
Lunghezza d'onda	$\lambda$	405	nm
Potenza ottica in uscita	$P_o$	500	mW
Corrente di funzionamento	$i$	600	mA
Tensione di funzionamento	$V$	5	V
Temperatura di lavoro	$\vartheta$	-40 - 75	°C

I vantaggi derivanti dall'utilizzo di un sistema del genere sono molteplici, dalla facile maneggiabilità alla bassa potenza elettrica di funzionamento, pari a  $P_{el} = V \cdot i = 3 W$ , fino alla elevata potenza ottica per unità di superficie, inoltre il laser permette di avere un fascio di luce collimato e opportunamente focalizzato. Visto l'intento di riprodurre un sistema MPSL si è prevista l'aggiunta di un ulteriore elemento ottico, ovvero una lente prismatica generatrice di linea laser, come quella riportata in Figura 29; queste lenti sono caratterizzate dall'angolo di apertura del fascio luminoso.



Figura 29 - Esempio di lente prismatica generatrice di linea laser

Il laser è stato prima valutato e ampiamente testato come modulo e poi, viste le esigenze legate all'ingombro eccessivo, è stata presa in considerazione la possibilità di progettare un nuovo assieme, comprensivo di sistema ottico (lente di collimazione e lente prismatica) e dissipativo,

montando un diodo TO-38, al fine di rispettare i vincoli d'ingombro. Questo diodo presenta stesse caratteristiche ottiche ed elettriche di quello contenuto nel dispositivo pre-assemblato e con le specifiche dimensionali riportate nella figura seguente.

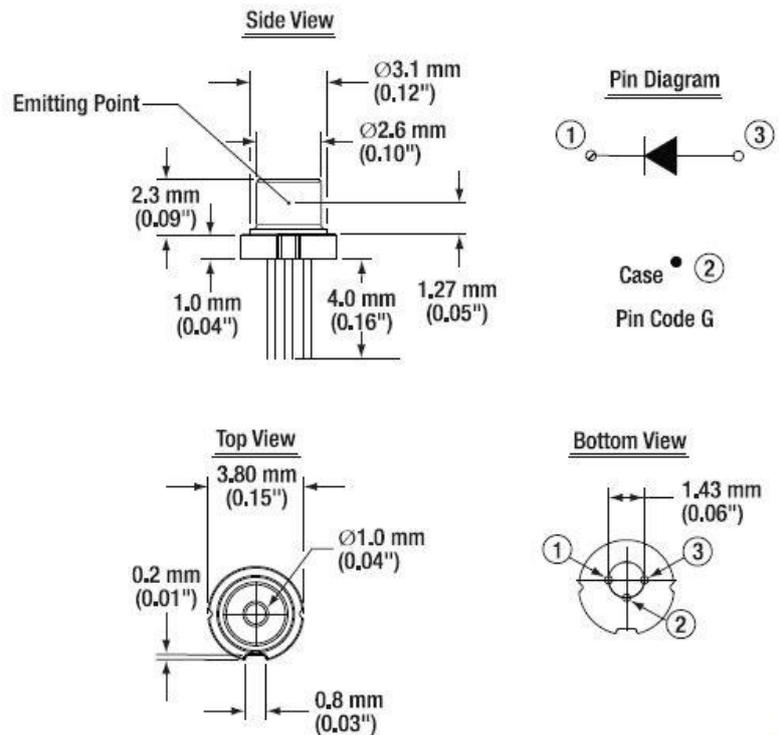


Figura 30 - Specifiche dimensionali del diodo LASER T0-38

Tuttavia i laser risultano abbastanza costosi sia dal punto di vista del prezzo del diodo stesso, sia dal punto di vista della manutenzione, in quanto la vita utile attesa per questo tipo di laser (laser allo stato solido) non supera le 10000 h di servizio; inoltre in seguito alle sperimentazioni effettuate si è potuto osservare che il prodotto mostrava un'affidabilità relativamente bassa, in quanto nel giro di poche settimane gran parte dei laser si erano degradati perdendo potenza oppure addirittura bruciandosi.

A questo punto l'attenzione è stata rivolta ai diodi LED, i quali assicurano minor costo d'acquisto e di manutenzione, miglior affidabilità e garantiscono/assicurano comunque un'ottima potenza luminosa superficiale. Il componente generatore del fascio luminoso è un *flip-chip* semiconduttore InGaN (nitruro di gallio-indio) e il sistema si presenta come quello in figura seguente.

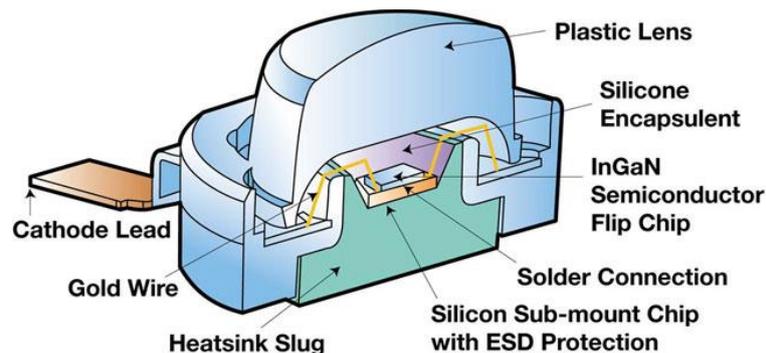


Figura 31 - Schema costruttivo di un diodo LED

Di contro, il diodo si comporta da emettitore lambertiano, ovvero non genera un fascio coerente e concentrato, ma diffonde l'energia luminosa come mostrato in Figura 32 e 33, inoltre non è possibile generare un fascio luminoso uniforme su tutta la superficie utile del LCD montando un singolo diodo (come avveniva per il laser), il che comporta la necessità di montare più LED che richiedono un adeguato sistema di dissipazione del calore generato, la cui progettazione sarà affrontata nel capitolo seguente.

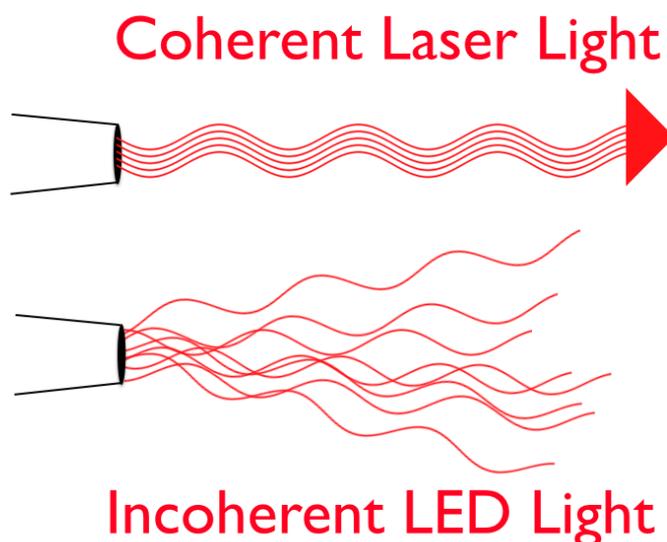


Figura 32 - Confronto tra luce laser e luce LED

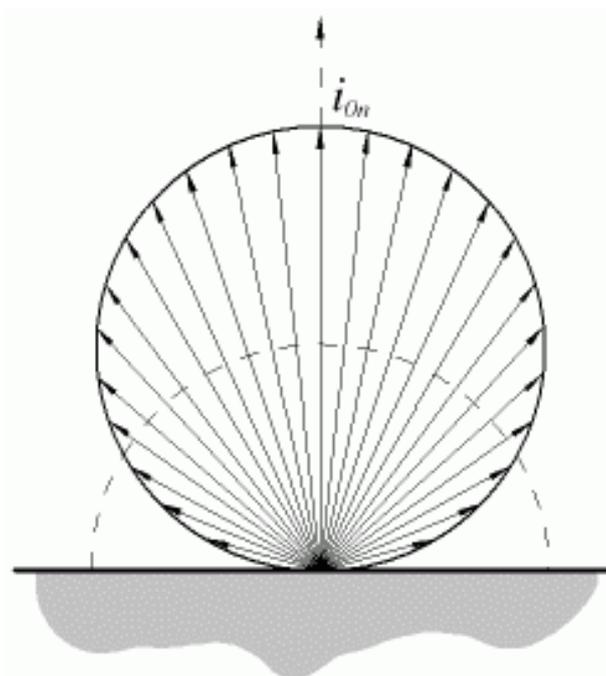


Figura 33 - Modello di fascio lambertiano

Per questo progetto ci si è focalizzati in particolare su quei diodi LED che lavorano tra il campo UV e quello della luce visibile; tecnicamente la strada più corretta da seguire sarebbe stata quella di campionare diverse tipologie di LED e testarli sottoponendoli a varie sperimentazioni, tuttavia, essendo FABtotum una *start-up* con condizioni economiche relative a quelle di una piccola azienda,

per direttiva aziendale si è proceduto campionando e testando una sola categoria di LED, i quali lavorano per lo più all'interno del campo visibile e presentano le seguenti specifiche:

**Tabella 2 - Specifiche dei LED con  $\lambda = 400$  nm**

Caratteristica	Simbolo	Valore tipico	Unità di misura
<b>Lunghezza d'onda</b>	$\lambda$	400	nm
<b>Potenza elettrica</b>	$P_{el}$	3	W
<b>Potenza ottica in uscita</b>	$P_o$	700	mW
<b>Corrente di funzionamento</b>	$i$	700	mA
<b>Tensione di funzionamento</b>	V	3.2 - 3.6	V
<b>Temperatura di lavoro</b>	$\vartheta$	-40 - 100	°C

Poiché, come detto in precedenza, il fascio emesso da un LED risulta non coerente e lambertiano, è stato opportuno pensare ad un sistema ottico in grado di collimare il fascio, quindi si è effettuato il campionamento anche di lenti, con rispettivi supporti come mostrato in Figura 34, al fine di concentrare ed indirizzare l'energia luminosa in uscita dal diodo verso lo schermo a cristalli liquidi. In questo caso sono state campionate due diversi tipi di lenti, il primo con angolo del fascio luminoso pari a  $10^\circ$  e l'altro con angolo di  $25^\circ$ .



**Figura 34 - Esempio di lenti e relativi supporti**

Visto il minor costo e la maggior affidabilità presentata dai LED, la scelta è ricaduta su quest'ultima opzione tecnologica; dopo di che non rimaneva altro da fare che procedere con analisi e

sperimentazioni per decidere quanti diodi LED utilizzare, come disporli e a che tensione alimentarli; tutto ciò verrà descritto in dettaglio nel capitolo seguente.

### 3.1.2 Sperimentazione e test

Come detto in precedenza, il sistema laser è stato accantonato in seguito a diverse sperimentazioni, iniziate prima dell'inizio dello stage formativo in azienda, che hanno dimostrato quanto facilmente questi diodi possano essere soggetti a problemi di funzionamento e quindi elevata probabilità di "mortalità infantile".

La sperimentazione del sistema composto dai LED, che ha invece coinvolto direttamente tutto il progetto sviluppato durante il tirocinio, si è in prima battuta concentrata sul verificare che l'insieme non producesse troppo calore al punto da andare oltre il limite massimo di temperatura ammesso dai diodi LED ( $\vartheta_{\max} = 120^{\circ}\text{C}$ ). Si è quindi realizzato un sistema con lo scopo di simulare le reali condizioni di lavoro alle quali sarebbero sottoposti i LED all'interno dell'apparato PRISM, ad eccezione della movimentazione; il dispositivo di misura, mostrato in Figura 35, era composto da:

- alimentatore stabilizzato da laboratorio Agilent E3632A;
- multimetro a pinza Agilent U1194A con termocoppia di tipo K;
- circuito stampato (PCB, *Printed Circuit Board*) in alluminio fissato su lamina d'alluminio di spessore pari a 3 mm;
- 12 LED con lunghezza d'onda pari a 400 nm;
- 12 lenti con angolo di apertura del fascio da  $25^{\circ}$ ;
- scatola di cartone delle dimensioni di 20x20x5 mm.



Figura 35 - Sistema di sperimentazione per la misura della temperatura dell'array di LED

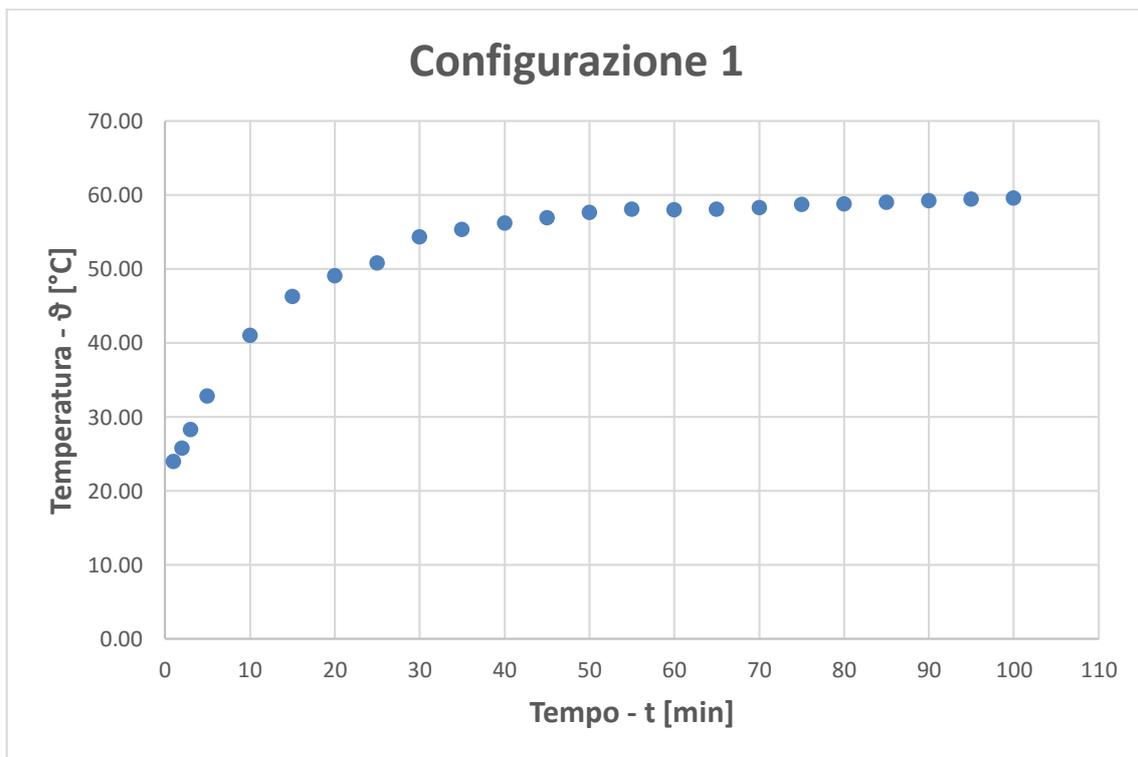
Da sottolineare che in questo esperimento si è utilizzata solo una tipologia di lenti ( $25^{\circ}$ ), poiché la quantità di calore generato e da dissipare risulta all'incirca uguale per ciascuna delle tre soluzioni possibili:  $10^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$  e senza lente ( $130^{\circ}$ ).

Sono stati eseguiti quattro diversi test su quattro diverse configurazioni riportate nella tabella seguente:

**Tabella 3 – Configurazioni degli esperimenti di temperatura svolti sui LED**

Configurazione	n_LED	Alimentazione	Ventilazione
1	6	continua, LED sempre ON	nessuna
2	12	continua, LED sempre ON	nessuna
3	12	alternata, 30 s ON e 5 s OFF	forzata, 2 ventole assiali 35x35 mm, 5 V in DC
4	12	continua, LED sempre ON	forzata, 2 ventole assiali 35x35 mm, 5 V in DC

L'esperimento è stato svolto con una temperatura iniziale pari a quella ambientale ( $\sim 21^{\circ}\text{C}$ ) e collegando in parallelo due serie da 6 LED con una tensione di alimentazione pari a quella tipica suggerita dal fornitore dei LED ( $3.4 \text{ V/led} \rightarrow 20.4 \text{ V}$ ). Durante l'esperimento sono stati rilevati i valori di temperatura nell'arco delle prime 3 h e alcuni valori di corrente, questi dati sono stati importati quindi in un foglio di lavoro Excel e rappresentati nei grafici successivi, plottando l'andamento della temperatura in funzione del tempo.



**Figura 36 - Andamento della temperatura nel tempo per la configurazione 1**

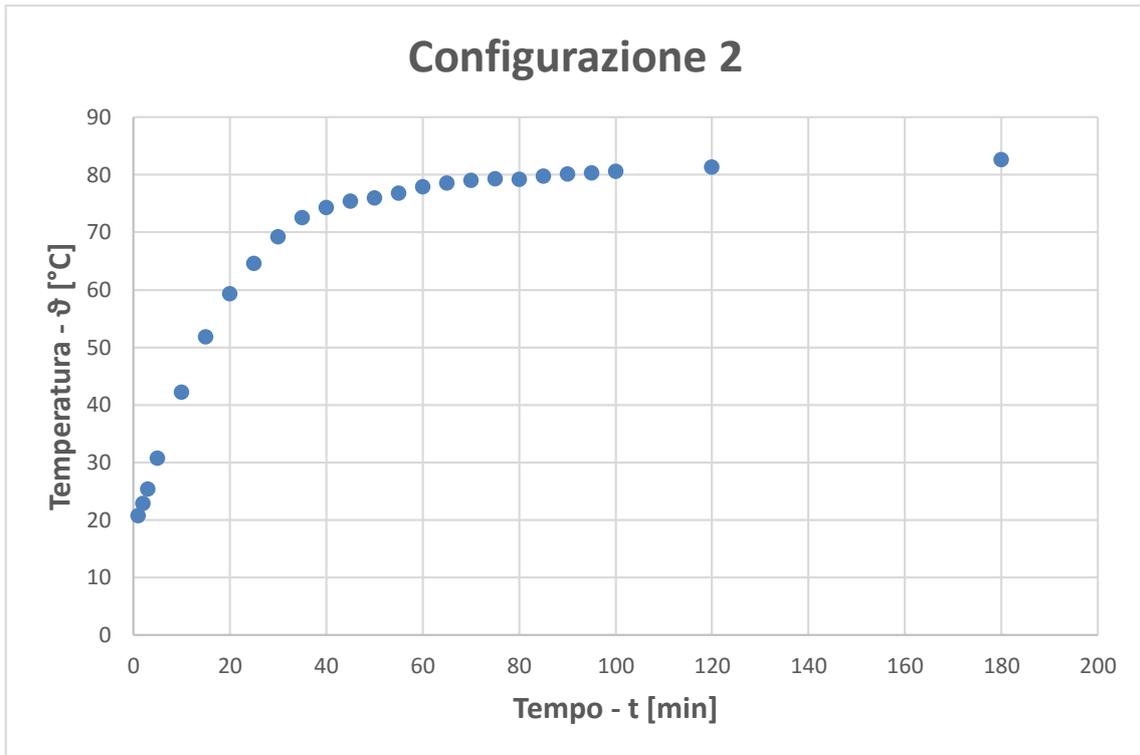


Figura 37 - Andamento della temperatura nel tempo per la configurazione 2

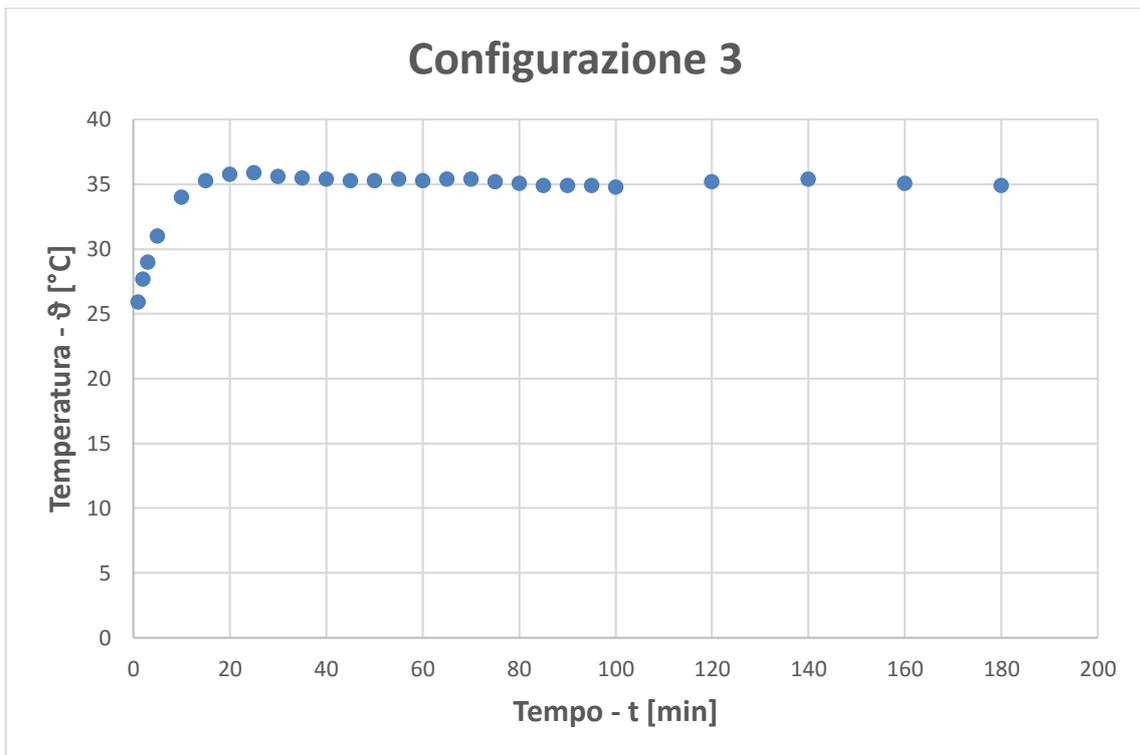


Figura 38 - Andamento della temperatura nel tempo per la configurazione 3

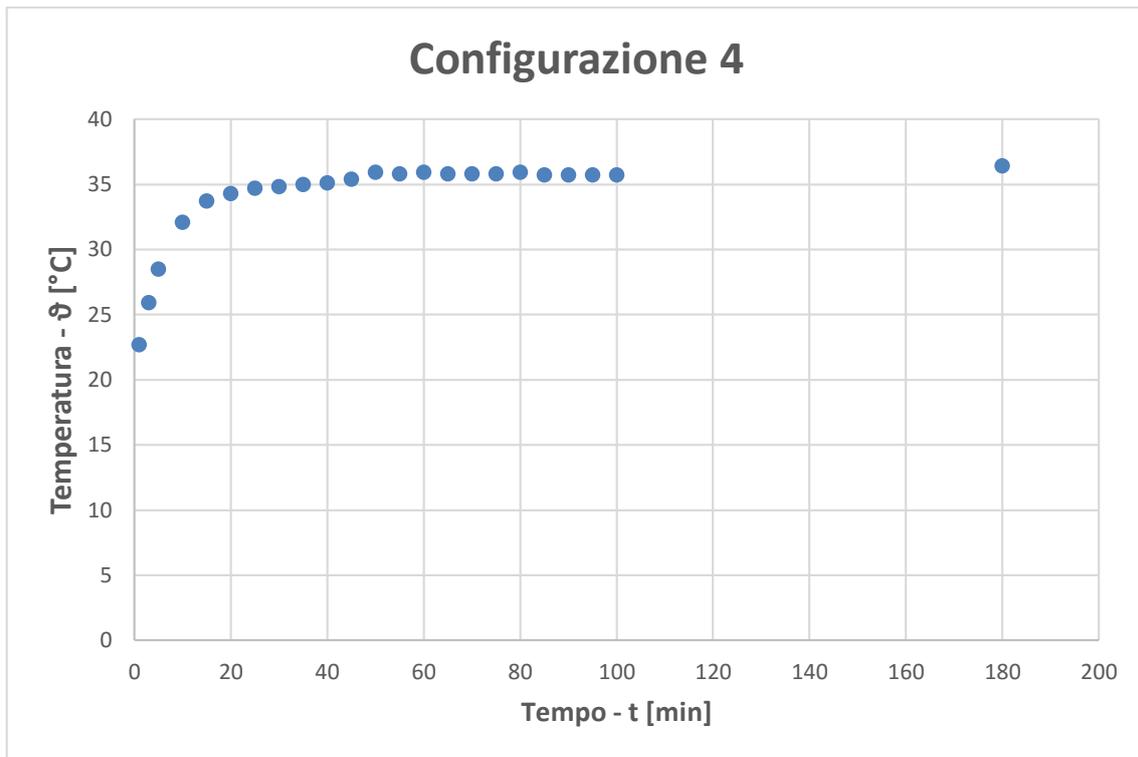


Figura 39 - Andamento della temperatura nel tempo per la configurazione 4

Si può notare che dopo un certo periodo la temperatura tende a stabilizzarsi intorno a un valore che potremmo definire “di regime” e che, come ci si aspettava, la configurazione 2 risulta la più critica, raggiungendo un valore di temperatura a regime appena superiore agli 80°C; inoltre grazie ai valori di corrente acquisiti si può facilmente calcolare la potenza elettrica richiesta dal sistema e di conseguenza quella per singolo LED, che risulta compresa tra 0.9 e 1.15 W per singolo diodo, a fronte dei 3W di progetto indicati nel *datasheet*.

Alla luce dei risultati, per quel che riguarda la potenza, si intuisce la presenza di un elemento dissipante nel circuito realizzato e che, vista la necessità di avere la massima potenza ottica in uscita dal diodo e visto che questa è strettamente correlata alla potenza elettrica fornita dal sistema di alimentazione, sarà probabilmente necessario sovralimentare i LED oltre la tensione nominale; ciò comporterà un aumento dell’energia termica da evacuare e, legato al fatto che la sperimentazione è stata eseguita nel periodo invernale, la conseguente necessità di progettare un sistema dissipativo adeguato, che verrà presentato in un capitolo seguente.

Il passaggio successivo si è focalizzato sulla scelta delle lenti e sull’individuazione della distanza ottima dei LED dallo schermo LCD al fine di avere un fascio luminoso allo stesso tempo ben distribuito e il più omogeneo possibile; per far ciò è stato eseguito un test empirico, il quale consente di verificare visivamente quanto richiesto, utilizzando l’attrezzatura riportata in Figura 40, ovvero:

- alimentatore stabilizzato da laboratorio Agilent E3632A;
- LED da 400 nm, poiché emettendo luce nel campo del visibile consente di verificare visivamente quanto detto sopra;
- lenti con angolo del fascio luminoso di 10° e 25°;
- piano in vetro regolabile in altezza;
- carta millimetrata.



Figura 40 - Sistema per la sperimentazione della distanza dal LCD e della lente ideale per l'applicazione richiesta

L'esperimento è stato eseguito variando la distanza tra diodo e piano di visualizzazione a valori predefiniti, partendo da 3 mm e incrementando di 10 mm ogni volta fino a 103 mm, e in tre configurazioni differenti: senza lente, con lente da  $10^\circ$  e con lente da  $25^\circ$ . In Appendice A si riportano tutte le immagini relative alla sperimentazione effettuata, dalle quali è possibile evincere visivamente che la distanza che permette di avere un buon grado di intensità luminosa e allo stesso tempo una distribuzione uniforme del fascio risulta essere quella intorno ai 23 mm. Si può vedere dalla figura seguente come la lente da  $25^\circ$  sia preferibile rispetto alle altre due opzioni a parità di distanza, inoltre presenta una miglior uniformità in zona centrale, che la lente da  $10^\circ$  raggiunge solo ad una distanza di circa 43 mm, e una potenza luminosa che senza lente non sarebbe raggiungibile.

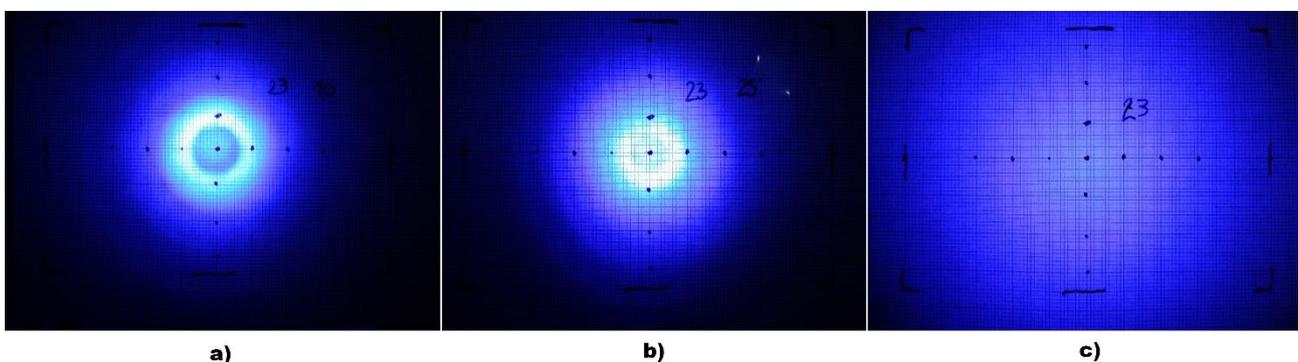


Figura 41 - Confronto a parità di distanza (23 mm) tra le lenti con angolo di apertura pari a  $10^\circ$  (a),  $25^\circ$  (b) e senza lente, ovvero  $130^\circ$  (c)

A questo punto si è voluto verificare che il fascio emesso dai diodi a 400 nm riuscisse a polimerizzare effettivamente la resina; si è perciò implementato un sistema prototipale, basato su quello già realizzato per la movimentazione del modulo laser, per movimentare 3 LED non allineati, ma disposti a triangolo. Le sperimentazioni hanno dato risultati contrastanti, infatti spesso il sistema falliva nella creazione dell'artefatto nonostante in pochi e sporadici casi fosse riuscita a generare un

oggetto completo. I fallimenti si dimostravano per lo più legati ad un'incompleta, se non addirittura assente, polimerizzazione oppure a strati che rimanevano sul fondo della camera di costruzione senza aggrapparsi al piano di stampa.

Allora l'attenzione è stata rivolta alla lunghezza d'onda dei diodi LED e di conseguenza verso i diagrammi degli spettri di assorbimento delle resine (Figure 27 e 28), i quali mostrano un notevole abbattimento oltre i 400 nm, presupponendo quindi che l'energia luminosa incidente sulla resina non fosse sufficiente a dare inizio alla fotopolimerizzazione. Si è quindi deciso di campionare un altro tipo di LED che lavorasse completamente nel campo ultravioletto e mostrasse le seguenti caratteristiche tecniche:

**Tabella 4 - Specifiche dei LED con  $\lambda = 365$  nm**

Caratteristica	Simbolo	Valore tipico	Unità di misura
<b>Lunghezza d'onda</b>	$\lambda$	365	nm
<b>Potenza elettrica</b>	$P_{el}$	3	W
<b>Potenza ottica in uscita</b>	$P_o$	700	mW
<b>Corrente di funzionamento</b>	$i$	700	mA
<b>Tensione di funzionamento</b>	V	3.9 - 4.3	V
<b>Temperatura di lavoro</b>	$\vartheta$	-40 - 100	°C

Procedendo sperimentalmente si è notato che questa soluzione non era in grado di generare alcun profilo solido; l'elemento limitante è stato riscontrato nella struttura interna dello schermo LCD, infatti, come si può vedere in Figura 42, si compone di 2 filtri polarizzatori, i quali impediscono il passaggio della luce al di fuori del campo visibile (380-750 nm) e di conseguenza anche di quella UV. Così facendo i diodi da 365 nm e 400 nm risultano entrambi svantaggiosi, poiché i primi non riescono a far arrivare sufficiente potenza luminosa alla resina, dato che non riesce ad attraversare lo schermo, e i secondi forniscono un'energia luminosa che la resina non riesce ad assorbire completamente.

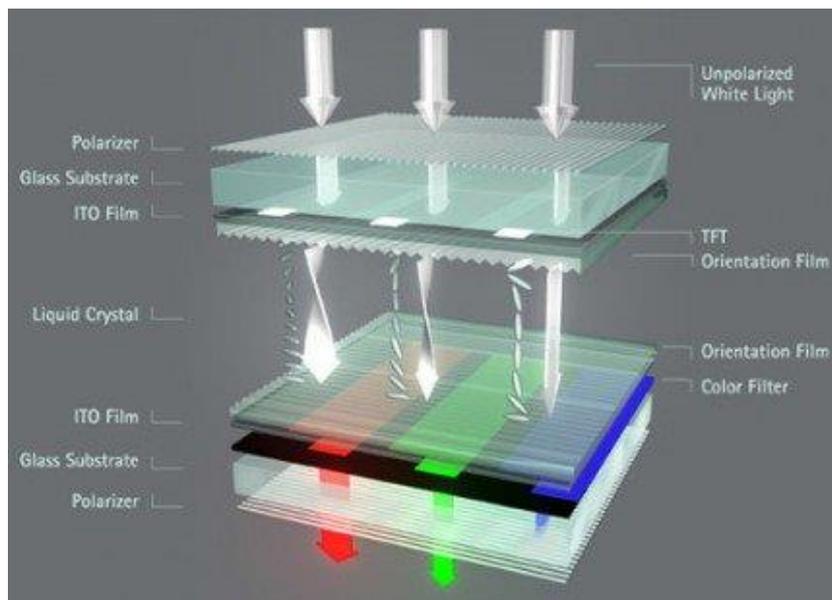


Figura 42 – Struttura interna di un pixel del display a cristalli liquidi (LCD)

La soluzione alla quale si è pensato è stata quella di campionare un'ulteriore tipologia di LED che operasse al confine tra il campo di luce visibile e il campo di luce ultravioletta, la scelta è ricaduta sui diodi con le caratteristiche riportate di seguito:

Tabella 5 - Specifiche dei LED con  $\lambda = 380 \text{ nm}$

Caratteristica	Simbolo	Valore tipico	Unità di misura
Lunghezza d'onda	$\lambda$	380	nm
Potenza elettrica	$P_{el}$	3	W
Potenza ottica in uscita	$P_o$	700	mW
Corrente di funzionamento	$i$	700	mA
Tensione di funzionamento	$V$	3.2 - 4.0	V
Temperatura di lavoro	$\vartheta$	-40 - 100	°C

La sperimentazione per quel che riguarda questi diodi deve ancora iniziare a causa di fattori che hanno costretto l'intero reparto ad occuparsi di problemi più impellenti per l'azienda.

Tuttavia si può asserire che un deciso passo in avanti è stato fatto; infatti alla luce di queste sperimentazioni si è deciso di implementare una soluzione con 11 diodi LED su due file sfalsate, vista l'area utile del LCD, alimentati tutti in parallelo, che si accendano e spengano ad ogni passata, con ventilazione forzata, ad una distanza di circa 23 mm e utilizzando lenti con angolo d'uscita del fascio luminoso pari a 25°, disposte in modo tale da ottenere un fascio il più uniforme possibile.

## 3.2 Sistema di movimentazione della sorgente luminosa

La progettazione di un sistema che permetta al fascio di luce di traslare e quindi illuminare uniformemente tutta la superficie di stampa risulta abbastanza delicata, in quanto è direttamente legata alle specifiche delle singole parti che compongono il sistema MTU (motore-trasmissione-utilizzatore) e ai limiti imposti dal progetto, ma soprattutto alla scelta della sorgente luminosa, in quanto l'analisi e sperimentazione di quest'ultima proseguiva di pari passo con la prototipazione dell'assieme di scorrimento, tant'è che alcune delle configurazioni presentate nelle sezioni seguenti sono state accantonate a seguito di decisioni legate alla sorgente luminosa.

In questo capitolo verrà quindi riportato l'intero processo progettuale, partendo dalla fase di prototipazione virtuale del sistema, eseguita tramite il software Autodesk Inventor Professional 2016, in cui verranno sottolineate le decisioni prese riguardo la scelta dei singoli componenti e messe in evidenza le configurazioni più significative.

### 3.2.1 Analisi preliminare di fattibilità

Come detto in precedenza il settore R&D imponeva determinati vincoli per quanto riguarda le scelte progettuali, ovvero il massimo ingombro disponibile e l'utilizzo, per quanto possibile, di componenti meccanici già presenti in magazzino e nella DiBa del *personal fabricator*, oltre alle decisioni aziendali già stabilite; ulteriori specifiche di progetto erano legate alla volontà di ottenere un sistema il più performante ed affidabile possibile, sicuro per l'utente al quale è destinato il prodotto, oltre che semplice ed immediato da assemblare per il reparto di produzione, ma soprattutto economico. Proprio il fattore costo è stato il termine che ha avuto maggior funzione di discriminante e che ha quindi portato a prendere in considerazione o meno talune proposte e a decidere per quale soluzione optare.

Si sono perciò prese in considerazione diverse strade per la realizzazione del sistema MTU; da un *briefing* sono emerse le soluzioni riportate in seguito, dove sono presentate anche le rispettive considerazioni e motivazioni che hanno portato a scartare o meno la configurazione proposta. Per analizzare al meglio le varie possibilità si è distinta la soluzione per la mozione, che si compone di un sistema elettromeccanico per generare il moto (motore) e uno meccanico per trasmetterlo, dal sistema di *sliding*, ossia quello che scorre insieme ai diodi LED ed è composto quindi dalle parti in movimento (utilizzatore).

Per prima cosa si è proceduto con la scelta del motore, che è ricaduta su un motore di tipo passo-passo, in quanto presenta diversi vantaggi:

- costo non elevato se paragonato a motori con eguali prestazioni;
- facilmente utilizzabili senza necessità di un'eccessiva potenza di calcolo, infatti possono essere usati per azionamenti di precisione controllandoli in catena aperta tramite calcolatore, non necessitando quindi di sensori di posizione o velocità (catena chiusa);
- elevata robustezza meccanica ed elettrica, infatti non presentano contatti elettrici striscianti;
- possibilità di far compiere all'albero piccole rotazioni angolari anche a velocità basse, senza necessità di riduttori;
- elevata stabilità a rotore bloccato e momenti d'inerzia piuttosto bassi.

Tutto ciò risulta ideale per l'applicazione che si vuole realizzare, in particolare la scelta è ricaduta sullo standard NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) che indica una vasta gamma di motori *stepper* caratterizzati da un numero (es. NEMA 17), il quale indica in decine di pollici la

distanza tra due fori contigui sul frontalino (*faceplate*), così facendo si può tranquillamente sostituire il motore sapendo che un NEMA 17 calzerà perfettamente al posto di un altro NEMA 17.



Figura 43 - Esempi di motori passo-passo NEMA di diverse dimensioni

A questo punto si è proceduto analizzando il meccanismo di trasmissione del moto. Si sono considerate diverse soluzioni possibili, chiaramente questa decisione influenza direttamente la successiva progettazione dell'utilizzatore, quindi per alcune di queste soluzioni il sistema di *sliding* viene già presentato nella descrizione.

**Omega drive:** la soluzione già implementata in uno dei primi prototipi fisici realizzato dal reparto R&D prima dell'inizio dello *stage* e già presentata in precedenza; questo sistema permette di ottenere un moto traslatorio dalla rotazione di un motore *stepper* sfruttando due cuscinetti volventi, una puleggia e una cinghia 2GT; il punto di forza principale è legato alla precisione consentita dal motore, mentre gli svantaggi dipendono dal fatto di avere, oltre all'*array* di LED, anche il motore in movimento, il che comporta un aumento delle inerzie in gioco, seppur minimo, e dall'averlo a così stretto contatto con la fonte di calore.

**Attuatore lineare non-captive:** questa configurazione prevede un sistema già assemblato, che consente di convertire il moto rotatorio in traslatorio sfruttando il rotore di un motore passo-passo con all'interno un dado filettato di precisione (*threaded nut*) e una vite di comando (*lead screw*) al posto di un albero; nella soluzione proposta le estremità della vite venivano vincolate consentendo al corpo motore di traslare avanti e indietro. Questo sistema consente di ottenere un'elevata precisione e accuratezza, ideale per l'applicazione preposta, risulta silenzioso nel suo funzionamento e molto efficiente; tuttavia presenta un problema legato alla sollecitazione termica, in quanto il dado di azionamento, realizzato in materiale plastico con lo scopo di diminuire il coefficiente di attrito ed incrementare quindi la durata dell'attuatore, tende ad espandersi comportando un'instabilità nel motore, inoltre la soluzione di avere il corpo motore, e quindi tutto l'*array* di LED, in movimento comporta un maggior carico sulla vite di comando ed infine il costo di questo sistema risulta decisamente elevato rispetto ad altre soluzioni proposte.

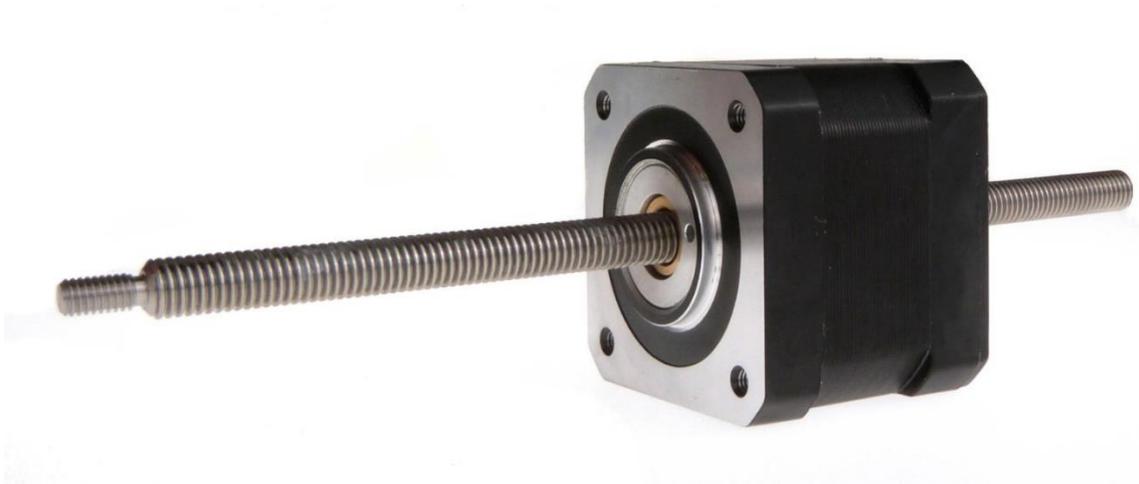


Figura 44 - Esempio di attuatore lineare non-captive

**Attuatore lineare esterno o motore statico e vite:** il sistema in questione si può presentare preassemblato come l'attuatore lineare presente in figura oppure comporsi di un motore *stepper* (NEMA), una vite senza fine, un accoppiatore meccanico tra albero del motore e vite, una madrevite e un cuscinetto volvente supportato sul quale calettare la vite; anche in questo caso la prima soluzione presenta i benefici e gli svantaggi dell'attuatore lineare non-captive, ad eccezione del motore in movimento, mentre la seconda presenta un'eccessiva quantità di componenti, in quanto sulla madrevite andrebbe inoltre realizzato un apparato in grado di sostenere il sistema luminoso, comportando di conseguenza un aumento dei costi.



Figura 45 - Esempio di attuatore lineare esterno

**Pignone e cremagliera (*rack and pinion*):** la soluzione, già descritta dal nome, consiste nel trasformare il movimento da rotatorio a traslatorio grazie ad una cremagliera, ovvero una ruota dentata con raggio primitivo infinito; questa soluzione comporta i problemi legati all'accoppiamento tra ruote dentate, ossia la fatica e l'usura (*pitting*), ma anche il problema di avere il motore in movimento.

**Motore statico con loop della cinghia:** questa soluzione è presentata per ultima in quanto è risultata essere quella vincente; essa si compone di un motore passo-passo (NEMA), due pulegge e una cinghia, rispettivamente 2GT, e presenta come punti di forza il fatto di essere composto da componenti in parte già presenti a magazzino ed avere quindi costi ridotti e la buona precisione ed accuratezza consentite dal motore, inoltre la decisione di tenere il motore fisso consente una diminuzione delle inerzie in gioco. Anche in questo caso va previsto un sistema di *sliding*, le cui varie opzioni saranno analizzate di seguito.

Infine si sono analizzate due diverse possibilità per gli assiemi di scorrimento: la prima è quella di acquistare un sistema di scorrimento lineare preassemblato come quelli mostrati in figura, mentre la seconda valuta la possibilità di realizzarlo tramite componenti più standard, meglio se già presenti nell'archivio dei componenti aziendali (PLM, *Product Lifecycle Management*). Chiaramente il componente preassemblato risulta più pratico per il reparto di produzione, in quanto consente di ridurre i tempi e semplificare l'assemblaggio, tuttavia i prezzi di questi sistemi risultavano di gran lunga eccessivi rispetto alla seconda soluzione, così la scelta è ricaduta sulla progettazione e produzione interna del sistema utilizzatore.

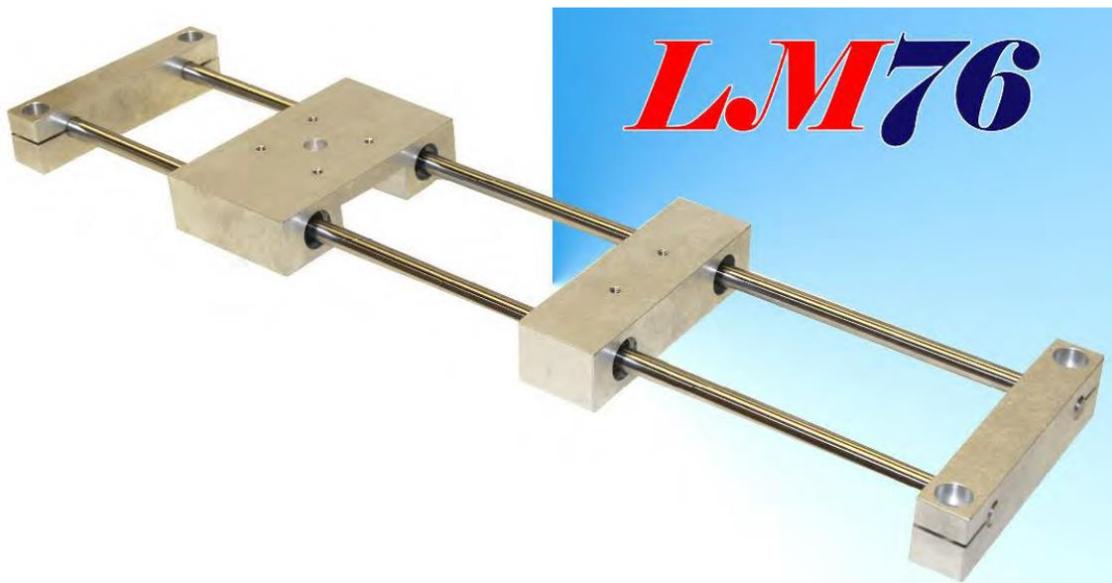
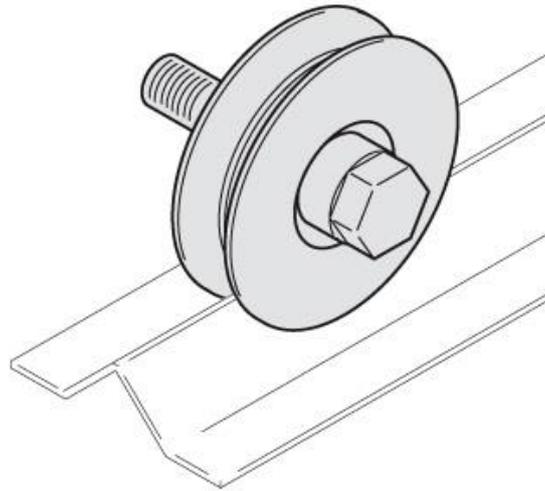


Figura 46 - Esempio di sistema preassemblato preso in considerazione

La prima idea per realizzare questo apparato si proponeva di utilizzare la maggior parte possibile dei componenti a magazzino; osservando il sistema di movimentazione del carrello x-y già presente sul *personal fabricator*; si è pensato quindi di sfruttare una coppia di cuscinetti lineari (*linear bearings*) calettati su due alberi; a magazzino erano presenti barre di diametro pari a 10 mm e i rispettivi cuscinetti lineari, già supportati, denominati SC10UU. Questi cuscinetti hanno il vantaggio di avere costo moderato, basso coefficiente di attrito, necessità di una lubrificazione minima, elevata precisione di posizionamento, basso livello di rumore e lunga durata di esercizio grazie al supporto esterno che non permette a sporco e particelle ambientali di raggiungere l'interno del cuscinetto.

Un'ulteriore soluzione presa in considerazione sfrutta un sistema composto da profilati in alluminio a C e cuscinetti scanalati a V, in cui il profilato funge da rotaia per il cuscinetto analogamente a come mostrato in Figura 47. Il problema di questa configurazione risiede nel fatto che il cuscinetto non viene utilizzato nella sua solita posizione, ma viene posto orizzontalmente, così facendo, seppur si compensino gli eventuali giochi dovuti all'assemblaggio, il cuscinetto, progettato per resistere ad un carico radiale, viene sollecitato in direzione assiale.



**Figura 47 - Esempio di cuscinetto scanalato a V che scorre su rotaia**

La configurazione risultata più adeguata è quella che prevede l'utilizzo dei *linear bearings* calettati su alberi, in quanto risulta più in linea con il resto della meccanica del *personal fabricator*, può consentire un notevole risparmio in termini di costi, in quanto utilizza parti già presenti a magazzino e inoltre assicura una discreta semplicità in fase di assemblaggio. Nel capitolo successivo vengono evidenziate le diverse configurazioni implementate nel SW di prototipazione virtuale Autodesk Inventor Professional 2016 con le rispettive considerazioni che hanno portato via via alla generazione del prototipo definitivo.



**Figura 48 - Esempio di cuscinetto lineare**

### 3.2.2 Diverse Configurazioni

Le prime configurazioni virtualmente assemblate utilizzavano tutte parti già presenti nella DiBa della macchina: supporti termoformati, cuscinetti lineari SC10UU e barre in alluminio di diametro 10 mm. Prima di procedere, sono stati considerati attentamente gli ingombri e la struttura del sistema di sostegno e movimentazione del piatto del sistema FFF; poi è stato necessario prendere alcune decisioni per quanto riguarda il posizionamento delle barre, che sono state tenute il più lontano possibile al fine di aumentare la stabilità e la solidità del sistema, e quello dello schermo LCD, ovvero posizionarlo verticalmente oppure orizzontalmente rispetto al piatto.

Vista la flessibilità consentita dal SW utilizzato, è stato possibile implementare per il display a cristalli liquidi entrambe le soluzioni, riportate nelle figure seguenti, ed è stato riscontrato che in queste soluzioni emergono principalmente due problemi legati agli ingombri, poiché sarà necessario prevedere nell'insieme tutto il sistema di mozione e quello luminoso, ed alla corsa consentita dai cuscinetti, che avrebbe comportato una diminuzione della superficie di stampa utile, in quanto non si sarebbero potute sfruttare le aree vicine ai fine corsa, che non sarebbero state adeguatamente illuminate come il resto dello schermo, ma ciò non era accettabile vista la già limitata area di stampa.

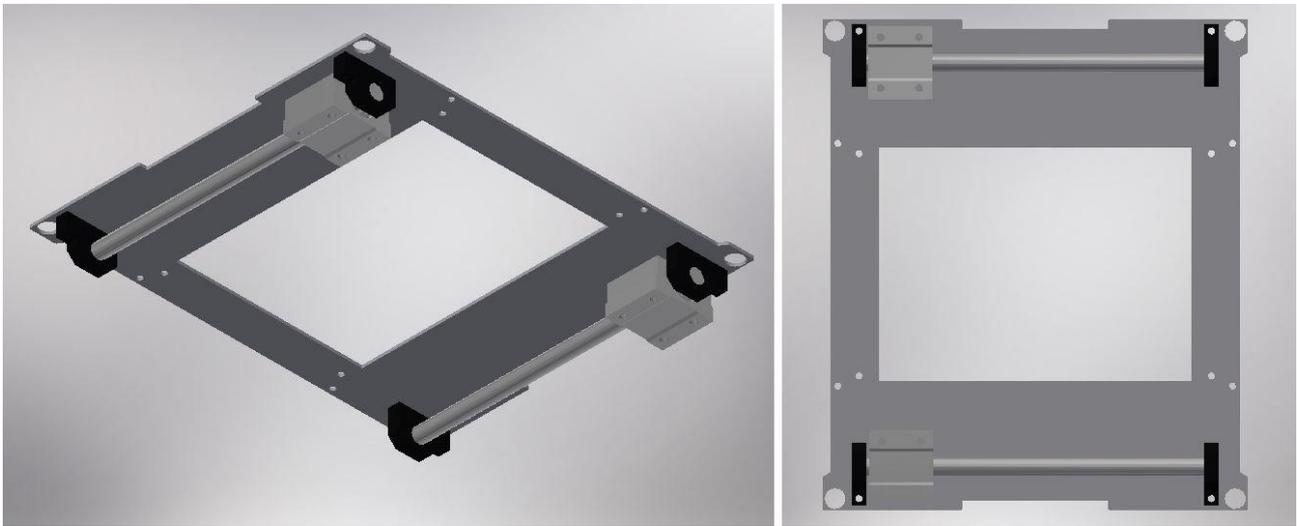


Figura 49 - Configurazione con display orizzontale, barre con  $d = 10 \text{ mm}$  e SC10UU

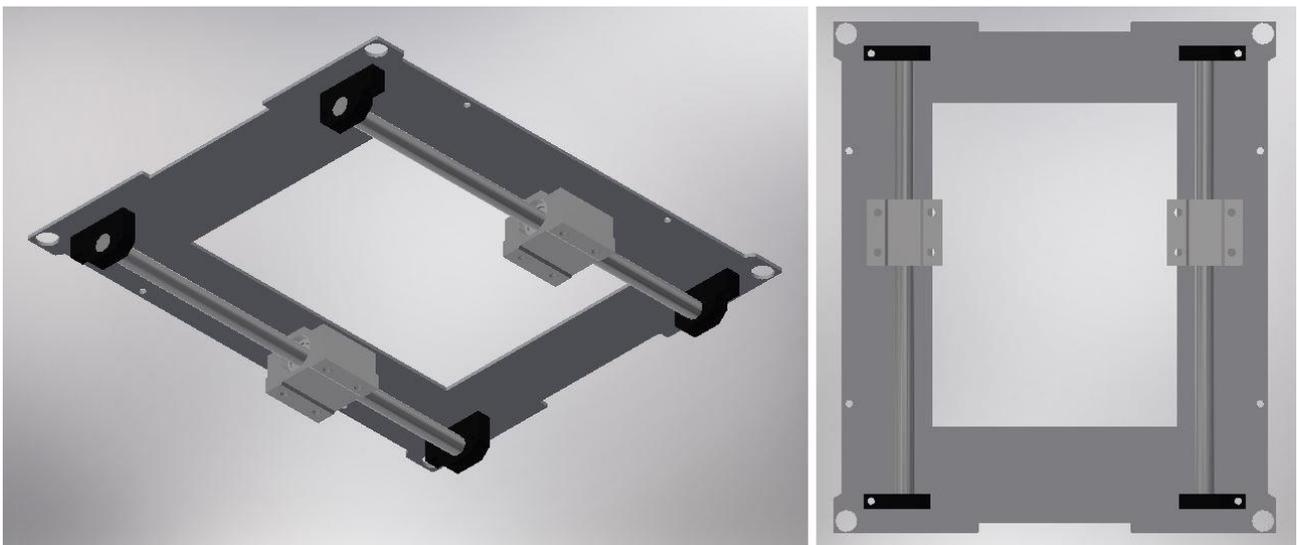


Figura 50 - Configurazione con display verticale, barre con  $d = 10 \text{ mm}$  e SC10UU

Alla luce di quanto detto in precedenza, mantenendo la stessa configurazione, si sono implementate nuove soluzioni, le prime soluzioni prendevano in considerazione barre da 8 mm con *linear bearings* SC8UU, scartate per lo stesso motivo delle precedenti, mentre le seconde prevedevano l'utilizzo di barre da 6 mm con i rispettivi cuscinetti lineari SC6UU; si sono quindi disegnati nuovi supporti per gli alberi adatti all'applicazione esaminata. Tuttavia anche in questo caso, la configurazione con display orizzontale non consentiva la corsa necessaria a coprire tutto lo schermo, precludendo la possibilità di utilizzare la massima area di stampa, mentre la soluzione con schermo verticale si è verificata soddisfacente, sia dal punto di vista del rispetto degli ingombri in

vista di una futura introduzione del sistema MTU sia dal punto di vista della corsa garantita all'*array* di LED. Si riportano di seguito le due soluzioni.

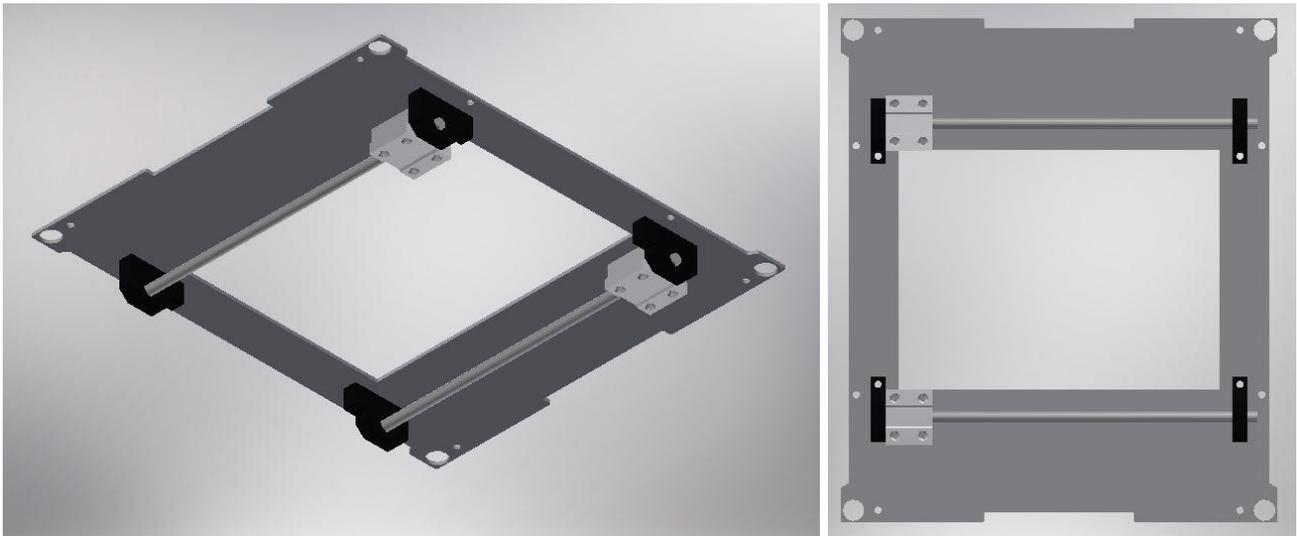


Figura 51 - Configurazione con display orizzontale, barre con  $d = 6 \text{ mm}$  e SC6UU

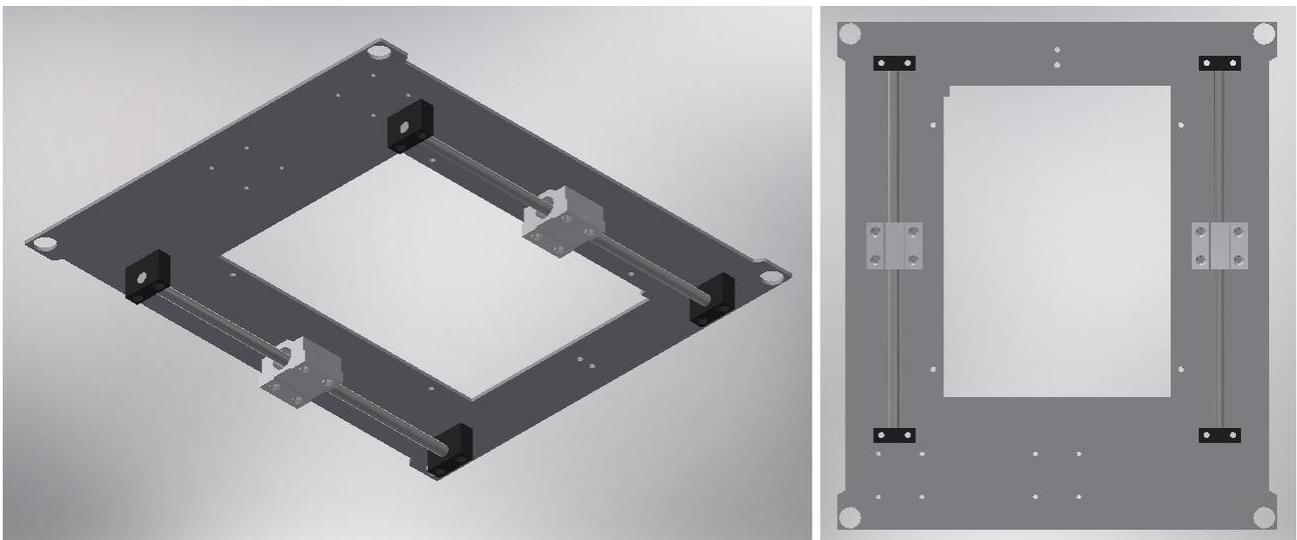


Figura 52 - Configurazione con display verticale, barre con  $d = 6 \text{ mm}$  e SC6UU

Una volta determinato come posizionare LCD e sistema di scorrimento è stato necessario rivolgere l'attenzione verso il sistema di movimentazione, in particolare è risultato opportuno determinare la posizione e l'orientamento del motore e di conseguenza della puleggia di rinvio, tenendo in considerazione i limiti di ingombro e la presenza di un eventuale dissipatore.

Si noti che in Figura 52, la posizione dello schermo risulta modificata, infatti questo è stata spostata verso quella che sarà la parete di fondo del *personal fabricator*; ciò è stato fatto per assicurare una maggior stabilità del sistema di movimentazione dell'asse z, infatti come si può vedere in Figura 53, i bracci di sostegno del piatto risultano a sbalzo, quindi spostando il carico il più possibile sul fondo della macchina si riduce il momento flettente, in quanto diminuisce il braccio di applicazione della forza peso rispetto al punto in cui i bracci sono vincolati e di conseguenza anche la freccia che si viene a generare. Un altro motivo di questo spostamento si riscontra nella necessità di trovare spazio per alloggiare il motore passo-passo. Si sono quindi sviluppate tre diverse configurazioni: le

prime due con motore disposto verticalmente e l'altra con motore disposto orizzontalmente; passiamo ora ad analizzare le singole configurazioni.

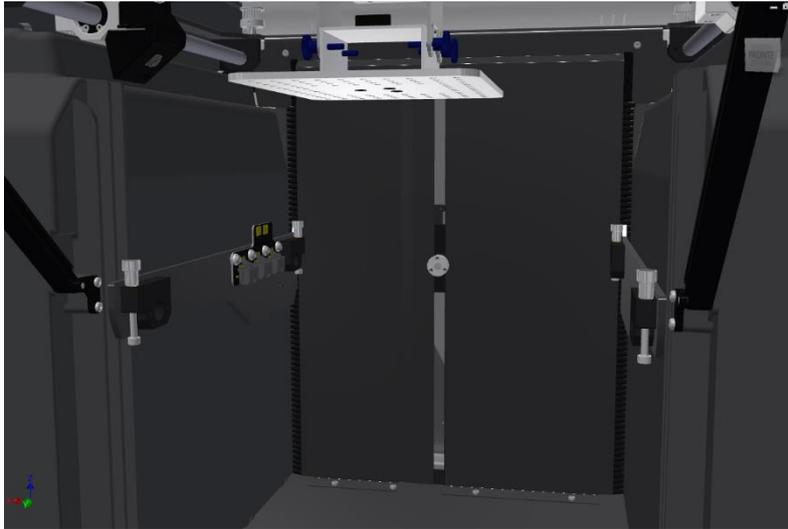


Figura 53 - Dettaglio dei bracci di sostegno del piatto, i quali risultano a sbalzo rispetto al fondo della macchina

La prima, come già anticipato e come è possibile vedere in Figura 54, presenta un motore *stepper* NEMA disposto con asse del rotore, e di conseguenza anche dell'albero, verticalmente e centrato assialmente rispetto al piatto. In figura si sono rappresentati i principali componenti aggiunti con una codifica colore al fine di distinguere in giallo le pulegge, in rosso il dissipatore (il cui dimensionamento verrà riportato nel capitolo successivo) e in blu le eventuali ventole assiali per il raffreddamento forzato del dissipatore. Il punto debole di questa configurazione risiede nella posizione del motore e della puleggia di distribuzione, che fa sì che la cinghia rischi di entrare in contatto con il dissipatore, il quale scaldandosi durante la fase di esercizio rischia di degradare poco per volta la cinghia con continui cicli di strisciamento accompagnati dalla dilatazione termica.

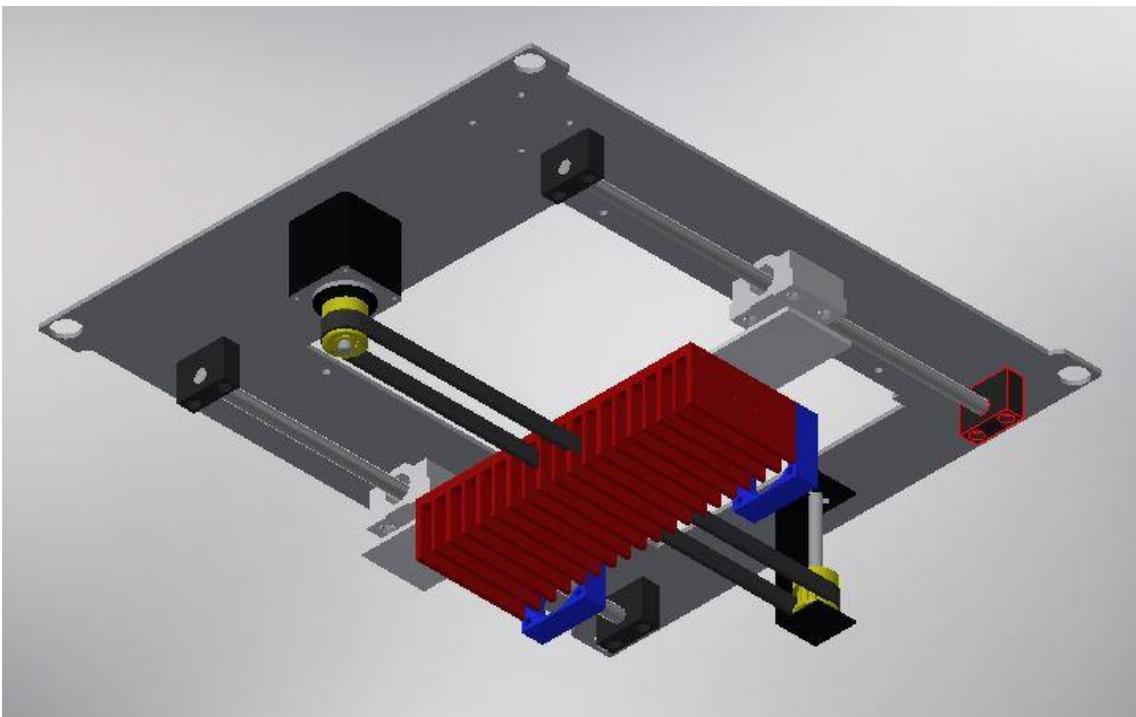
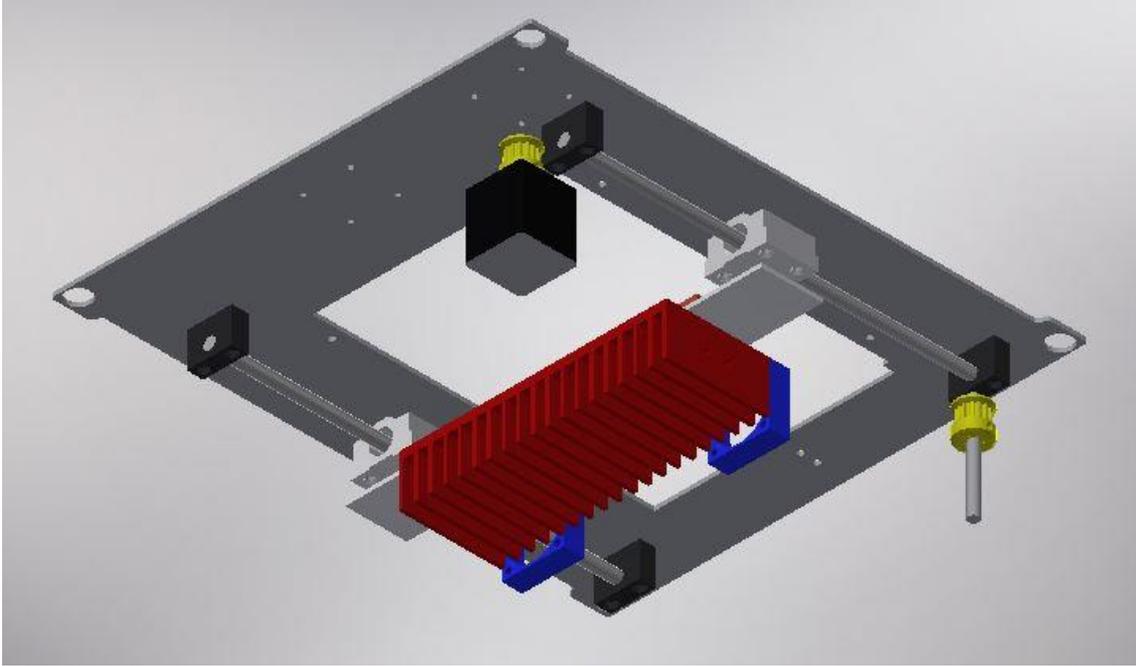


Figura 54 - Configurazione con motore verticale centrato rispetto al piatto

La soluzione a questo problema è stata trovata disassando il motore rispetto al piatto, tuttavia sono emersi altri problemi legati al fissaggio del motore, il quale seppur presenti dei fori filettati sulla *faceplate*, questi non risultano adatti per sostenerlo nella maniera presentata in Figura 55 e rendono il motore troppo ingombrante in altezza rispetto ai limiti consentiti, e al posizionamento della puleggia; anche in questo caso si è mantenuta una codifica colore per rendere più intellegibile lo schema raffigurato.



**Figura 55 - Configurazione con motore verticale disassato rispetto al piatto**

Si è allora proceduto con l'implementazione di una configurazione in cui il motore potesse essere disposto con asse orizzontale, mantenendolo però disassato rispetto al piatto, e si è contemporaneamente sviluppato un sistema in grado di sostenere il dissipatore collegandolo ai cuscinetti lineari. La soluzione riscontrata si può osservare nella figura seguente, dove in viola sono evidenziati i sostegni del dissipatore, previsti di asole per poter regolare l'altezza del dissipatore, e in verde la staffa di fissaggio (*mounting bracket*) del NEMA; inoltre sono presenti nell'assieme anche dei tensionatori per fissare la cinghia, un sistema di sostegno della puleggia di rinvio e l'assieme dei LED con PCB.

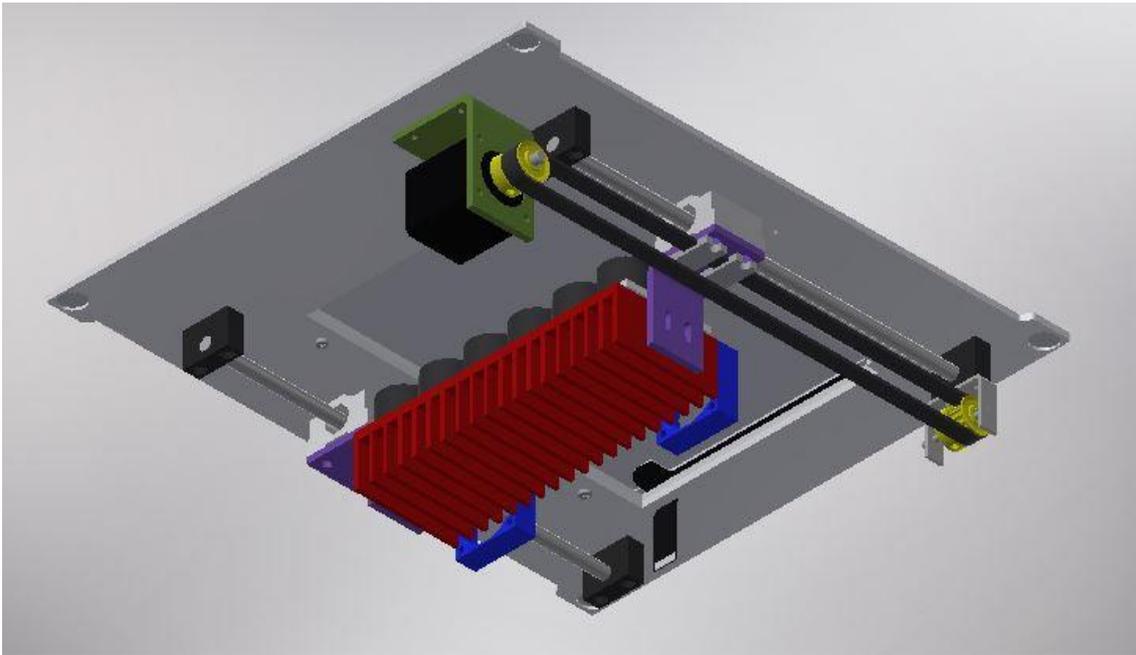


Figura 56 - Configurazione con motore orizzontale disassato rispetto al piatto

Anche questa soluzione presentava una possibilità di miglioramento, sia per quanto riguarda la semplificazione della fase di assemblaggio che per l'eventuale produzione; infatti molti dei componenti previsti dell'assieme, in alluminio di spessore 3 mm, sono ottenuti da un processo di piegatura, il quale tuttavia risulta poco accurato dal punto di vista dimensionale e delle tolleranze, per cui si è cercata una soluzione per quelle parti ottenute in questo modo. Le soluzioni trovate sono riportate nel capitolo seguente in cui viene presentata la soluzione definitiva per quanto riguarda il prototipo virtuale

### 3.2.3 Configurazione definitiva

I componenti principalmente esposti al problema legato alla piegatura sono: gli elementi di collegamento del dissipatore con gli SC6UU, il sostegno della spina della puleggia di distribuzione e il *mounting bracket* del NEMA. Analizzando singolarmente queste parti si è valutata la possibilità di migliorare il collegamento tra dissipatore e *linear bearing* progettando *ad hoc* un circuito stampato (che non è altro che una lamina in alluminio) con il fine di fissarlo direttamente ai fori del cuscinetto, per gli altri componenti si è valutata l'ipotesi di produrli internamente all'azienda in ABS utilizzando i *personal fabricator* FABtotum. Questa ultima opzione è stata presa in considerazione anche per altre parti dell'assieme, quali i supporti delle barre di alluminio da 6 mm e i tensionatori della cinghia. Invece per il sostegno del NEMA si è considerata anche l'opzione di acquistare il componente.

Si riporta nelle figure sottostanti il sistema di movimentazione definitivo e i rispettivi sotto assiemi.

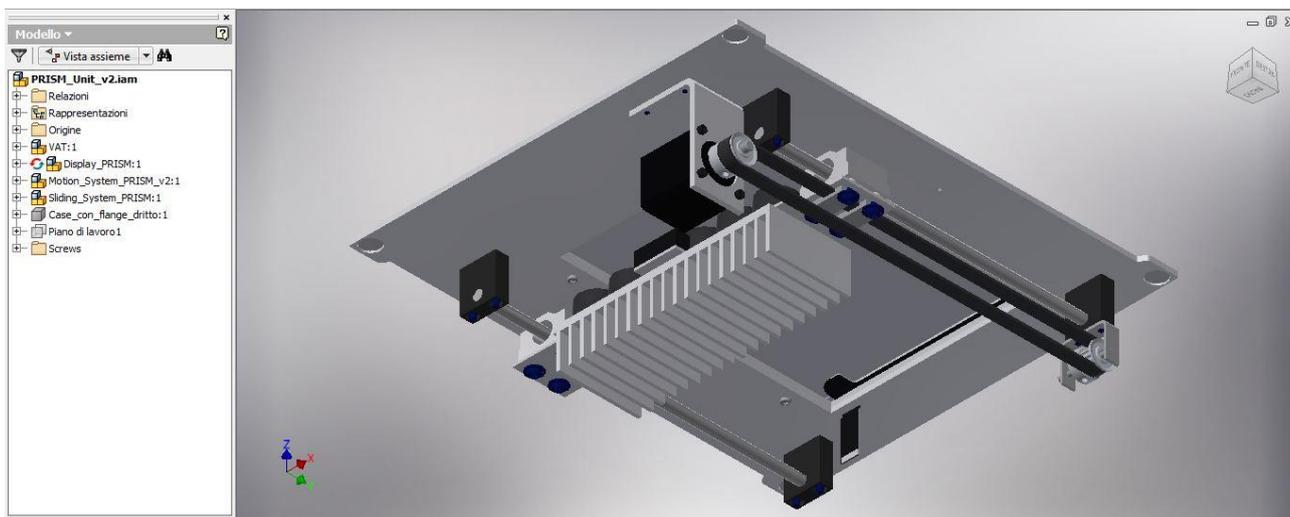


Figura 57 - Configurazione definitiva



Figura 58 - Sistema di mozione

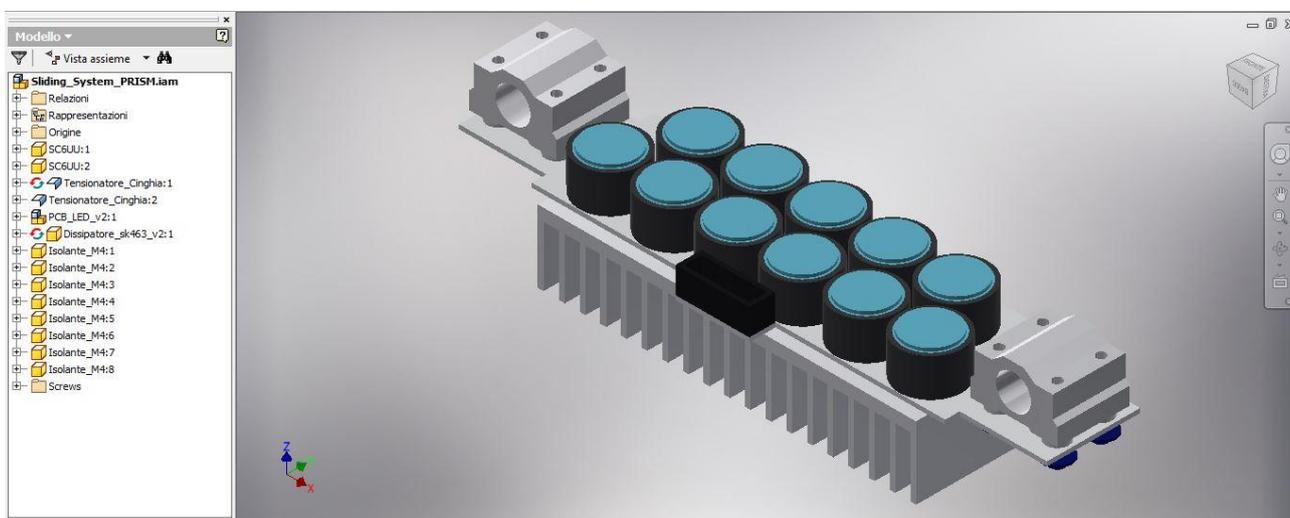


Figura 59 - Sistema di scorrimento

Per quanto riguarda eventuali analisi del sistema di movimentazione, si è ritenuto inutile svolgere calcoli di fatica o durata dei cuscinetti, in quanto il carico da sostenere è esiguo, infatti si può facilmente calcolare che la massa totale del sistema di scorrimento risulta di poco superiore a 0.3 kg.

Per quel che riguarda invece la scelta del motore passo-passo, si è optato per un NEMA 11, in quanto rispetta i limiti di ingombro rispetto al NEMA 17, genera una coppia motrice ( $C_m$ ) pari a  $600 g_F \cdot cm = 0.5886 N \cdot m$  più che sufficiente alla movimentazione del sistema e risulta di più economico di un NEMA 8.

### 3.3 Sistema di dissipazione

La componente dissipativa è un altro dei fattori più critici, infatti è importante che la temperatura non ecceda un determinato valore limite (prefissato) per non deteriorare o addirittura compromettere il funzionamento dei diodi LED, inoltre anche gli altri componenti risentono negativamente dell'influenza del calore, ad esempio il motore, i cuscinetti lineari, la cinghia 2GT e altri.

Nonostante una fase di sperimentazione della temperatura fosse stata già eseguita, si è reso necessario valutare la scelta del dissipatore tramite un foglio di calcolo al fine di considerare la condizione più restrittiva nella quale potesse agire il dissipatore; infatti, come detto nel Capitolo 3.1.2, l'esperimento è stato svolto durante il periodo invernale, comportando una temperatura ambiente di gran lunga ridotta e con essa una resistenza termica disponibile per dimensionare il dissipatore più elevata. Inoltre si era anche osservato che alla tensione di alimentazione, la corrente e quindi la potenza da dissipare restava molto al di sotto di quella nominale indicata nelle specifiche dei LED, ciò voleva quindi dire che le temperature raggiunte non erano le massime alle quali potesse arrivare il sistema.

Per sviluppare un sistema dissipativo adeguato si sono seguiti principalmente due step: il primo consisteva nel calcolare la resistenza termica del sistema LED senza la presenza di un dissipatore, mentre nel secondo si procedeva all'effettiva scelta del dissipatore prendendo in considerazione le condizioni di esercizio cui questo era sottoposto, ovvero la tipologia di scambio termico. Per tutta la procedura si sono seguite passo-passo le linee guida riportate nel catalogo del produttore dei dissipatori (*Fischer Elektronik*).

È possibile osservare che un modello termico che dissipa potenza per effetto Joule presenta strette analogie con un equivalente elettrico, al punto che si può fornire una descrizione in termini circuitali del fenomeno di scambio termico, ove le temperature prendono il posto delle tensioni, le resistenze termiche di quelle elettriche e il flusso termico della corrente. Ci si rifà al modello elettrico con potenza continua applicata (Figura 60), in quanto, nonostante ci siano dei cicli di accensione e spegnimento, il rapporto tra la durata di accensione e quella di spegnimento è molto elevato ed è quindi possibile approssimarlo a questa condizione.

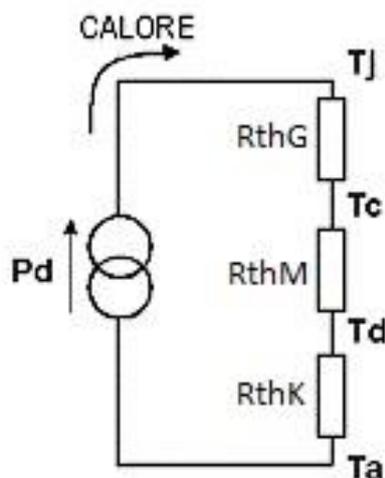


Figura 60 - Equivalente elettrico del modello termico relativo alla dissipazione di potenza

Alla luce dell'analogia elettrica è possibile effettuare il calcolo della resistenza termica disponibile per il dissipatore  $R_{thK}$  ricavando ed utilizzando la formula:

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{P} - (R_{thG} + R_{thM}) = \frac{\Delta\vartheta}{P} - R_{thGM}$$

dove  $\vartheta_i$  è la massima temperatura di sicurezza ricavata dalla differenza tra la temperatura limite dei diodi LED  $\vartheta_j$  e il fattore di sicurezza in termini di temperatura  $\vartheta_{safety}$ ,  $\vartheta_u$  è la temperatura ambiente,  $P$  è la potenza generata dal LED,  $R_{thG}$  è la resistenza termica del diodo LED (da *datasheet*) e  $R_{thM}$  è la resistenza termica fornita dall'interfaccia tra le superfici di montaggio. I dati necessari a svolgere questo calcolo erano facilmente ricavabili dai fogli tecnici o calcolabili; si riportano nella tabella seguente i dati di progetto significativi dei LED e i limiti imposti.

Tabella 6 - Condizioni e limiti per il calcolo della resistenza termica

Caratteristica	Simbolo	Valore tipico	Unità di misura
Temperatura massima di esercizio dei LED	$\vartheta_j$	120	°C
Fattore di sicurezza espresso in termini di temperatura	$\vartheta_{safety}$	20	°C
Temperatura ambiente (periodo estivo)	$\vartheta_u$	40	°C
Corrente di funzionamento	I	700	mA
Tensione di funzionamento	V	3.2 – 4.3	V

A questo punto si è proceduto calcolando la potenza nominale da dissipare  $P$  come prodotto tra la corrente e la tensione media di funzionamento dei LED prima, e quella massima dopo, e considerando due casi per quanto riguarda la resistenza termica dovuta alla superficie di montaggio  $R_{thM}$ , il primo (caso A) a secco, senza isolante tra le due superfici e il secondo (caso B) con pasta termica (*thermal compound*). Per ciascuno di questi ultimi due casi si sono distinti tre valori:

minimo, medio e massimo. Suddividendo inoltre la computazione per singolo LED e per *array* completo di 11 LED, si sono ricavate le diverse resistenze termiche nelle diverse condizioni; per il calcolo della resistenza termica fornita dagli 11 LED con la rispettiva resistenza legata all'accoppiamento  $R_{thGM}$ , si è utilizzata ancora l'analogia elettrica considerando le resistenze termiche in parallelo così come nel circuito elettrico:

$$\frac{1}{R_{thGM}} = \frac{1}{R_{thG1} + R_{thM1}} + \frac{1}{R_{thG2} + R_{thM2}} + \dots + \frac{1}{R_{thG11} + R_{thM11}}$$

Inoltre, essendo tutte le resistenze termiche  $R_{thG}$  e  $R_{thM}$  uguali tra loro, risulta:

$$\frac{1}{R_{thGM}} = \frac{11}{R_{thG} + R_{thM}} \rightarrow R_{thGM} = \frac{R_{thG} + R_{thM}}{11}$$

Tuttavia, alla luce di quanto era emerso dai test di temperatura sui diodi LED precedentemente eseguiti, è stato inoltre opportuno calcolare la potenza massima da dissipare legata alla tensione e alla corrente con cui il sistema di generazione del fascio luminoso era stato realmente ed effettivamente alimentato; si è pertanto calcolata la resistenza termica legata anche a questa potenza, la quale risulta però meno limitativa rispetto al caso ideale, infatti la  $P_{eff} = 25.48 W$  è inferiore alla  $P_{id,MAX} = (11 \text{ led}) \cdot (0.7 A) \cdot (4.3 V) = 33 W$ , di conseguenza la resistenza termica del caso ideale risultata essere la più adatta alla scelta del dissipatore. Così facendo si sovradimensiona il sistema dissipativo, assicurandosi che entro le condizioni di esercizio il sistema non incorra in problemi legati all'eccessivo surriscaldamento.

Si riportano i risultati più significativi nelle tabelle seguenti distinguendo tra caso A (a secco) e caso B (con *thermal compound*) e ponendosi nel caso peggiore per quanto riguarda la potenza da dissipare e la resistenza termica della superficie di collegamento, mentre per tutti gli altri risultati si rimanda all'Appendice B.

Tabella 7 - Valori di potenza e resistenza termica più indicativi per il caso A (a secco)

Caratteristica	Simbolo	Valore tipico	Unità di misura
<b>Potenza termica nominale massima da dissipare</b>	$P_{id}$	33	W
<b>Resistenza termica del diodo e della superficie di collegamento</b>	$R_{thGM}$	0.745454545	K/W
<b>Resistenza termica nominale del dissipatore</b>	$R_{thK,id}$	1.066686802	K/W
<b>Potenza termica effettiva da dissipare</b>	$P_{eff}$	25.48	W
<b>Resistenza termica effettiva del dissipatore</b>	$R_{thK}$	1.609333524	K/W

Tabella 8 - Valori di potenza e resistenza termica più indicativi per il caso B (con thermal compound)

Caratteristica	Simbolo	Valore tipico	Unità di misura
<b>Potenza termica nominale massima da dissipare</b>	$P_{id}$	33	W
<b>Resistenza termica del diodo e della superficie di collegamento</b>	$R_{thGM}$	0.736363636	K/W
<b>Resistenza termica nominale del dissipatore</b>	$R_{thK,id}$	1.075777711	K/W
<b>Potenza termica effettiva da dissipare</b>	$P_{eff}$	25.48	W
<b>Resistenza termica effettiva del dissipatore</b>	$R_{thK,eff}$	1.618424433	K/W

Come ci si aspettava il caso A risulta più critico rispetto a quello con la presenza di una pasta termica. A questo punto, ottenuti i valori di resistenza termica massima ammissibile per il sistema, si può procedere con la scelta del dissipatore, verificando che la resistenza termica effettiva del dissipatore sia inferiore a quella appena calcolata, in particolare a quella più limitante.

Oltre al limite fornito dalla resistenza termica il dissipatore deve rispettare anche un limite di ingombro, legato alla distanza tra i due cuscinetti lineari, alla distanza dei LED dallo schermo, che influisce direttamente sul massimo ingombro in altezza, e alla corsa disponibile, che il dissipatore non deve limitare. Quindi prima di procedere con il secondo step si sono selezionati tutti quei dissipatori che rispettassero queste specifiche, facendo ricadere la scelta su quello con scambio termico più basso; così facendo si sovradimensiona il sistema e ci si assicura un fattore di sicurezza accettabile.

Per quanto riguarda quindi il secondo step, si è deciso di sviluppare un sistema di raffreddamento del dissipatore a convezione forzata, sfruttando 2 ventole assiali con diametro utile ( $d_{fan}$ ) per il passaggio dell'aria pari a 30 mm e portata d'aria ( $Q_{fan}$ ) uguale a 0.11 mm<sup>3</sup>/min, le quali sono state scelte in quanto già presenti tra gli ordini dell'azienda; grazie a queste specifiche è stato possibile calcolare approssimativamente la velocità media dell'aria all'interno della ventola con la seguente equazione:

$$v_{m,air} = \frac{Q_{fan}}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Per tenere in considerazione l'effetto della convezione forzata si è estrapolato dal grafico sottostante un fattore di proporzione  $a$  funzione della velocità dell'aria, il quale permette di ottenere la resistenza termica del dissipatore sottoposto a convezione forzata moltiplicando il fattore di proporzione per la resistenza termica del dissipatore da specifiche.

### Thermal resistances of any profiles with forced convection

$R_{thKf} \approx a \cdot R_{thK}$   
 $R_{thKf}$  = thermal resistance with forced convection  
 $R_{thK}$  = thermal resistance with natural convection  
 $a$  = factor of proportion

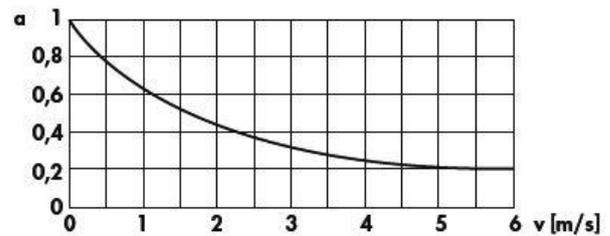


Figura 61 - Diagramma della ventilazione forzata che esprime il fattore  $a$  in funzione della velocità dell'aria

Dopo aver ottenuto la resistenza termica del dissipatore sottoposta a convezione forzata, è necessario verificare che questa sia inferiore a quella massima ammissibile ricavata dal primo procedimento e ottenere un fattore di sicurezza dal rapporto tra le due.

Detto ciò è stato necessario implementare il tutto su un foglio di calcolo Excel. Prima di tutto, non avendo l'equazione che leghi la velocità dell'aria con il fattore di proporzionalità, si sono estrapolati visivamente dei punti notevoli dal grafico di Figura 61 e si sono interpolati con una curva di terzo grado come mostrato nella figura seguente.

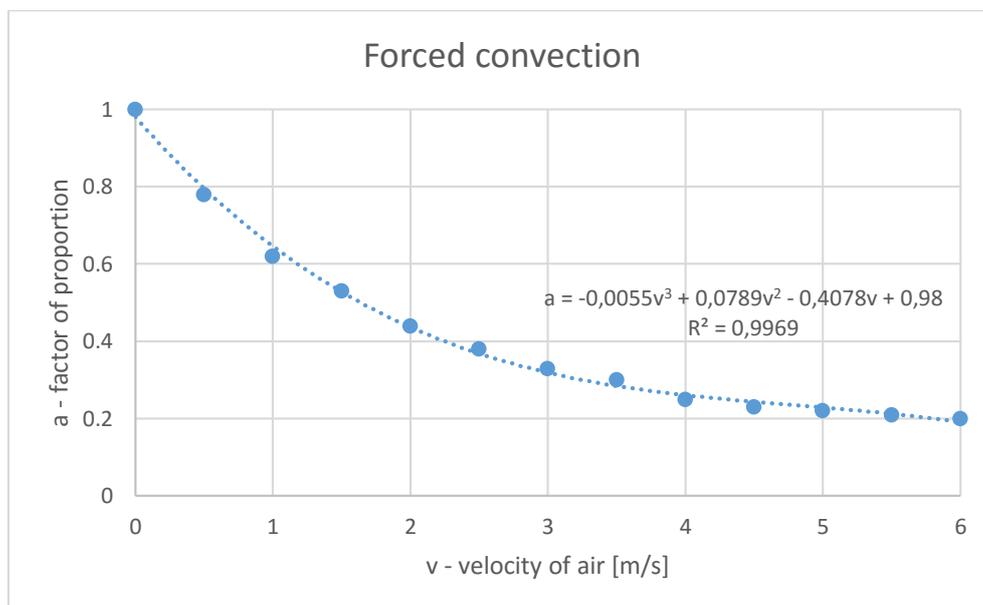


Figura 62 - Diagramma della convezione forzata estrapolato ed approssimato

Si è quindi proceduto al calcolo della velocità dell'aria  $e$ , sostituendo nell'equazione polinomiale di terzo grado, si è risaliti al valore di  $a$ :

$$v_{m,air} = 5.1872 \text{ m/s}$$

$$a = 0.219976$$

Dalla selezione del dissipatore, il più adatto per quel che riguarda il *trade-off* tra ingombri e resistenza termica minima è risultato l'estruso in alluminio SK 463, il cui profilo è riportato in Figura 63 insieme alla curva della resistenza termica in funzione della lunghezza di estrusione.

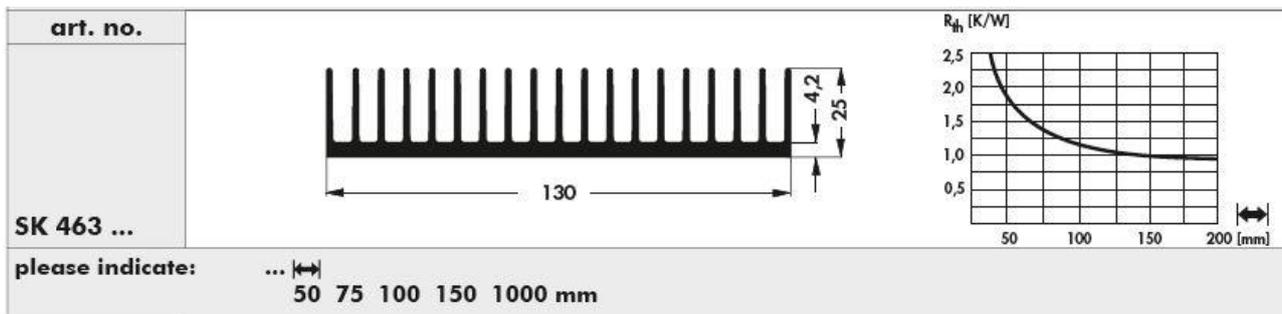


Figura 63 - Estratto dal catalogo della Fischer Elektronik per quel che riguarda le dimensioni e la resistenza termica del dissipatore SK 463

Anche in questo caso è stato necessario estrapolare i dati più significativi e riportarli su un grafico per ricavare l'equazione della curva; tuttavia non bastava interpolare con una polinomiale sufficientemente accurata, poiché i dati di interesse erano al di fuori dell'intervallo dei valori delle ascisse selezionati, infatti la lunghezza di estrusione ideale è pari a 30 mm.

Allora si è cercata un'interpolazione più affidabile per mezzo di un'iperbole equilatera traslata; per fare ciò è stato opportuno calcolare l'inverso della variabile L (lunghezza di estrusione) e riportare i valori ottenuti sulle ascisse di un grafico con le resistenze ricavate manualmente sulle ordinate, come mostrato in Figura 64, e interpolare questi punti con una retta.

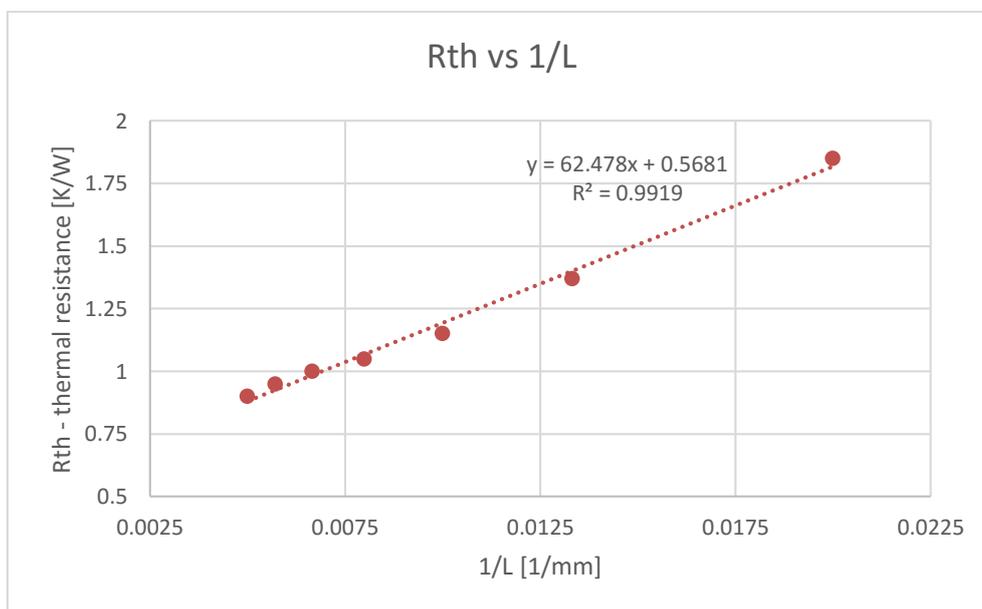


Figura 64 - Grafico per interpolazione della resistenza termica sul reciproco della lunghezza di estrusione

Una volta ottenuti il coefficiente angolare (m=64.478) e l'intercetta all'origine (q=0.5681) è stato possibile calcolare le resistenze termiche relative all'equazione ottenuta e riportare sul grafico L-R<sub>th</sub> e confrontarli con i precedenti con il fine di verificare la precisione dell'interpolazione; l'equazione dell'iperbole equilatera traslata ottenuta è:

$$R_{th} = \frac{0.5681x + 64.478}{x}$$

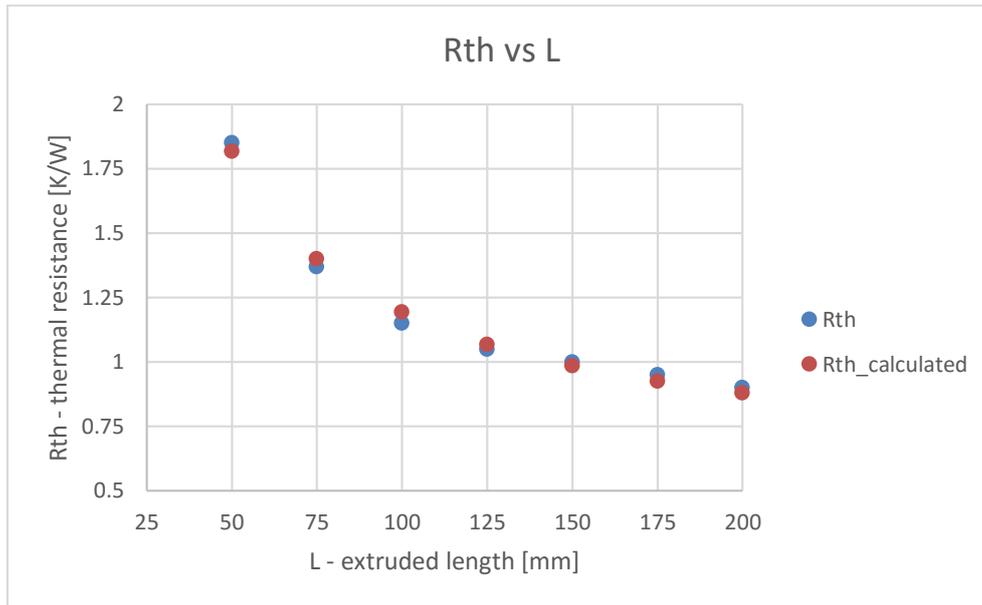


Figura 65 - Confronto tra le resistenze termiche ricavate dal catalogo e quelle calcolate

A questo punto è stato opportuno prendere in considerazione il valore di  $L$  da scegliere per il dissipatore; come già anticipato, la condizione progettuale ideale sarebbe quella di selezionare un dissipatore con  $L=30$  mm, tuttavia sul catalogo dei produttori sono presenti delle lunghezze standard di estrusione, tra le quali la minore è pari a 50 mm. Si sono quindi presi in considerazione, nell'eventualità che non fosse possibile estrarre alla lunghezza desiderata o che estrarre ad una lunghezza standard risultasse più economico, entrambi i valori di  $L$  e si è proceduto parallelamente con i calcoli; i risultati più significativi sono riportati nella tabella seguente, con il fattore di sicurezza ottenuto dal rapporto tra la resistenza termica massima ammissibile calcolata nel primo step e quella con convezione forzata appena calcolata:

Tabella 9 - Risultati fondamentali legati al dimensionamento e alla scelta del dissipatore nei due diversi casi di lunghezza  $L$

Caratteristica	$L=30$ mm	$L=50$ mm	U.d.M.
Resistenza termica del dissipatore <b>SENZA</b> convezione forzata: $R_{thK,diss}$	2.6507	1.81766	K/W
Resistenza termica del dissipatore <b>CON</b> convezione forzata: $R_{thKf,diss}$	0.5831	0.3998	K/W
Fattore di sicurezza: $\eta$	1.82936784	2.667773584	/

Ricordando che una temperatura di sicurezza ( $\vartheta_{safety}$ ) era già stata presa in considerazione, a fronte di questi risultati è possibile affermare che entrambi i valori di  $L$  risultano accettabili; inoltre, dopo aver contattato l'azienda che si occupa della distribuzione in Italia, è stato comunicato che il prezzo varia proporzionalmente con la lunghezza di estrusione, per cui la scelta è ricaduta sull'estruso di 30 mm, che presenta un buon fattore di sicurezza e rispetta al meglio i vincoli dimensionali imposti.

Per quanto riguarda invece le ventole, si è deciso di fissarle, come si può vedere in Figura 66, sul componente previsto per mantenere l'intero sistema chiuso e al riparo da agenti esterni quali polvere, sporcizia e altri fattori, piuttosto che fissarle direttamente sul dissipatore per una questione

di ingombri e di componenti aggiuntivi necessari in fase di assemblaggio, che avrebbero di conseguenza incrementato i costi totali del sistema PRISM.

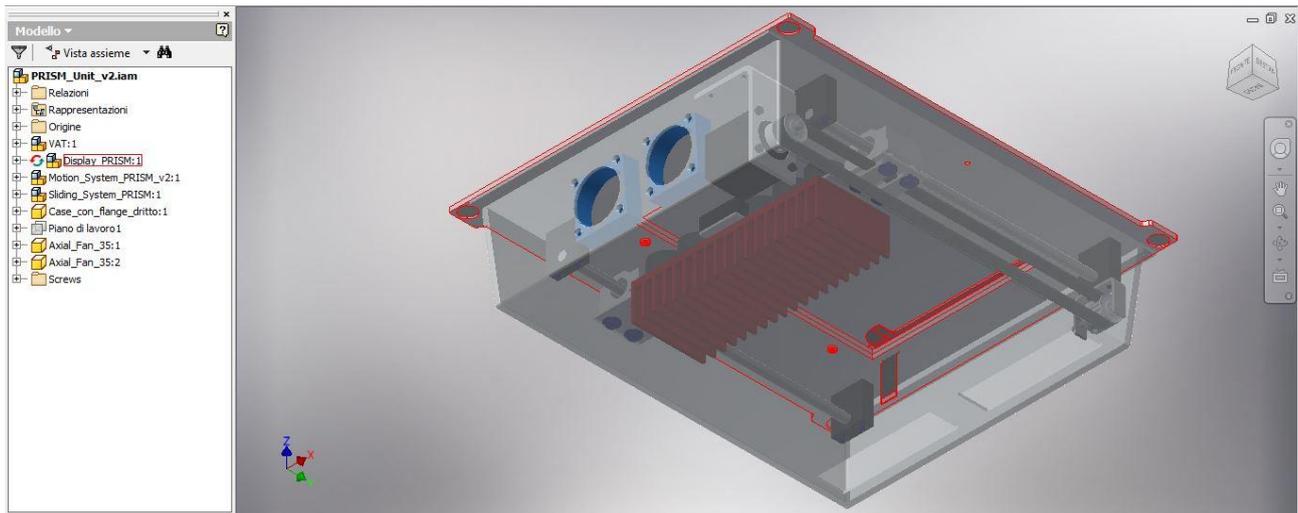


Figura 66 - Sistema PRISM comprensivo di contenitore esterno e ventole per il raffreddamento in convezione forzata

### 3.3.1 Simulazione tramite Autodesk Fusion 360

Una volta selezionato e dimensionato il dissipatore, si è voluta eseguire un'analisi agli elementi finiti (FEA – *Finite Elements Analysis*) per verificare che fosse effettivamente adatto all'applicazione. Prima di procedere con questa fase l'intero sistema è stato esportato sulla piattaforma *cloud* Autodesk A360 ed è stato importato in un nuovo *software*: Autodesk Fusion 360.

Come lascia ben intendere il nome, questo prodotto consente di gestire un progetto industriale e meccanico nella sua totalità, a 360° per l'appunto; infatti presenta al suo interno diversi moduli:

- 3D CAD (*Computer Aided Design*):
  - modellazione in forma libera e scultura;
  - modellazione solida;
  - modellazione parametrica;
  - modellazione tramite mesh;
  - librerie di parti e contenuti.
- CAE (*Computer Aided Engineering*):
  - creazione di assieme tramite vincoli e giunti;
  - studi di movimento;
  - *rendering*;
  - test e simulazioni agli elementi finiti;
  - animazioni.
- CAM (*Computer Aided Manufacturing*):
  - creazione di percorsi utensile per lavorazioni meccaniche a 2, 2.5 e 3 assi;
  - generazione di disegni tecnici;
  - *utility* per la stampa 3D.

Il punto di forza di questo SW risiede però nella possibilità dei *team* e soggetti coinvolti di lavorare insieme in un ambiente integrato di progettazione, ingegnerizzazione e costruzione grazie al fatto che questo strumento si basa completamente sul *cloud*; infatti permette l'accesso su più piattaforme e dispositivi, consentendo l'abbandono dei metodi tradizionali di gestione dei dati.

Proprio questi vantaggi hanno convinto il reparto di R&D a rivolgere la propria attenzione verso Autodesk Fusion 360 e successivamente ad adottare per il resto del progetto, e probabilmente per i progetti a venire, questo *software* innovativo ed unico nel suo genere.

Nel modulo *Simulation*, si è svolta una simulazione termica assegnando il tipo di materiale ai singoli componenti, come riportato in Figura 67, (in quanto la libreria materiali di Fusion 360 è più ampia) e imponendo due diversi carichi termici.

Component	Original Material	Study Material	Safety Factor
/Piatto2.3:1	Aluminum 6061	Aluminum	Yield Strength
/LCD_Holder:1	ABS Plastic	(As Original)	Yield Strength
/Retina_display_7:1/Body1	Generic	(As Original)	Yield Strength
/Retina_display_7:1/Body2	Generic	(As Original)	Yield Strength
/Vetro:1	Glass	(As Original)	Yield Strength
/Support_d6:1	ABS Plastic	(As Original)	Yield Strength
/Support_d6:2	ABS Plastic	(As Original)	Yield Strength
/Support_d6:3	ABS Plastic	(As Original)	Yield Strength
/Support_d6:4	ABS Plastic	(As Original)	Yield Strength
/Barra_d6:1	Stainless Steel, 440C	Stainless Steel AISI 304	Yield Strength
/Barra_d6:2	Stainless Steel, 440C	Stainless Steel AISI 304	Yield Strength
/NEMA_Mounting_Bracket_2:1	Aluminum 6061	Aluminum	Yield Strength
/NEMA1:1	Generic	Stainless Steel	Yield Strength
/TS Pulley:1	Generic	Aluminum	Yield Strength
/TS Pulley:2	Generic	Aluminum	Yield Strength
/Cinghia_02:1	Rubber, Silicone	(As Original)	Yield Strength
/Spina_3mm_hb32:1	Generic	Aluminum	Yield Strength
/Supporto_Pulley_2:1	Steel Carbon	ABS Plastic	Yield Strength
/SC6UU:1	Aluminum 6061-AHC	Stainless Steel AISI 304	Yield Strength
/SC6UU:2	Aluminum 6061-AHC	Stainless Steel AISI 304	Yield Strength

Figura 67 - Estratto della tabella dei materiali assegnati

Il primo carico imposto, *Internal Heat*, serve a modellare la generazione di calore da dissipare da parte dell’array di LED; come opportuna approssimazione è stato selezionato il PCB ed è stato assegnato un valore di potenza pari a 33 W (valore limite introdotto nel Capitolo 3.3) come mostrato nella figura seguente.

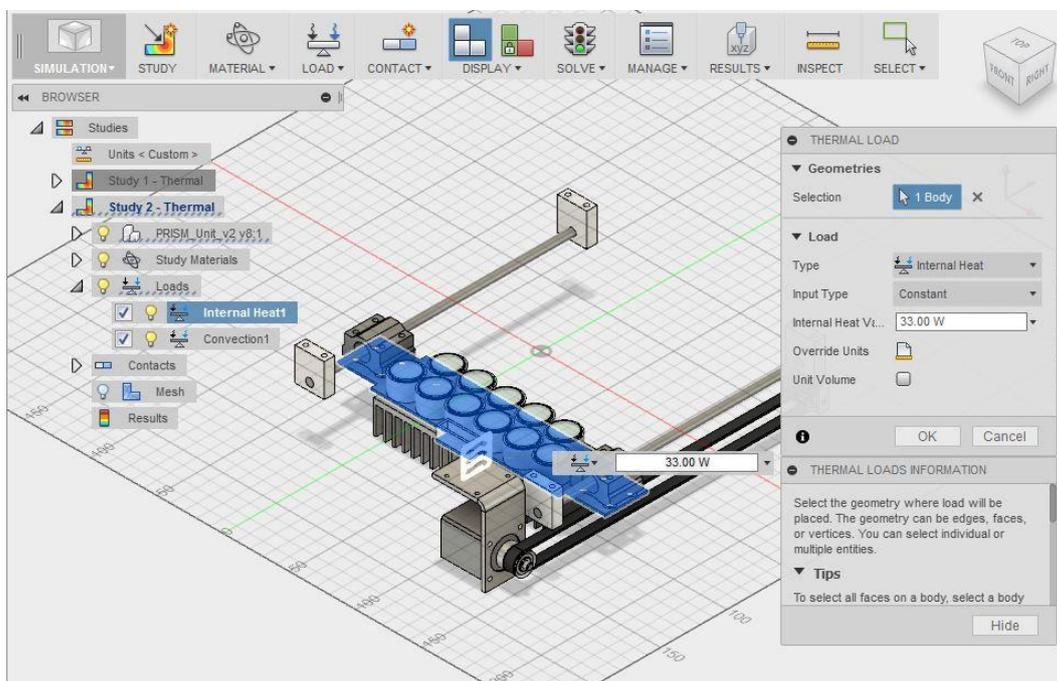


Figura 68 - Internal Heat: carico termico applicato nella simulazione agli elementi finiti

Il secondo invece, *Convection*, per modellare la convezione forzata a cui è sottoposto il sistema; sono quindi state selezionate tutte le superfici sottoposte alla convezione, come si può vedere in Figura 69, ed è stato assegnato un valore di temperatura iniziale dell'aria pari a 40°C (condizione più critica) e un valore del coefficiente di scambio termico convettivo ( $h_c$ ) ricavato dalla seguente equazione empirica:

$$h_c = 10.45 - v + 10 \cdot v^{1/2} = 28.03 \frac{W}{m^2K}$$

dove  $v = 5.1872 \text{ m/s}$ , velocità dell'aria ricavata in precedenza.

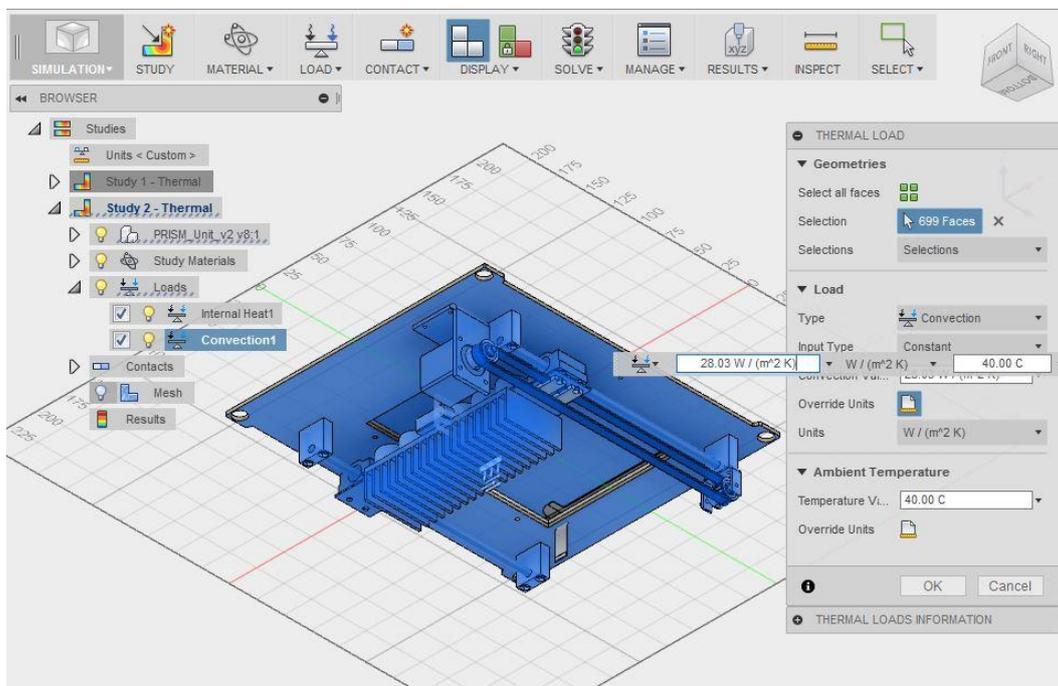


Figura 69 - Convection: carico termico applicato nella simulazione agli elementi finiti

A questo punto si è provveduto ad assegnare i contatti con il comando *Automatic Contacts* e ad implementare una *mesh* con i settaggi riportati nella figura seguente:

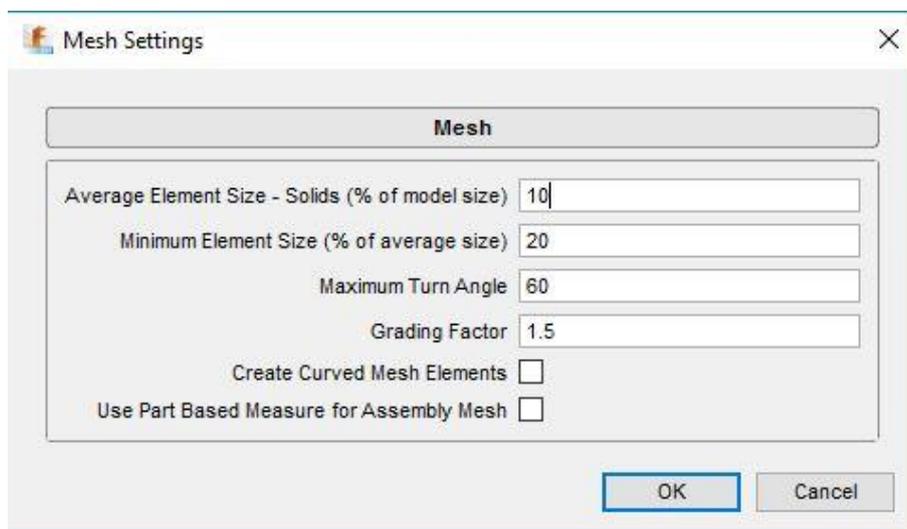


Figura 70 - Mesh settings

Facendo girare la simulazione si è ottenuto il risultato riportato in Figura 71, dove si osserva che la temperatura massima si mantiene di poco al di sopra dei 60°C; ciò, a fronte delle assunzioni semplificative effettuate, consente di affermare che il dissipatore risulta adatto a tale applicazione. Per il report completo generato dal *software* si rimanda all'Appendice C.

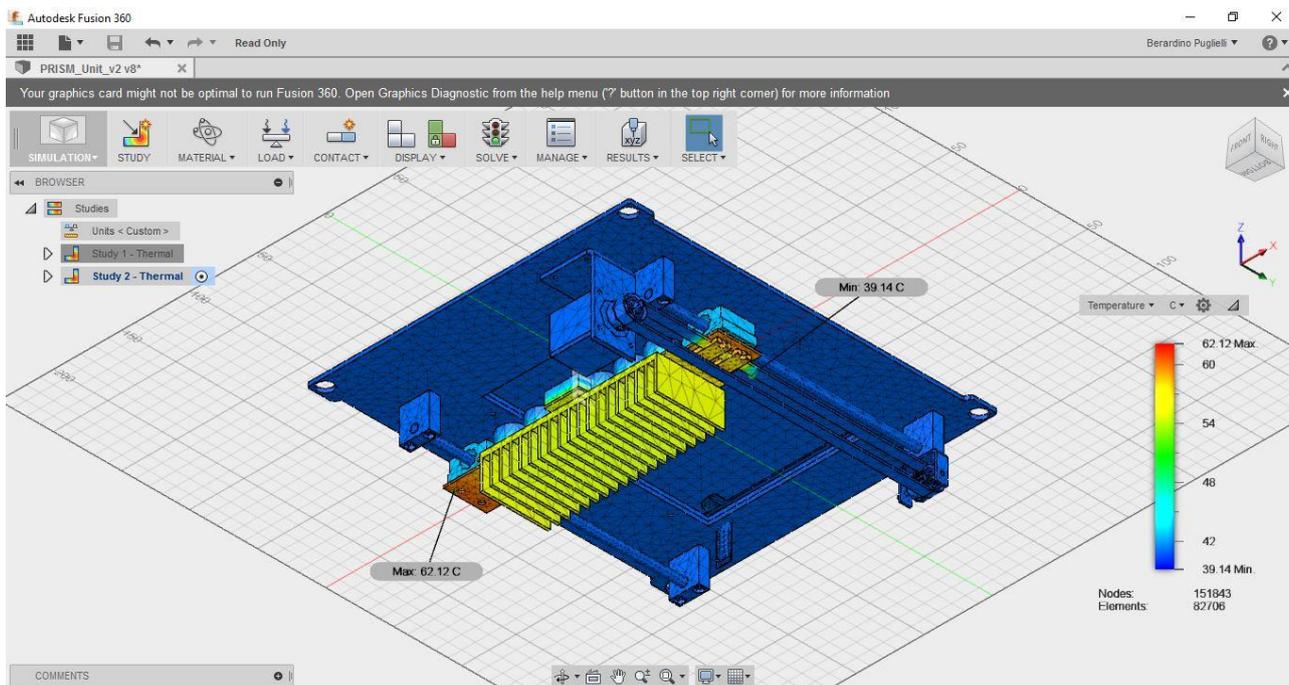


Figura 71 – Risultato grafico ottenuto dalla simulazione termica

### 3.4 VAT

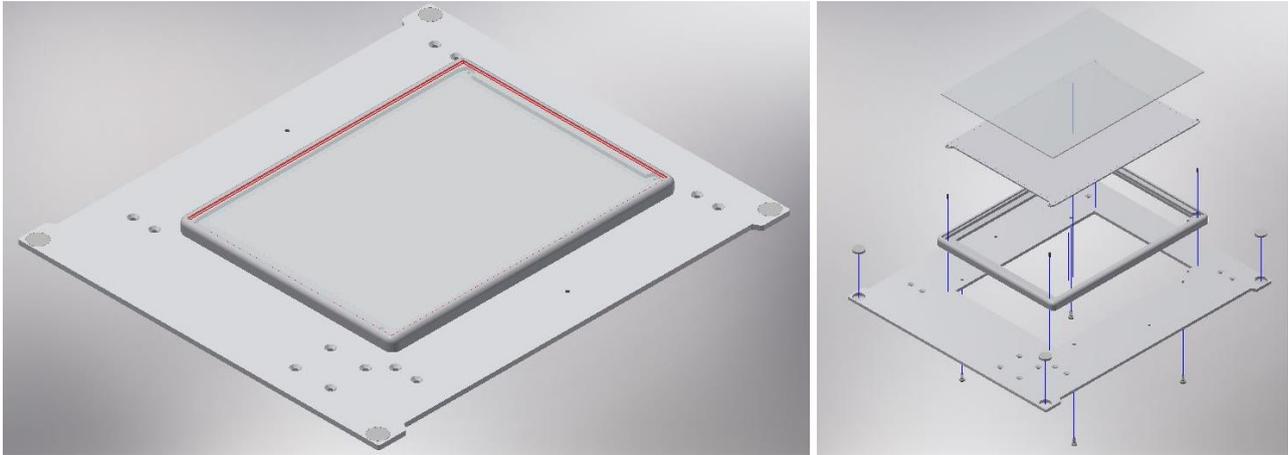
La camera di costruzione o *vat*, nome comunemente usato nel settore, svolge in questo progetto la duplice funzione di contenitore della resina e “finestra” di passaggio per il fascio di luce che illumina la resina dal basso; il vantaggio di avere un sistema di polimerizzazione con illuminazione dal basso, oltre a quelli esposti nel terzo paragrafo del Capitolo 3, risiede nel fatto che lo strato di resina che deve essere polimerizzato non si trova a contatto con l’ossigeno dell’atmosfera e quindi non viene inibito il processo di formazione e quello di attivazione dei radicali liberi.

Il primo dei due compiti può facilmente essere svolto da un sistema sufficientemente ermetico, ovvero che non lasci passare la resina permettendole di cadere sul sistema di movimentazione sottostante, in quanto una volta sottoposta alla radiazione luminosa questa solidificherebbe provocando seri danni al sistema ottico e meccanico della macchina. Per quel che riguarda la seconda funzione invece, deve essere in grado di essere attraversato dalla luce senza però distorcerla o filtrarla, per cui la superficie inferiore del *vat* deve risultare il più trasparente possibile.

Inoltre, un’altra peculiarità per quanto riguarda il fondo del contenitore, è che non deve presentare un’eccessiva forza di adesione con l’ultimo *layer* polimerizzato; in quanto, nella fase di distacco, potrebbe comportare una lacerazione dello strato appena formato, se non addirittura del pezzo stampato, oppure un distacco del pezzo dal piatto di stampa invece che dal fondo del *vat* e ciò implicherebbe una continua esposizione dello stesso strato di resina ottenendo un oggetto schiacciato e deformato.

Per tutto il sistema *vat* deve poi essere previsto il posizionamento al di sopra del piatto, in particolare al di sopra del sistema mostrato in figura, che si compone di un LCD, di un sostegno per

il display a cristalli liquidi, fissato al piatto tramite viti autoconformanti, e di un vetro sopra di esso, per proteggere lo schermo da eventuali impatti; quindi il dimensionamento dei componenti deve essere previsto *ad hoc*; senza contare la possibilità di prevedere un sistema di fissaggio ulteriore per tenere in posizione il contenitore della resina.

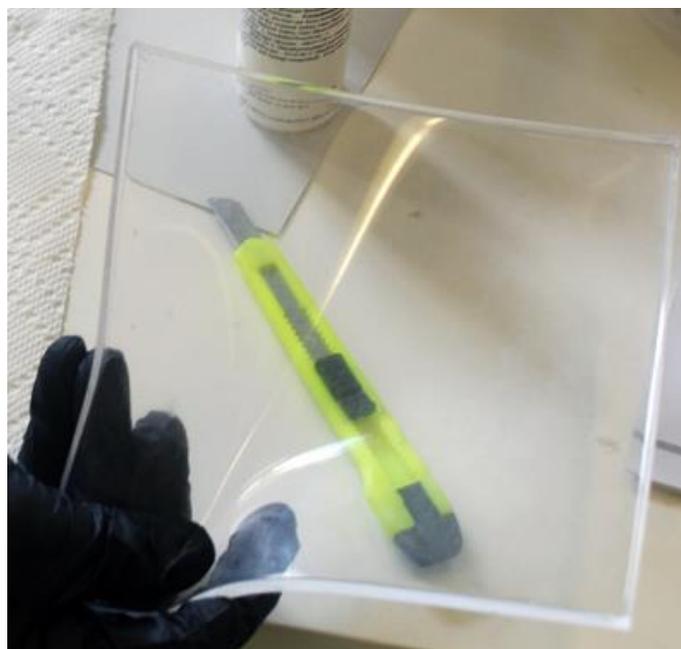


**Figura 72 - Vista assemblata ed esplosa del sistema di supporto del display a cristalli liquidi**

Allo stato dell'arte attuale si utilizzano due diverse soluzioni per il fondo della vasca di contenimento della resina: il polidimetilsilossano (PDMS) oppure il copolimero etilene propilene fluorato (FEP) che verranno affrontati e messi a confronto nel capitolo successivo.

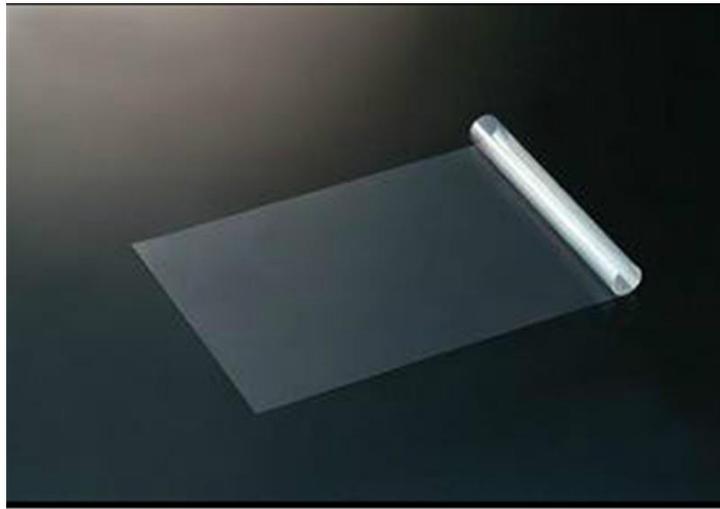
#### 3.4.1 PDMS vs FEP

Il PDMS è un polimero siliconico caratterizzato da una notevole resistenza alla temperatura, agli attacchi chimici, all'ossidazione, è un ottimo isolante elettrico e resistente all'invecchiamento; risulta inoltre otticamente pulito, cioè trasparente, biocompatibile e inerte, non è tossico né infiammabile, ma soprattutto non presenta aderenza al vetro, ai metalli e alla plastica in fase di solidificazione, proprietà che interessa direttamente questo progetto.



**Figura 73 - Foglio di PDMS**

Il FEP è un termoplasto fluoropolimerico e pertanto fonde durante la cottura fornendo un rivestimento con una superficie non porosa; presenta alte caratteristiche di antiaderenza, basso coefficiente di frizione, eccellente resistenza chimica (anche agli agenti caustici) e resistenza fino a temperature di circa 200°C.



**Figura 74 - Foglio di FEP**

Entrambi risultano largamente usati nel mercato dell'AM, quindi in fase di progetto sono stati presi in considerazione e testati. Alla luce delle sperimentazioni svolte si è potuto osservare come il PDMS, come si può osservare in Figura 75, dopo un largo utilizzo presenti:

- un appannamento della superficie trasparente dovuta alla continua esposizione della luce UV;
- una difficoltà nel processo di stampa a causa della sua porosità, in quanto permette ad alcuni componenti della resina di diffondersi al suo interno; così facendo questi assorbono parte della radiazione prima che arrivi alla resina da solidificare, diminuendo quindi la potenza luminosa del fascio;
- graffi sulla superficie dovuti a una manutenzione inadeguata del *vat*, i quali, in fase di stampa, si trasferiscono sulla stampa stessa.



**Figura 75 - Vat con fondo in PDMS sottoposto alle sperimentazioni**

Ad eccezione del secondo, gli stessi problemi sono stati riscontrati anche nel FEP, il quale risulta però meno costoso e soprattutto più facile da rimuovere e sostituire rispetto alla soluzione in silicone. Proprio per questo motivo si è deciso di implementare nel sistema PRISM questa soluzione come mostrato nella figura seguente.



Figura 76 - Vista assemblata ed esplosa del sistema vat

Si può osservare in Figura 76 come il foglio in FEP sia pinzato tra due cornici in alluminio e un contenitore termoformato, che svolge la funzione vera e propria di vasca per la resina; inoltre per assicurarsi che il foglio di FEP si mantenga in tensione è stato previsto un tensionatore al di sotto del sistema appena descritto, con la possibilità di avvicinarlo ad esso per mezzo di sei viti, e quindi mantenere in tensione il foglio di termoplasto.

### 3.5 Piano di stampa

La progettazione del piano o piatto di stampa (*building plate*) è l'ultima parte *hardware* del prototipo virtuale che viene affrontata in questa trattazione. È stato già introdotto il problema relativo alla forza di adesione tra *layer* appena solidificato e fondo del *vat*, per sopperire a questo problema è utile progettare accuratamente anche questo apparato, così che concorra al corretto funzionamento del sistema nella sua totalità.

In particolare esso deve prevedere una forza di adesione superiore a quella del FEP, così da assicurare che il materiale si separi da quest'ultimo e rimanga attaccato al piatto di stampa, ed un meccanismo di calibrazione manuale, per far sì che ad inizio stampa il piano sia parallelo al fondo del *vat*, consentendo l'uniformità di spessore del singolo strato e il parallelismo tra gli strati successivi.

Per progettare questo sistema è stato necessario prima di tutto prevedere un meccanismo di aggancio-sgancio comodo e semplice che si adattasse al carrello x-y già presente sulla macchina; si è quindi proceduto alla sua prototipazione virtuale partendo dalle componenti virtuali relative al carrello x-y già nel *database* dell'azienda, ottenendo il particolare del sistema esplosa proposto in Figura 77.

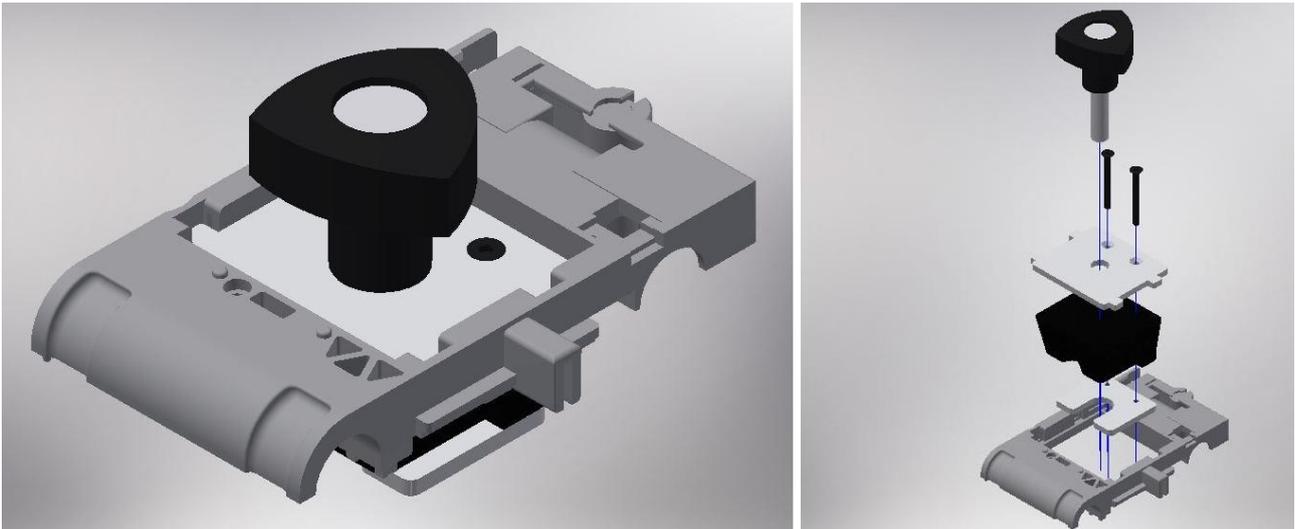


Figura 77 – Vista assemblata ed esplosa del sistema di aggancio-sgancio

A questo punto si è implementata la parte di progetto relativa al piatto di stampa vero e proprio, rappresentato da una lamina di alluminio, prevedendo un sistema di sostegno che si adattasse all'assieme della figura precedente, in cui l'elemento cardine è rappresentato da una parte in lamiera; questo componente presenta inoltre delle asole grazie alle quali è possibile la regolazione manuale del piatto tramite 4 manopole (*knob*). Nella figura seguente si può osservare l'assieme completo assemblato ed esplosa.

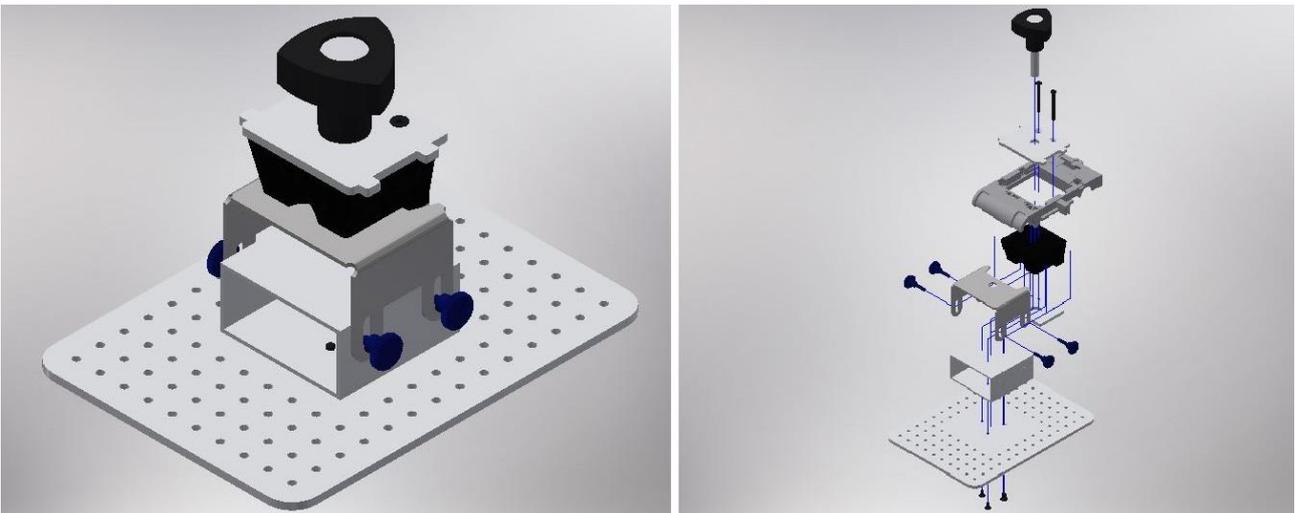
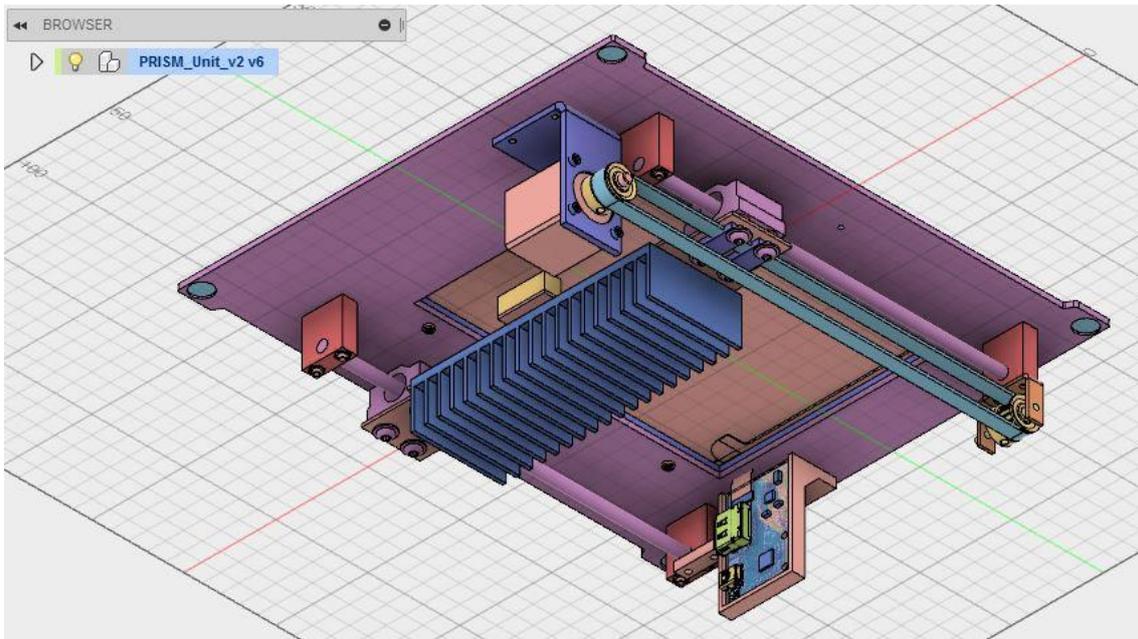


Figura 78 - Vista assemblata ed esplosa del sistema di sostegno e regolazione del piatto di stampa

### 3.6 Prototipo fisico

Una volta progettati e assemblati i sottoassiemi della parte meccanica, si è voluto sviluppare un prototipo fisico per assicurarsi che gli ingombri fossero effettivamente rispettati e che la mozione fosse effettivamente sufficiente a garantire lo scorrimento della sorgente luminosa.

Per procedere con la realizzazione del prototipo fisico è stato necessario prevedere un'elettronica provvisoria per quanto riguarda lo schermo LCD; si è quindi implementato un sistema in grado di sostenere un *driver ICs* (circuito integrato semiconduttore) con *Mini DisplayPort* (Mini DP) per il collegamento del display a cristalli liquidi.



**Figura 79 - Vista dell'assieme importato in Autodesk Fusion 360, con aggiunta del driver con relativo supporto e mappa di colore propria di Fusion 360**

Per quanto riguarda invece le parti meccaniche: alcune sono state campionate presso un fornitore, come le barre di diametro 6mm e i cuscinetti SC6UU, per altre si è generato un percorso utensile tramite modulo CAM in grado di fresare una lamiera di alluminio di spessore pari a 3 mm, come quello mostrato nella figura seguente, per ottenere il piatto e i componenti necessari al fissaggio del *building plate* al carrello x-y.



**Figura 80 - Lamiera in alluminio fresata per ottenere componenti del prototipo fisico**

La maggior parte dei componenti invece è stata stampata in ABS o PLA tramite i *personal fabricator* FABtotum presenti in azienda; sono stampati tutte le parti previste per il *vat* (2 cornici, contenitore per la resina e tensionatore), il supporto per il display a cristalli liquidi e quello per il motore *stepper*, i sostegni per il *driver* del LCD, quelli per le sbarre e per la puleggia di rinvio ed i tendicinghia. Nelle foto seguenti si riporta un esempio di “impiattata” di stampa di alcuni di questi componenti tramite il *software* Cura, *SW open-source* sviluppato da *Ultimaker*, e gli step di assemblaggio del sistema.

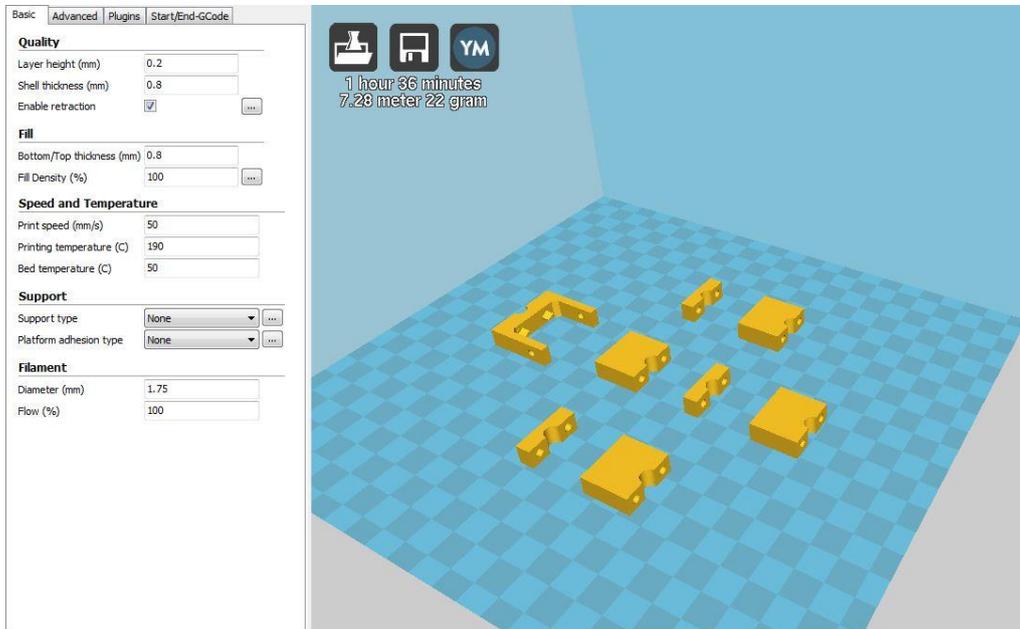


Figura 81 - Preparazione alla stampa di alcuni componenti necessari alla costruzione del prototipo fisico

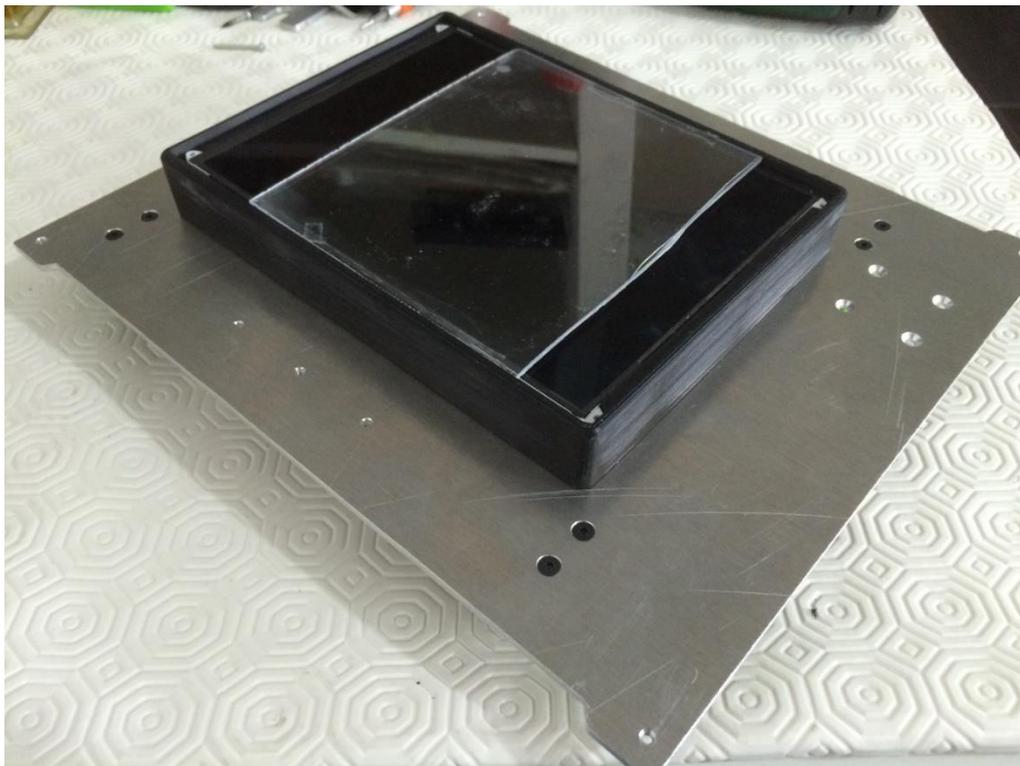
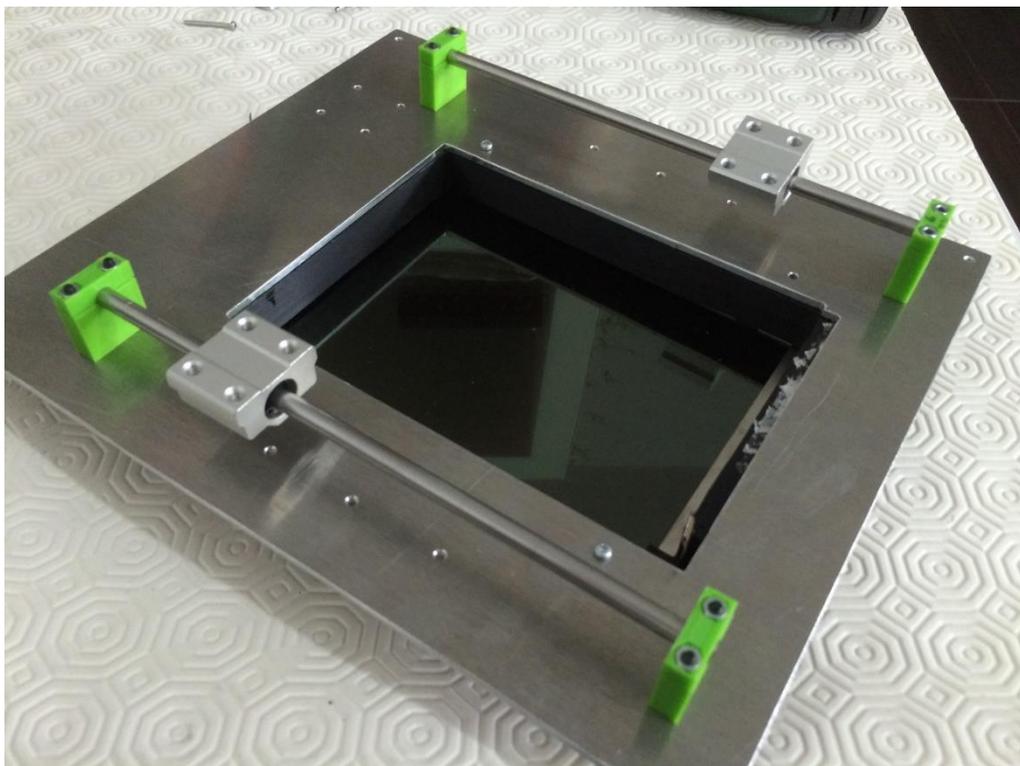
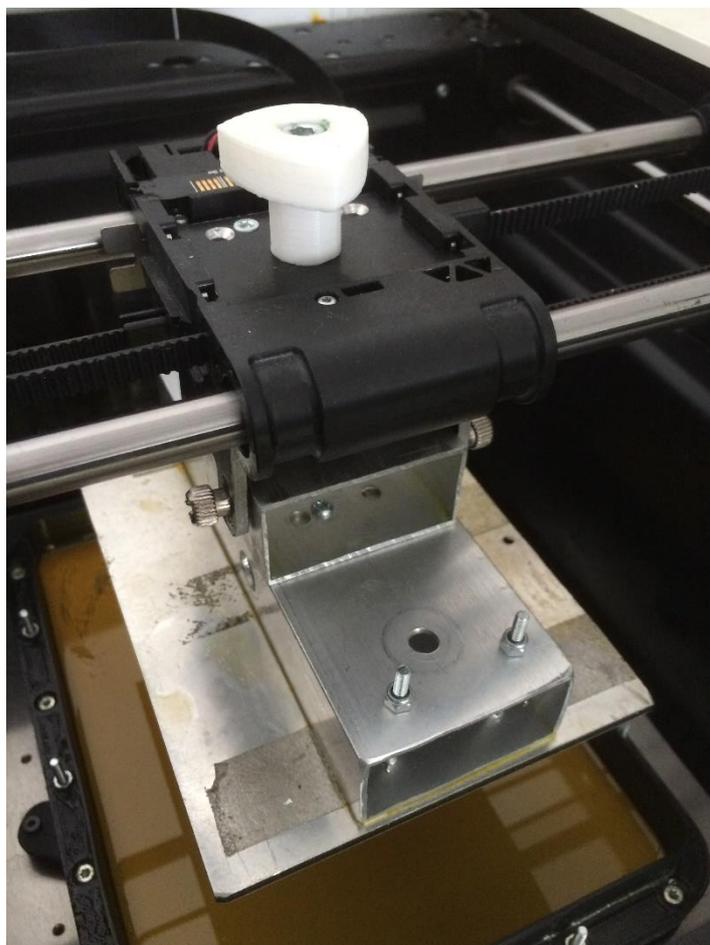


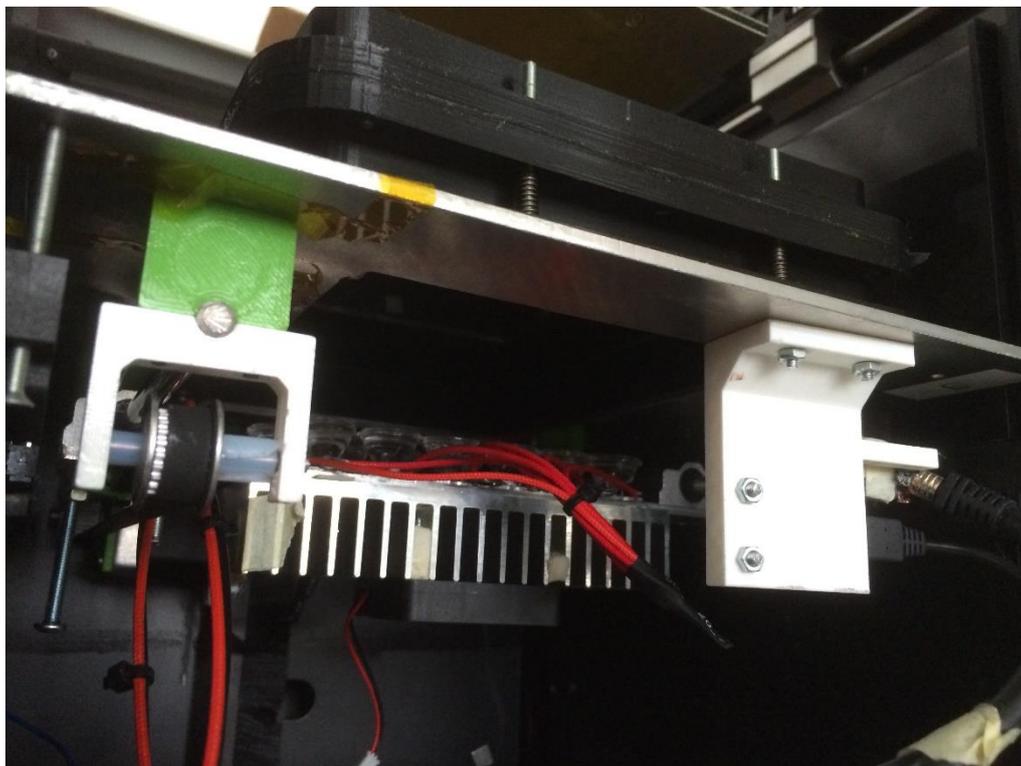
Figura 82 - Vista della faccia superiore del sistema piatto



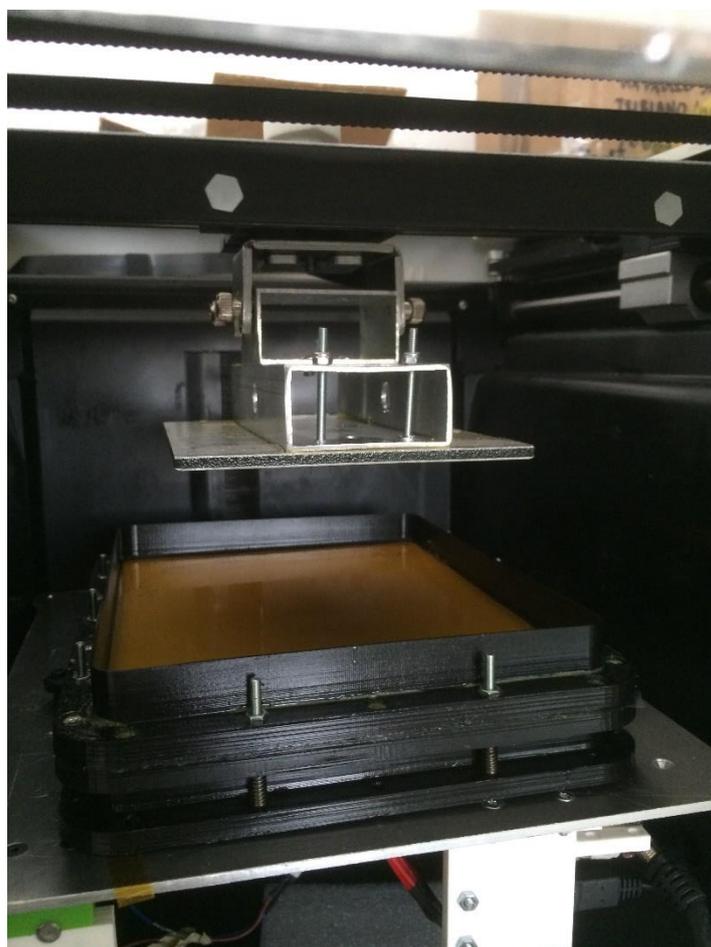
**Figura 83 - Vista della faccia inferiore del sistema piatto**



**Figura 84 - Building plate montato sul personal fabricator FABtotum**



**Figura 85 - Piatto con sistema di movimentazione del fascio luminoso montato sul personal fabricator FABtotum**



**Figura 86 – Vat e building plate montati sul personal fabricator FABtotum**

Per far sì che il prototipo potesse funzionare si è implementato quindi uno *script* Processing al fine di controllare tramite Totumduino (scheda di controllo dedicata di FABtotum basata su Arduino) la traslazione dell'asse z ed eventualmente del carrello x-y, l'accensione e spegnimento dei LED e la traslazione del fascio luminoso grazie alla rotazione del motore passo-passo.

Per l'alimentazione dei LED si è optato per la configurazione prevista nel dimensionamento del dissipatore, ovvero con 11 diodi alimentati in parallelo dall'alimentatore da laboratorio fissati su dei PCB come quelli mostrati in Figura 87.

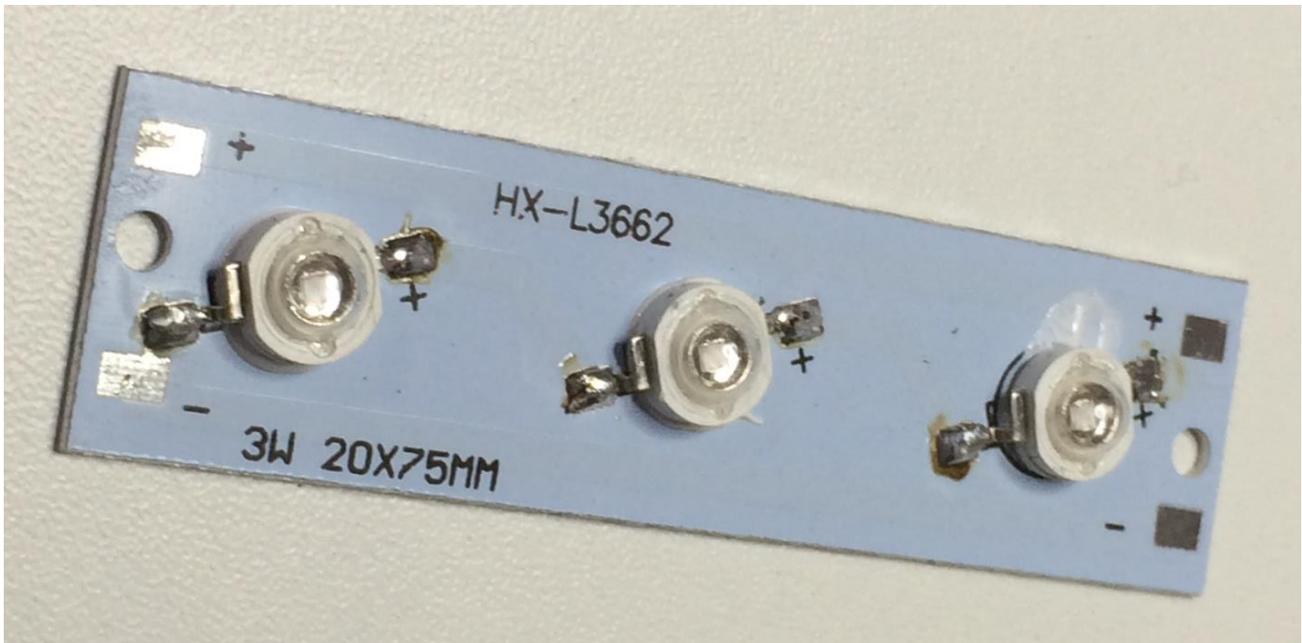


Figura 87 – 3 LED saldati su PCB

A questo punto il sistema è stato aggiunto al *personal fabricator* come mostrato nella figura seguente e si è potuto continuare la sperimentazione delle resine e della sorgente luminosa sfruttando il sistema nella sua totalità.



**Figura 88 - Personal fabricator FABtotum con assemblato il prototipo del modulo PRISM**

## 4. Conclusioni e sviluppi futuri

Il compito assegnatomi all'inizio del mio tirocinio formativo, ovvero la progettazione della parte *hardware* di un sistema MP3L, in particolare la movimentazione della sorgente luminosa, può considerarsi concluso ed ultimato, salvo piccole ed eventuali modifiche e perfezionamenti, entro le tempistiche imposte dall'azienda e rispettando i vincoli costruttivi imposti.

Anche il dimensionamento degli altri sistemi (dissipativo, *vat* e del piano di stampa) può essere ritenuto completo; l'unico difetto riguarda la richiesta di utilizzare componenti già presenti nella DiBa del *personal fabricator*, infatti si è riusciti a portare a termine questa richiesta solo per quel che riguarda la viteria; infatti parti come il motore e i cuscinetti sono stati sostituiti da stessi componenti di dimensione ridotta, ad esempio il motore elettrico NEMA 17 con il NEMA 11 ed i cuscinetti a scorrimento lineare SC10UU con SC6UU; tuttavia la possibilità di ordinarli dallo stesso fornitore garantisce comunque un risparmio rispetto alla sostituzione con soluzioni totalmente diverse.

Per quel che riguarda l'aspetto economico è possibile affermare che si sono rispettati i limiti imposti, tuttavia per motivi di riservatezza non è possibile riportare un elenco di tutti i componenti e dei rispettivi costi al fine di dimostrare questa affermazione, ma si rimanda all'Allegato D in cui il tutor aziendale, Grieco Giovanni, attesta la mia partecipazione al lavoro svolto, la completezza di esso e il raggiungimento degli obiettivi preposti.

Sono tutt'ora in corso sperimentazioni legate al sistema di generazione del fascio luminoso e della sua interazione con LCD e resina al fine di ottimizzare il funzionamento della tecnica di stampa tramite LCD, infatti deve avere inizio una sperimentazione con LED con lunghezza d'onda pari a 380 nm al fine di validare l'effettiva disponibilità di funzionamento del sistema.

Nel caso in cui non si riuscisse a garantire il funzionamento del sistema con questa soluzione, sarebbe opportuno analizzare se il problema è legato alla potenza dei diodi, all'assorbimento della resina oppure ai filtri polarizzatori del display a cristalli liquidi e si potrebbe riversare la propria attenzione su altri tipi di LED o su altre resine, magari in grado di solidificare a lunghezze d'onda più elevate di 400 nm; un'altra possibilità potrebbe essere l'acquisto di LCD senza filtri UV o la rimozione di essi, ma ciò comporterebbe prima di tutto un prezzo di gran lunga più elevato.

Il passo successivo verso il quale l'azienda si muoverà sarà la progettazione dei componenti elettronici, ovvero il PCB dei LED e il PCB del *plate*, su quest'ultimo sarà necessario prevedere dei *pogo pins* con i quali alimentare e controllare lo schermo, il motore NEMA e i diodi (prevedendo anche un *flex*). Inoltre sarà necessario l'apporto del reparto informatico al fine di implementare un codice macchina, probabilmente in linguaggio *Python*, in grado di interfacciarsi con la FABUI (interfaccia utente propria del *personal fabricator*) e per sviluppare dei profili di configurazione per i programmi di *slicing open-source* per poter stampare su un fabbricatore personale FABtotum, probabilmente Slic3R (sviluppato da Alessandro Ranellucci) e/o Creation Workshop (sviluppato da *Envision Labs*).

## Appendice A – Sperimentazione sulle lenti dei diodi LED

In questa sezione si riporta la sperimentazione, in particolare i risultati sotto forma di immagini, relativi alla scelta dell'angolo di apertura della lente e della distanza dallo schermo alla quale far lavorare i LED. Si riportano in funzione della distanza dal piano crescente, da 3 mm fino a 103 mm, le tre soluzioni considerate, ovvero con lente con angolo da  $10^\circ$ , da  $25^\circ$  e senza lente, cioè  $130^\circ$ .

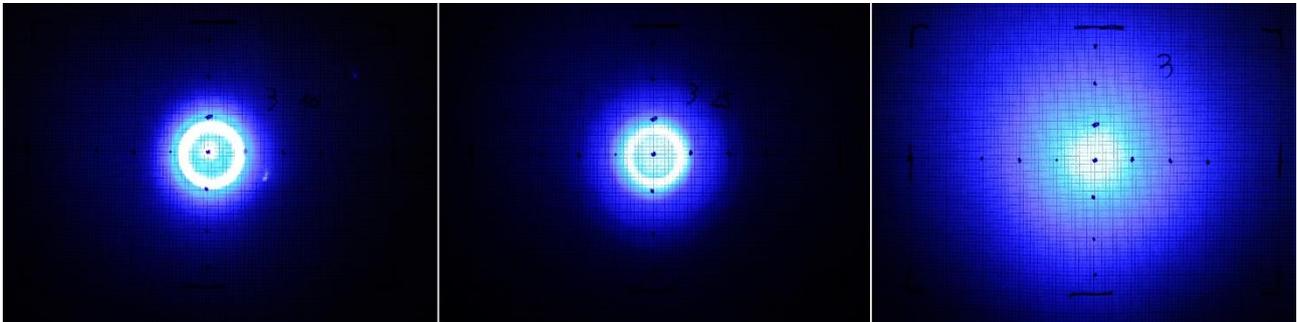


Figura 89 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 3 mm

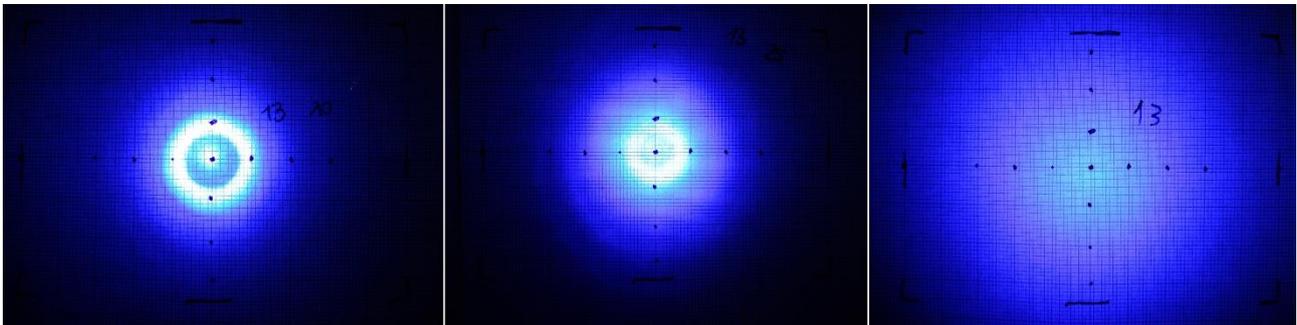


Figura 90 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 13 mm

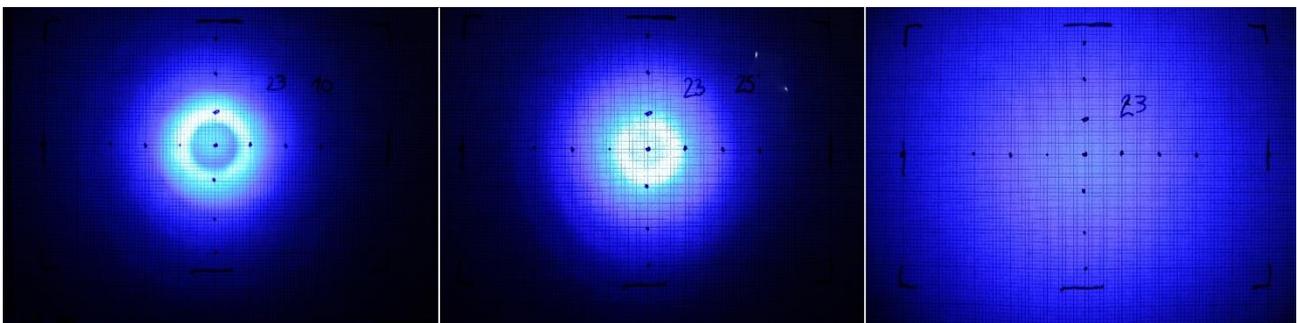


Figura 91 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 23 mm

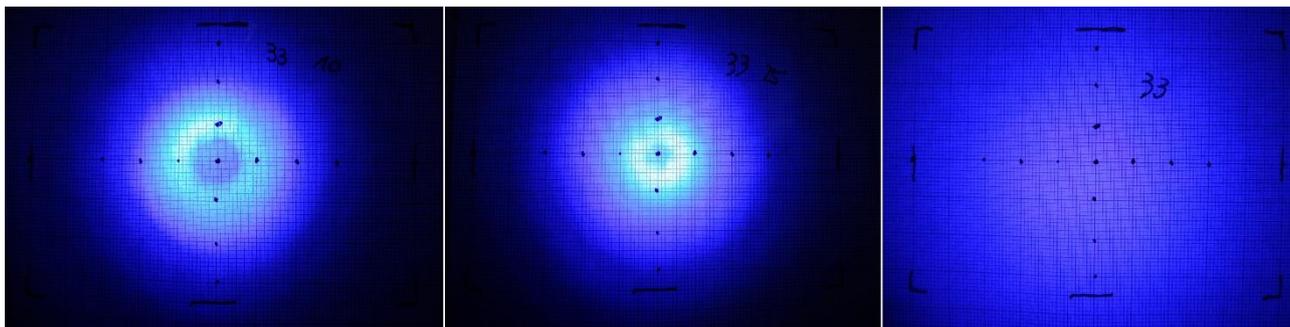


Figura 92 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 33 mm

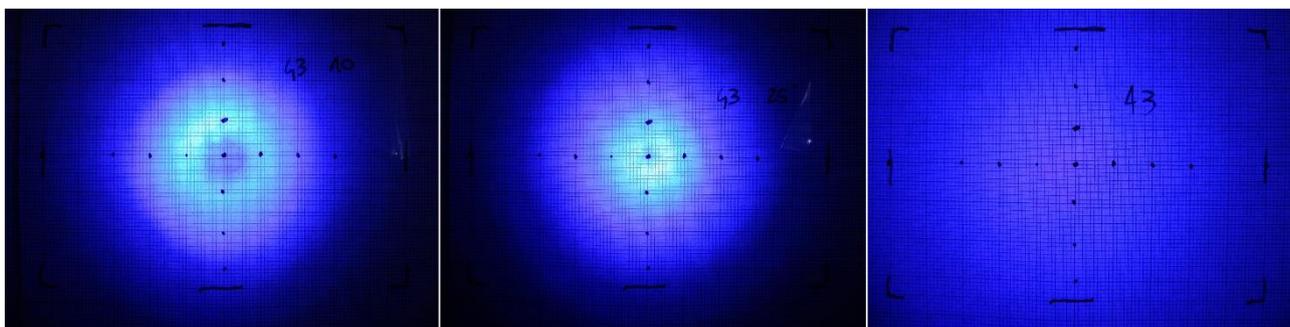


Figura 93 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 43 mm

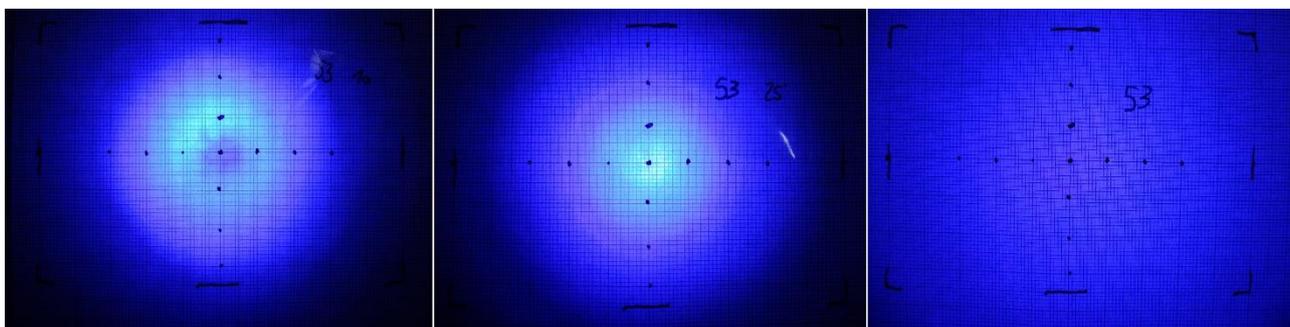


Figura 94 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 53 mm

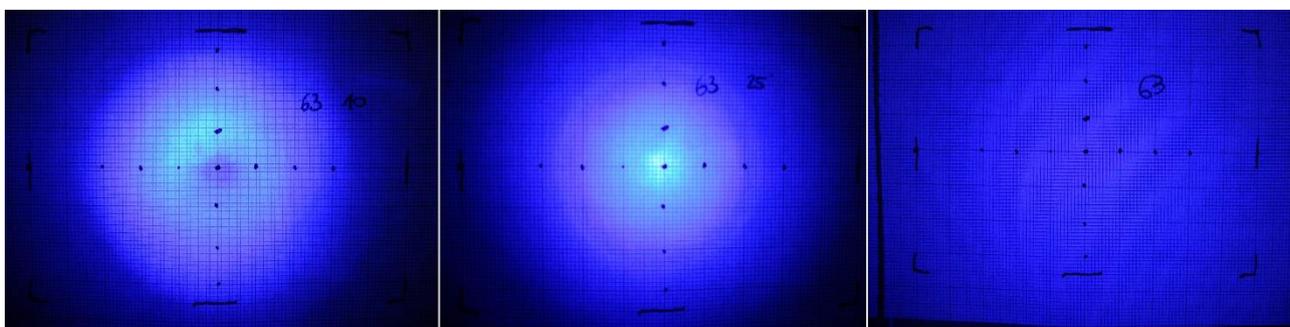


Figura 95 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 63 mm

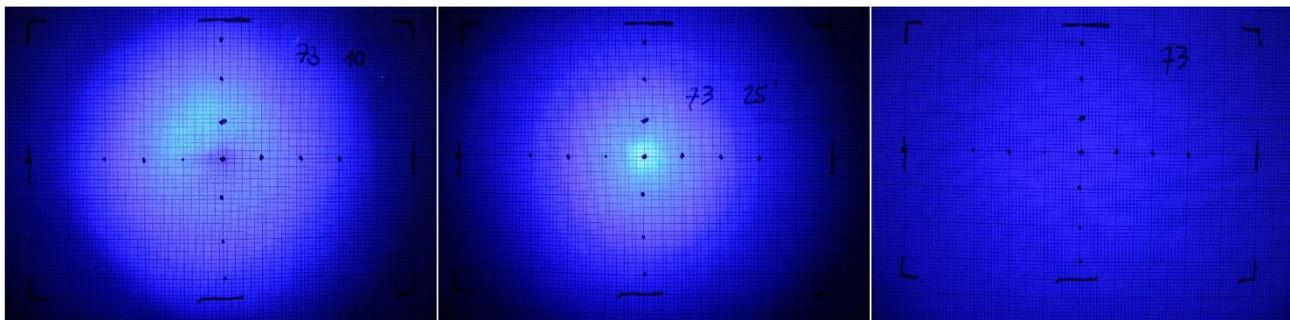


Figura 96 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 73 mm

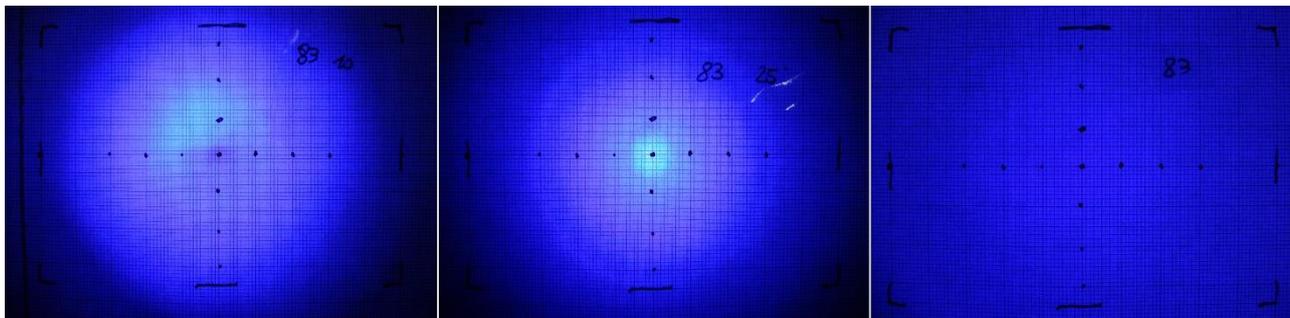


Figura 97 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 83 mm

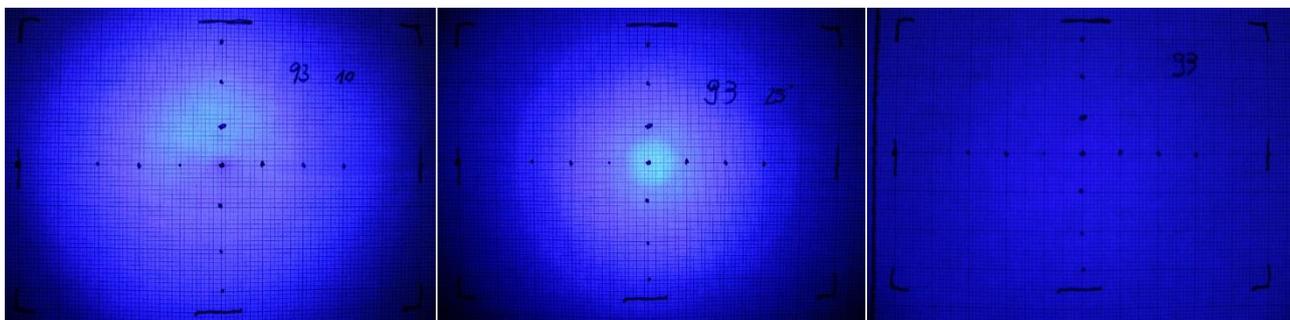


Figura 98 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 93 mm

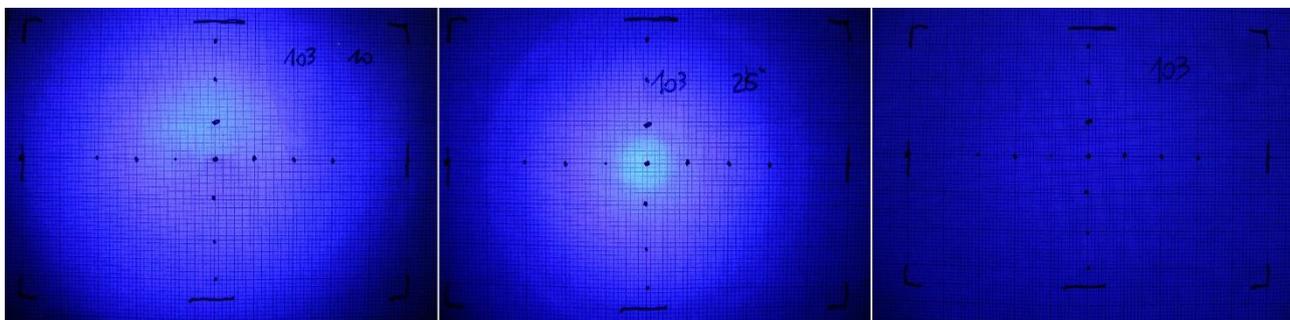


Figura 99 – Confronto tra le lenti a distanza pari a 103 mm

## Appendice B – Dimensionamento di dettaglio del dissipatore termico

In questo paragrafo vengono esposti interamente i calcoli effettuati per il dimensionamento del dissipatore riportati nel Capitolo 3.3. Si riportano le formule utilizzate e in fondo estratti dei fogli di calcolo Excel utilizzati.

Nel primo step si è proceduto calcolando la resistenza termica disponibile per il dimensionamento e si sono svolti i seguenti calcoli:

$$R_{thK} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_u}{P} - (R_{thG} + R_{thM}) = \frac{\Delta\vartheta}{P} - R_{thGM}$$

dove  $R_{thK}$  rappresenta la resistenza termica massima ammissibile del dissipatore,  $\vartheta_i$  è la massima temperatura di sicurezza ricavata dalla differenza tra la temperatura limite dei diodi LED  $\vartheta_j$  (da *datasheet*) e il fattore di sicurezza in termini di temperatura  $\vartheta_{safety}$  (scelto arbitrariamente),  $\vartheta_u$  è la temperatura ambiente,  $P$  è la potenza generata dal LED,  $R_{thG}$  è la resistenza termica del diodo LED (da *datasheet*) e  $R_{thM}$  è la resistenza termica fornita dall'interfaccia tra le superfici di montaggio.

Vista la configurazione di 11 diodi LED in parallelo è stato opportuno ricavare la  $R_{thGM}$  equivalente per questa configurazione, grazie all'analogia elettrica si è ottenuta la seguente equazione:

$$\frac{1}{R_{thGM}} = \frac{1}{R_{thG1} + R_{thM1}} + \frac{1}{R_{thG2} + R_{thM2}} + \dots + \frac{1}{R_{thG11} + R_{thM11}}$$

dalla quale si ricava:

$$\frac{1}{R_{thGM}} = \frac{11}{R_{thG} + R_{thM}} \rightarrow R_{thGM} = \frac{R_{thG} + R_{thM}}{11}$$

come già detto la resistenza del diodo è fornita dal produttore dei LED, mentre la resistenza delle superfici di montaggio dipende dalla tipologia di quest'ultimo ed è stata ricavata dal catalogo dell'azienda tedesca *Fischer Elektronik*, i produttori dei dissipatori, considerando il caso di montaggio semplice a secco (caso A – *dry, without insulator*) e quello tramite pasta termica (caso B – *with thermal compound*).

È stato infine opportuno calcolare la potenza generata dai LED e quindi quella da dissipare, ricavata tenendo conto del numero di LED, della corrente e dalla tensione di alimentazione indicata dal produttore dei diodi con la seguente equazione:

$$P = n_{LED} \cdot i \cdot V$$

I valori numerici ricavati dai calcoli sono stati ottenuti tenendo conto della potenza massima da dissipare e di quella registrata dalle sperimentazioni riportate nel Capitolo 3.1.2 rispetto al caso più critico ( $R_{thM\_max}$ ).

Nel secondo step si procede al dimensionamento vero e proprio del dissipatore. Si è optato per un raffreddamento in convezione forzata tramite due ventole assiali estrapolando dal diagramma di Figura 61 dei valori di riferimento, che sono stati poi interpolati tramite curva polinomiale di terzo grado. È stata poi calcolata la velocità media dell'aria mossa dalle due ventole grazie alla formula:

$$v_{m,air} = \frac{Q_{fan}}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

Si è poi sostituito questo valore nell'equazione della curva di Figura 62 ottenendo il fattore di proporzionalità  $a$ , che verrà utilizzato per il calcolo della resistenza termica effettiva del dissipatore sottoposto a ventilazione forzata:

$$R_{thK\_forcedconvection\_diss} = a \cdot R_{thK\_diss}$$

Per ricavare la resistenza termica effettiva del dissipatore non sottoposto a ventilazione forzata è stato necessario ottenere un'equazione che esprimesse la resistenza in funzione della lunghezza di estrusione del dissipatore; come prima si sono estrapolati dei valori da un diagramma fornito dalla *Fischer Elektronik* (Figura 63) e si sono interpolati, ma questa volta l'interpolazione è stata fatta per mezzo di un'iperbole equilatera traslata, in quanto più affidabile per i valori di nostro interesse (esterni al *range* riportato in figura), tuttavia non presente tra le opzioni di Excel; è stato quindi necessario ricavare l'inverso della lunghezza di estrusione ed interpolarlo per mezzo di una retta  $y = mx + q$ . A questo punto nota l'equazione caratteristica dell'iperbole equilatera traslata:

$$y = \frac{ax + b}{cx + d}$$

si è potuto risalire all'equazione da noi cercata considerando:

$$R_{thK\_diss} = m \cdot \frac{1}{L} + q \rightarrow R_{thK\_diss} = \frac{qL + m}{L}$$

ovvero per analogia  $a = q, b = m, c = 1$  e  $d = 0$ .

Così facendo è stato possibile, sostituendo i valori di interesse di  $L$ , calcolare la resistenza termica propria del dissipatore e di conseguenza al valore di resistenza termica legato alla convezione forzata. Si è quindi calcolato il coefficiente di sicurezza come rapporto tra la resistenza termica massima ammissibile ottenuta nel primo step e quella appena calcolato:

$$\eta = \frac{R_{thK\_max}}{R_{thK\_forcedconvection\_diss}}$$

Si riportano di seguito i fogli di calcolo Excel utilizzati per svolgere questa analisi qualitativa.

$\vartheta_j$ [°C]	$\vartheta_{safety}$ [°C]	$\vartheta_i$ [°C]	$\vartheta_u$ [°C]	$\Delta\vartheta$ [K]	$\vartheta_g$ [°C]	$i$ [A]	$V_{min}$ [V]	$V_{typ}$ [V]	$V_{MAX}$ [V]
120	20	100	40	60		0.7	3.2	3.7	4.3
			Summer						
Rth_G [K/W]							P_min [W]	P_typ [W]	P_MAX [W]
8							2.24	2.59	3.01
		<b>CASE A: dry, without insulator</b>					<b>CASE B: with thermal compound</b>		
		min	medium	Max			min	medium	Max
Rth_M [K/W]		0.05	0.125	0.2			0.005	0.0525	0.1
	<b>N_led //</b>								
Rth_GM [K/W]	1	8.05	8.125	8.2			8.005	8.0525	8.1
	11	0.731818	0.738636	0.745455			0.7277273	0.73204545	0.736363636
Rth_K [K/W]	1	11.88355	11.80855	11.73355			11.928555	11.8810548	11.83355482
	11	1.080323	1.073505	1.066687			1.0844141	1.08009589	1.075777711
		<b>i_eff [A]</b>	<b>V_eff [V]</b>	<b>P_eff [W]</b>		<b>Rth_K_MAX [K/W]</b>	<b>Case A</b>	<b>Case B</b>	
		4.9	5.2	25.48			1.6093335	1.61842443	

Figura 100 - Foglio di Excel per il calcolo della resistenza termica massima ammissibile

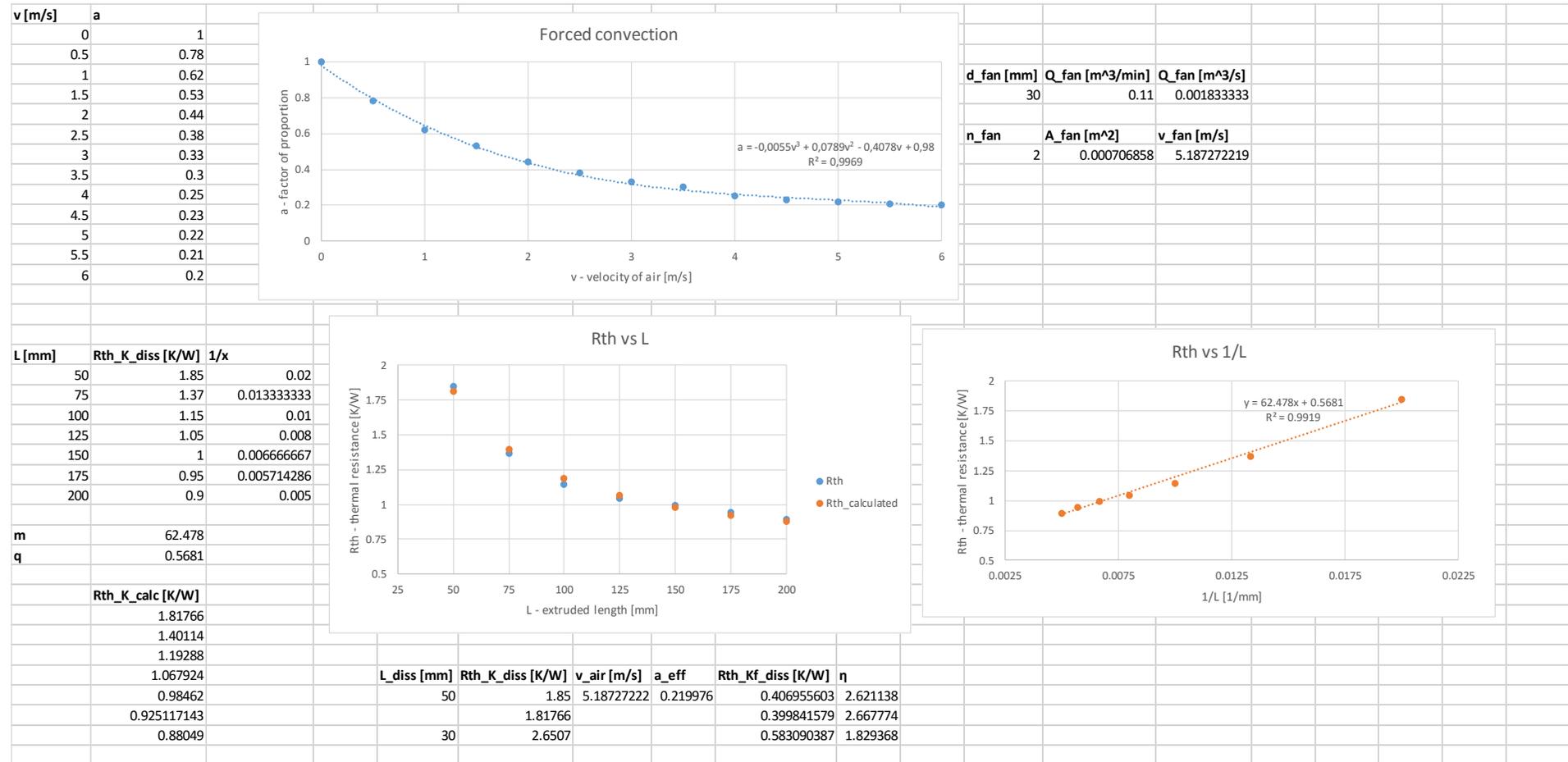
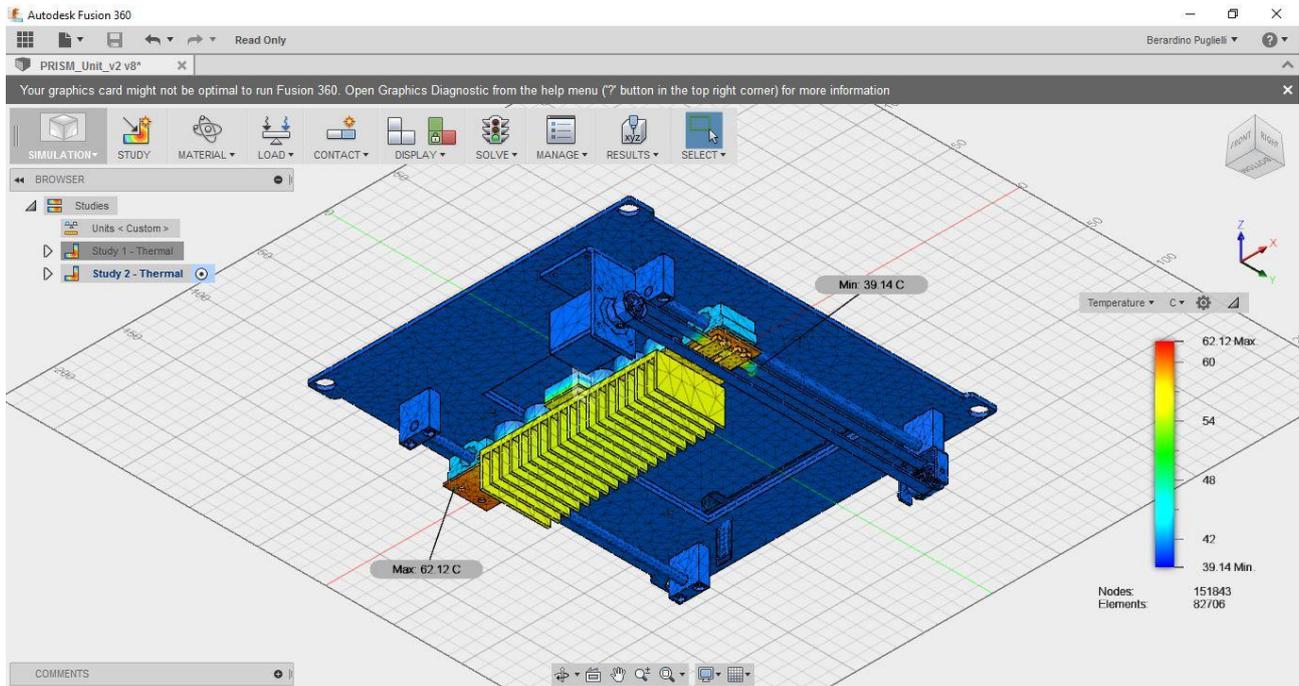


Figura 101 - Foglio di calcolo Excel per il dimensionamento del dissipatore

## Appendice C – Simulazione termica del sistema

### Thermal study report



Analyzed File	PRISM_Unit_v2 v8
Version	Autodesk Fusion 360 (2.0.1957)
Creation Date	2016-04-08, 10:34:37
Author	Berardino Puglielli
Summary	Thermal analysis of the PRISM module. Heat generated by LED diode array. Initial temperature set at 40°C. Convective heat transfer coefficient derived from an empirical equation for a similar case found on engineeringtoolbox.com. Internal heat applied on PCB set at 33 W (11 LEDs with 3W max each).

### Project Properties

Title Studies

### PRISM\_Unit\_v2 v8:1

### Study 2 - Thermal

#### Study Properties

Study Type	Thermal
Last Modification Date	2016-04-08, 10:12:03

#### Settings

## General

Contact Tolerance	0.1 mm
-------------------	--------

## Mesh

Average Element Size (% of model size)	
Solids	10
Minimum Element Size (% of average size)	20
Maximum Turn Angle	60
Grading Factor	1.5
Create Curved Mesh Elements	No
Use Part Based Measure for Assembly Mesh	No

## Adaptive Mesh Refinement

Maximum Number of Mesh Refinements	0
Minimum Refinement Step Difference (%)	10
Portion of Elements to Refine (%)	25
Results for Baseline Accuracy	Heat Flux

## Materials

Component	Material	Safety Factor
Display_PRISM:1/Piatto2.3:1	Aluminum 6061	Yield Strength
Display_PRISM:1/LCD_Holder:1	ABS Plastic	Yield Strength
Display_PRISM:1/Retina_display_7:1/Body1	Generic	Yield Strength
Display_PRISM:1/Retina_display_7:1/Body2	Generic	Yield Strength
Display_PRISM:1/Vetro:1	Glass	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Support_d6:1	ABS Plastic	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Support_d6:2	ABS Plastic	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Support_d6:3	ABS Plastic	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Support_d6:4	ABS Plastic	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Barra_d6:1	Stainless Steel, 440C	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Barra_d6:2	Stainless Steel, 440C	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/NEMA_Mounting_Bracket_2:1	Aluminum 6061	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/NEMA11:1	Generic	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/T5 Pulley:1	Generic	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/T5 Pulley:2	Generic	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Cinghia_02:1	Rubber, Silicone	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Spina_3mm_h8x32:1	Generic	Yield Strength
Motion_System_PRISM_v2:1/Supporto_Pulley_2:1	Steel, Carbon	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/SC6UU:1	Aluminum 6061-AHC	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/SC6UU:2	Aluminum 6061-AHC	Yield Strength

Sliding_System_PRISM:1/Tensionatore_Cinghia:1	Generic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Tensionatore_Cinghia:2	Generic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/PCB_v2:1	Aluminum 6061	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/LED_PCB_v6:1	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:1	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:1	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:2	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:2	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:3	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:3	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:4	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:4	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:5	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:5	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:6	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:6	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:7	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:7	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:8	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:8	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:9	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:9	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:10	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:10	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens:11	Glass	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/PCB_LED_v2:1/Lens_Holder_LED:11	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Dissipatore_sk463_v2:1	Aluminum 6061	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Isolante_M4:1	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Isolante_M4:2	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Isolante_M4:3	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Isolante_M4:4	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Isolante_M4:5	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Isolante_M4:6	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Isolante_M4:7	ABS Plastic	Yield Strength
Sliding_System_PRISM:1/Isolante_M4:8	ABS Plastic	Yield Strength

## Glass

Density	2.18E-06 kg / mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	68000 MPa
Poisson's Ratio	0.19
Yield Strength	33 MPa

Ultimate Tensile Strength	33 MPa
Thermal Conductivity	0.00138 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	7.5E-06 / C
Specific Heat	750 J / (kg C)

### Aluminum 6061

Density	2.7E-06 kg / mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	68900 MPa
Poisson's Ratio	0.33
Yield Strength	275 MPa
Ultimate Tensile Strength	310 MPa
Thermal Conductivity	0.167 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	2.36E-05 / C
Specific Heat	897 J / (kg C)

### Aluminum 6061-AHC

Density	2.7E-06 kg / mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	68900 MPa
Poisson's Ratio	0.33
Yield Strength	275 MPa
Ultimate Tensile Strength	310 MPa
Thermal Conductivity	0.167 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	2.36E-05 / C
Specific Heat	897 J / (kg C)

### Steel, Carbon

Density	7.85E-06 kg / mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	200000 MPa
Poisson's Ratio	0.29
Yield Strength	350 MPa
Ultimate Tensile Strength	420 MPa
Thermal Conductivity	0.0476 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	1.2E-05 / C
Specific Heat	480 J / (kg C)

### Stainless Steel, 440C

Density	7.75E-06 kg / mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	206700 MPa
Poisson's Ratio	0.27
Yield Strength	689 MPa

Ultimate Tensile Strength	861.3 MPa
Thermal Conductivity	0.02423 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	1.04E-05 / C
Specific Heat	460 J / (kg C)

### ABS Plastic

Density	1.06E-06 kg / mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	2240 MPa
Poisson's Ratio	0.38
Yield Strength	20 MPa
Ultimate Tensile Strength	29.6 MPa
Thermal Conductivity	1.6E-04 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	8.57E-05 / C
Specific Heat	1500 J / (kg C)

### Rubber, Silicone

Density	1.25E-06 kg / mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	3 MPa
Poisson's Ratio	0.49
Yield Strength	10.34 MPa
Ultimate Tensile Strength	6.5 MPa
Thermal Conductivity	2.275E-04 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	8.1E-06 / C
Specific Heat	1880 J / (kg C)

### Generic

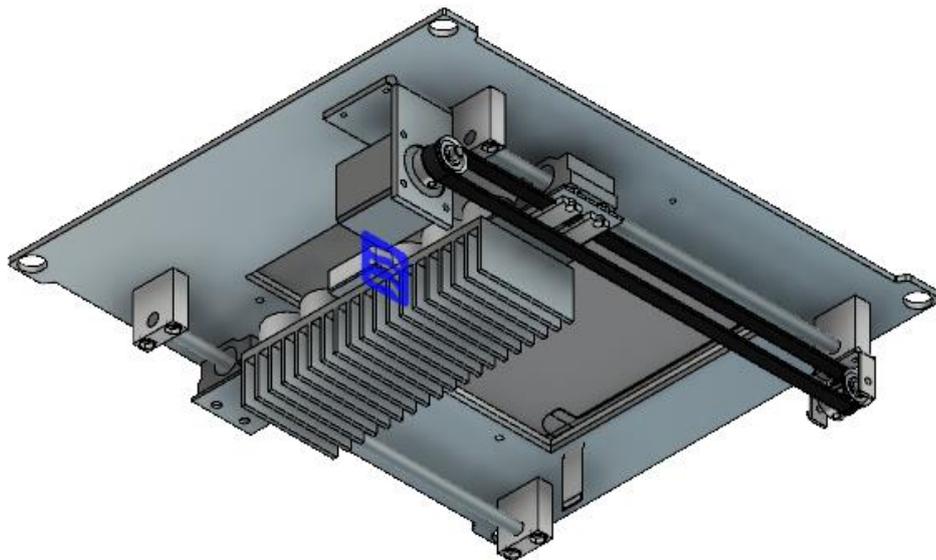
Density	1E-06 kg / mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	1E-04 MPa
Poisson's Ratio	0
Yield Strength	0 MPa
Ultimate Tensile Strength	0 MPa
Thermal Conductivity	1E-06 W / (mm C)
Thermal Expansion Coefficient	1E-07 / C
Specific Heat	100 J / (kg C)

### Loads

#### Internal Heat1

Type	ternal Heat
Internal Heat Value	33 W

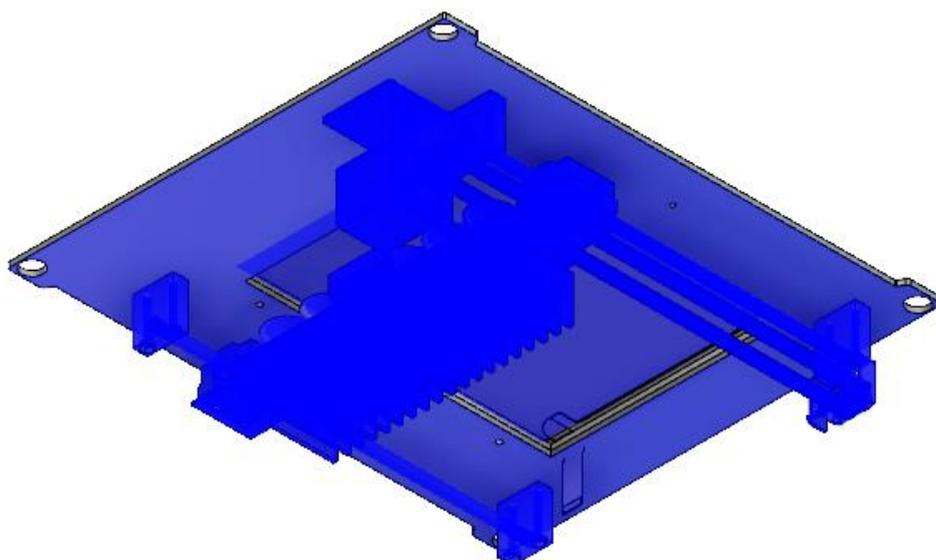
### Selected Entities



### Convection1

Type	Convection
Convection Value	28.03 W / (m <sup>2</sup> K)
Ambient Temperature	40 C

### Selected Entities



## Contacts

### Bonded

Name
Bonded1 [Lens_Holder_LED:6  Lens:6]
Bonded2 [Lens_Holder_LED:5  Lens:5]
Bonded3 [Lens_Holder_LED:4  Lens:4]
Bonded4 [Lens_Holder_LED:3  Lens:3]
Bonded5 [Lens_Holder_LED:2  Lens:2]
Bonded6 [Lens_Holder_LED:1  Lens:1]
Bonded7 [PCB_v2:1  Dissipatore_sk463_v2:1]
Bonded8 [PCB_v2:1  Isolante_M4:8]
Bonded9 [PCB_v2:1  Isolante_M4:7]
Bonded10 [PCB_v2:1  Isolante_M4:6]
Bonded11 [PCB_v2:1  Isolante_M4:5]
Bonded12 [PCB_v2:1  Isolante_M4:4]
Bonded13 [PCB_v2:1  Isolante_M4:3]
Bonded14 [PCB_v2:1  Isolante_M4:2]
Bonded15 [PCB_v2:1  Isolante_M4:1]
Bonded16 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:11]
Bonded17 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:10]
Bonded18 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:9]
Bonded19 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:8]

Bonded20 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:7]
Bonded21 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:6]
Bonded22 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:5]
Bonded23 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:4]
Bonded24 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:3]
Bonded25 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:2]
Bonded26 [PCB_v2:1  Lens_Holder_LED:1]
Bonded27 [PCB_v2:1  LED PCB v6:1]
Bonded28 [Tensionatore_Cinghia:2  PCB_v2:1]
Bonded29 [Tensionatore_Cinghia:2  PCB_v2:1]
Bonded30 [Tensionatore_Cinghia:1  PCB_v2:1]
Bonded31 [Tensionatore_Cinghia:1  PCB_v2:1]
Bonded32 [SC6UU:2  Isolante_M4:6]
Bonded33 [SC6UU:2  Isolante_M4:5]
Bonded34 [SC6UU:2  Isolante_M4:8]
Bonded35 [SC6UU:2  Isolante_M4:7]
Bonded36 [SC6UU:1  Isolante_M4:4]
Bonded37 [SC6UU:1  Isolante_M4:3]
Bonded38 [SC6UU:1  Isolante_M4:2]
Bonded39 [SC6UU:1  Isolante_M4:1]
Bonded40 [Spina_3mm_h8x32:1  Supporto_Pulley_2:1]
Bonded41 [Spina_3mm_h8x32:1  Supporto_Pulley_2:1]
Bonded42 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:2]
Bonded43 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:1]
Bonded44 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:2]
Bonded45 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:1]
Bonded46 [Cinghia_02:1  PCB_v2:1]
Bonded47 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:2]
Bonded48 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:2]
Bonded49 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:2]
Bonded50 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:2]
Bonded51 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:2]
Bonded52 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:1]
Bonded53 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:1]
Bonded54 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:1]
Bonded55 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:1]
Bonded56 [Cinghia_02:1  Tensionatore_Cinghia:1]
Bonded57 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded58 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded59 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded60 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded61 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]

Bonded62 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded63 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded64 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded65 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded66 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded67 [T5 Pulley:2  Cinghia_02:1]
Bonded68 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded69 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded70 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded71 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded72 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded73 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded74 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded75 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded76 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded77 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded78 [T5 Pulley:1  Cinghia_02:1]
Bonded79 [NEMA11:1  T5 Pulley:1]
Bonded80 [NEMA_Mounting_Bracket_2:1  NEMA11:1]
Bonded81 [NEMA_Mounting_Bracket_2:1  NEMA11:1]
Bonded82 [Support_d6:4  Barra_d6:2]
Bonded83 [Support_d6:3  Barra_d6:1]
Bonded84 [Support_d6:2  Barra_d6:2]
Bonded85 [Support_d6:1  Supporto_Pulley_2:1]
Bonded86 [Support_d6:1  Barra_d6:1]
Bonded87 [Retina_display_7:1(Body1)  Retina_display_7:1(Body2)]
Bonded88 [Retina_display_7:1(Body1)  Retina_display_7:1(Body2)]
Bonded89 [Retina_display_7:1(Body1)  Retina_display_7:1(Body2)]
Bonded90 [Retina_display_7:1(Body1)  Retina_display_7:1(Body2)]
Bonded91 [LCD_Holder:1  Vetro:1]
Bonded92 [LCD_Holder:1  Vetro:1]
Bonded93 [LCD_Holder:1  Vetro:1]
Bonded94 [LCD_Holder:1  Vetro:1]
Bonded95 [LCD_Holder:1  Vetro:1]
Bonded96 [LCD_Holder:1  Vetro:1]
Bonded97 [LCD_Holder:1  Vetro:1]
Bonded98 [LCD_Holder:1  Vetro:1]
Bonded99 [LCD_Holder:1  Retina_display_7:1(Body1)]
Bonded100 [Piatto2.3:1  LCD_Holder:1]
Bonded101 [Piatto2.3:1  NEMA_Mounting_Bracket_2:1]
Bonded102 [Piatto2.3:1  Support_d6:4]
Bonded103 [Piatto2.3:1  Support_d6:3]

Bonded104 [Piatto2.3:1 Support_d6:2]
Bonded105 [Piatto2.3:1 Support_d6:1]

### Mesh

Type	Nodes	Elements
Solids	151843	82706

### Results

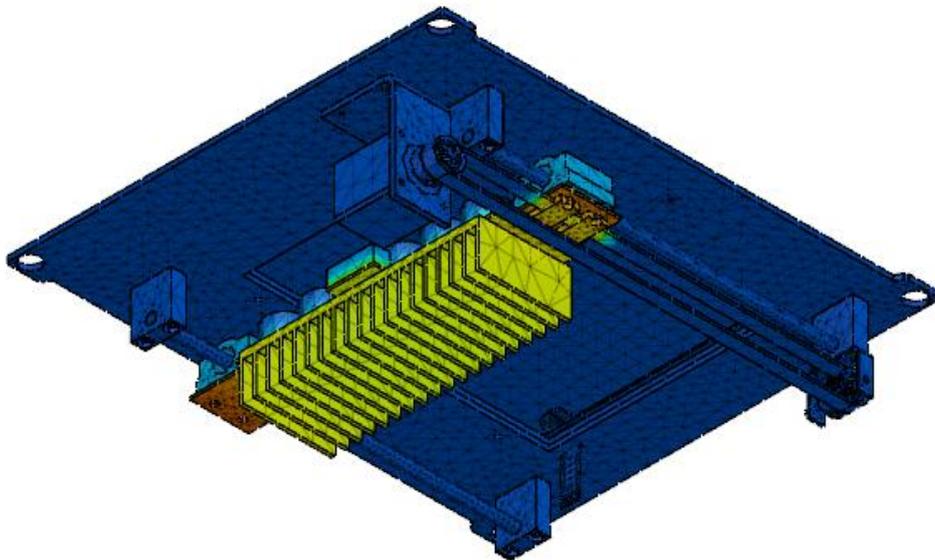
#### Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Temperature		
Temperature	39.14 C	62.12 C
Heat Flux		
Total	1.688E-11 W / mm <sup>2</sup>	0.08405 W / mm <sup>2</sup>
X	-0.07141 W / mm <sup>2</sup>	0.08393 W / mm <sup>2</sup>
Y	-0.03853 W / mm <sup>2</sup>	0.03658 W / mm <sup>2</sup>
Z	-0.03778 W / mm <sup>2</sup>	0.01078 W / mm <sup>2</sup>

### Temperature

#### Temperature

[C] 39.14  62.12



## Appendice D – Commento dell’azienda sui risultati del tirocinio



### RELAZIONE DI TIROCINIO FABTOTUM - BERARDINO PUGLIELLI

Di seguito il rapporto circa il tirocinio di Berardino Puglielli, studente di Ingegneria meccanica presso il Politecnico di Milano, svoltosi presso la società FABtotum di Tribiano (MI), ormai in fase di conclusione.

A partire dal 6 novembre 2015 e fino al 15 aprile 2016, il Sig. Puglielli ha iniziato a lavorare in FABtotum in qualità di tirocinante testista magistrale. Da subito è stato coinvolto nel progetto "PRISM" (componente opzionale per aggiungere alla FABtotum la funzionalità di stampa 3D a resina), avviato nei mesi precedenti dalla società FABtotum.

Le sue principali mansioni sono state quelle di assistenza nella progettazione della parte meccanica del suddetto modulo. Il sig. Puglielli si è occupato principalmente della modellazione 3D dei vari elementi che compongono il prodotto e del loro assieme; ha aiutato anche nell'ideazione, sviluppo, realizzazione e test del prototipo, oltre ad aver portato a termine altri compiti secondari assegnatigli giorno per giorno.

Ha portato avanti il suo lavoro con serietà e costanza, il suo interesse nel progetto si è dimostrato non solo in ufficio, ma anche con telefonate e scambi di e-mail anche in momenti esterni all'orario lavorativo; meritevole anche la sua presenza nei giorni successivi a una frattura della spalla.

Il suo apporto nel progetto è stato fondamentale e molto apprezzato dal team.

A conclusione ritengo che la società può ritenersi soddisfatta del lavoro svolto e in caso di necessità terrà in considerazione una futura assunzione.

Cordialmente

Giovanni Grieco

FABTOTUM S.R.L.  
www.fabtotum.com  
e-mail info@fabtotum.com

Via Paolo 3/A  
20067 Tribiano  
Milan - Italy

P. IVA/C.F. 08448100962  
Company Stock 11.638 Euro  
R.E.A. MI - 2027054

Figura 102 - Relazione di tirocinio redatta da FABtotum

## Bibliografia e sitografia

Camagni V., “FabTotum: la stampante 3D a portata di tutti”, <http://www.pcprofessionale.it/news/periferiche/fabtatum-la-stampa-3d-a-portata-di-tutti/>, 10 dicembre 2013

Catania G, “Le stampanti 3D? Una rivoluzione industriale soft”, <http://www.linkiesta.it/it/article/2013/01/02/le-stampanti-3d-una-rivoluzione-industriale-soft/13624/>, 2 gennaio 2013

Colombo D., “Fabtatum, il tris italiano che piace nel mondo”, <http://www.3dprintingcreative.it/fabtatum-il-tris-italiano-che-piace-nel-mondo/>, 19 gennaio 2015

Cotugno F., “FABtotum, la stampante 3D italiana, low cost e tuttofare ("fotocopie" comprese)”, [http://www.economyup.it/startup/1603\\_fabtatum-la-stampante-3d-italiana-low-cost-e-tuttofare-fotocopie-comprese.htm](http://www.economyup.it/startup/1603_fabtatum-la-stampante-3d-italiana-low-cost-e-tuttofare-fotocopie-comprese.htm), 30 settembre 2014

Della Mura M. T., “Dalla stampa 3D new business per il retail. Personalizzazione dei prodotti, riduzione dei costi e nuovi servizi per i clienti”, *3D Printing Creative. The makers magazine*, Guide pratiche di 3D Printing Creative

FABtotum, <http://www.fabtatum.com/>

FABtotum – Wiki, <http://wiki.fabtatum.com/doku.php>

Fun To Do, <http://www.funtodo.net/index.html>

Gibson I., Rosen D. W., Strucker B., “Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing”, New York, Springer US, 2010

Grunewald S. J., “The FABtotum PRISM Brings Stereolithography to their All in One Personal Fabrication Station”, <http://3dprint.com/91202/fabtatum-prism-sla-3d/>, 24 agosto 2015

Gulizia S., “Fabtatum: la prima stampante 3D che stampa, scolpisce e fa pure da scanner”, <http://www.wired.it/economia/start-up/2013/12/09/fabtatum-la-prima-stampante-3d-che-lavora-additivo-sottrattivo-e-fa-pure-da-scanner/>, 9 dicembre 2013

Haydon Kerk Motion Solution, “Introduction to linear actuators”, <http://www.pddnet.com/article/2009/05/introduction-linear-actuators>, 15 maggio 2009

Indiegogo, Campagna FABtotum personal fabricator, <https://www.indiegogo.com/projects/fabtatum-personal-fabricator#/>

Indiegogo, Campagna FABtotum PRISM, <https://www.indiegogo.com/projects/fabtatum-prism#/>

Kaziunas France A., “Stampa 3D. Concetti di base, tutorial e progetti”, Milano, Tecniche Nuove, 2014  
Magni P., “Panoramica sulle tecnologie di RAPID PROTOTYPING”, Parma, 1998

LCD based 3D printers, <http://www.lcd3dprinter.com/>

MadeSolid (blog), “3 Things Wrong With Your Vat”, <http://shop.madesolid.com/blogs/madesolid/16994740-3-things-wrong-with-your-vat>, 19 marzo 2014

RepRap – Wiki, [http://reprap.org/wiki/Main\\_Page](http://reprap.org/wiki/Main_Page)

Sala G., Lezione di “Prototipazione rapida: tecniche e applicazioni” - <http://services.aero.polimi.it/~sala/bacheca/PROTOTIPAZIONE.pdf>

Sher D., “A Visit to the FABtotum Factory Confirms That These Guys Are Delivering”, <http://3dprintingindustry.com/2015/01/02/fabtatum-3d-printer-factory/>, 2 gennaio 2014

Sher D., “All-In-One FABtotum Fabricator Becomes Even More All-In-One with SLA 3D Printing”, <http://3dprintingindustry.com/2015/08/24/fabtatum-further-lives-up-to-its-name-with-sla-expansion-kit/>, 24 agosto 2015

Soppelsa M., “Come la stampa 3D cambierà il nostro lavoro. Nascono nuove professioni, nuove aziende, nuovi servizi e cambia il modo di progettare e produrre”, *3D Printing Creative. The makers magazine*, Guide pratiche di 3D Printing Creative

Soppelsa M., “Glossario della stampa 3D professionale. I termini, i prodotti, le voci e gli acronimi per orientarsi nel 3D Printing”, *3D Printing Creative. The makers magazine*, Guide pratiche di 3D Printing Creative

Soppelsa M., “Come la stampa 3D cambia l’industria elettrotecnica. Un nuovo modo per produrre, per sviluppare nuove soluzioni per gestire la personalizzazione”, *3D Printing Creative. The makers magazine*, Guide pratiche di 3D Printing Creative

Soppelsa M., “La stampa 3D e l’industria degli stampi. La stampa additiva entra nel settore degli stampisti: le tecnologie e le applicazioni”, *3D Printing Creative. The makers magazine*, Guide pratiche di 3D Printing Creative

Soppelsa M., “Come la stampa 3D cambia il mondo del design. Un nuovo modo di progettare, produrre e personalizzare i prodotti”, *3D Printing Creative. The makers magazine*, Guide pratiche di 3D Printing Creative

Soppelsa M., “Come la stampa 3D cambia il mondo dell’edilizia. Idee e suggerimenti per crescere professionalmente con il 3D Printing”, *3D Printing Creative. The makers magazine*, Guide pratiche di 3D Printing Creative

Soppelsa M., “Come la stampa 3D cambia il mondo calzaturiero. Nuovo design e nuovi materiali cambiano moda e produzione”, *3D Printing Creative. The makers magazine*, Guide pratiche di 3D Printing Creative

Spot-A Materials, <http://spotamaterials.com/>

The Engineering Toolbox, “Convective heat transfer”, [http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d\\_430.html](http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html)

Werner Stefano Villa, “Stampa 3D professionale. Design, prototipazione e produzione industriale”, Milano, Tecniche Nuove, 2014