POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica

Tesi di Laurea Magistrale

Laser medicali per ablazione di tumori

Realizzazione di un dispositivo per ablazione termica laser

Relatore
prof. Ing. Alberto Vallan

Correlatore:
prof. Ing. Guido Perrone

Laureando
Giuseppe Poma

Anno Accademico 2019/2020

A chi c'era, a chi c'è sempre stato e sempre ci sarà

I numeri primi sono divisibili soltanto per 1 e per se stessi. Se ne stanno al loro posto nell'infinita serie dei numeri naturali, schiacciati come tutti fra due, ma un passo in là rispetto agli altri. Sono numeri sospettosi e solitari e per questo Mattia li trovava meravigliosi. Certe volte pensava che in quella sequenza ci fossero finiti per sbaglio, che vi fossero rimasti intrappolati come perline infilate in una collana. Altre volte, invece, sospettava che anche a loro sarebbe piaciuto essere come tutti, solo dei numeri qualunque, ma che per qualche motivo non ne fossero capaci.

In un corso del primo anno Mattia aveva studiato che tra i numeri primi ce ne sono altri ancora più speciali. I matematici li chiamano *primi gemelli*: sono coppie di numeri primi che se ne stanno vicini, anzi quasi vicini, perché fra di loro vi è sempre un numero pari che gli impedisce di toccarsi per davvero. Numeri come l'11 e il 13, come il 17 e il 19, il 41 e il 43.

Mattia pensava che lui e Alice erano così, due primi gemelli, soli e perduti, vicini ma non abbastanza per sfiorarsi

Paolo Giordano, La solitudine dei numeri primi, 2008

Indice

1 Introduzione 1

2 Ablazione Termica 3
2.1 Ablazione Termica Laser 4

3 Dispositivi Commerciali 6
3.1 Leonardo® Mini 6
3.2 Leonardo® 7
3.3 LASEmaR® 7
3.4 Spectrum® Dual Boost® 8
3.5 Diode Laser DIOLAS Newton 8
3.6 Diode Laser DIOLAS Photon 9
3.7 SAT-M2 Multi-Application Surgical Laser 10
3.8 Gbox Medical Diode Laser Systems 10
3.9 VELAS Medical Diode Laser Systems 12
3.10 neoV Laser Systems® 12

4 Realizzazione del dispositivo 16
4.1 Power Supply 17
4.2 Laser Diode 19
4.3 LDP-CW 20-50 Laser Driver 20
4.4 User Interface 24
4.4.1 Hardware 24
4.4.2 Software 26
4.5 Controller 29
4.5.1 Hardware 29
4.5.2 Software 33
4.6 Scheda di sicurezza a relè 39
4.7 Montaggio finale 40
4.8 Considerazioni finali 43

5 Prove di Ablazione Termica 48
5.1 Set-up di misura 48
5.2 Risultati - Prima prova 48
5.3 Risultati - Seconda prova 48

6 Simulazioni MATLAB® 55
6.1 Simulazioni 2D . . . 56
6.2 Considerazioni . . . 59

7 Sicurezza e Normativa per i laser 63
7.1 Cos'è un laser? . . . 63
7.2 I laser sono pericolosi? . . . 64
7.3 Classificazione laser . . . 65
7.3.1 Classe laser 1 . . . 65
7.3.2 Classe laser 1M . . . 65
7.3.3 Classe laser 2 . . . 66
7.3.4 Classe laser 2M . . . 66
7.3.5 Classe laser 3R . . . 66
7.3.6 Classe laser 3B e 4 . . . 66
7.4 Obblighi normativi . . . 66

8 Istruzioni per l'uso 69
8.1 Avvio del sistema . . . 69
8.2 Menu e schermate principali . . . 71
8.2.1 Schermata principale . . . 71
8.2.2 Menu configurazione laser . . . 71
8.2.3 Schermata Laser Ready . . . 72
8.2.4 Menu principale . . . 72
8.2.5 System Settings . . . 73
8.2.6 System Status . . . 73
8.2.7 Device Info . . . 74
8.3 Quick Start . . . 74
8.4 Timer retroilluminazione . . . 74
8.5 Modifica password . . . 74
8.6 Modifica orario . . . 75
8.7 Modifica data . . . 75

A Schemi Elettrici 76

B PCB Layout 81

C PCB 3D View 84

D Assembly Drawings 86

Riferimenti bibliografici 88

Elenco delle figure 90

Elenco delle tabelle 93

Capitolo 1

Introduzione

Oggigiorno i laser sono ovunque e, anche se non ce ne accorgiamo, essi sono utilizzati in ambito industriale e domestico per una miriade di applicazioni diverse. Tutti noi, anche in maniera indiretta, abbiamo a che fare con i laser quotidianamente: basti pensare alla fibra ottica per la connessione internet o ad un lettore CD/DVD. Tra i diversi campi di applicazione c'è anche quello medicale, dove i laser sono utilizzati in diverse discipline. Negli ultimi anni ha avuto un grande successo l'ablazione termica laser: terapia utilizzata per il trattamento di neoplasie, ancora oggi una delle principali cause di morte nel mondo. Lo scopo di questa tesi è quello di sviluppare un dispositivo per ablazione termica laser, alimentato a batteria, quindi, con la possibilità di essere facilmente trasportato per l'ambito didattico-sperimentale. Il dispositivo realizzato non sarà commercializzato, ma rimarrà per uso all'interno del laboratorio. Questo dispositivo sarà dotato di un Display LCD, un tastierino numerico, un pulsante a fungo per lo STOP di emergenza, un segnalatore acustico e dei LEDs per indicare lo stato del sistema.

La parte sperimentale della tesi consiste nella progettazione e realizzazione di un **controller**, la cui funzione sarà quella di interfacciarsi con il Driver Laser. Il Controller lavora a *"basso livello"* e si occupa in autonomia della gestione del dispositivo comunicando costantemente con l'**interfaccia utente** (UI). Quest'ultima sarà la parte ad *"alto livello"*, ed è proprio con questa che l'operatore interagisce per impostare i parametri del laser (potenza ottica, modalità di funzionamento, durata degli impulsi, ecc), modificare le impostazioni principali (data, ora, timer retroilluminazione, password) e controllare lo stato del sistema (temperatura diodo laser, temperatura driver, tensione di alimentazione).Completano il dispositivo un circuito di alimentazione per fornire le tensioni necessarie al funzionamento dei moduli e una scheda a relays per il blocco dell'emissione del Diodo Laser in caso di emergenza.

Inizialmente al Capitolo 2 verrà riassunto l'aspetto teorico dell'ablazione termica, i suoi principi fisici e i suoi attuali utilizzi in ambito clinico.

Successivamente si passerà all'aspetto sperimentale. Diverse sono state le fasi preliminari alla progettazione e realizzazione del dispositivo: dapprima è stata effettuata una ricerca dei dispositivi per ablazione termica presenti in commercio per comprenderne le caratteristiche base, i sistemi di protezione e sicurezza, il design e le dimensioni (Capitolo 3). Purtroppo non è stato possibile reperire alcun schema elettrico di tali dispositivi in quanto brevetti aziendali protetti, si è quindi, deciso di basarsi sul lavoro svolto dai precedenti

tesisti su questo argomento.

Successivamente, nel Capitolo 4 sarà descritto il sistema realizzato sia dal punto di vista hardware che software. I blocchi principali che compongono il dispositivo sono:

- Scheda di alimentazione (Power Supply): fornice le corrette tensioni a tutti i moduli. Si occupa anche della ricarica della batteria
- Interfaccia utente (User Interface): permette l'interazione con l'utente per la scelta dei parametri del laser (potenza ottica, modalità di funzionamento, lunghezza d'onda, ecc).
- Controller: è il collegamento tra l'UI e il Driver Laser, controlla la corretta operatività del laser ed interviene in caso di guasto e/o malfunzionamento.
- Scheda di sicurezza: una scheda a relays per interrompere l'alimentazione del Diodo Laser in caso di emergenza (Safety Board)
- Driver Laser: fornisce la corrente adeguata al Diodo Laser per emettere la corretta potenza ottica ad una determinata lunghezza d'onda.
- Diodo Laser: la parte terminale del dispositivo che emette il fascio laser invisibile ad una lunghezza d'onda di 915 nm per una potenza ottica massima di circa 7 W.

Non meno importante il Capitolo 6, ovvero la parte riguardante le simulazioni svolte al PC utilizzando MATLAB® e il ToolBox Partial Differential Equations (PDE). Attraverso questi strumenti sono state simulate le distribuzioni di temperatura nel tessuto in seguito ad irraggiamento laser in modalità continua (CW).

Nel Capitolo 5 saranno mostrati i risultati ottenuti in seguito all'ablazione termica laser di un campione di fegato bovino *ex-vivo*.

Al Capitolo 7 verranno indicate le classi di laser secondo la normativa EN 60825-1:2014, poi verranno elencate le principali norme di sicurezza per l'operatore che utilizza i dispositivi di ablazione termica laser e gli adempimenti del produttore di tali dispositivi per ottenere la certificazione del prodotto. Verranno anche descritti i principali dispositivi di protezione da indossare, i comportamenti da seguire e le misure di sicurezza da mettere in atto.

Infine al Capitolo 8 è stato redatto una breve guida all'uso del dispositivo contente le istruzione per utilizzare il dispositivo in sicurezza. Sono stati anche inseriti le schermate dei vari menu e le possibili azioni che l'utente può eseguire con quest'ultimi.

Capitolo 2

Ablazione Termica

Con il termine **"Ablazione Termica"** si fa riferimento ad un insieme di tecniche che hanno l'obiettivo di provocare la necrosi dei tessuti attraverso l'uso di temperature molto elevate (ipertermia) o temperature molto basse (ipotermia). L'ablazione termica viene impiegata molto in ambito oncologico, grazie alla ridotta invasività, in sostituzione alla resezione chirurgia: il tessuto non viene più asportato chirurgicamente all'esterno del corpo, ma si provoca una necrosi localizzata che verrà assorbita dal corpo stesso. Tutte queste tecniche si basano sulla trasmissione del calore all'interno dei tessuti che, come ben noto, avviene per tre meccanismi fisici: conduzione, convezione e irraggiamento. Tra le tecniche di Ablazione Termica ritroviamo:

- **Ablazione a Radiofrequenza:** attraverso l'uso di correnti a radiofrequenza è possibile riscaldare il tessuto interposto fra due elettrodi fino a raggiungere l'effetto termico desiderato.

- **Ablazione a Microonde:** attraverso onde ad altissima frequenza emesse da un'antenna è possibile riscaldare i tessuti ricchi di acqua. Questa tecnica, un pò come il forno a microonde, sfrutta la polarità delle molecole d'acqua per farle oscillare e produrre un innalzamento della temperatura.

- **Ablazione a Ultrasuoni:** utilizza onde meccaniche ad alta frequenza (fuori dallo spettro dell'udibile) che vengono focalizzate in modo non invasivo in un volume di tessuto. L'aumento della densità di energia nel tessuto bersaglio dovuta agli ultrasuoni focalizzati provoca un'innalzamento della temperatura.

- **Crioablazione:** attraverso un fenomeno fisico un gas (argon o azoto liquido) viene fatto espandere e, di conseguenza, la sua temperatura diminuisce (Effetto Joule-Thompson). Temperature molto basse provocando la morte cellulare per disidratazione e rottura della membrana.

- **Ablazione Laser:** utilizza un raggio laser ad alta potenza per irradiare il tessuto fino a raggiungere temperature elevate necessarie per la necrosi dei tessuti. Dato che l'obiettivo di questa tesi è lo sviluppo di un sistema per ablazione termica laser, solo questa tecnica verrà approfondita e considerata in seguito.

2.1 Ablazione Termica Laser

Nell'**ablazione termica laser**, o più semplicemente Ablazione Laser, la fonte di energia è la radiazione elettromagnetica emessa da un laser. Per comprendere come il raggio laser riesca a riscaldare i tessuti è necessario capire i principi fisici che stanno alla base dell'interazione tra una radiazione elettromagnetica e il tessuto umano. La lunghezza d'onda del laser è di fondamentale importanza per determinare la profondità di penetrazione del raggio laser, ad esempio, diodi laser che emettono nell'infrarosso riescono a penetrare in profondità.

Un laser emette una radiazione elettromagnetica che interagisce con i tessuti, o con un mezzo in generale, attraverso due fenomeni fisici: l'assorbimento e lo scattering. Si ha assorbimento quando l'energia del raggio laser incidente viene trasformata in calore, si parla di scattering quando questa, invece, viene dispersa in tutte le direzioni.

Esistono diversi tipi di laser usati in ambito medicale ognuno dei quali presenta caratteristiche diverse che lo rendono specifico per un tipo di applicazione; i laser sono utilizzati in chirurgia oncologica, in dermatologia, per l'estetica o ancora in oftalmologia. In ambito medicale vengo utilizzate diverse lunghezze d'onda, infatti, ogni tessuto, o meglio gli atomi e le molecole che lo compongono, assorbono in maniera diversa la radiazione laser. Per esempio le proteine e il DNA assorbono maggiormente radiazione laser con lunghezza d'onda compresa tra 180 nm e 400 nm o la melanina e l'emoglobina hanno il loro picco di assorbimento tra 400 nm e 780 nm.

Uno tra i più comuni tipi di laser utilizzati è l'Nd:YAG che utilizza come mezzo attivo un cristallo di granato di ittrio e alluminio drogato al neodimio, il quale emette ad una lunghezza d'onda di 1064 nm riuscendo a penetrare nei tessuti per alcuni centimetri. Questo tipo di laser viene utilizzato principalmente in odontoiatria, chirurgia vascolare e oftalmologia. Il laser a CO_2, il cui mezzo attivo è un gas, viene utilizzato per la vaporizzazione dei tessuti (taglio), infatti, la radiazione che emette è fortemente assorbita dall'acqua. Un' altro esempio è il laser a Rubino (lunghezza d'onda 694 nm) che è specifico per la dermatologia o per la rimozione di tatuaggi. Il tipo di laser che verrà utilizzato nel dispositivo realizzato è un laser a semiconduttore (comunemente chiamato diodo laser).

L'uso dell'ablazione laser in ambito oncologico presenta due grandi vantaggi:

- la possibilità di riscaldare selettivamente il tessuto tumorale per non danneggiare le strutture sane adiacenti

- ridotta invasività, infatti, questa tecnica si presta benissimo per interventi in laparoscopia.

Per distribuire il fascio laser all'interno dei tessuti si usano delle sonde che, tipicamente, non sono altro che delle fibre ottiche, le quali vengono inserite all'interno del corpo attraverso degli aghi: viene così ridotta di gran lunga l'invasività dell'intervento.

La tabella mette in relazione il danno biologico con la temperatura e il tempo di esposizione. [1]

Temperatura	**Effetto biologico sui tessuti**	**Tempo di esposizione**
> 300℃	fusione	< 1 secondo
> 100℃	carbonizzazione	< 1 secondo
100℃	formazione di bolle di vapore, rotture meccaniche	secondi
60℃	denaturazione proteine, coagulazione del tessuto	$<$ minuti/secondi
> 50℃	riduzione attività enzimatica, disattivazione meccanismi di riparazione cellulare	$<$ minuti
42℃- 50℃	ipertermia, distruzione legami	$<$ ore/minuti

In un primo momento il calore è ceduto tramite irraggiamento, successivamente i tessuti irradiati cedono calore a quelli circostanti, per cui si ha il fenomeno della conduzione del calore, questo effetto può essere dannoso se si desidera riscaldare selettivamente una porzione di tessuto.

Per questo motivo i laser possono operare in modalità continua (CW) o pulsata (PW): nella prima il laser viene mantenuto sempre attivo e nella seconda viene accesso e spento rapidamente per generare una serie di impulsi di lunghezza variabile. Le due modalità producono effetti diversi sui tessuti poiché, ad esempio, in modalità continua (CW) il calore riesce a diffondersi per conduzione nei tessuti adiacenti. Ma questo comportamento può essere dannoso nel caso in cui si voglia riscaldare solo una regione precisa del tessuto.

Per ridurre i cosiddetti danni collaterali si può utilizzare la modalità pulsata (PW), in questo caso l'aumento di temperatura nei tessuti irradiati è maggiore nella fasi iniziali rispetto alla modalità CW. I tessuti adiacenti però si comportano in maniera diversa, se nella modalità CW vengono riscaldati per conduzione, in quella PW ciò non avviene. Nel caso PW i tessuti adiacenti non vengono riscaldati poiché la distribuzione di temperatura dovuta all'irradiazione è di tipo gaussiano e l'aumento maggiore di temperatura si ha nella zona irradiata.

Capitolo 3

Dispositivi Commerciali

Prima di iniziare la progettazione del dispositivo è necessario conoscere, seppur in maniera limitata (dato che le aziende produttrici non diffondono schemi elettrici e/o caratteristiche hardware specifiche), i principali dispositivi per ablazione termica laser in commercio. Esistono diverse aziende del settore che commercializzano dispositivi più o meno complessi adatti a diverse applicazioni: dalla chirurgia oncologica alla dermatologia.

Nel capitolo seguente verranno presentati alcuni dei più popolari dispositivi per ablazione termica laser presenti sul mercato e alla fine verranno riassunte le caratteristiche principali in una tabella.

3.1 Leonardo® Mini

Leonardo® Mini prodotto da Biolitec® è la versione palmare dei classici dispositivi di ablazione termica laser. Il prodotto dalle dimensioni ridotte è un dispositivo versatile ed economico che, tuttavia, mantiene gli alti standard imposti dal produttore. Il peso è di soli 900 grammi ed è disponibile in due differenti versioni: a singola lunghezza d'onda (1470 nm) o con due lunghezze d'onda (980 nm e 1470 nm). Date le ridotte dimensioni le potenze dissipabili sono relativamente basse: circa 10 W a 980 nm e 4 W a 1470 nm. [2]

Figura 3.1: Leonardo® Mini di Biolitec®

Leonardo® Mini è realizzato per i seguenti trattamenti:

- Malattie venose
- Emorroidi e fistole
- Malattie ginecologiche
- Controllo del dolore
- Rivitalizzazione del tessuto muscolare

3.2 Leonardo®

Leonardo® è la versione avanzata del precedente dispositivo 3.1, prodotto sempre da Biolitec®. Questa volta la compattezza non è più una priorità, infatti, Leonardo® pesa circa 8.5 Kg e le sue dimensioni non sono indifferenti: tutto ciò per dare vita ad un prodotto tra i migliori disponibili sul mercato dei laser medici. Dotato di due diodi laser a due diverse lunghezze d'onda (980 nm e 1470 nm) permette non solo di selezionare la singola lunghezza d'onda da utilizzare, ma anche di combinare le due per ottenere l'effetto desiderato sul tessuto irradiato (taglio, coagulazione, vaporizzazione). Lo schermo touch-screen e le sue prestazioni rendono Leonardo® un dispositivo commerciale completo e multiuso. Disponibile in tre diverse versioni è in grado di dissipare potenze davvero elevate: da 45 W a 200 W. Tra le sue applicazioni in ambito clinico troviamo la chirurgia toracica, la ginecologia, l'urologia e l'estetica. [2]

Figura 3.2: Leonardo® di Biolitec®

3.3 LASEmaR®

LASEmaR® è un dispositivo laser per uso medico prodotto da una azienda italiana: Eufoton®. La versione 1500 è compatta nelle dimensioni e grazie al display touch-screen è possibile impostare tutti i parametri necessari in maniera rapida e sicura. Le principali applicazioni di questo dispositivo vanno dalla chirurgia estetica e generale alla dermatologia. Sono disponibili diverse lunghezze d'onda a seconda del modello scelto, per esempio, il LASEmaR® 1500 è in grado di emettere un fascio laser a 1470 nm. Le dimensioni non sono ridotte e il peso è di circa 8,5 Kg. Il dispositivo si presta bene per l'utilizzo in sala

operatoria grazie alla compattezza e la varietà di applicazioni. Da evidenziare anche il sistema di raffreddamento ad aria che, come indicato sul sito del produttore, utilizza celle Peltier. [3]

Figura 3.3: LASEmaR® 1500 di Eufoton®

3.4 Spectrum® Dual Boost®

Un altro prodotto della famiglia Eufoton® è Spectrum® Dual Boost®. Questo dispositivo usato principalmente in dermatologia è dotato di due diodi laser, a due diverse lunghezza d'onda, che possono essere combinate tra di loro. Sono disponibili diverse combinazioni tra le quali: 532 nm + 940 nm, 808 nm + 1470 nm, 940 nm + 1470 nm o 980 nm + 1470 nm. Le potenze emesse sono abbastanza elevate con un massimo di 5W a 532nm e 25W a 940nm, per la configurazione 532 nm + 940 nm. Dotato di un ampio display Lcd touch-screen permette all' operatore di scegliere i parametri da utilizzare in modo semplice con la possibilità di usare anche delle configurazioni preimpostate. Completano il dispositivo un sistema di raffreddamento a celle Peltier e il raggio laser guida a bassa potenza di colore rosso. Le dimensioni sono 43 x 40 x 39 (cm) e il peso è di 15 Kg. [4]

3.5 Diode Laser DIOLAS Newton

Il DIOLAS Newton è prodotto da un'azienda tedesca, la Limmer Laser, la quale produce dispositivi laser medicali di alta qualità per applicazioni nei campi della chirurgia generale, odontoiatria, ginecologia, urologia, dermatologia, proctologia e laringoiatria. Nello specifico il DIOLAS Newton si presenta con un ampio display Lcd touch-screen da 9.7 pollici a colori e un design compatto. Sono disponibili diverse configurazioni con lunghezze d'onda da 810 nm, 980 nm, 1064 nm e 1470 nm e potenza fino a 50 W. L'azienda produttrice permette di personalizzare il prodotto, secondo le esigenze del cliente, con la potenza massima richiesta e la possibilità di integrare fino a due lunghezze d'onda nel dispositivo. Altre caratteristiche del prodotto sono: il raffreddamento ad aria, raggio laser di pilotaggio a bassa potenza di

Figura 3.4: Spectrum® Dual Boost® di Eufoton®

colore rosso o verde e, infine, una serie di programmi preimpostati per i diversi trattamenti. Le dimensioni so 34 x 30 x 22 cm, mentre il peso massimo può arrivare ad 8 Kg. [5]

Figura 3.5: DIOLAS Newton di Limmer Laser GmbH

3.6 Diode Laser DIOLAS Photon

DIOLAS Photon è un altro dispositivo prodotto dalla tedesca Limmer Laser; si può definire come il "fratello maggiore" del DIOLAS Newton, infatti, lo schermo Lcd touch-screen è più ampio (10.4 pollici) e le dimensioni e il peso sono maggiori (35 x 31 x 42 cm per un massimo di 15 Kg). L'alta qualità dei diodi laser (lunghezza d'onda a scelta tra 810 nm e 980 nm o combinazione delle due) unita alla varietà di accessori rendono questo dispositivo adatto a tutte le applicazione mediche dalla chirurgia generale, alla dermatologia, all'urologia e alla neurochirurgia. Alcune caratteristiche di questo prodotto sono: un software che memorizza i parametri e le impostazioni utilizzate dall'utente, accessori configurabili per tutte le esigenze e la possibilità di utilizzare programmi preimpostati per diversi trattamenti. Design

compatto e peso non eccessivo lo rendono un prodotto versatile e facile da trasportare. A richiesta è possibile avere una modalità denominata LDF (Levelled Field Density) che riduce i danni collaterali sui tessuti durante il trattamento e aumenta il controllo della coagulazione. [6]

Figura 3.6: DIOLAS Photon di Limmer Laser GmbH

3.7 SAT-M2 Multi-Application Surgical Laser

SAT-M2 è un dispositivo laser medicale prodotta dalla Pioon, azienda cinese molto conosciuta in questo ambito. Come ormai tutti i dispositivi di questa categoria il SAT-M2 si presenta con un ampio Lcd touch-screen a colori, interruttore a chiave per l'accensione e un design moderno e compatto. Il suo punto di forza è, secondo l'azienda produttrice, la semplicità di utilizzo che, collegata ad un hardware "intelligente" in grado di garantire il corretto funzionamento dell'intero sistema, lo rendono un prodotto economico e dalle prestazioni cliniche eccellenti. Disponibile in diverse versioni con lunghezze d'onda a scelta tra 980 nm e 1470 nm (o combinazione delle due), è in grado di erogare una potenza ottica massima di 30/60 W a 980 nm e di 20 W a 1470 nm. Il connettore di uscita per la fibra ottica è un SMA905, ciò permette il collegamento di accessori facilmente disponibili sul mercato e non obbliga l'utente a comprare quelli proprietari del costruttore. Le applicazioni specifiche per questo dispositivo sono la chirurgia vertebrale, liposuzione, rimozione delle vene varicose e il trattamento di malattie del cavo orale. [7]

3.8 Gbox Medical Diode Laser Systems

Il Gbox Medical Diode Laser System è un dispositivo portatile dalle dimensioni ridotte prodotto dalla Gigaa Optronics Technology Co., un'azienda cinese. Sono disponibili varie lunghezze d'onda a scelta tra 532 nm, 810 nm, 980 nm, 1064 nm con una potenza ottica massima di 20 W. Dotato di un'interfaccia user-friendly con programmi preimpostati

Figura 3.7: SAT-M2 di Pioon

per alcuni tipi di trattamento rappresenta un'alternativa economica per un vasto range di applicazioni: odontoiatria, dermatologia, trattamenti endovenosi e liposuzione. Ampio display Lcd touch-screen da 8 pollici e design compatto per una semplice ed economica manutenzione: le dimensioni sono 24.5 x 21.5 x 31.5 cm per un peso massimo di 5 Kg. Caratteristica importante di questo prodotto è la presenza di un power-meter integrato in grado di misurare la potenza ottica in uscita e, attraverso il software, regolarla in base alla scelta dell'utente. [8]

Figura 3.8: Gbox Medical Laser di Gigaa Optronics Technology Co.

3.9 VELAS Medical Diode Laser Systems

Come tutte le aziende produttrici di dispositivi laser medicali, anche la Gigaa Laser produce una versione avanzata del precedente Gbox, quest'ultima chiamata VELAS. Il VELAS è un dispositivo dalle alte prestazioni con una varietà di applicazioni cliniche. Come per il precedente dispositivo si possono scegliere varie lunghezze d'onda tra le quali 810 nm, 940 nm, 1210 nm e 1470 nm con una potenza ottica massima di 60 W, ma varia a seconda della versione scelta. Non può mancare un ampio display touch-screen a colori e il diodo di puntamento a bassa potenza di colore rosso. Date l'elevate potenze le dimensioni non son più contenute (40 x 38.5 x 20 cm) e il peso può raggiungere i 13 Kg. Il dispositivo è fornito di un'interfaccia utente user-friendly semplice e intuitiva e, anche in questo modello, ritroviamo la funzione di calibrazione della potenza di uscita. Le applicazioni sono: odontoiatria, dermatologia, trattamenti endovenosi e liposuzione. [9]

Figura 3.9: VELAS Medical Laser di Gigaa Optronics Technology Co.

3.10 neoV Laser Systems®

Il neoV è un dispositivo laser medico prodotto da un azienda israeliana: la neoLaser®. Disponibile in diverse versioni a singola lunghezza d'onda è un prodotto compatto e portatile dalle dimensioni ridotte 10 x 22 x 22 cm per un peso di 3.5 Kg. Le lunghezze d'onda disponibili sono: 1940 nm, 1470 nm, 980 nm e 1064 nm. Può operare sia in modalità continua che pulsata con una potenza massima che va dai 6 ai 28 W a seconda della versione scelta. Il piccolo display lcd touch screen a colori permette di monitare e controllare l'emissione del diodo laser. Le applicazioni sono diverse e variano sulla base della lunghezza d'onda scelta. [10]

Figura 3.10: neoV Laser System® di neoLaser®

Modello	Azienda	Lunghezza d'onda	Potenza	Modalità	Durata Impulsi	Dimensioni e Peso	Applicazioni
Leonardo Mini Dual®	Biolitec®	980 nm e 1470 nm	10 W (980 nm)/4 W (1470 nm)	CW, Pulse mode(PW) (optinal)	0.01-60 sec	6 x 9 x 21.5 cm, 900 g	Chirurgia Flebologica, Proctologica, Otorinolaringoiatria, Chirurgia Ginecologica.
Leonardo Dual 45®	Biolitec®	980 nm e 1470 nm	45 W(1470 nm/15 W + 980 nm/30 W)	CW, Pulse Mode(PW), EL-VeS®Signal, Derma Mode	0.01 - 60 sec	28 x 37 x 9 cm, 8.5 Kg	Chirurgia toracica, Ginecologia, Urologia, Estetica medica
LASEmaR® 1500	Eufoton®	1470 nm	-	Single Pulse, Pulse Mode(PW), CW	Da 1 a 9000 msec	30.5 x 35 x 15.5 cm, 8.5 Kg	Chirurgia estetica e Generale, Dermatologia
Spectrum® Dual Boost®	Eufoton®	Diverse combinazioni tra 532 nm, 808 nm, 980 nm e 1470 nm	Da 5 W (532 nm) a 100 W (980 nm)	CW, Pulse Mode(PW), Dual Boost®	-	43 x 42 x 33 cm, Max. 18 Kg	Chirurgia, Dermatologia, Ginecologia, Estetica medica
DIOLAS Newton	Limmer Laser	Diverse combinazioni tra 810 nm, 980 nm, 1064 nm e 1470 nm	Fino a 50 W (varia a seconda della lunghezza d'onda)	CW, Pulse Mode(PW), LDF Mode	Da 1 msec a 5sec	34 x 30 x 22 cm, Max. 8 kg	Chirurgia generale, Odontoiatria, Ginecologia

Tabella 3.1: Tabella di confronto dispositivi commerciali - Parte 1

Modello	Azienda	Lunghezza d'onda	Potenza	Modalità	Durata Impulsi	Dimensioni e Peso	Applicazioni
DIOLAS Photon	Limmer Laser	810 nm e 980 nm (o combinazione delle due)	Da 30 W a 50 W	CW, Pulse Mode(PW), LFD Mode	Da 10 msec a 5 sec	35 x 31 x 42 cm Max. 15 Kg	Dermatologia, Proctologia, Neurochirurgia, Urologia
SAT-M2	Pioon	980 nm e 1470 nm (o combinazione delle due)	Da 20 W (1470 nm) fino a 60 W(980 nm)	CW, Pulse Mode(PW)	-	29 x 23.2 x 15.1 cm Max. 7 Kg	Chirurgia vertebrale, Liposuzione, Vene varicose e Malattie del cavo orale
Gbox	Gigaa Optronics Technology Co.	A scelta tra 532 nm, 810 nm, 980 nm e 1064 nm	Fino a 20 W	CW, Pulse Mode(PW)	-	24.5 x 21.5 x 31.5 cm Max. 5 Kg	Odontoiatria, Dermatologia, Trattamenti endovenosi e Liposuzione.
VELAS	Gigaa Optronics Technology Co.	A scelta tra 810 nm, 940 nm, 980 nm, 1210 nm e 1470 nm	Fino a 60 W	CW, Pulse Mode(PW) , Single Pulse	10µsec-3sec/10msec-3sec	40 x 38.5 x 20 cm Max. 13 Kg	Odontoiatria, Dermatologia, Trattamenti endovenosi e Liposuzione
neoV	neoLaser®	A scelta tra 1940 nm, 1470 nm, 980 nm e 1064 nm	Fino a 28 W	CW, Pulse Mode(PW)	-	22 x 22 x 10 cm 3.5 Kg	Trattamenti endovenosi

Tabella 3.2: Tabella di confronto dispositivi commerciali - Parte 2

Capitolo 4

Realizzazione del dispositivo

L'analisi dei dispositivi di Ablazione Laser presenti in commercio (Capitolo 3) è stata di fondamentale importanza per determinare le caratteristiche tecniche che si vogliono implementare nel dispositivo oggetto di questa tesi. Non tutti i dispositivi hanno le stesse funzioni e alcuni operano con modalità diverse che variano a seconda dell'applicazione specifica del prodotto. In questo caso il dispositivo verrà utilizzato per prove su fegato ex-vivo ai fini didattico-sperimentali all'interno del laboratorio, per cui è stata scelta la lunghezza d'onda di 915 nm, particolarmente adatta per questo tipo di tessuto. Altre caratteristiche tecniche implementate sono state dettate da esigenze sperimentali e dalle normative; si è cercato di dotare il dispositivo di tutte quelle protezioni o/e controlli simili ad uno professionale, malgrado questo non verrà commercializzato nè tanto meno certificato.

Dopo un'attenta analisi sono state individuate le caratteristiche tecniche che il dispositivo dovrà possedere alla fine della realizzazione. Queste sono:

- Diodo Laser 7W con lunghezza d'onda 915 nm
- Doppia modalità di funzionamento: CW e PW
- Alimentazione a batteria
- Accesso tramite password
- Interruttore a chiave per abilitare l'emissione laser
- Tasto di STOP in caso di emergenza
- Auto diagnosi all'avvio
- Controllo automatico sullo stato del sistema
- Comando esterno a pedale
- Connettore di uscita SMA905 per fibra ottica
- Scheda di sicurezza a relè
- Orologio elettronico con modulo RTC(Real Time Clock)

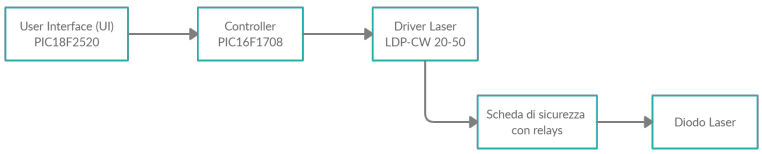


Figura 4.1: Schema a blocchi del dispositivo

Il passo successivo è stato quello di dividere il dispositivo in sezioni per semplificarne la progettazione. Sono state, pertanto, individuate sei sezioni principali:

- un circuito di alimentazione (Power Supply)
- un sistema di controllo per la gestione dei parametri del laser (Controller)
- un' interfaccia utente per l'inserimento dei valori di lunghezza d'onda, potenza e modalità di lavoro (User Interface)
- una scheda a relays per interrompere l'alimentazione del Diodo Laser in caso di emergenza (Safety Board)
- un Driver Laser per fornire la corrente necessaria al Diodo Laser per emettere una determinata potenza ottica
- un Diodo Laser con lunghezza d'onda 915 nm che emette il fascio di luce coerente

Di questi sei, tuttavia, il Driver Laser e il Diodo Laser sono stati già realizzati dalle rispettive aziende produttrici e non necessitano di una fase progettuale. Nei paragrafi successivi saranno descritte le quattro rimanenti sezioni dal punto di vista hardware e software, e verranno analizzate eventuali problematiche legate al consumo o alla dissipazione termica.

4.1 Power Supply

Il sistema è alimentato con una batteria agli ioni di Litio, prodotta da Enix Energies, formata da quattro celle con una tensione nominale totale di 15 V e una capacità di 2.2Ah. La scheda di alimentazione presenta 2 morsetti di ingresso, uno per i terminali della batteria e l'altro per i terminali del connettore di ricarica, e un morsetto di uscita utilizzato per alimentare il Driver Laser. Per quanto riguarda la parte dell'elettronica di controllo, la tensione nominale della batteria risulta troppo elevata; è necessario, pertanto, ridurla per portarla ad un valore accettabile per i microcontrollori e gli altri componenti. Per fare ciò esistono in commercio regolatori lineari a basso ripple che permettono di ottenere una tensione di uscita costante. Nel nostro caso una tensione di 5 V per la parte di controllo è più che sufficiente: la scelta ricade sul famoso LM7805. L'LM7805 è un regolatore lineare con tensione di ingresso massima di 35 V e tensione di uscita costante pari a 5 V. [11]

La dissipazione è uno dei problemi più comuni di questo tipo di regolatori, bisogna pertanto, determinare se è necessario inserire un dissipatore esterno. [12] La prima cosa da

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings are those values beyond which damage to the device may occur. The datasheet specifications should be met, without exception, to ensure that the system design is reliable over its power supply, temperature, and output/input loading variables. Fairchild does not recommend operation outside datasheet specifications.

Symbol	Parameter		Value	Unit
V_I	Input Voltage	V_O = 5V to 18V	35	V
		V_O = 24V	40	V
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance Junction-Cases (TO-220)		5	°C/W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance Junction-Air (TO-220)		65	°C/W
T_{OPR}	Operating Temperature Range	LM78xx	-40 to +125	°C
		LM78xxA	0 to +125	
T_{STG}	Storage Temperature Range		-65 to +150	°C

Figura 4.2: Datasheet LM7805 della Fairchild

fare è calcolare la potenza massima dissipata dal regolatore con la formula:

$$P_D = (V_{in} - V_{out}) \times I_{out} = (16.8V - 5V) \times 0.3A = 3.54W$$

considerando che la massima tensione della batteria è 16.8 V, quando totalmente carica, e la massima corrente assorbita dal circuito di controllo non supera i 300 mA. Successivamente va calcolata la resistenza termica totale giunzione-ambiente con la formula:

$$\theta_{JA(total)} = \frac{T_J - T_A}{P_D} = \frac{125℃ - 55℃}{3.54W} = 19.77℃/W$$

dove T_J è la temperatura massima della giunzione generalmente fissata a 150℃, ma si sconsiglia di superare i 125℃ per non alterare il funzionamento del regolatore, e T_A è la massima temperatura all'interno del contenitore (caso limite). A questo punto si possono verificare tre situazioni:

- $\theta_{JA(total)} < \theta_{JC}$: in questo caso è necessario cambiare regolatore di tensione e sceglierne in grado di erogare una maggiore potenza
- $\theta_{JA(total)} > \theta_{JA}$: se la resistenza termica totale giunzione-ambiente e maggiore della resistenza termica giunzione-ambiente non è necessario utilizzare un dissipatore.
- $\theta_{JC} < \theta_{JA(total)} < \theta_{JA}$: in questo caso la resistenza termica totale giunzione-ambiente è compresa tra la resistenza termica giunzione-contenitore e la resistenza termica giunzione-ambiente, pertanto, è necessario utilizzare un dissipatore.

In questo caso abbiamo $\theta_{JC} = 5℃/W$, $\theta_{JA} = 65℃/W$ e $\theta_{JA(total)} = 19.77℃/W$, quindi,

$$5℃/W < 19.77℃/W < 65℃/W$$

è necessario dimensionare un dissipatore adeguato.
Per determinare la resistenza termica del dissipatore si usa:

$$\theta_{SA} = \theta_{JA(total)} - \theta_{JC} = 19.77℃/W - 5℃/W = 14.77℃/W$$

Un dissipatore con resistenza termica minore o uguale a θ_{SA} è sufficiente per questa applicazione. Si ricorda che un valore di resistenza termica pari a 14 ℃/W indica che per ogni Watt di potenza dissipata si ha un incremento di temperatura di 14℃. Minore sarà quindi la resistenza termica, minore sarà la temperatura raggiunta del componente a discapito però dello spazio occupato dal dissipatore. Un giusto compresso per questa situazione è il dissipatore SK75-37,5TO220 della Fischer Elektronik con resistenza termica di 10℃/W. Considerando la massima potenza dissipata e la resistenza termica del dissipatore si può determinare la massima temperatura che verrà raggiunta:

$$T_{max} = \theta_{SA} \times P_D = 10℃/W \times 3.54W = 35.4℃$$

Sono, inoltre, necessari dei condensatori sia ai pin di ingresso che a quelli di uscita cosi come indicato sul datasheet del LM7805. La scelta è stata di inserire una coppia di condensatori, uno da 10μF elettrolitico e uno da 0.1μF ceramico. Per ragioni di sicurezza è stato anche inserito un fusibile per interrompere l'alimentazione in caso di sovracorrenti dovute a guasti e/o errate connessioni. Il dispositivo sarà acceso da un interruttore a pulsante luminoso, pertanto, è necessario predisporre un connettore a 4 vie (due per il led e due per l'interruttore). Lo schema elettrico è disponibile all'Appendice A.

4.2 Laser Diode

Il **Diodo Laser** utilizzato è un BMU7-915 01 R, prodotto da II-VI, in grado di emettere una potenza ottica massima di circa 7 W. La corrente di soglia è 0.5 A, ciò significa che al di sotto di questo valore il diodo laser non emette, mentre la corrente massima operativa è di 8.5 A con una tensione nominale di lavoro pari a 1.9 V. Altra caratteristica del diodo laser è una **wallplug efficency** del 48%, ovvero il rapporto tra la potenza ottica in uscita e la potenza elettrica in ingresso.

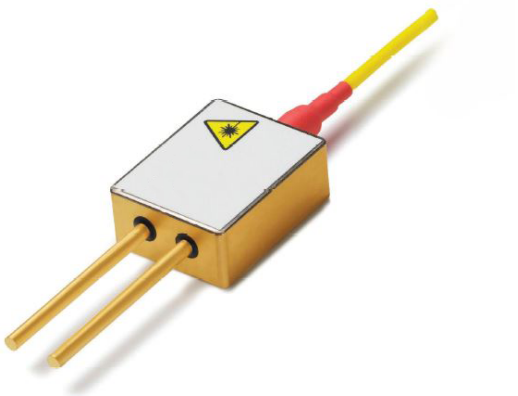


Figura 4.3: Diodo Laser BMU7-915 01 R con pigtail multimodo da 105µm

Ad esempio, se sul diodo viene fatta scorrere una corrente di 5 A, la potenza elettrica in ingresso è di:

$$P_{el} = V_n \times I_d = 1.9V \times 5 = 9.5W$$

sapendo che:

$$Wallplug_{efficency} = \frac{P_{opt}}{P_{el}}$$

si può determinare la potenza ottica in uscita:

$$P_{opt} = Wallplug_{efficency} \times P_{el} = 0.48 \times 9.5W = 4.56W$$

Il diodo laser deve essere necessariamente caratterizzato per conoscere la relazione che intercorre tra la corrente attraverso il diodo e la potenza ottica emessa in uscita, infatti, il Driver Laser fornisce una corrente costante ma non è in grado di determinare la potenza ottica in quanto proprietà di ogni singolo diodo laser. A tal fine è stato utilizzato un Virtual Optical Power Meter della Newport™ (841-P-USB) al quale è stata collegato una testina di rilevazione per diodi ad alta potenza (818P-030-18 della Newport™) che attraverso l'uso di una termopila fornisce il valore di potenza ottica. Per la caratterizzazione del diodo sono stati impostati diversi valori di corrente e valutata la potenza ottica per ognuno di questi. I risultati ottenuti sono stati poi riportati in tabella e, in un grafico a dispersione x-y. Si osserva che la potenza ottica aumenta pressoché in maniera costante per valori di corrente compresi tra 1 A e 7 A, successivamente per valori superiori l'aumento di potenza è limitato a causa dei tipici problemi di deriva termica interni al diodo. I punti sono stati interpolati linearmente per ottenere la relazione che lega la corrente alla potenza ottica, ottenendo così la seguente equazione:

$$P_{opt} = 0.7384 \cdot I_{diode} + 0.1106$$

Dal momento che l'utente dovrà indicare la potenza ottica desiderata a passi di 0.1 W, il software calcolerà la corrente necessaria secondo la relazione:

$$I_{diode} = \frac{P_{opt} - 0.1106}{0.7384}$$

Bisogna precisare che il valore di corrente ottenuto da questa relazione verrà approssimato al decimo di ampere (0.1 A) poiché il Driver Laser accetta valori di corrente con variazioni da 0.1 A.

Il range di temperatura entro il quale il diodo laser opera in maniera ottimale è 15℃-60℃. Oltre questo range il produttore non garantisce il corretto funzionamento, pertanto, è necessario utilizzare un sensore per monitorare la temperatura del diodo laser e fare in modo che questa non superi mai i 40℃. Inoltre è necessario prevedere una dissipazione passiva per il diodo laser, a tal fine questo verrà fissato al contenitore di allumino per garantire una corretta dissipazione. Un ultima considerazione va fatta sull'uscita del diodo laser, infatti, il BMU7 915 emette attraverso una fibra ottica (diametro del core tipicamente di 105μ m) nuda il che rende poco pratico il collegamento con le varie sonde, pertanto, si è deciso di giuntare l'estremità della fibra con un connettore **SMA-905** maschio e, montare sul contenitore esterno un adattatore **SMA-905** femmina-femmina in modo da poter agevolmente collegare le sonde utili per il *delivery* del raggio laser.

4.3 LDP-CW 20-50 Laser Driver

Il driver laser è un convertitore DC-DC che fornisce una corrente costante ad un carico grazie ad un sistema di controllo ad anello chiuso, ciò significa che la corrente non dipende

Corrente (A)	Potenza ottica (W)
0.5	0.073
0.6	0.21
0.7	0.28
0.8	0.414
0.9	0.483
1	0.626
1.5	1.15
2	1.6
2.5	2.08
3	2.55
3.5	3.01
4	3.44
4.5	3.88
5	4.24
5.5	4.66
6	5.03
6.5	5.33
7	5.65
7.5	5.94
8.0	6.1
8.5	6.28
9	6.38
9.5	6.48

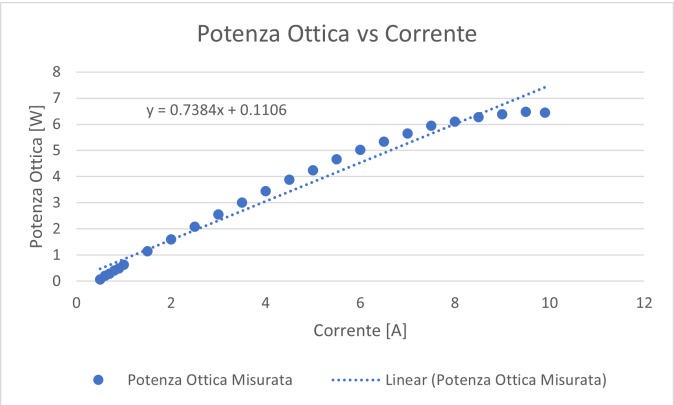


Figura 4.4: Caratteristica del Diodo Laser con la retta ottenuta tramite interpolazione lineare

dal carico ma dal valore impostato dall'utente (setpoint). Il driver laser scelto per la realizzazione del dispositivo è LDP-CW 20-50 prodotto da PicoLas: uno strumento compatto ed efficiente per pilotare diodi laser ad alta potenza (può erogare fino a 1kW di potenza in

uscita). Il suo uso è indicato principalmente per applicazioni nelle quali il laser opera in modalità continua, ma sono possibili modulazioni analogiche come sinusoidi, onde rettangolari o triangolari. Sono molteplici i campi di applicazione di questo tipo di driver laser: dalla

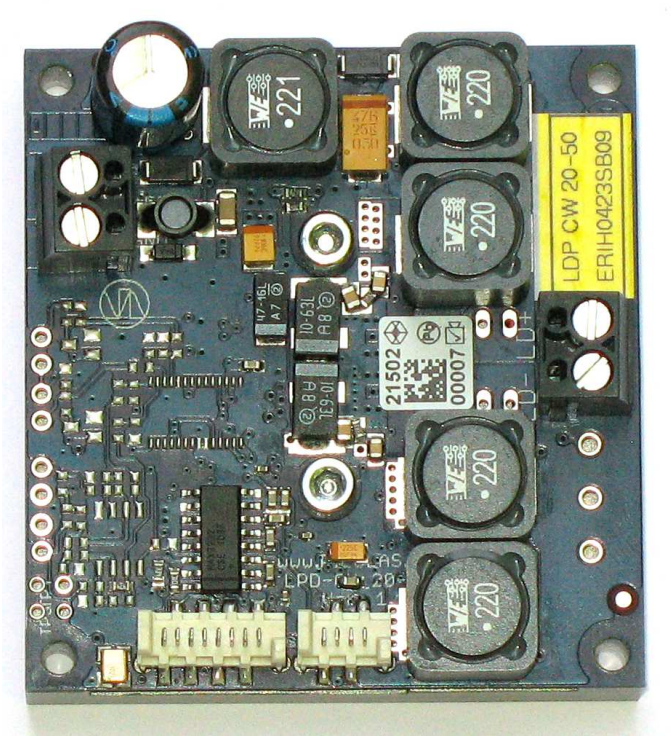


Figura 4.5: LDP-CW 20-50 Laser Driver

saldatura al trattamento delle superfici. Nello specifico LDP-CW 20-50 opera con quattro convertitori DC-DC tipo Buck in parallelo per distribuire la corrente equamente (Figura 4.6); ognuno dei convertitori ha il suo anello di controllo indipendente con un sensore di corrente.

Per ottenere la regolazione della corrente, affinché questa rimanga costante nel tempo, l' LDP-CW 20-50 è dotato di un controllo software di tipo P-I (Figura 4.7). In questo tipo di regolatori i parametri Kp e Ki descrivono il comportamento del sistema di controllo. La modifica di questi parametri può portare a situazioni di overshoot della corrente o a tempi di settling molto elevati, i quali limitano la frequenza per una eventuale modulazione analogica. L'azienda produttrice fornisce il driver con i parametri Kp e Ki già impostati per operare in maniera sicura, ma offre la possibilità di modificarli a rischio e pericolo dell'utente.

La batteria deve essere in grado di alimentare sia la parte di controllo sia il driver e il diodo laser: deve poter erogare la potenza richiesta dal diodo più le perdite interne del driver. Per esempio, in questo caso la tensione nominale della batteria è di 15 V e la tensione nominale di funzionamento del diodo laser è di 1.9 V con una corrente massima di 10 A. Quando il driver eroga 10 A, secondo il manuale, ha bisogno di ulteriori 11 W per

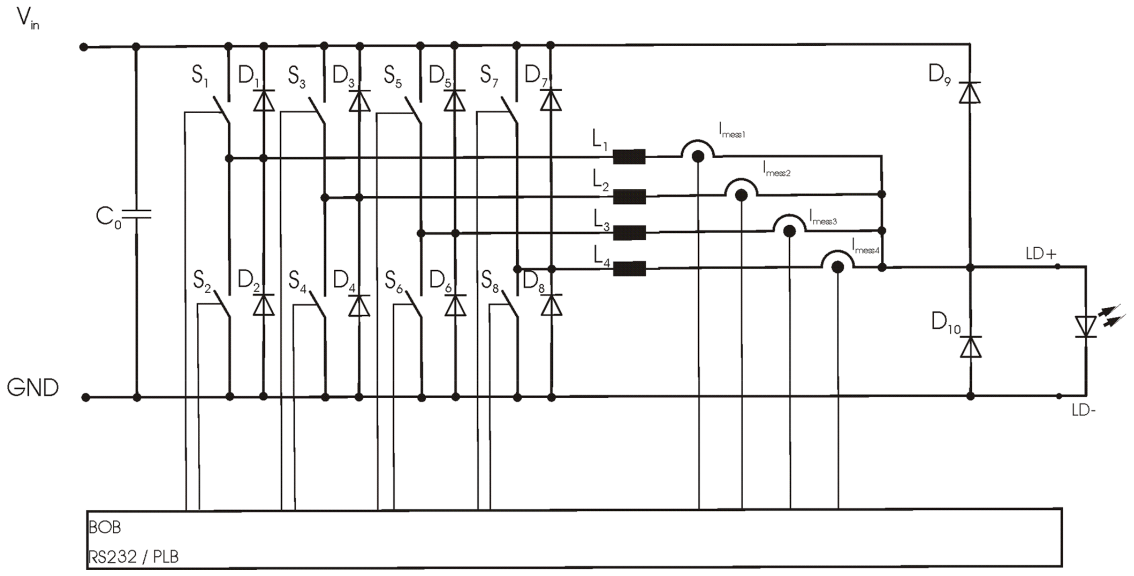


Figura 4.6: Schema convertitore Buck LDP-CW 20-50

coprire le perdite interne. Il consumo totale sarà, pertanto, dato:

$$P_{tot} = 1.9V \times 10A + 11W = 30W$$

Dividendo questo valore per la tensione di alimentazione (15 V) si ottiene il valore massimo di corrente che la batteria erogherà nelle condizioni sopra elencate per alimentare il Driver e il Diodo Laser.

$$I_{max(driver+diode)} = \frac{P_{tot}}{V_{al}} = \frac{30W}{15V} = 2A$$

Considerando anche la parte di controllo che assorbe massimo 300 mA, la corrente massima totale sarà:

$$I_{max(tot)} = I_{max(driver+diode)} + I_{max(control)} = 2A + 0.3A = 2.3A$$

Questo valore è importante sia per dimensionare i componenti da inserire sulla scheda, ogni componente è realizzato per sopportare una corrente massima nominale, sia per la progettazione del PCB, infatti, la larghezza delle piste deve essere valutata sulla base della massima corrente che le attraversa.

Interessante è conoscere la durata della batteria nel caso si voglia utilizzare il dispositivo per un certo numero di sessioni di ablazione, ad esempio, supponendo che la batteria sia perfettamente carica e che la sua capacità nominale sia al 100% (2.2Ah) è possibile calcolare, come sopra, il consumo e, di conseguenza, la durata della batteria.

Si vuole determinare quante sessioni si possono eseguire in modalità CW con una potenza ottica di 5W per un tempo di 5 minuti. Affinché il laser emetta 5 W di potenza ottica è necessario fornirgli una corrente, attraverso il driver, di circa 6 A. Il driver laser quando eroga 6 A ha bisogno di altri 6 W di potenza per coprire le perdite interne, per cui si ha:

$$P_{tot} = 1.9V \times 6A + 6W = 17.4W$$

$$I_{max(driver+diode)} = \frac{P_{tot}}{V_{al}} = \frac{17.4W}{15V} = 1.16A$$

$$I_{max(tot)} = I_{max(driver+diode)} + I_{max(control)} = 1.16A + 0.3A = 1.46A$$

In queste condizioni la batteria può erogare la $I_{max(tot)}$ per:

$$t_{bat} = \frac{C_{bat}}{I_{max(tot)}} = \frac{2.2Ah}{1.46A} = 1.5h = 90min$$

Considerando sessioni da 5 minuti:

$$N_{sessioni} = \frac{t_{bat}}{t_{sessione}} = \frac{90min}{5min} = 18$$

Si possono eseguire circa 18 sessioni senza considerare la pausa tra una sessione e l'altra ed eventuali consumi non calcolati.

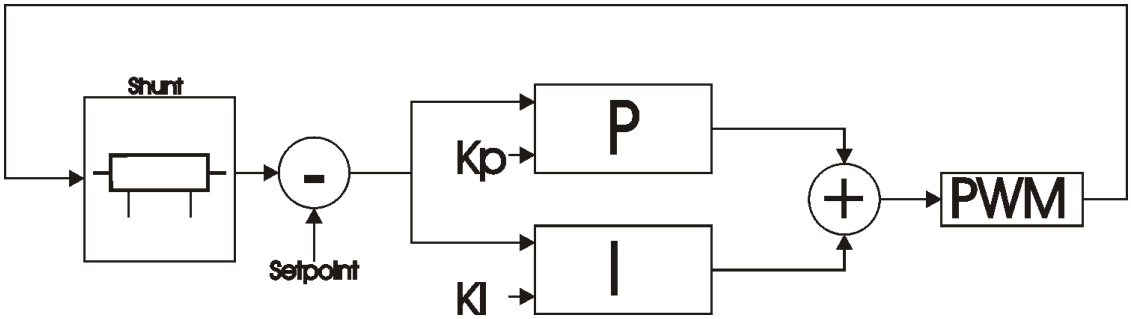


Figura 4.7: Schema a blocchi regolatore PI LDP-CW 20-50

4.4 User Interface

L'User Interface permette all'utente di interagire con il dispositivo per impostare i parametri del laser, modificare le impostazioni principali (data, ora, timer retroilluminazione, password) e controllare lo stato del sistema (temperatura diodo laser, temperatura driver, tensione di alimentazione). Al Capitolo 8 è stata redatta una guida all'uso del dispositivo breve e completa, in modo da permettere una formazione di base sull'uso del dispositivo.

4.4.1 Hardware

Al cuore dell'User Interface vi è un PIC®18F2520 della Microchip Technology®: un microcontrollore a 8 bit che lavora ad una frequenza di 32MHz. [13] Per interagire con l'utente l'User Interface è dotata di un display LCD 20x4 con retroilluminazione e un tastierino numerico da 16 tasti. Inoltre è stato inserito un modulo RTC per mostrare l'orario e la data sulla schermata iniziale all'avvio del dispositivo. Il modulo RTC comunica con il microcontrollore attraverso un protocollo seriale chiamato I^2C (Inter Integrated Circuit), infatti il

PIC®18F2520 assolve la funzione di *Master* nel BUS I^2C, mentre il RTC e il Controller sono degli *Slave*. L'I^2C usa per comunicare due linee: SDA per la trasmissione dei dati e SCL per la trasmissione del clock, queste due linee sono di tipo open-drain e necessitano, pertanto, di due resistori di pull-up. Di seguito verrà descritta la procedura per il dimensionamento di questi. [14]

$$R_p\,(min) = \frac{(V_{CC} - V_{OL}\,(max))}{I_{OL}} = \frac{(5V - 0.6V)}{3 \times 10^{-3} A} = 1.5k\Omega$$

$$R_p\,(max) = \frac{t_r}{0.8473 \times C_b} = \frac{1000 \times 10^{-9} s}{0.8473 \cdot 400 \times 10^{-12} F} = 2.9k\Omega$$

dove C_b e t_r sono i massimi valori ammessi dalle specifiche dell' I^2C. [15] Il valore dei resistori di pull-up è stato fissato al valore commerciale di 2.2kΩ.

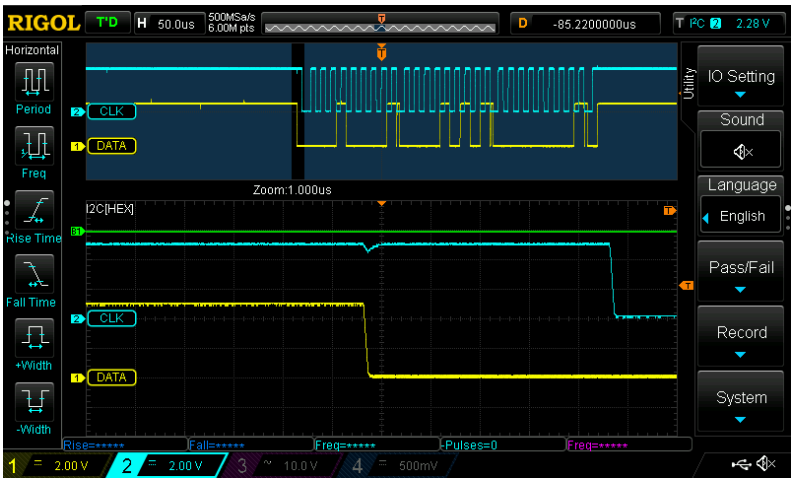


Figura 4.8: Esempio di comunicazione seriale tramite protocollo I^2C. In azzurro il segnale di Clock (SCL) e in giallo i dati trasmessi (SDA)

Una possibile alternativa per realizzare un'interfaccia dall'aspetto più professionale è l'uso del Raspberry Pi. Il Raspberry Pi è una popolare scheda di sviluppo utilizzata per diverse applicazioni che vanno dalla domotica alla robotica. Conosciuta nel mondo dei makers, si può meglio definire come un mini-computer dalle dimensioni estremamente ridotte. Nella sua ultima versione, il Raspberry Pi 4 Model B, offre un processore quad-core ad alte prestazioni a 64-bit, il supporto per due monitor 4K attraverso due uscite micro-HDMI, fino ad 8GB di RAM, connettività wireless, una porta LAN Gigabit, Bluetooth 5.0 e due porte USB 3.0 oltre alle due USB 2.0.

Di seguito l'elenco del materiale necessario per realizzare la GUI con il Raspberry Pi 4:

- Raspberry Pi 4 Model B 4GB RAM
- Modulo display LCD touch screen da 7 pollici
- Scheda MicroSD 32 GB

- Case per Raspberry Pi 4 Nero
- Adattatore AC/DC per Raspberry Pi 5.1V (3A MAX) con uscita USB Type C

Tuttavia si è preferito iniziare lo sviluppo del dispositivo utilizzando il display LCD e il tastierino numerico per semplificare la realizzazione, lasciando spazio ad una futura implementazione dell'interfaccia grafica con il Raspberry Pi, che per mancanza di tempo non è stato possibile completare. Difatti l'UI e il Controller sono totalmente indipendenti l'uno dall'altro, ciò permette di sviluppare l'UI con una qualsiasi scheda di sviluppo e/o microcontrollore e, successivamente metterla in comunicazione con il Controller tramite protocollo I^2C. In questo senso il Controller sviluppato è universale e necessità di solo 4 linee per il funzionamento: due per la comunicazione seriale e due per l'alimentazione.

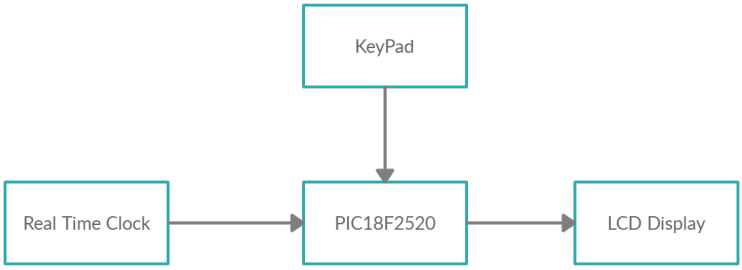


Figura 4.9: Schema a blocchi dell' User Interface

4.4.2 Software

Lo scopo principale dell'UI è quello di: eseguire delle azioni quando l'utente preme un determinato tasto, modificare i valori delle variabili e verificare costantemente che tutti i moduli siano funzionanti e operativi. Nella fase di avvio vengono effettuati una serie di controlli di sicurezza sul funzionamento dei moduli, la loro temperatura, la tensione di alimentazione, ecc. Si rimanda al Capitolo 8 per una tabella dettagliata. Nel loop principale vi è una funzione (*keypad_scanner()*) che esegue una lettura del tastierino ogni 60 ms circa e, nel caso in cui venga premuto un tasto la funzione ritorna il carattere ASCII corrispondente, altrimenti, se nessun tasto viene premuto, la funzione ritorna 'n'.

```
1     while(1) {
2
3         key = keypad_scanner();
4
5         if(key != 'n' && backlight_selection != 0) {
6             LATAbits.LATA5 = 1;
7             tmr3_cnt = 0;
8             TMR3ON = 1;
9         }
10
11        if(key == '*' && laser_setup == 0 && laser_ready_screen == 0) {
12            menu = 1;
```

```
13              Lcd_Clear();
14          }
15          else if(key == '#' && menu == 0 && laser_ready_screen == 0) {
16              laser_setup = 1;
17              Lcd_Clear();
18          }
19          else if(key == 'D' && laser_ready_screen == 1) {
20              laser_ready_screen = 0;
21              DisableController();
22              Lcd_Clear();
23          }
24
25          if(menu) {
26              main_menu();
27          }
28          else if(laser_setup) {
29              laser_settings();
30          }
31          else if(laser_ready_screen) {
32              laser_ready_page();
33          }
34          else {
35              main_page();
36          }
37
38          __delay_ms(50);
39          CLRWDT();
40      }
```

La pressione di alcuni tasti modifica i flag per la visualizzazione delle schermate come si può osservare nel codice dalla riga 11 alla riga 23. Sono presenti quattro schermate o menu principali:

- *main_menu*: menu principale che permette di modificare le impostazioni del dispositivo, controllarne lo stato e visualizzarne informazioni sulla versione.
- *laser_settings*: menu guidato per impostare i parametri del laser.
- *laser_ready_page*: questa schermata viene visualizzata solo dopo che sono state confermare le impostazione al menu *laser_settings*
- *main_page*: schermata di avvio, non appena il sistema viene avviato viene mostrata questa schermata.

All'avvio del sistema viene mostrata la schermata principale (*main_page()*) e viene visualizzata a schermo la data, l'orario e un messaggio: *"Press ENT to start"*. Questa scelta è stata dettata dal fatto che il dispositivo deve essere usato anche da persone che poco conoscono il mondo dell'elettronica, pertanto, devono essere subito in grado di attivare il sistema in sicurezza senza commettere errori e/o premere tasti a caso. L'idea è stata quella di avere un menu facilmente accessibile (*laser_settings()*) premendo, appunto, il tasto "ENT" e un menu nascosto (*main_menu()*), al quale è possibile accedere premendo il tasto ".".

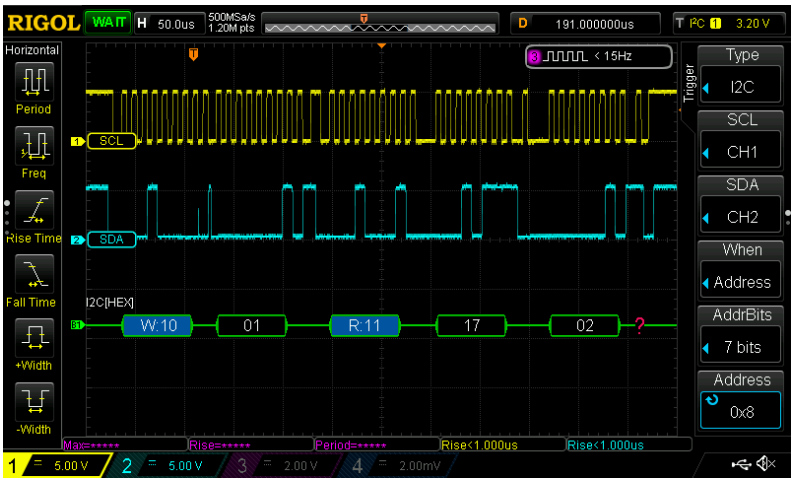


Figura 4.10: Comunicazione seriale tramite protocollo I^2C tra l'Ui e il Controller

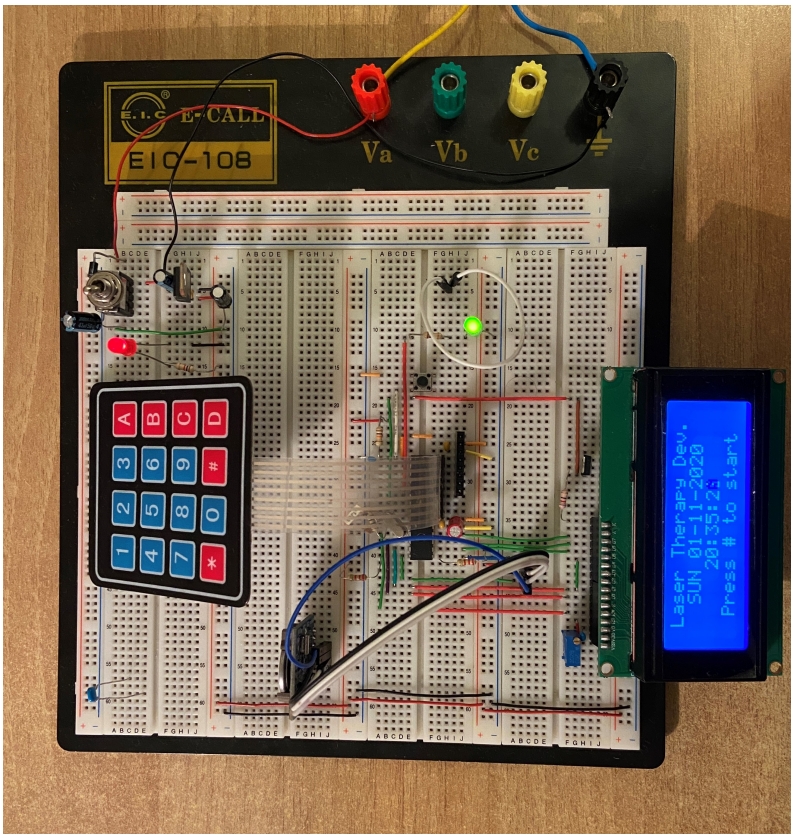


Figura 4.11: Prototipo su breadboard dell' User Interface

Quando l'utente ha inserito e confermato il set-up del laser e conferma i dati nell'apposita schermata, vengono inviati i valori inseriti al Controller tramite protocollo I^2C. In coda a questi viene anche inviato un codice di controllo per l'abilitazione del Controller, ciò significa che non è possibile attivare il laser se prima non sono state inviate le impostazioni corrette.

4.5 Controller

Il Controller realizza una sorta di collegamento tra l'UI e il Driver Laser, infatti, questo comunica con entrambi per garantire il funzionamento del dispositivo.

I compiti del Controller sono quelli di:

- monitorare le temperature del Driver e del Diodo Laser
- controllare lo stato del Driver Laser
- attivare e disattivare l'emissione del diodo laser
- interrompere l'emissione laser in caso di emergenza o in caso di rimozione della chiave di sicurezza, temperatura Driver o Diodo Laser troppo elevata, errori nel Driver Laser, tensione di alimentazione troppo bassa

4.5.1 Hardware

La gestione del Controller è affidata al PIC®16F1708 della Microchip Technology®: un microcontrollore a 8 bit che lavora anch'esso ad una frequenza di 32MHz. [16] Come detto in precedenza questo comunica sia con il Driver Laser che con l'User Interface utilizzando protocolli diversi: il primo comunica tramite seriale utilizzando lo standard RS-232, mentre il secondo, come anticipato nella sezione dedicata all'UI, utilizza il protocollo I^2C. Per comunicare con il Driver Laser il PIC®16F1708 presenta al suo interno una periferica UART adatta alla comunicazione seriale, ma i livelli di tensione in uscita non sono quelli idonei per l'RS-232. In questo caso vengono incontro particolare integrati come il MAX232A che converte i livelli di tensione dell'UART adattandoli a quelli delle specifiche elettriche per la trasmissione tramite RS-232. Allo stesso modo la periferica che gestisce la comunicazione tramite I^2C è integrata nel microcontrollore.

Particolare importanza va posta per ciò che riguarda la gestione dell'interruttore a pedale e dell'interruttore a chiave che all'interno del software generano degli interrupt, i quali vanno a modificare determinati flag di controllo. In generale tutti gli interruttori o tasti meccanici presentano una problematica comune, il rimbalzo. In termini pratici significa che la pressione di un tasto non genera soltanto una variazione dello stato logico, ma una serie indeterminata di impulsi di breve durata. Spesso questo problema è trascurabile, ma nel caso di questo dispositivo è necessario avere un hardware che sia in grado di eliminare qualsiasi rimbalzo. Si ricorda che maggiore è la dimensione dell'interruttore, maggiore sarà la durata di queste fluttuazioni. Per tale motivo è necessario prevedere un circuito di anti-rimbalzo per eliminare le problematiche sopra elencate. Per fare ciò è stato necessario introdurre un 74LS14N, integrato che contiene sei porte NOT con Trigger di Schimtt, insieme ad un resistore e un condensatore. [17]

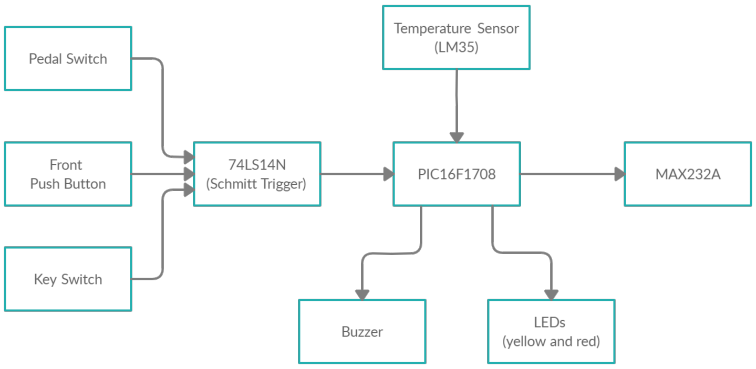


Figura 4.12: Schema a blocchi del Controller

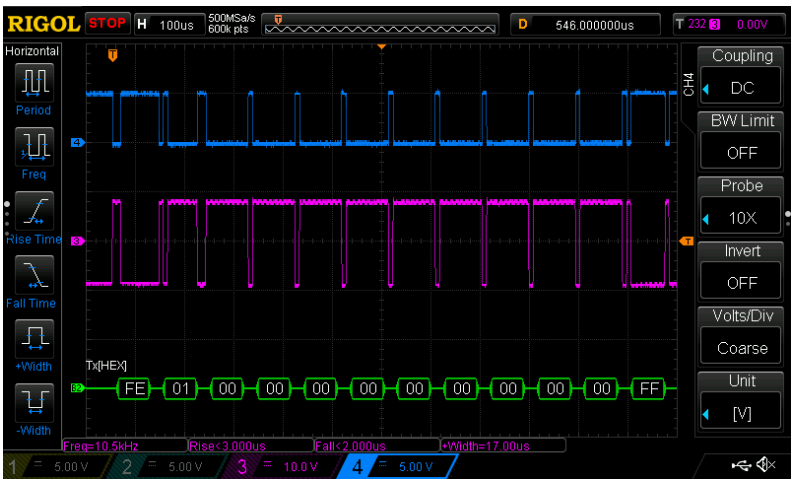


Figura 4.13: Comunicazione seriale RS-232 tra il Controller e il Driver Laser

Il Driver Laser contiene al suo interno un sensore di temperatura, il cui valore può essere letto tramite seriale, mentre il Diodo Laser non presenta alcun sensore, sarà necessario introdurne uno per monitorare la temperatura e intervenire in caso questa raggiunga valori non accettabili. Il sensore di temperatura scelto è LM35 [18], il quale presenta una tensione di uscita proporzionale alla temperatura ($10mV/$°C). L'uscita del LM35 andrà collegata ad un pin di ingresso analogico del PIC® e successivamente all'ADC interno. Prima però è necessario condizionare il segnale per adattare la dinamica di ingresso a quella dell'ADC, per questo scopo è stato utilizzato un circuito di condizionamento con l'amplificatore operazione integrato del PIC®. [19] Considerando un range di temperature che va da 0°Ca circa 60°C(massima temperatura per garantire le prestazioni del Diodo Laser), avremmo sul pin di uscita del LM35, una tensione compresa tra 0 e 600 mV. L'ADC è stato configurato via software per avere una tensione di riferimento positiva pari a 4.096 V e una tensione di riferimento negativa pari a 0 V, in questo modo la dinamica di ingresso dell'ADC è

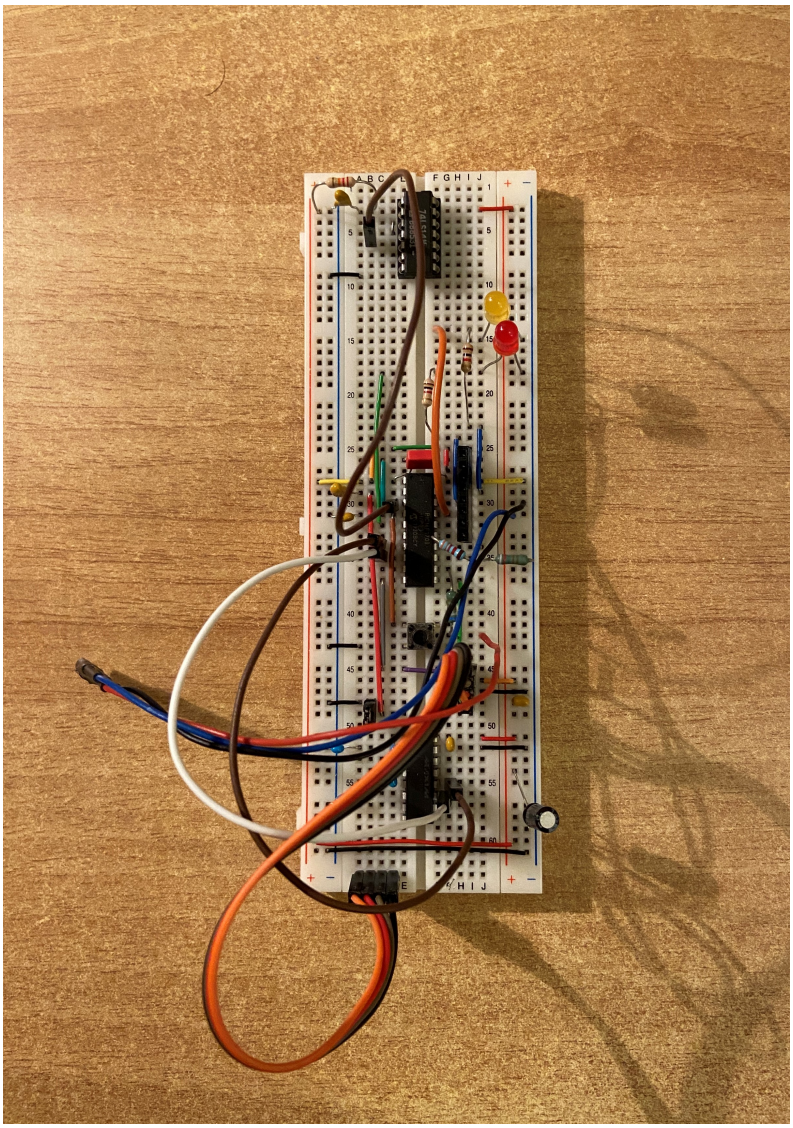


Figura 4.14: Prototipo su breadboard del Controller

compresa tra questi due valori. Da qui si può calcolare il guadagno necessario per adattare la dinamica di uscita del LM35 con quella di ingresso dell'ADC, per cui si ha:

$$A = \frac{D_{ADC}}{D_{LM35}} = \frac{5V}{0.6V} = 8.3$$

Per semplicità si sceglie $A = 8$. Sarà, pertanto, necessario amplificare il segnale di ingresso di 8 volte tramite un amplificatore operazione in configurazione non invertente (Figura 4.15) con un guadagno pari a:

$$A = 1 + \frac{R_F}{R_I}$$

Conoscendo il guadagno A rimane da dimensionare il valore dei resistori. Ponendo $R_I = 12k\Omega$, il valore di R_F sarà:

$$R_F = (A-1)) \times R_I = 7 \times 12k\Omega = 84k\Omega$$

Il valore commerciale più vicino è 82kΩper cui il guadagno effettivo sarà di:

$$A = 1 + \frac{R_F}{R_I} = 1 + \frac{82k\Omega}{12k\Omega} = 7.8$$

Inoltre è necessario inserire una resistenza all'ingresso non invertente dell'operazione di valore pari al parallelo tra R_I e R_F:

$$R_C = \frac{R_I \cdot R_F}{R_I + R_F} = \frac{12k\Omega \cdot 82k\Omega}{12k\Omega + 82k\Omega} \approx 10.46k\Omega = 10k\Omega$$

FIGURE 2: NON-INVERTING OPA

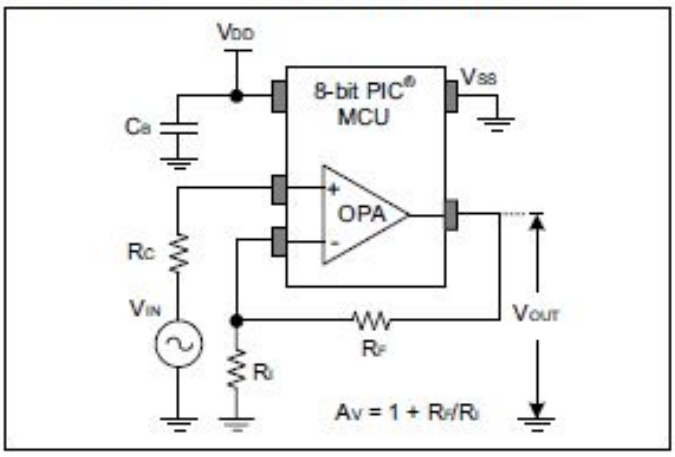


Figure 2 shows the OPA module of an 8-bit PIC microcontroller in a non-inverting configuration. The input signal is fed directly to the non-inverting input of the amplifier. Resistors RF and RI determine the Closed Loop Voltage Gain (ACL). CB acts as a decoupling/ bypass capacitor to reduce the noise in the circuitry. RC, whose value is equal to the parallel combination of RF and RI, is a bias compensating resistor to reduce the effects of bias currents at the input. The transfer characteristic of this op amp configuration is shown in Figure 3.

Figura 4.15: Schema amplificatore operazione in configurazione non invertente [19]

4.5.2 Software

Il Controller, quando il dispositivo viene accesso, inizia la fase di inizializzazione per configurare il Driver Laser alla comunicazione seriale. Dopodiché il programma entra nel loop principale all'interno del quale vengono costantemente letti l'ID del driver, lo stato degli interruttori, le temperature di Diodo e Driver e, ancora, la tensione di alimentazione. Se uno di questi parametri non è all'interno del range di valori consentiti il Controller forza lo spegnimento del Driver, se questo è attivo. Il resto del programma attende che l'utente, tramite l'User Interface, inserisca i parametri per l'emissione del Diodo Laser. Si precisa che se l'utente non ha impostato questi valori non è possibile avviare l'emissione anche se la chiave si trova in posizione ON e viene premuto il tasto di avvio emissione. Quando l'UI invia i parametri impostati il Controller viene abilitato, ciò significa che la pressione del pedale attiva l'emissione del raggio laser. In base alla modalità scelta si avrà un'emissione continua o pulsata, quest'ultima è gestita da un timer che accende e spegne il Driver Laser secondo la frequenza e il duty cycle impostati. Indipendentemente dalla modalità scelta all'avvio dell'emissione, parte un timer per calcolare il tempo di attivazione del Driver Laser che verrà poi visualizzato sul display dell'UI e utilizzato per il calcolo dell'energia ceduta al tessuto. Sono state previste due modalità di funzionamento:

- **Standard Mode:** dopo che il Controller è stato abilitato, premendo il pedale si attiva l'emissione del Diodo Laser che termina quando questo viene rilasciato
- **Timer Mode:** dopo che il Controller è stato abilitato, premendo il pedale si avvia un timer che garantisce l'emissione per un periodo di tempo, precedentemente impostato, anche se il pedale viene rilasciato. Per interrompere l'emissione prima dello scadere del timer basta premere nuovamente il pedale

Sono state ideate tre routine principali per la gestione del Driver:

- *force_on()*: imposta la corrente di setpoint e forza l'abilitazione del Driver.
- *force_off()*: forza lo spegnimento del Driver e reinizializza tutte le variabili utilizzate
- *off()*: forza lo spegnimento del Driver e senza reinizializzare le variabili utilizzate (utilizzato in PW per spegnere il Driver)

```
1     while (1)
2     {
3         StatusReg.key_switch = IO_RA5_GetValue() ? 0:1;
4         StatusReg.laser_switch = IO_RA4_GetValue() ? 0:1;
5         StatusReg2.pedal_switch = IO_RC5_GetValue() ? 1:0;
6
7         //condition ? value_if_true : value_if_false
8
9         StatusReg.driver_id = Check_LDP_CW() ? 1:0;
10        StatusReg.driver_err = Error_LDP_CW() ? 0:1;
11
12        Get_LDP_CW_Temp();
13        StatusReg.driver_overtemp = driver_temp > 550 ? 1:0;
14        Get_LDP_CW_Vcc();
15        StatusReg.driver_undervolt = driver_vcc < 110 ? 1:0;
```

```
16          GetDiodeTemp();
17          StatusReg.diode_overtemp = diode_temp > 550 ? 1:0;
18
19          if(StatusReg.driver_overtemp || StatusReg.driver_undervolt ||
20                  StatusReg.diode_overtemp || StatusReg.driver_err) {
21              force_off = 1;
22              IO_RA1_SetHigh();
23          }
24
25          if(key_pressed && StatusReg.key_switch && controller_en == 0x2C) {
26              if(mode && !T4CONbits.TMR4ON) {     //PW mode
27                  TMR4_StartTimer();
28                  TMR1_StartTimer();
29              }
30              else if(!mode && !StatusReg.driver_enable) {     //CW mode
31                  TMR1_StartTimer();
32                  force_on = 1;
33              }
34          }
35          else if(key_pressed2) {
36              key_pressed2 = 0;
37              if(!timer_mode || tmr1_off_en)
38                  force_off = 1;
39          }
40          else {
41              key_pressed = 0;
42          }
43
44          if(!timer_mode && StatusReg.driver_enable) {
45              if(IO_RA4_GetValue()) {
46                    force_off = 1;
47                    key_pressed = 0;
48              }
49          } //what about the timer mode?
50
51          if(force_on) {
52              force_on = 0;
53              laser_timer = 0;
54              if(Set_LDP_CW(power)) {
55                  if(Enable_LDP_CW()) {
56                      PWM3CONbits.PWM3EN = 1;
57                      IO_RA0_SetHigh();
58                      StatusReg.driver_enable = 1;
59                      __delay_ms(80);
60                      PWM3CONbits.PWM3EN = 0;
61                  }
62              }
63          }
64
65          if(off) {
66              if(Disable_LDP_CW()) {
67                  IO_RA0_SetLow();
68                  off = 0;
69                  StatusReg.driver_enable = 0;
70              }
```

```
71          }
72
73          if(force_off) {
74              if(Disable_LDP_CW()) {
75                  PWM3CONbits.PWM3EN = 1;
76                  IO_RA0_SetLow();
77                  StatusReg.driver_enable = 0;
78                  force_off = 0;
79                  key_pressed = 0; //check!
80                  if(T1CONbits.TMR1ON) {
81                      tmr1_off_en = 0;
82                      TMR1_StopTimer();
83                      TMR1_Reload();
84                  }
85                  if(T4CONbits.TMR4ON) {
86                      TMR4_StopTimer();
87                      TMR4 = 0x00;
88                  }
89                  __delay_ms(180);
90                  PWM3CONbits.PWM3EN = 0;
91              }
92          }
93          __delay_ms(100);
94      }
```

Per quanto riguarda la comunicazione tra il Controller e l'UI è necessario chiarire alcuni punti. Come si è detto il Controller agisce come uno *Slave* nel bus I^2C, ciò significa che devono essere predisposti dei registri accessibili, tramite il protocollo sopra citato, per impostare dei valori o leggerne altri. Le tabelle che seguono danno una spiegazione dettagliata dei registri accessibili tramite I^2C. La prima tabella indica i registri di sola scrittura, mentre la seconda quelli di sola lettura.

Indirizzo Registro	**Nome Registro**	**Descrizione**
0x10	Modalità emissione	Quando viene scritto il valore 1 su questo registro viene attivata la modalità PW. Il valore di default è 0 che corrisponde alla modalità CW
0x11	Potenza ottica	Numero compreso tra 5 e 200 che indica la corrente di setpoint del Driver Laser. La conversione in corrente-potenza ottica deve essere gestita dall'UI
0x12	Frequenza	In modalità PW indica la frequenza degli impulsi.
0x13	Duty Cycle	In modalità PW indica il rapporto tra il tempo in cui il laser è attivo e il tempo in cui il laser è spento
0x14	Modalità Timer	Quando viene scritto il valore 1 su questo registro viene attivata la modalità Timer. Il valore di default è 0 che corrisponde alla modalità Timer spenta
0x15	Timer laser Low Byte	Se attivata la modalità Timer permette di scegliere il tempo di emissione del laser
0x16	Timer laser High Byte	Se attivata la modalità Timer permette di scegliere il tempo di emissione del laser
0x17	Abilitazione Controller	Byte codificato che abilita l'emissione laser

Indirizzo Registro	**Nome Registro**	**Descrizione**
0x01	Identificativo Controller	La lettura di questo registro ritorna sempre il valore 0x17
0x02	Registro di Stato Low Byte	La lettura di questo registro ritorna il valore dello Status Register (vedi Tabella descrizione Registro di Stato)
0x03	Registro di Stato High Byte	La lettura di questo registro ritorna il valore dello Status Register (vedi Tabella descrizione Registro di Stato)
0x04	Temperatura Driver Laser	La lettura di questo registro ritorna il valore di temperatura del Driver Laser (con incrementi di 0.1℃)
0x05	Modalità Timer	La lettura di questo registro ritorna il valore di temperatura del Driver Laser (a passi di 0.1℃)
0x06	Tensione di Alimentazione Low Byte	La lettura di questo registro ritorna il valore della tensione del Driver Laser (a passi di 0.1 V)
0x07	Tensione di Alimentazione High Byte	La lettura di questo registro ritorna il valore della tensione del Driver Laser (a passi di 0.1 V)
0x08	Timer Laser Low Byte	La lettura di questo registro ritorna il valore del Timer Laser (a passi di 200 ms)
0x09	Timer Laser High Byte	La lettura di questo registro ritorna il valore del Timer Laser (a passi di 200 ms)

Indirizzo Registro	**Nome Registro**	**Descrizione**
0x0A	Temperatura Diodo Laser Low Byte	La lettura di questo registro ritorna il valore della temperatura del Diodo Laser (a passi di 0.1℃)
0x0B	Temperatura Diodo Laser High Byte	La lettura di questo registro ritorna il valore della temperatura del Diodo Laser (a passi di 0.1℃)

Come la maggior parte dei moduli elettronici che comunicano tramite seriale si è previsto per il Controller uno Status Register. Questo registro, la cui lettura è possibile tramite I^2C, indica lo stato del sistema ed è utile all'UI per comunicare all'utente se vi sono errori e/o malfunzionamenti. Il registro, come tutti gli altri, è a 8 bit e nella tabella seguente viene descritto il significato di ogni singolo bit.

Bit	Nome	Descrizione
0	Driver ID	Se il Controller è riuscito a comunicare con il Driver questo bit viene settato a 1, altrimenti a 0
1	Driver Error	Se il Controller rileva la presenza di errori sul Driver Laser questo bit viene settato a 1
2	Driver Enable	Quando il Driver è attivo, cioè il laser sta emettendo, questo bit viene settato a 1. Quando il Driver viene disattivato il bit ritorna a 0
3	Driver Overtemperature	Quando il Driver supera la temperatura di 55℃ questo bit viene settato a 1
4	Driver Undervoltage	Quando il Driver rileva una tensione inferiore a 11 V questo bit viene settato a 1
5	Diode Overtemperature	Quando il Diodo Laser supera la temperatura di 40℃ questo bit viene settato a 1
6	Key Switch	Questo bit viene settato a 1 quando il comando a chiave è impostato su ON
7	Pedal Switch	Questo bit viene settato a 1 quando lo switch a pedale viene premuto

4.6 Scheda di sicurezza a relè

Come ulteriore misura di sicurezza è stata introdotta una scheda a relays per interrompere l'alimentazione del diodo laser in situazione di emergenza. Può infatti capire che il sistema si blocchi e non risponda più ai comandi o, che il pulsante a pedale si guasti e rimanga sempre attivo o, ancora che il cavo si scolleghi durante l'uso. Tutte queste situazioni non permettono di terminare l'emissione del raggio laser in condizioni di sicurezza. Prendendo spunto dal manuale del LDP-CW 20-50 [20] è stata realizzata una scheda con due relays da 8 A in parallelo e un circuito di controllo per comunicare al Controller l'attivazione o meno del tasto di STOP. In caso di emergenza premendo il tasto di STOP o arresto d'emergenza, viene tolta alimentazione alle bobine dei relays che, nel giro di qualche decina di millisecondi, aprono il contatto e interrompono l'alimentazione del diodo laser.

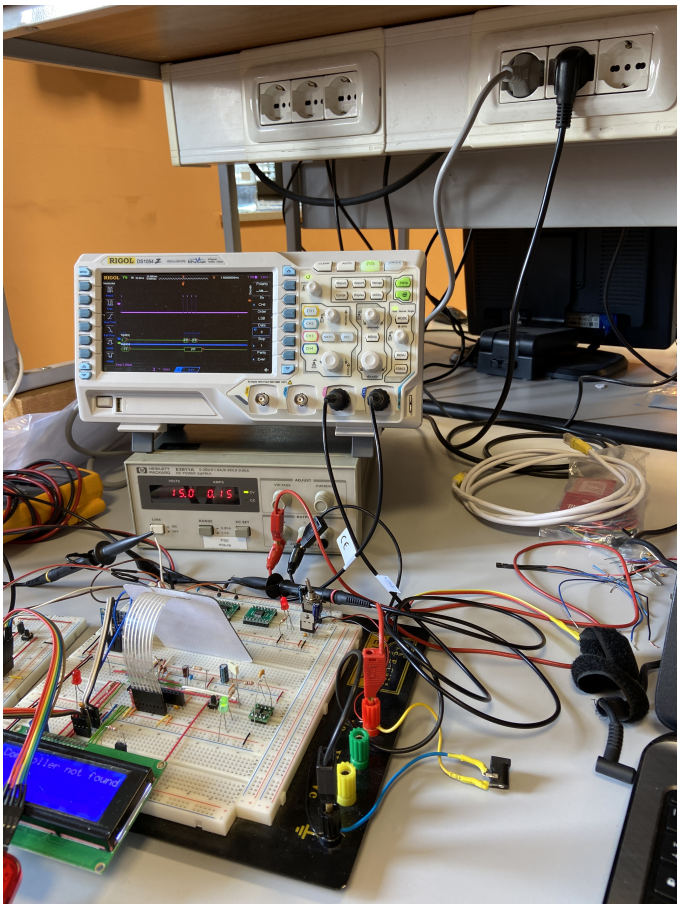


Figura 4.16: Test del dispositivo completo

4.7 Montaggio finale

Dopo aver completato il prototipo su breadboard della parte hardware e software del dispositivo, è stato realizzato un circuito stampato (PCB) tramite un software di progettazione dedicato: Altium Designer®. A tal fine si vedano le Appendici per maggiori dettagli sul PCB realizzato e schemi elettrici. La produzione del circuito stampato è stata affidata ad un'azienda specializzata nella realizzazione di circuiti stampati.

La fase successiva della realizzazione, nonché quella finale, consiste nell'inscatolamento di tutti i moduli all'interno di un contenitore compatto e di design in alluminio anodizzato, il 92865300.MT1 della serie Alu-Topline prodotto da Bopla.

Nella Figura 4.19 si può osservare la disposizione delle varie parti sulla parte frontale del contenitore. Questa fase è stata molto delicata e impegnativa, in quanto è stato necessario prevedere tutti i possibili ingombri dei componenti sia all'esterno che all'interno del contenitore per evitare posizionamenti errati che non avrebbero permesso la chiusura del contenitore.

All'interno del contenitore sono stati posizionati il circuito stampato, la batteria, il

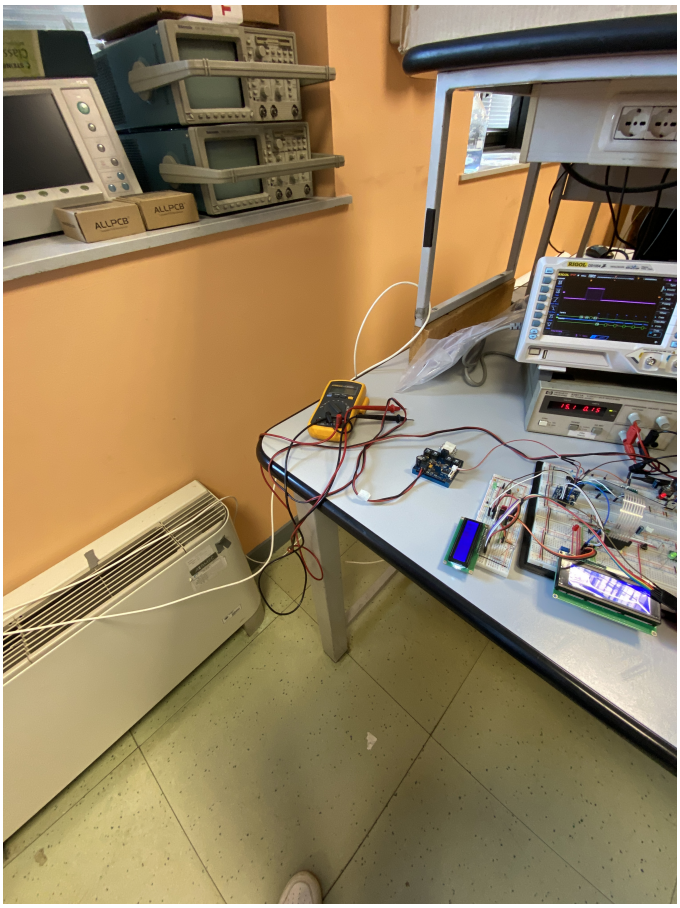


Figura 4.17: Test del dispositivo

Driver Laser, la scheda di sicurezza a relays e il Diodo Laser. In particolare quest'ultimo (Figura 4.23) è stato fissato alla parte posteriore del contenitore utilizzando una piastrina di alluminio, sulla quale è stato inserito il sensore di temperatura LM35, e due viti filettate di fissaggio. L'introduzione di due molle per serrare il diodo laser è di particolare importanza per mantenere un fissaggio stabile anche in caso di dilatazioni termiche. Prima del montaggio il diodo laser è stato ricoperto con pasta termica per favorire la dissipazione del calore generato. Durante le prove di collaudo è stato verificato che la temperatura del diodo laser non supera in 27℃, ciò era facilmente prevedibile dal momento che la superficie di alluminio del contenitore contribuisce alla dissipazione del calore con la sua resistenza termica.

Nella vista interna del dispositivo alla Figura 4.20 è possibile osservare la disposizione interna dei vari moduli. Tale disposizione è stata preventivamente pianificata attraverso un software CAD 3D per prevedere l'ingombro dei singoli moduli ed ottimizzare lo spazio interno.

Nelle Figure 4.24 e 4.25 si possono osservare le serigrafie realizzate mediante un software

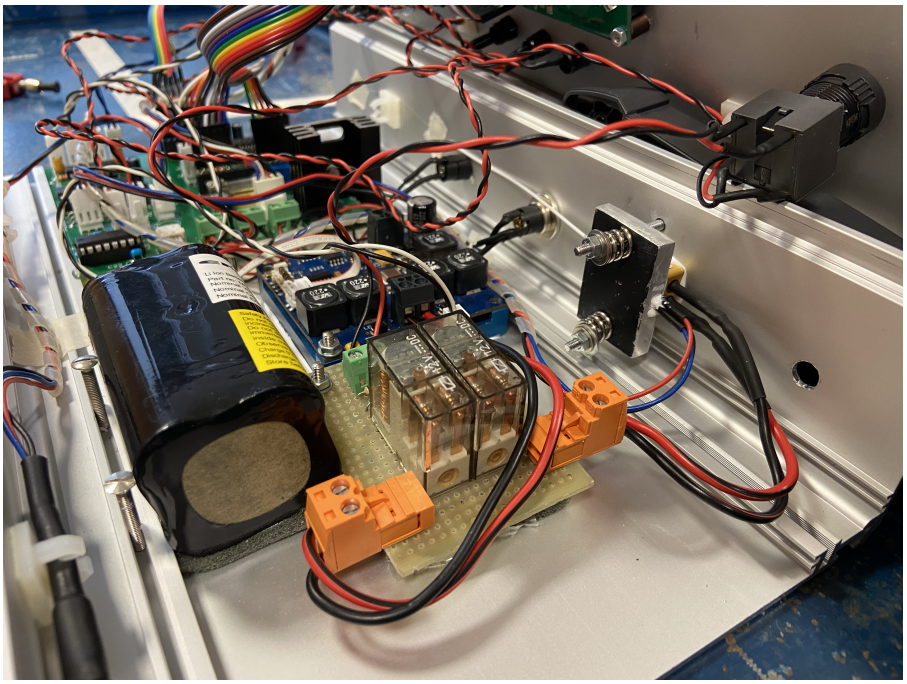


Figura 4.18: Dettaglio scheda di sicurezza a relays realizzata su millefori

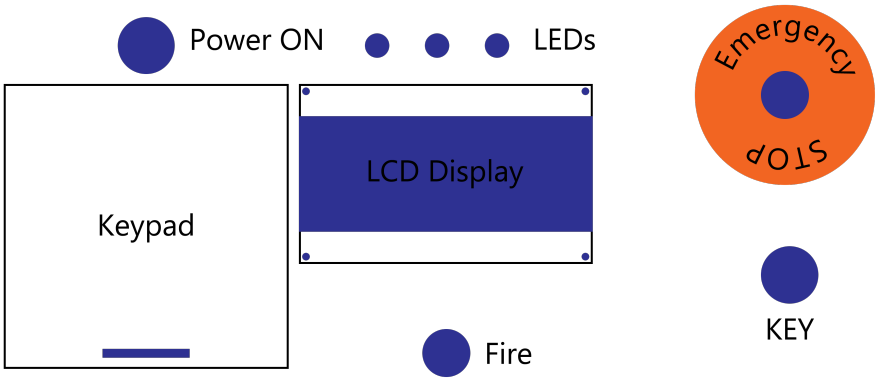


Figura 4.19: Disposizione frontale dei componenti sul contenitore

di grafica. Le grafiche cosi realizzzate sono stampate su carta lucida adesiva e poi posizionate sulla parte frontale e posteriore del contenitore. In particolare nella serigrafia frontale (Figura 4.24) si può osservare la presenza al centro del display LCD, del comando a chiave e del pulsante di arresto emergenza sulla destra. Sulla parte sinistra è stato posizionato il tastierino numerico, mentre in alto sono stati fissati tre diodi LEDs per indicare lo stato del sistema:

- LED verde per indicare che il sistema ha superata i controlli iniziali ed è pronto per

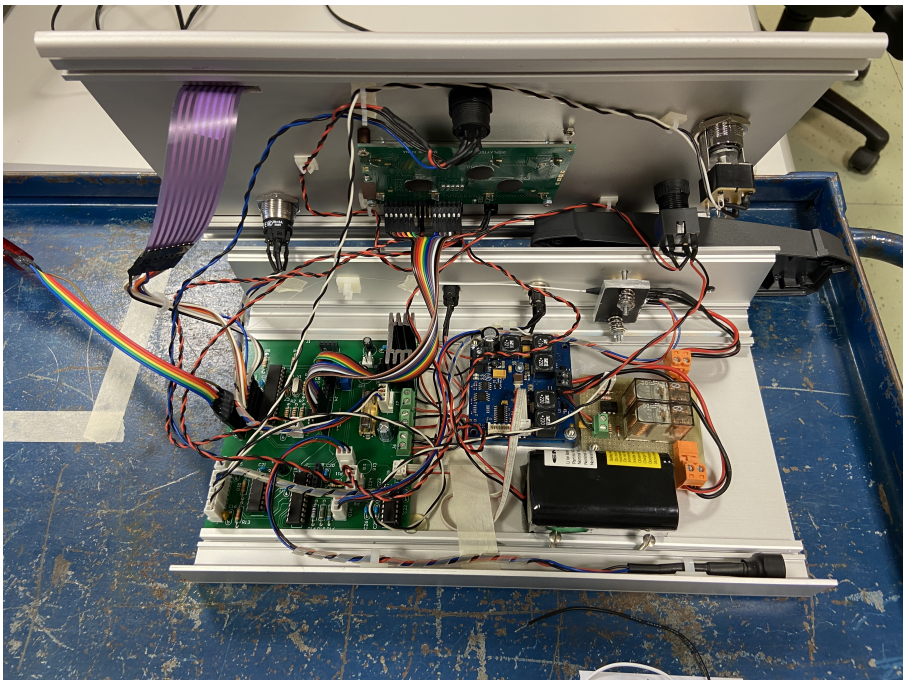


Figura 4.20: Vista interna del dispositivo

funzionare

- LED giallo per indicare l'emissione del fascio laser
- LED rosso per indicare una situazione di errore dovuto a malfunzionamento del sistema

Al centro, appena sotto il display LCD, è presente il tasto **"FIRE"** per avviare o terminare l'emissione laser, tale tasto è collegato in parallelo con il comando a pedale, ciò significa che l'utente poi indifferentemente decidere se utilizzare il tasto sul dispositivo o il comando a pedale.

Per quanto riguarda la serigrafia posteriore (Figura 4.25) si possono osservare i due connettori: uno per la ricarica della batteria e uno per il comando a pedale; entrambi sono individuati da simboli che permettono all'utente di distinguerli facilmente. Sulla sinistra è presente il connettore SMA-905 per collegare la fibra di delivery.

4.8 Considerazioni finali

La Figura 4.26 e la Figura 4.27 mostrano il prodotto finito e assemblato, pronto per essere utilizzato. Termina così la lunga e complessa realizzazione del dispositivo oggetto di questa tesi. Sicuramente è di grande effetto vedere come dall'idea su carta, si possa passare pian piano alla realizzazione finale. Tante possono essere le migliorie da apportare, dall'interfaccia grafica con Raspberry Pi e schermo touchscreen all'ottimizzazione del software, ma

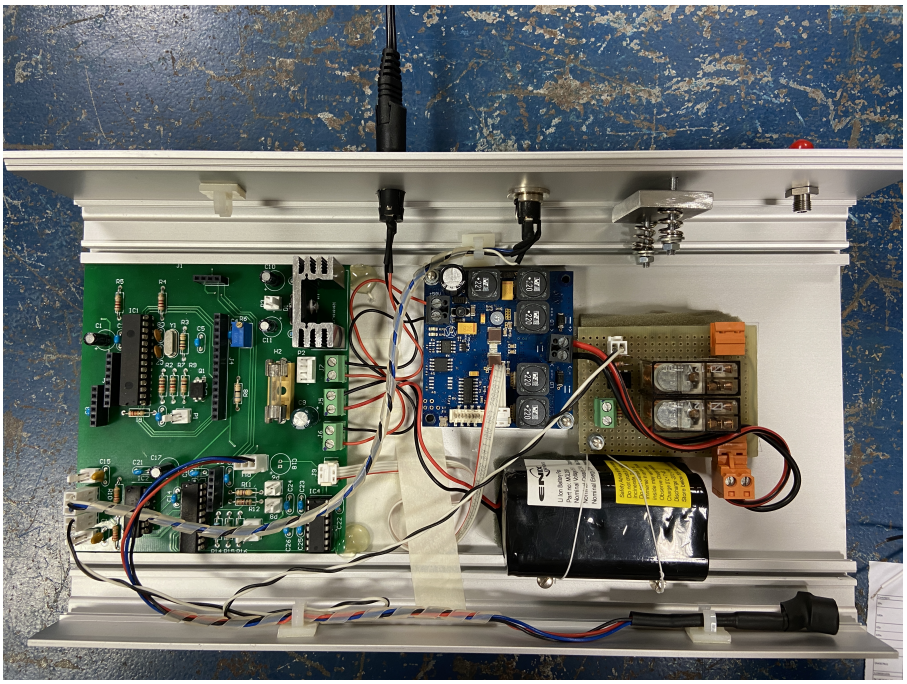


Figura 4.21: Dettaglio disposizione interna dei vari moduli

il risultato ottenuto è stato ottimo considerando l'immensa mole di lavoro dietro ad una realizzazione così complessa. Raggiungere la fine di un lavoro cosi strutturato è sicuramente motivo di grande soddisfazione nonostante tutte le difficoltà incontrate durante il percorso, il quale è stato reso più semplice grazie al contributo tecnico-pratico del Prof. Alberto Vallan e i consigli del Prof. Guido Perrone, ai quali non posso che rinnovare il mio grazie per il supporto dato.

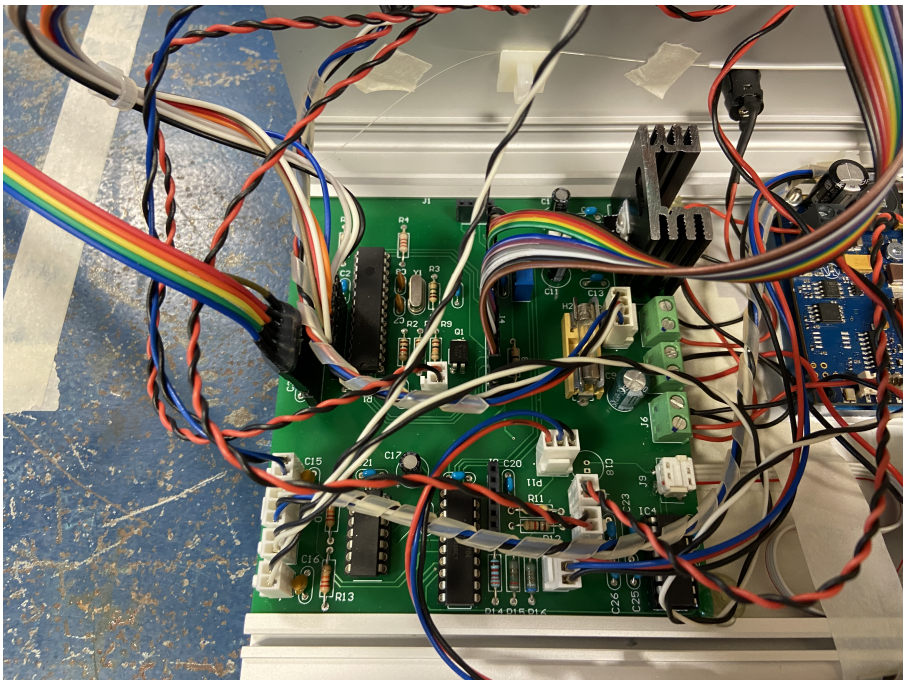


Figura 4.22: Dettaglio PCB montato (User Interface + Controller + Power Supply)

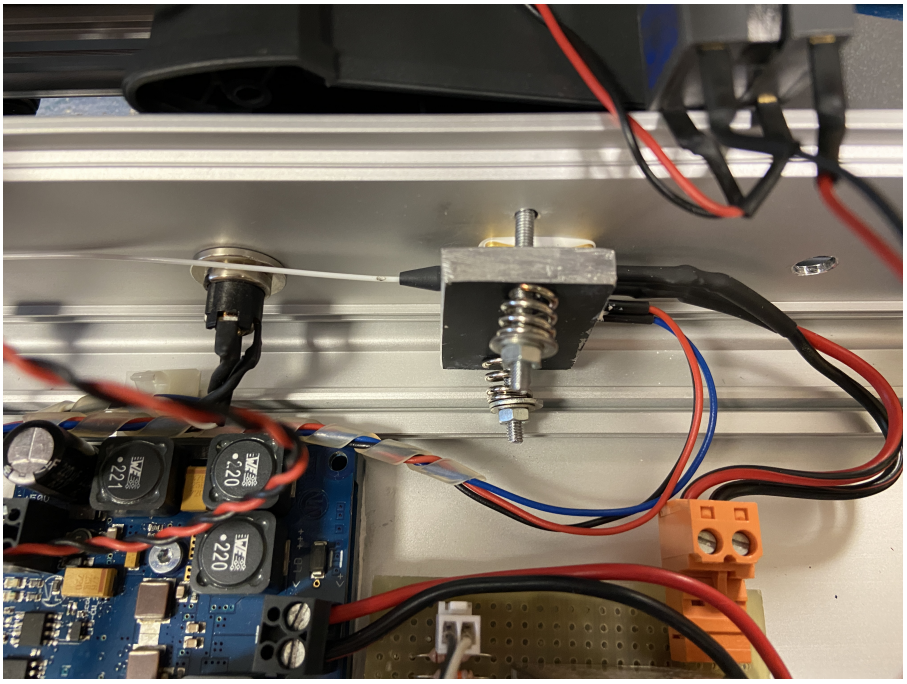


Figura 4.23: Dettaglio fissaggio del diodo laser all'involucro

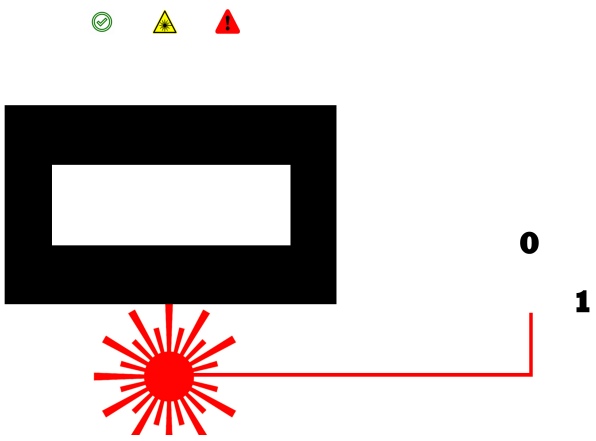


Figura 4.24: Serigrafia finale della parte frontale

Figura 4.25: Serigrafia finale della parte posteriore

Figura 4.26: Vista frontale del dispositivo finale

Figura 4.27: Vista dal retro del dispositivo finale

Capitolo 5

Prove di Ablazione Termica

Per testare il funzionamento del dispositivo nell'applicazione per la quale è stato realizzato sono state fatte delle prove di ablazione termica laser su un campione di fegato bovino, il quale presenta dei valori dei coefficienti di assorbimento e scattering molto simili a quello umano.

5.1 Set-up di misura

Il dispositivo realizzato è stato utilizzato per emettere il fascio laser a 915 nm, mentre per la rilevazione delle temperature sul campione è stato utilizzato un interrogatore per sensori di temperatura in fibra a reticolo di Bragg, il Micron Optics Hyperion prodotto da LUNA Innovations. Per irradiare il tessuto è stata utilizzata una fibra di *delivery* con diametro di 200 µm collegata al diodo laser per mezzo di un connettore SMA-905. Sono state effettuate due prove.

5.2 Risultati - Prima prova

In questa prova è stato emesso mezzo Watt di potenza ottica per un tempo di 180 s in modalità continua (CW). Il tessuto irradiato ha raggiunto una temperatura massima di poco inferiore a 60℃, ottenendo così la denaturazione delle proteine e una coagulazione del tessuto (Figura 5.5 e Figura 5.6)

5.3 Risultati - Seconda prova

In questa prova sono stati emessi 2 W di potenza ottica per 180 s in modalità continua (CW). Dall'analisi dei risultati si osserva che il tessuto irradiato presenta una zona circolare di diametro circa 5 mm dove questo si è carbonizzato (Figura 5.10). I grafici dell'andamento della temperatura ottenuti dai reticoli di Bragg indicano che in prossimità del punto di emissione la temperatura raggiunta è stata intorno a 85℃.

Figura 5.1: Set-up della prova di ablazione termica laser

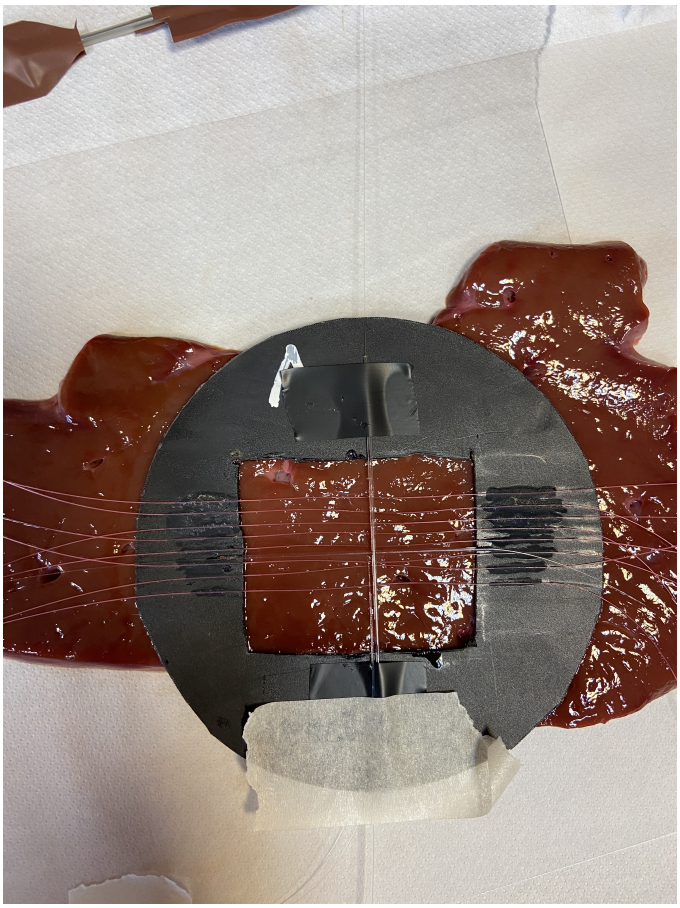


Figura 5.2: Vista delle fibre ottiche con reticoli di Bragg e la fibra di *delivery*

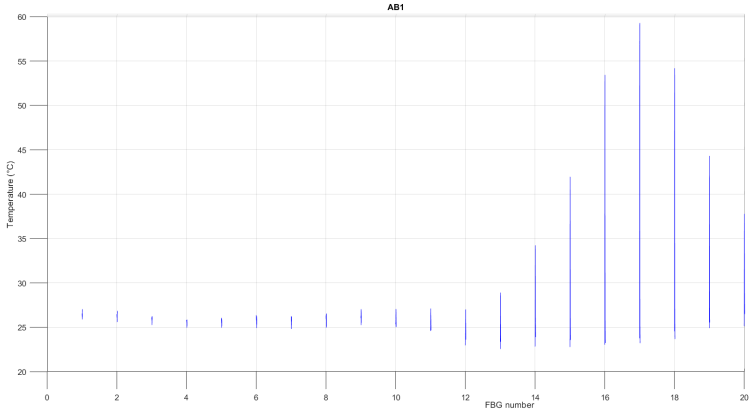


Figura 5.3: Grafico che mostra la massima temperatura raggiunta da ogni singolo reticolo

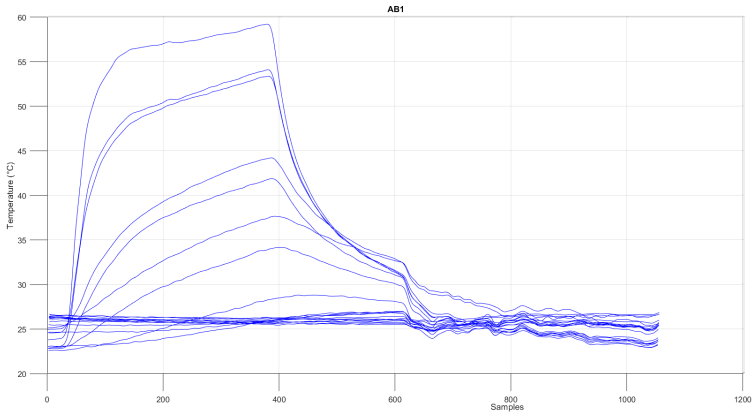


Figura 5.4: Grafico che mostra l'andamento della temperatura in funzione del tempo. Ogni curva rappresenta un reticolo di Bragg

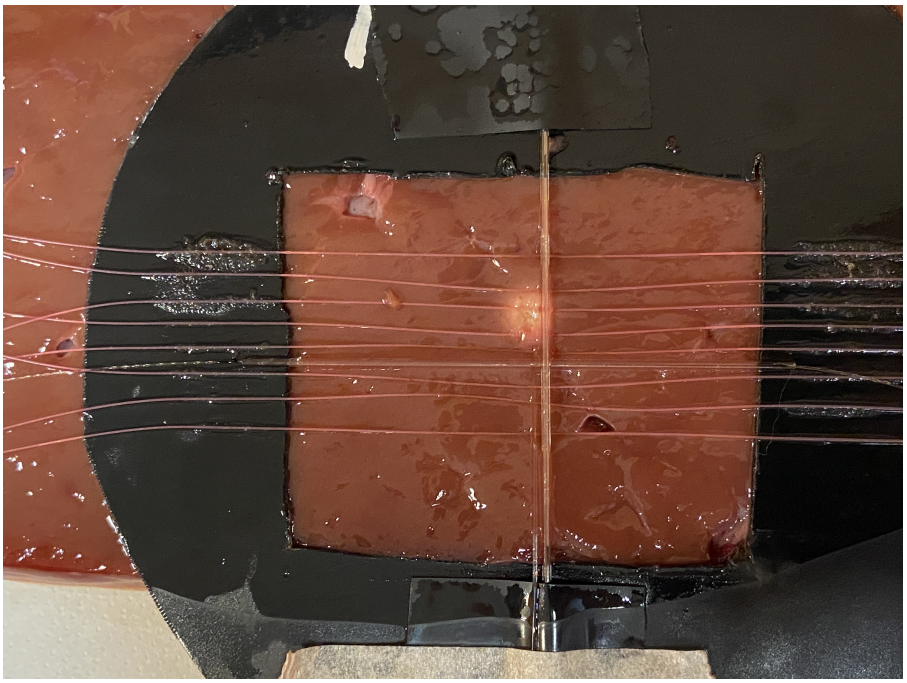


Figura 5.5: Particolare della zona di ablazione nella prima prova

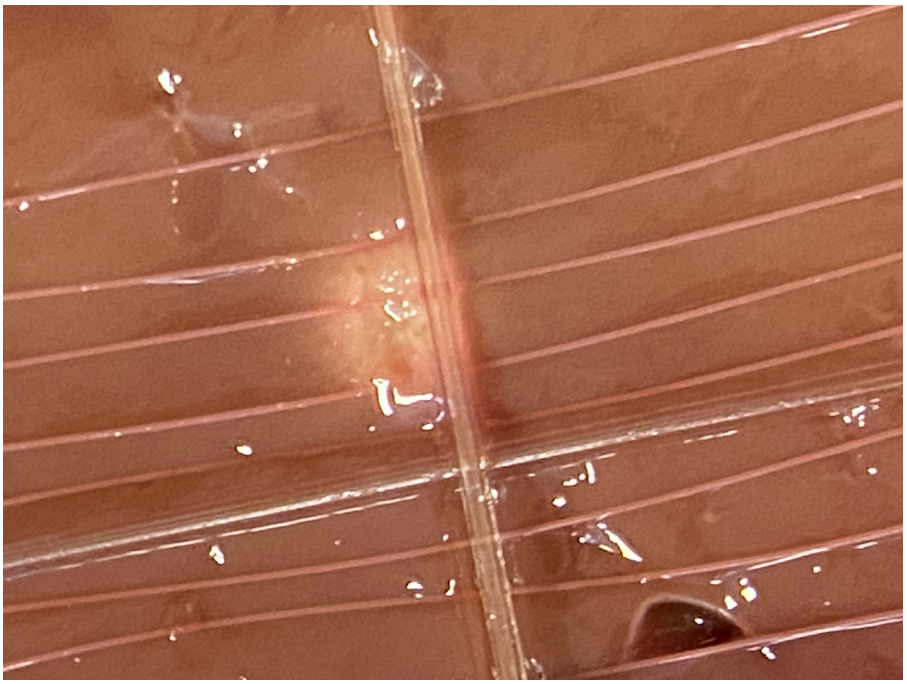


Figura 5.6: Particolare della zona di ablazione nella prima prova

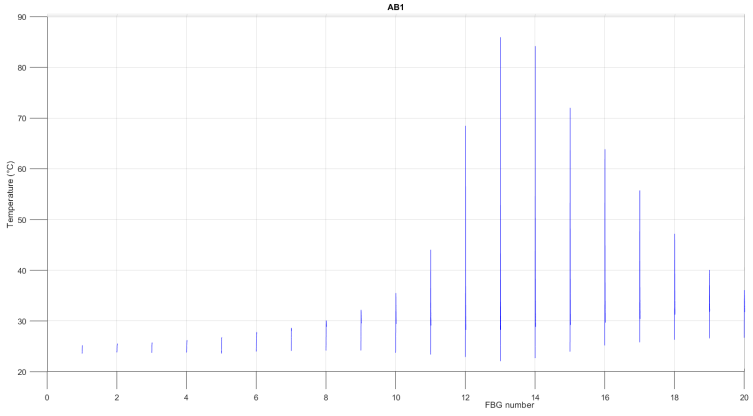


Figura 5.7: Grafico che mostra la massima temperatura raggiunta da ogni singolo reticolo

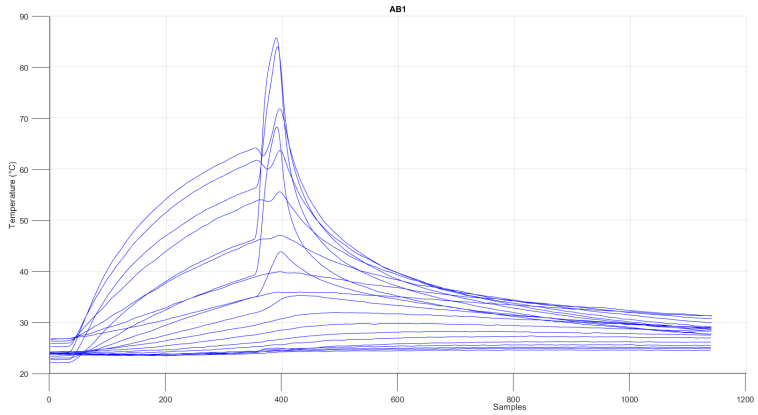


Figura 5.8: Grafico che mostra l'andamento della temperatura in funzione del tempo. Ogni curva rappresenta un reticolo di Bragg

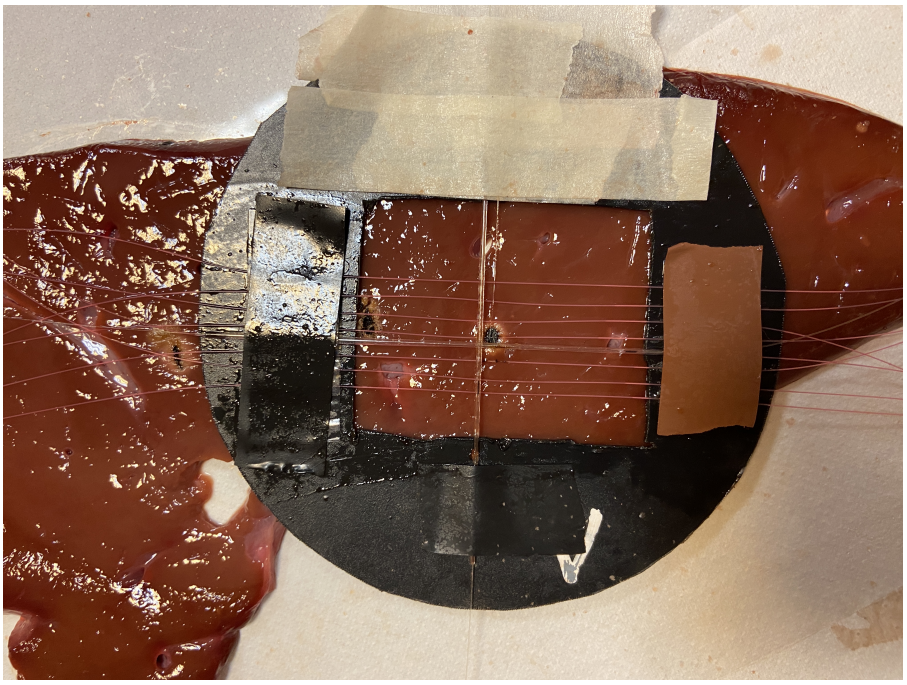


Figura 5.9: Particolare della zona di ablazione nella seconda prova dove si può osservare una carbonizzazione del tessuto

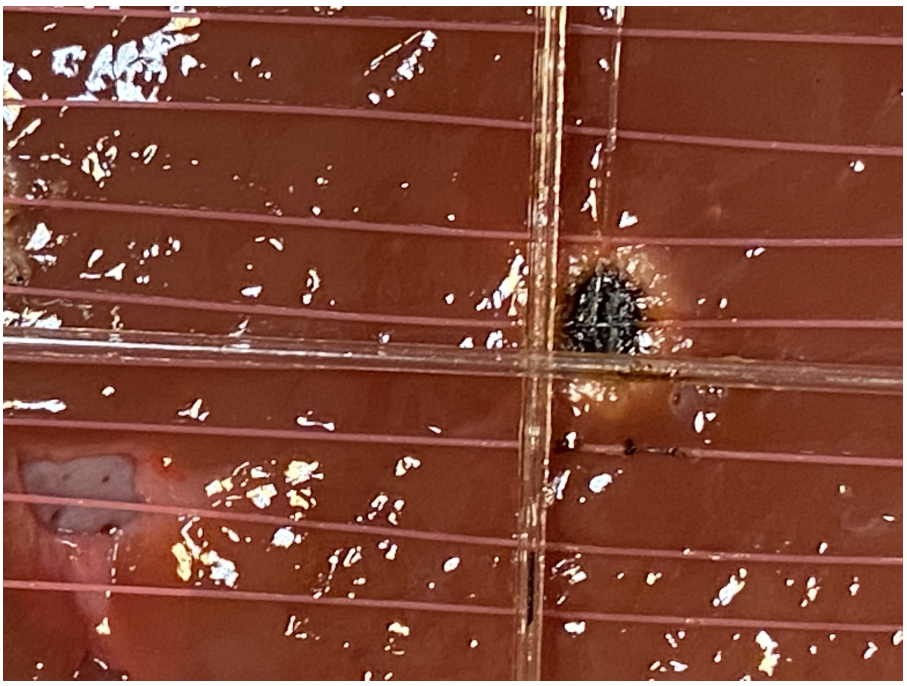


Figura 5.10: Particolare della zona di ablazione nella seconda prova dove si può osservare una carbonizzazione del tessuto

Capitolo 6

Simulazioni MATLAB®

Per prevedere la distribuzione di temperatura all'interno dei tessuti in seguito all'irradiazione sono state fatte delle simulazioni con il ToolBox Partial Differential Equation (PDE) di MATLAB®. Tale strumento permette di risolvere equazioni differenziali mediante l'analisi agli elementi finiti. Le simulazioni risultano di fondamentale importanza non solo per conoscere la distribuzione di temperatura all'interno del tessuto, ma anche per comprendere come il calore si trasferisce per conduzione nei tessuti adiacenti e prevedere il danno biologico. A temperature maggiori corrisponderà un danno cellulare maggiore, ma bisogna anche considerare il tempo di esposizione.

L'equazione che descrive la conduzione del calore all'interno di un tessuto è la BioHeat Transfer Equation di Pennes [21]:

$$\rho Cp\frac{\partial T}{\partial t} = k\nabla^2 T + Q_{laser} + \omega_b C_b \rho_b \left(T - T_b\right) + Q_m$$

dove T è la temperatura del tessuto, ρ, Cp e k sono rispettivamente la densità di massa (kg/m^3) , il calore specifico per unità di massa $(J/\left(K \cdot Kg\right))$ e la conducibilità termica $(W/\left(K \cdot m\right))$. Q_m e Q_{laser} sono rispettivamente i flussi termici (W/m^3) dovuti al metabolismo e all'irradiazione del laser, mentre il termine $\omega_b C_b \rho_b \left(T - T_b\right)$ modella la dissipazione del calore causato dalla perfusione sanguigna.

Tuttavia per semplificare la risoluzione del problema si può trascurare l'effetto del metabolismo Q_m e quello della perfusione sanguigna, in questo modo, l'equazione precedente diventa:

$$\rho Cp\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q_{laser}$$

Il ToolBox PDE è in grado di risolvere equazioni differenziali di questo tipo. Per la simulazione si è scelto di utilizzare il fegato come tessuto sul quale determinare la distribuzione di temperatura. Il calore specifico del fegato è 3600 $J/(Kg \cdot K)$, la conducibilità termica è 0.57 $W/(m \cdot K)$ e la densità di massa è 1060 Kg/m^3. Inoltre è necessario conoscere anche il coefficiente di assorbimento $\alpha = 76\ 1/m$, il coefficiente di scattering $\alpha_s = 10015\ 1/m$ e il coefficiente di anisotropia $g = 0.9$ [22]

6.1 Simulazioni 2D

Per prima cosa si deve definire il modello da utilizzare per l'analisi: nel nostro caso si vuole studiare il trasferimento di calore per cui è stato scelto il modello *"thermal"* del ToolBox in regime transitorio.

```
%% Create a transient thermal model.
thermalmodelT = createpde('thermal','transient');
```

Va definita, successivamente, la geometria del modello (Figura 6.1): un quadrato di lato 10 cm dal quale è stata rimossa la sezione circolare della fibra ottica che trasporta il fascio laser (raggio di 0.5µm).

```
%% Include the geometry in the model.
gd =
    [3,4;4,0;-0.05,0;0.05,0.00005;0.05,0.00005;-0.05,0;0.05,0;0.05,0;-0.05,0;-0.05,0];
ns = [82,69;49,49];
sf = 'R1+E1';
g = decsg(gd,sf,ns);
geometryFromEdges(thermalmodelT,g);
%% Show the model geometry
figure,
pdegplot(thermalmodelT,'EdgeLabels','on','FaceLabels','on')
axis equal
saveas(gcf, "geometry.png");
%% Assign thermal properties of the material to the model.
```

Le proprietà termiche, ovvero, il calore specifico c, la densità di massa ρ e la conducibilità termica k fanno riferimento al fegato.

```
k = 0.52;    % Conducibilita termica del fegato
c = 3450;    % Calore specifico del fegato
rho = 1079; % Densita media del fegato

thermalProperties(thermalmodelT,'ThermalConductivity',k,'MassDensity',rho,...
    'SpecificHeat',c);
%% Specify internal heat sources Q within the geometry.
```

Il flusso di calore esterno Q_{laser} viene valutato secondo l'equazione: [23]

$$Q_{laser} = \alpha \cdot I\left(x, y\right) \cdot e^{\alpha \cdot z}$$

dove, nel caso CW, il fascio laser viene modellizzato con una distribuzione gaussiana 2-D:

$$I\left(x, y\right) = I_0 \cdot e^{\frac{-\left(x^2+y^2\right)}{2 \cdot \sigma^2}}$$

con $\sigma = \frac{r_0}{3}$ e $I_0 = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2}$ dove P è la potenza ottica (W) e r_0 è il raggio della fibra ottica (m). Secondo [24] i fenomeni di assorbimento e scattering possono essere considerati attraverso il coefficiente di attenuazione effettivo α_{eff}, per tale motivo, il coefficiente α nella precedente equazione è stato sostituito con α_{eff} in modo da considerare l'effetto dello scattering non trascurabile. Per cui si ha:

$$\alpha_{eff} = \sqrt{3\alpha\left(\alpha + \alpha_s\left(1 - g\right)\right)}$$

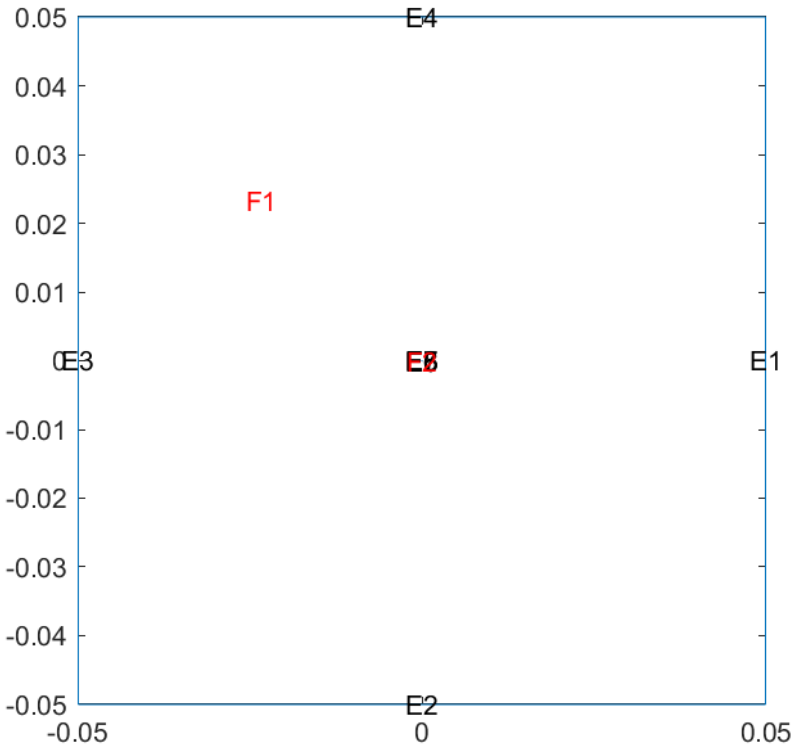


Figura 6.1: Geometria modello 2D

dove α è il coefficiente di attenuazione, α_s il coefficiente di scattering e g il coefficiente di anisotropia.

```
P = 2;      % Potenza ottica di picco del laser (W).
r0 = 0.5e-4; % Raggio della fibra ottica (m).
g = 0.9;    % Coefficiente di anisotropia

ua = 76; % Coefficiente di assorbimento lineare del fegato (1/m)
us = 10015; % Coefficiente di scattering del fegato (1/m)
sigma = r0/3; % Deviazione standard del fascio laser pari al raggio
    della fibra

a_eff = sqrt(3*ua*(ua + us*(1-g)));
I0 = P/(2*pi*sigma^2);
z = 0.01;

q = @(location,state) a_eff*I0*exp(-((location.x).^2 +
    (location.y).^2)/(2*sigma^2)).*exp(-z*a_eff);
internalHeatSource(thermalmodelT,q);
%% Specify temperatures on the boundaries or heat fluxes through the
    boundaries
```

Le condizioni al contorno utili per la risoluzione impongono che il flusso termico uscente dai lati sia nullo.

```
thermalBC(thermalmodelT,'Edge',[1,2,3,4],'HeatFlux',0);
%% Set an initial temperature
```

La temperatura iniziale è di 25 °C per tutta l'area considerata.

```
T0 = 25;
thermalIC(thermalmodelT,T0);
%% Mesh the geometry to the model
```

L'ultimo passo è quello di generare il cosiddetto *"mesh"* (Figura 6.2), ovvero, una griglia formata da triangoli molto piccoli distanti tra loro, al massimo, 2 mm.

```
msh = generateMesh(thermalmodelT,'Hmax',0.002, 'Hmin', 0.0005);
%% Show the mesh
figure, pdeplot(thermalmodelT);
axis equal
title 'Block With Finite Element Mesh Displayed'
saveas(gcf, "mesh.png");
%% Solve
```

Infine viene risolto il modello per un tempo di 180 s.

```
tlist = 0:0.1:180;
R = solve(thermalmodelT,tlist);
T = R.Temperature;
%% Plot results
getClosestNode = @(p,x,y) min((p(1,:) - x).^2 + (p(2,:) - y).^2);
[~,nid0] = getClosestNode( msh.Nodes, 0, 0 );
[~,nid1] = getClosestNode( msh.Nodes, 0, 0.001 );
[~,nid2] = getClosestNode( msh.Nodes, 0, 0.002 );
[~,nid3] = getClosestNode( msh.Nodes, 0, 0.004 );
[~,nid4] = getClosestNode( msh.Nodes, 0, 0.008 );

h = figure;
h.Position = [1 1 2 1].*h.Position;
subplot(1,2,1);
pdeplot(thermalmodelT,'XYData',T(:,end),'Contour','on','ColorMap','hot');
xlabel 'Distance from Origin, m'
ylabel 'Distance from Origin, m'
axis equal
axis equal
title 'Temperature, Final Time, Transient Solution'
subplot(1,2,2);
axis equal
plot(tlist(1:size(T,2)), T(nid1,:));
hold on; plot(tlist(1:size(T,2)), T(nid2,:)); hold on;
    plot(tlist(1:size(T,2)), T(nid3,:));
hold on; plot(tlist(1:size(T,2)), T(nid4,:));
grid on
title 'Temperature at various points as a Function of Time';
xlabel 'Time, seconds'
ylabel 'Temperature, degrees-Celsius'
legend('P1(0;0.001)','P2(0;0.002)','P3(0;0.004)','P4(0;0.008)')
```

```
saveas(gcf, "results_z=10mm.png");
```

Le simulazioni sono state ripetute per diverse profondità (asse z) del tessuto per comprendere l'assorbimento della radiazione da parte del tessuto stesso.

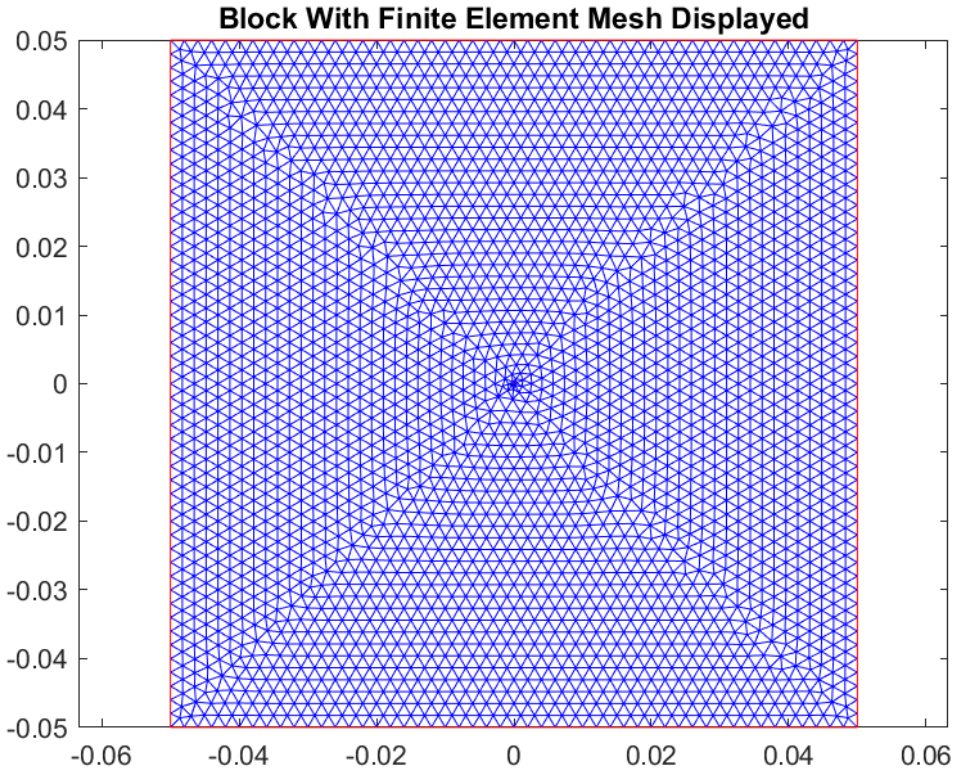


Figura 6.2: Mesh del modello 2-D

6.2 Considerazioni

I risultati delle simulazioni sono stati riportati sotto forma di *ColorMap* ed è stato valutato l'aumento di temperatura nel tempo di alcuni punti. A prima vista ci sono dei valori di temperatura molto elevati che sembrerebbero errati, ma ad una più attenta osservazione questi picchi "eccessivi" di temperatura vengono raggiunti in un area del tessuto dell'ordine di μm^2. Il software, ovviamente, calcola questi valori che nella realtà sono difficilmente misurabili e, bisogna anche considerare che, la distribuzione del fascio è massima proprio nell'origine degli assi. Per questo motivo dopo una più attenta analisi si è deciso di valutare l'aumento della temperatura in diversi punti del tessuto, sempre più lontani dall'origine. Si può osservare, ad esempio, che per z = 0 mm, cioè nella parte superiore del tessuto irradiato, la temperatura nel punto P1 (1 mm di distanza dall'origine) raggiunge un valore

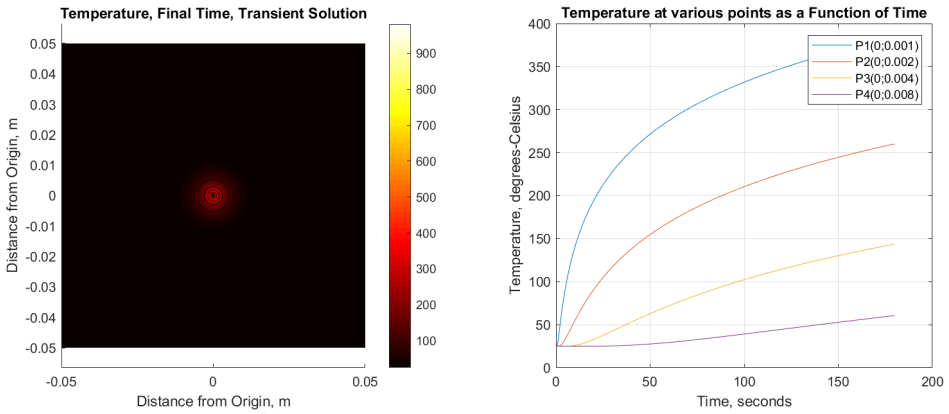


Figura 6.3: Distribuzione delle temperature a z=0 (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo.

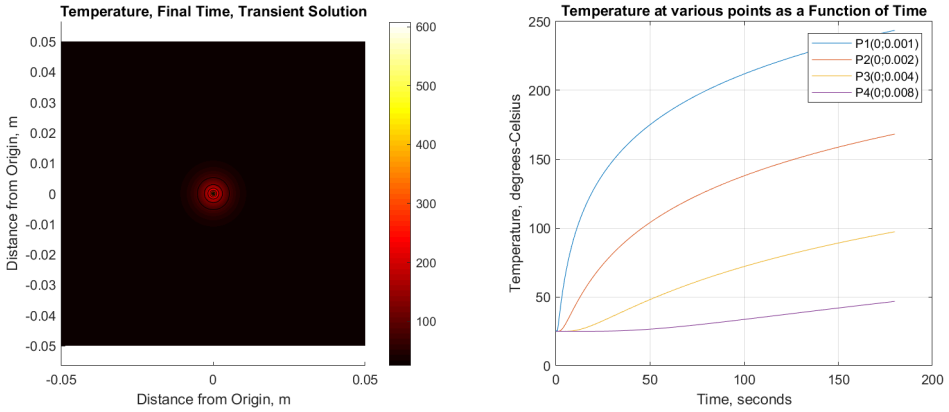


Figura 6.4: Distribuzione delle temperature a z=1mm (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo.

massimo di 370℃ circa e man mano che ci si allontana le massime temperature diminuiscono. Nel punto P4, distante 8 mm dall'origine, la temperatura supera di poco i 50℃, limitando di conseguenza il danno termico. Ovviamente nelle simulazione con z maggiori (più in profondità nel tessuto) le temperature massime nei diversi punti diminuisco, ciò è abbastanza prevedibile dato che l'equazione che determina l'assorbimento è un esponenziale decrescente.

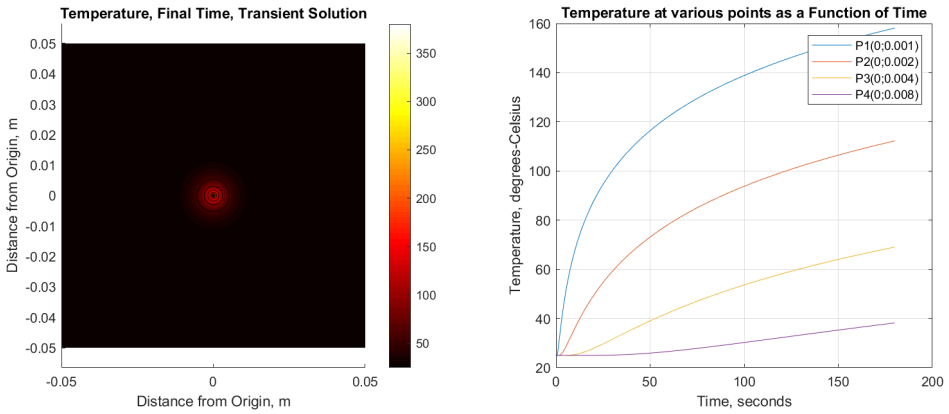


Figura 6.5: Distribuzione delle temperature a z=2mm (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo.

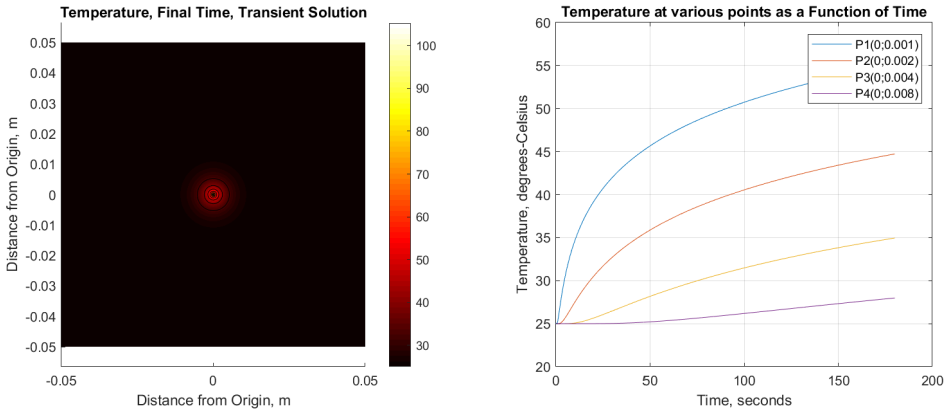


Figura 6.6: Distribuzione delle temperature a z=5mm (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo.

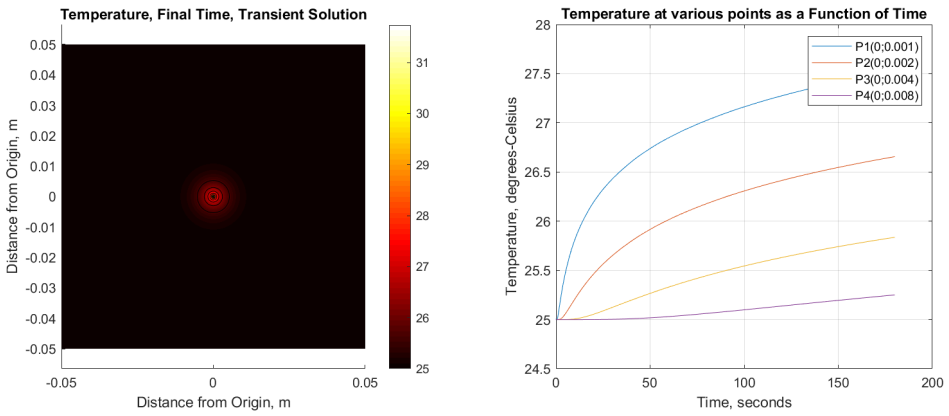


Figura 6.7: Distribuzione delle temperature a z=10mm (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo.

Capitolo 7

Sicurezza e Normativa per i laser

Oggigiorno i laser sono ovunque, anche se non ce ne accorgiamo, essi sono utilizzati in ambito industriale e domestico per una miriade di applicazioni diverse e tutti noi, anche in maniera indiretta, abbiamo a che fare con i laser quotidianamente. Basti pensare alla fibra ottica per la connessione internet, ai puntatori laser o ancora ai lettori CD e DVD. Nell'industria vengono impiegati per operazioni di taglio, incisione, saldatura o ancora in applicazioni mediche come la dermatologia, oftalmologia o oncologia. Insomma i laser sono ovunque e spesso li utilizziamo senza neanche rendercene conto, pertanto, possono sembrare oggetti innocui ma se utilizzati in maniera errata potrebbero causare danni a persone e cose.

7.1 Cos'è un laser?

Un laser, acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, è un dispositivo in grado di emettere radiazione elettromagnetica monocromatica e coerente: la radiazione è costituita da una sola lunghezza d'onda e viaggia in modo parallelo rispetto alla sorgente.[25] Il suo funzionamento si basa sulla stimolazione (pumping) attraverso una fonte di energia esterna di un mezzo attivo. Quest'ultimo può essere in forma gassosa (miscela di elio e neon, argon), liquida (etanolo, glicole etilenico) o solida (cristallo di zaffiro al titano, neodimio). Il mezzo attivo assorbe l'energia e la riemette sotto forma di fotoni ad una lunghezza d'onda predefinita, che dipende dalle proprietà fisiche dello stesso, attraverso il fenomeno fisico chiamato emissione stimolata. La radiazione cosi ottenuta viene amplificata attraverso il risonatore, una serie di specchi che riflettono i fotoni in tutte le direzioni. Per permette l'uscita del fascio laser dalla cavità risonante solo in una direzione è presente uno specchio semi-riflettente.

7.2 I laser sono pericolosi?

Anche i laser di bassa potenza (pochi mW) possono causare danni all'occhio umano o, nei casi peggiori, la perdita della vista. Vi è una sostanziale differenza tra i laser che emettono nello spettro del visibile (da 400 nm a 700 nm) e quelli che, invece, emettono radiazione invisibile (da 700 nm a 1500 nm). L'occhio umano quando percepisce una fonte di luce intensa tende, come riflesso spontaneo, a chiudere le palpebre, con quello che viene definito come riflesso palpebrale. Per le radiazioni invisibili ciò non avviene, quindi, queste arrivano a focalizzarsi sulla retina senza essere percepito dall'occhio. I danni che i laser possono causare non si limitano solo agli occhi, la pelle, ad esempio, è molto sensibile alle radiazione nell'infrarosso. La potenza generata dai laser viene assorbita dalla pelle e può provocare ustioni attraverso un processo termico di riscaldamento. Anche le radiazioni UV sono pericolose, ma in questo caso gli effetti sono di tipo fotochimico e non termico, un esempio comune a tutti è l'ustione solare causata, appunto, dai raggi UV emessi dal Sole.

Una domanda comune che ci si pone è perché la luce del Sole o quella emessa da una lampadina, che è una radiazione elettromagnetica a tutti gli effetti, non è cosi pericolosa come quella emessa da un laser. La risposta sta nel fatto che le fonti luminose come il Sole o le lampadine emettono radiazione in tutte le direzioni, in questo modo, solo una parte dell'energia raggiunge l'occhio. La radiazione emessa da un laser è focalizzata, ovvero, viaggia preferenzialmente solo in una direzione (parallela alla sorgente) per cui l'attenuazione è minima anche su grandi distanze. Quando il fascio laser colpisce l'occhio, questo viene focalizzato sulla retina in un area molto piccola per questo motivo si ha una densità di potenza elevatissima. Ciò non avviene per una normale fonte luminosa, in quanto l'attenuazione e la diffusione fanno si che una piccola parte della potenza emessa possa raggiungere l'occhio, inoltre, il fatto che queste radiazione viaggiano in diverse direzioni vengono focalizzate sulla retina in un area molto più ampio rispetto alla radiazione laser.

Altri pericoli derivanti dall'uso dei laser possono essere:

- **Incendio ed esplosione:** i laser, sopratutto quelli ad alta potenza, possono incendiare materiali come plastica, legno, carta o causare esplosioni se il fascio viene diretto verso materiali infiammabili per un tempo prolungato.

- **Gas tossici:** la lavorazione di alcuni materiali con i laser può generare vapori tossici oltre il limite massimo consentito dalla normativa, per cui, è necessario creare un sistema idoneo di ventilazione.

- **Tensioni elevate:** in generale un laser ha bisogno di alte tensioni per il suo funzionamento, per tale motivo, la manutenzione va fatta solo da personale specializzato.

- **Radiazione secondaria:** la lavorazione di alcuni materiali con i laser può anche causare l'emissione di radiazione secondaria dovuta all'energia ceduta al materiale. Le radiazioni secondarie posso rientrare nello spettro UV o dei raggi X, pertanto, dannose per la salute dell'operatore. Bisogna schermare opportunamente la sorgente laser e valutare un tempo massimo di esposizione alle suddette radiazioni.

- **Materiali tossici:** alcuni materiali non sono adatti per la lavorazione con i laser poiché rilasciano sostanze tossiche sotto forma di polveri o gas. Sono da evitare operazioni su: cromo, manganese, piombo, fibra di carbonio, ossido di berillio, ecc.

7.3 Classificazione laser

I laser vengono suddivisi secondo la normativa EN 60825-1:2014 "Sicurezza degli apparecchi laser" in sette classi sulla base della potenza massima emessa. L'attuale classificazione introduce due classi M per indicare che la pericolosità del laser è diversa se si utilizzano strumenti ottici in grado di focalizzare il fascio. Alla parte 1 della suddetta normativa ("Classificazione delle apparecchiature e requisiti") vengono descritte le diverse classi laser e i pericoli connessi all'uso dei laser. Vengono inoltre indicate le misure di prevenzione e protezione da mettere in atto per tutelare l'operatore, a tal fine vengono anche introdotti alcuni parametri: il LEA, l' EMP e la DNRO.

- L'EMP (esposizione massima permessa) indica il valore limite di radiazione laser al di sopra del quale vi è un rischio di subire danni. I valori di EMP rappresentano, pertanto, il massimo dell'esposizione consentita per non subire lesioni immediate o nel lungo termine. Tali valori variano e dipendono dal tessuto irradiato, dalla potenza, dalla lunghezza d'onda e dal tempo di esposizione.

- Il LEA (limite di emissione accessibile) è il massimo valore di radiazione emessa da un laser e la sua misurazione è di fondamentale importanza per determinare la classe laser di appartenenza.

- Il DNRO (distanza nominale di rischio oculare) è la distanza oltre la quale in fascio laser non è pericoloso anche se osservato in maniera diretta. Questo parametro è fondamentale per la gestione della sicurezza, infatti, a seconda del valore di DNRO si potranno decidere i dispositivi di protezione più adeguati (occhiali, delimitazione della zona, ecc).

7.3.1 Classe laser 1

La classe 1 rappresenta tutti i dispositivi laser abbastanza sicuri dato che la potenza emessa è molto basso e, pertanto, si possono escludere effetti dannosi. La radiazione emessa può essere sia nello spettro del visibile che dell'invisibile. Nella classe 1 possono essere compresi laser ad alta potenza purché questi siano internamente schermati al fine di non far fuoriuscire la radiazione laser. Non sono previste particolari misure di sicurezza per questa classe laser.

7.3.2 Classe laser 1M

Anche i laser di classe 1M non sono pericolosi se utilizzati in maniera corretta, poiché il diametro del raggio laser è più grande della pupilla, ciò significa che solo una parte del fascio può raggiungere la retina. Il laser di classe 1M possono diventare pericolosi quando il fascio viene focalizzato, mediante lenti, poiché una maggiore quantità di radiazione laser può raggiungere la retina. Per tale motivo bisogna evitare di puntare laser di classe 1M verso altre persone ed informare l'utente qualora utilizzasse strumenti ottici tali da poter focalizzare il fascio e renderlo pericoloso.

7.3.3 Classe laser 2

Fanno parte della classe 2 i laser che emettono potenze inferiori a 1 mW. La banda di emissioni di questi laser è nello spettro del visibile, ovvero, da 400 nm a 700 nm. Seppur non pericolosi in caso di un esposizione di breve durata (secondo la norma un tempo minore di 0,25 s), possono provocare abbagliamenti e/o possibili disturbi temporanei della vista nel caso di esposizione prolungata. A tutela della salute quando si opera con questa classe di laser bisogna evitare di guardare direttamente il fascio o puntarlo verso altre persone.

7.3.4 Classe laser 2M

Anche i laser di classe 2M emettono radiazione elettromagnetica nel visibile, e come nel caso della classe 1M, il diametro del fascio è maggiore di quello della pupilla, pertanto, sono sicuri anche in caso di esposizione di breve durata (solo una parte del fascio può raggiungere la retina). Questi possono diventare pericolosi non solo se il tempo di esposizione viene prolungato ma anche nel caso in cui il raggio viene focalizzato con strumenti ottici. I possibili disturbi e le misure di sicurezza da adottare sono le stesse della classe 2.

7.3.5 Classe laser 3R

Rientrano in questa classe i laser che emettono una potenza ottica compresa fra 1 mW e 5 mW, ovvero, il limite è cinque volte quello fissato per la classe 2. Il laser di classe 3R possono arrecare danni seri agli occhi, tuttavia, la loro pericolosità è limitata grazie al riflesso spontaneo di chiusura della palpebra. Solo nel caso di esposizione prolungata l'occhio può subire danni o creare disturbi temporanei alla vista. Per l'utilizzo di questo tipo di laser è necessario formare il personale ai rischi e alle misure di protezione e prevenzione. Per tutti i laser di questa classe il raggio non deve mai trovarsi all'altezza degli occhi e l'accesso a questi va limitato al solo personale autorizzato.

7.3.6 Classe laser 3B e 4

Il laser appartenenti a queste due classi possono danneggiare l'occhio, anche nel caso di esposizioni brevi e accidentali, causare lesioni cutanee o provocare incendi. La differenza tra queste due classi è nella potenza massima di emissione: $<$500 mW per la classe 3R e $>$500mW per la 4. Data l'elevata potenza dei laser di classe 4 possono essere dannose anche le riflessioni del fascio oltre all'esposizione diretta; i rischi maggiori quando si opera con questi tipi di laser ricadono sugli occhi con danni permanenti e irreversibili e sulla pelle con ustioni.

Il laser utilizzato nella realizzazione del dispositivo appartiene alla classe 4, e pertanto, verranno di seguito approfonditi gli aspetti legati alla sicurezza e la prevenzione per questa classe.

7.4 Obblighi normativi

Quando si vuole commercializzare un prodotto, in generale, questo deve soddisfare i requisiti di sicurezza secondo le normative vigenti. La prima cosa necessaria per l'immissione

in commercio di un prodotto che contiene un laser è la sua classificazione (7.3) secondo la normativa sui laser EN 6082-1:2014, all'interno della quale sono descritte le procedure dettagliate per attribuire la classe al laser. Altro aspetto fondamentale è l'etichettatura, che varia in base alla classe attribuita al laser. L'etichettatura comprende: il segnale di pericolo laser, indicazione della classe di appartenenza ed una targhetta di identificazione con i dati sull'emissione. Inoltre per le classi 3R, 3B e 4 si deve evidenziare con un etichetta il foro di uscita del raggio laser. Nel caso in cui il laser emetta radiazioni nell'invisibile questo deve essere esplicitamente indicato nell'etichetta. Inoltre il responsabile dell'immissione in commercio deve fornire la dichiarazione di conformità, ovvero, una sorta di autocertificazione nella quale si attesta che il prodotto soddisfa i requisiti normativi di sicurezza. Infine il manuale d'uso, scritto almeno nella lingua ufficiale del paese dove il prodotto verrà commercializzato, deve fornire indicazioni circa il funzionamento dell'apparecchio secondo l'uso previsto. All'interno del manuale d'uso devono essere descritte le misure di sicurezza da adottare durante l'uso del prodotto ed eventuali DPI da indossare (occhiali o altre protezioni). Anche le istruzioni d'uso fanno parte di questo documento, che in caso di apparecchiature complesse comprende anche manuali per l'installazione e manutenzione del prodotto.

Figura 7.1: Esempio etichettatura di un laser classe 4

Alcuni dei requisiti tecnici di sicurezza necessari per i dispositivi laser sono:

- **Involucro di protezione:** obbligatorio per tutte le classi laser, eccetto la 1, l'involucro di protezione impedisce l'accesso diretto al raggio laser; questo deve poter essere rimosso solo con l'utilizzo di utensili e resistere ad una eventuale irradiazioni dovuta a un guasto.

- **Interblocco di sicurezza:** dispositivo obbligatorio per tutte le classi che impedisce l'accesso diretto al raggio laser quando l'involucro di protezione viene rimosso.

- **Interruttore a chiave:** dispositivo, obbligatorio per le classi laser 3B e 4, che impedisce l'accesso al raggio laser quando viene rimosso. Secondo la normativa può essere una chiave fisica, una carta magnetica, un tag RFID o una password di accesso.

- **Tasto di arresto in caso di emergenza:** chiamata anche "shutter", questo dispositivo deve essere in grado di arrestare, in condizione di emergenza, il fascio laser e impedirne l'emissione fino al riarmo manuale del sistema. L'obbligo di questo dispositivo è esclusivo delle classi laser 3B e 4.
- **Dispositivo di comando:** la postazione di controllo deve essere localizzata in modo da permette all'operatore di eseguire le regolazioni senza esporsi al raggio laser. Obbligatori per le classi 3R, 3B e 4.
- **Segnalatore di emissione:** dispositivo in grado di emettere un segnale acustico o visivo quando il laser è in funzione. Secondo la normativa tale dispositivo deve essere a prova di guasto, ciò implica che un difetto del segnalatore di emissione deve impedire l'azionamento del laser. Questo dispositivo è obbligatorio per le classi 3R con raggio invisibile (con una lunghezza d'onda inferiore a 400 nm e superiore a 700 nm) e per le classi 3B e 4.

Capitolo 8

Istruzioni per l'uso

In quest'ultimo capitolo si vuole lasciare una piccola e semplice guida di riferimento per il corretto uso del dispositivo. Nelle sezioni sottostanti verranno descritti in maniera semplice i menu e tutte le operazioni consentite; una tabella riepilogativa darà informazioni sui i possibili errori in fase di avvio del sistema e una loro possibile soluzione. **Si consiglia di leggere attentamente queste istruzioni prima di utilizzare il dispositivo.**

8.1 Avvio del sistema

All'accensione il dispositivo mostra il logo iniziale e, successivamente, iniziano una serie di controlli sullo stato del sistema (inizializzazione): qualora venisse riscontrato un errore il sistema si blocca ed indica all'utente il motivo del mancato avvio. Se il problema non viene risolto l'utente non potrà utilizzare il dispositivo e accedere alla schermata principale (non vi è alcun modo di bypassare i controlli iniziali).

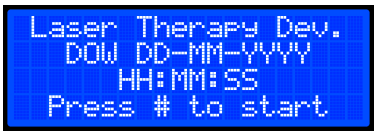
Di seguito una tabella riepilogativa sui controlli effettuati e cosa fare in caso di errore:

Tipo controllo	Errore	Cosa fare
Verifica funzionamento del Controller	Se il controller non viene rilevato verrà mostrata a schermo la scritta "Controller not found!"	Controllare le connessioni e l'alimentazione del Controller
Verifica funzionamento del Driver Laser	Se il Driver Laser non viene rilevato verrà mostrata a schermo la scritta "Driver ID error!"	Controllare le connessioni e l'alimentazione del Driver Laser
Temperatura del Driver Laser	Una temperatura del Driver Laser superiore ai 55°C viene rilevata come potenzialmente pericolosa, ciò è deducibile dalla scritta che appare a schermo: "Temperature too high!"	Attendere che il Driver Laser si raffreddi e verificare il suo corretto funzionamento
Temperatura Diodo Laser	Una temperatura del Diodo Laser superiore ai 55°C viene rilevata come potenzialmente pericolosa, ciò è deducibile dalla scritta che appare a schermo: "Temperature too high!"	Attendere che il Diodo Laser si raffreddi e verificare il suo corretto funzionamento
Tensione della batteria	Se la tensione della batteria scende al di sotto della soglia minima (11 V) viene mostrata la scritta "Voltage too low!"	Spegnere il dispositivo e caricare la batteria con l'apposito caricabatterie
Interruttore a chiave	Al momento dell'avvio l'interruttore a chiave deve essere inserito su OFF, diversamente il sistema non si avvierà	Portare l'interuttore su OFF e attendere il riavvio automatico del sistema
Interruttore a pedale	Questo controllo non è vincolante ai fini dell'avvio del sistema, serve solo ad indicare se l'interruttore a pedale e inserito o meno	-

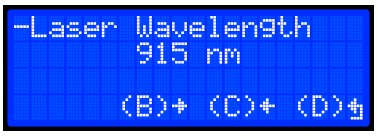
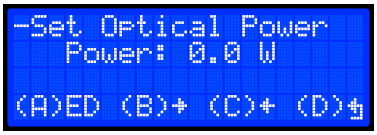
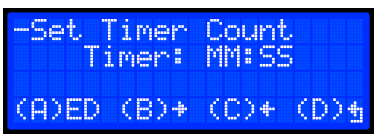
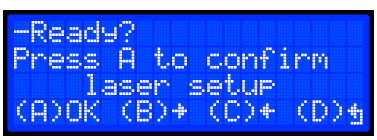
8.2 Menu e schermate principali

8.2.1 Schermata principale

Dopo la fase di inizializzazione, se non vi sono errori, il sistema si avvia mostrando la schermata principale.

	**Main Screen** Dalla schermata principale premendo il tasto "#" si entra nel menu di configurazione laser, mentre, premendo "*" si entra nel menu principale.

8.2.2 Menu configurazione laser

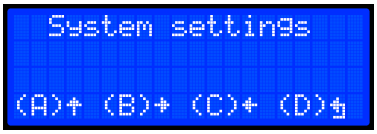
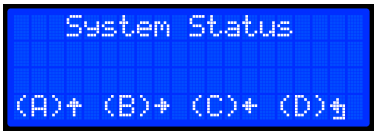
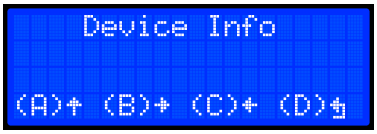
	**Laser Wavelength** Nessuna operazione possibile in questa schermata. Viene mostrata soltanto la lunghezza d'onda del diodo laser.
	**Set Optical Power** Premendo A il cursore inizia a lampeggiare ed è possibile digitare, tramite il tastierino, la potenza desiderata.
	Select Mode Premendo A è possibile cambiare la modalità di emissione del diodo laser (Continuous Mode/Pulse Mode)
	Timer Mode Premendo A è possibile attivare il la modalità timer che permette di controllare il tempo di emissione del diodo laser.
	**Set Timer Count** Premendo A il cursore inizia a lampeggiare ed è possibile digitare, tramite il tastierino, il tempo desiderato.(Min. 2 s - Max. 60 min)
	**Ready?** Premendo A si confermano i parametri e si passa alla schermata di controllo Laser Ready.

8.2.3 Schermata Laser Ready

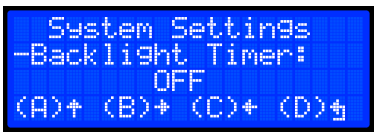
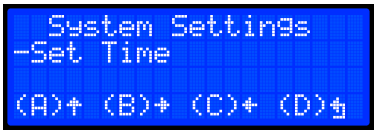
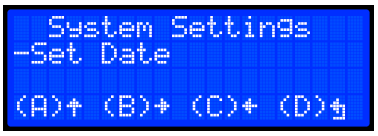
Dopo aver confermato il set-up del laser, viene mostrata la schermata *Laser Ready* e da qui è possibile monitorare il tempo di emissione del laser e l'energia fornita. Per tornare alla schermata principale basta premere "D". Nel caso in cui il laser sia attivo nel momento in cui si torna alla schermata principale, questo viene spento per ragioni di sicurezza.

	Laser Ready Screen Laser indica se il diodo sta emettendo il raggio laser (ON) o meno (OFF). Switch indica lo stato del comando a chiave, quando è ON vuole dire che il sistema è abilitato all'emissione del raggio laser.

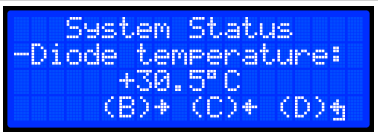
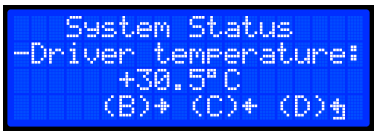
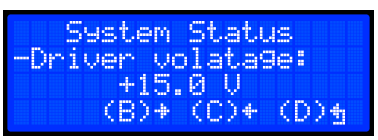
8.2.4 Menu principale

	**System Settings** Premendo A si entra nel menu delle impostazioni del sistema.
	**System Status** Premendo A si entra nel menu per controllare lo stato del sistema.
	**Device Info** Premendo A si entra nel menu informativo del dispositivo.

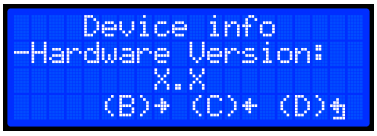
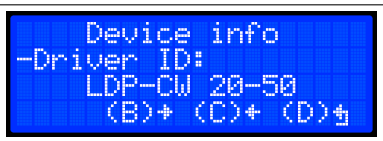
8.2.5 System Settings

	**Backlight Timer** Premendo A è possibile impostare un timer per lo spegnimento automatico della retroilluminazione. Valori a scelta tra: OFF, 20 s, 40 s, 60 s, 80 s e 100 s.
	Change Password Premendo A è possibile cambiare la password di accesso al dispositivo.
	**Set Time** Premendo A è possibile modificare l'orario del dispositivo.
	**Set Date** Premendo A è possibile modificare la data del dispositivo.

8.2.6 System Status

	**Diode Temperature** In questa schermata viene visualizzata la temperatura del diodo laser in °C.
	**Driver Temperature** In questa schermata viene visualizzata la temperatura del Driver Laser in °C.
	**Driver Voltage** In questa schermata viene visualizzata la tensione di alimentazione del Driver Laser.

8.2.7 Device Info

	Software Version In questa schermata viene visualizzata la versione attuale del software.
	**Hardware Version** In questa schermata viene visualizzata la versione attuale dell'hardware.
	Driver Serial In questa schermata viene visualizzato il codice seriale del Driver Laser.
	**Driver ID** In questa schermata viene visualizzato il codice identificativo del Driver Laser.

8.3 Quick Start

Subito dopo l'avvio del dispositivo premere il tasto "#" per entrare nel menu configurazione laser e seguire le indicazioni presenti per impostare i parametri. Utilizzare i tasti B e C per muoversi all'interno delle schermate e D per tornare indietro alla schermata principale.

8.4 Timer retroilluminazione

E' possibile impostare un timer per lo spegnimento automatico della retroilluminazione del display Lcd. Per fare ciò accedere al menu **System Settings** e alla schermata **Backlight Timer** premere A per cambiare il valore del timer. Son disponibili valore preimpostati a scelta tra 20 s, 40 s, 60 s , 80 s, 100 s e OFF. Il valore OFF indica il timer spento e retroilluminazione sempre attiva.

8.5 Modifica password

Per modificare la password accedere al menu **System Settings** e alla schermata **Change Password** premere A. Viene richiesto di inserire la vecchia password (default: 123456) e successivamente confermarla premendo A. Se la password è corretta viene chiesto all'utente di inserire la nuova password due volte, altrimenti viene mostrato a schermo il messaggio **"Wrong Password"**. La lunghezza della password deve essere compresa tra 4 e 10 caratteri esclusivamente numerici da digitare tramite tastierino. Per una maggiore sicurezza si consiglia di scegliere una password da minimo 6 numeri. Nel caso in cui la nuova password non coincide nei due inserimenti richiesti viene mostrato il messaggio **"Password**

must match" e questa non viene modificata. Se la procedura è andata a buon fine viene visualizzato a schermo il messaggio **"Password Updated!"**.

8.6 Modifica orario

Per modificare l'orario accedere al menu **System Settings** e alla schermata **Set Time** premere A. Quando il cursore inizia a lampeggiare vuol dire che si è entrati in modalità inserimento. Il formato orario è **HH:MM:SS**, quindi prima vanno inserite le ore, poi i minuti e successivamente i secondi. Per confermare l'inserimento premere A. I valori inseriti devono essere validi, altrimenti verrà mostrato il messaggio **"Time format not valid!"** e l'orario non viene aggiornato.

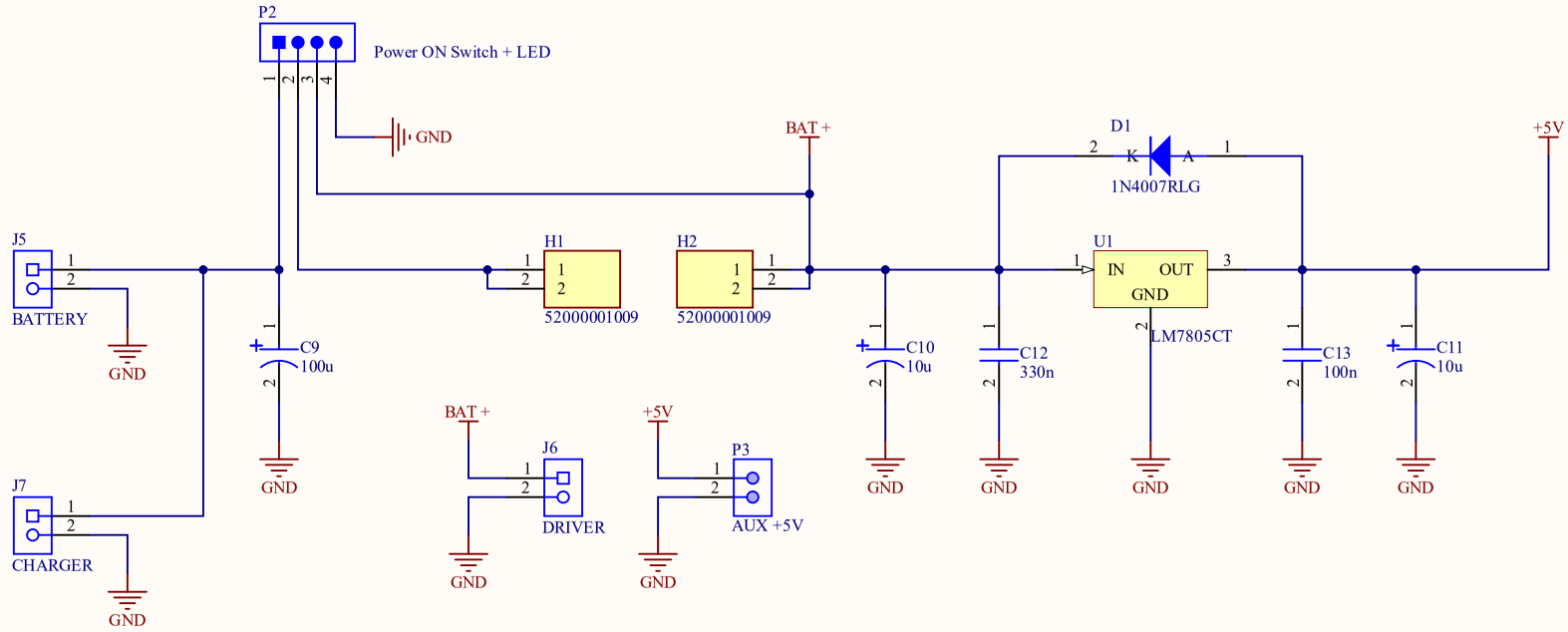
8.7 Modifica data

Per modificare la data accedere al menu **System Settings** e alla schermata **Set Date** premere A. Quando il cursore inizia a lampeggiare vuol dire che si è entrati in modalità inserimento. Il formato data è **DOW DD-MM-YYYY**, dove DOW sta per Day Of Week (giorno della settimana). il giorno della settimana va inserito digitando il numero corrispondente secondo la convenzione: 1 per lunedì, 2 per martedì, ... e 7 per la domenica. Se viene digitato un valore errato il sistema esce dalla modalità inserimento e torna indietro al menu. Digitare il giorni, il mese e l'anno e premere A per confermare l'inserimento. I valori inseriti devono essere validi, altrimenti verrà mostrato il messaggio **"Date format not valid!"** e la data non viene aggiornata.

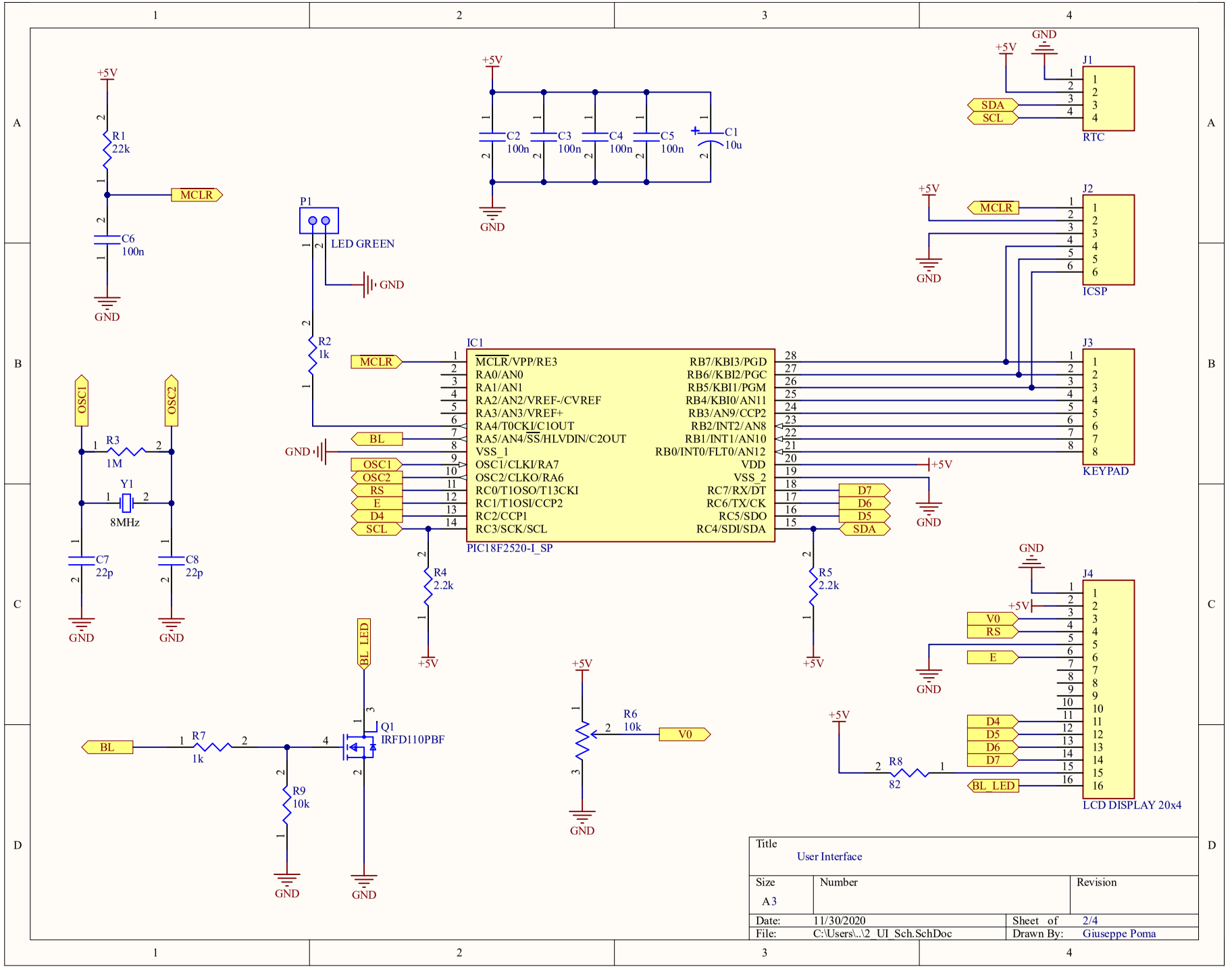
Appendice A

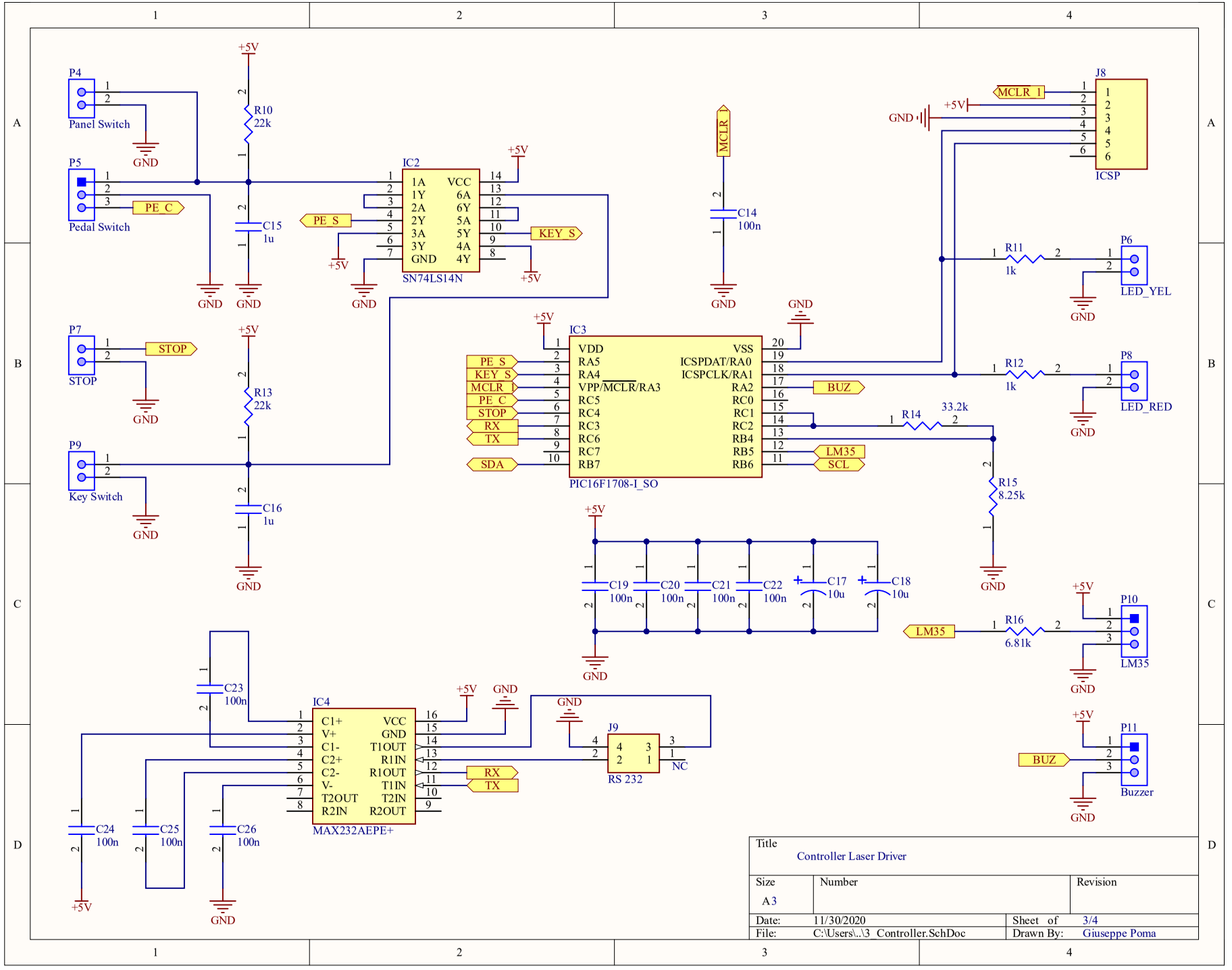
Schemi Elettrici

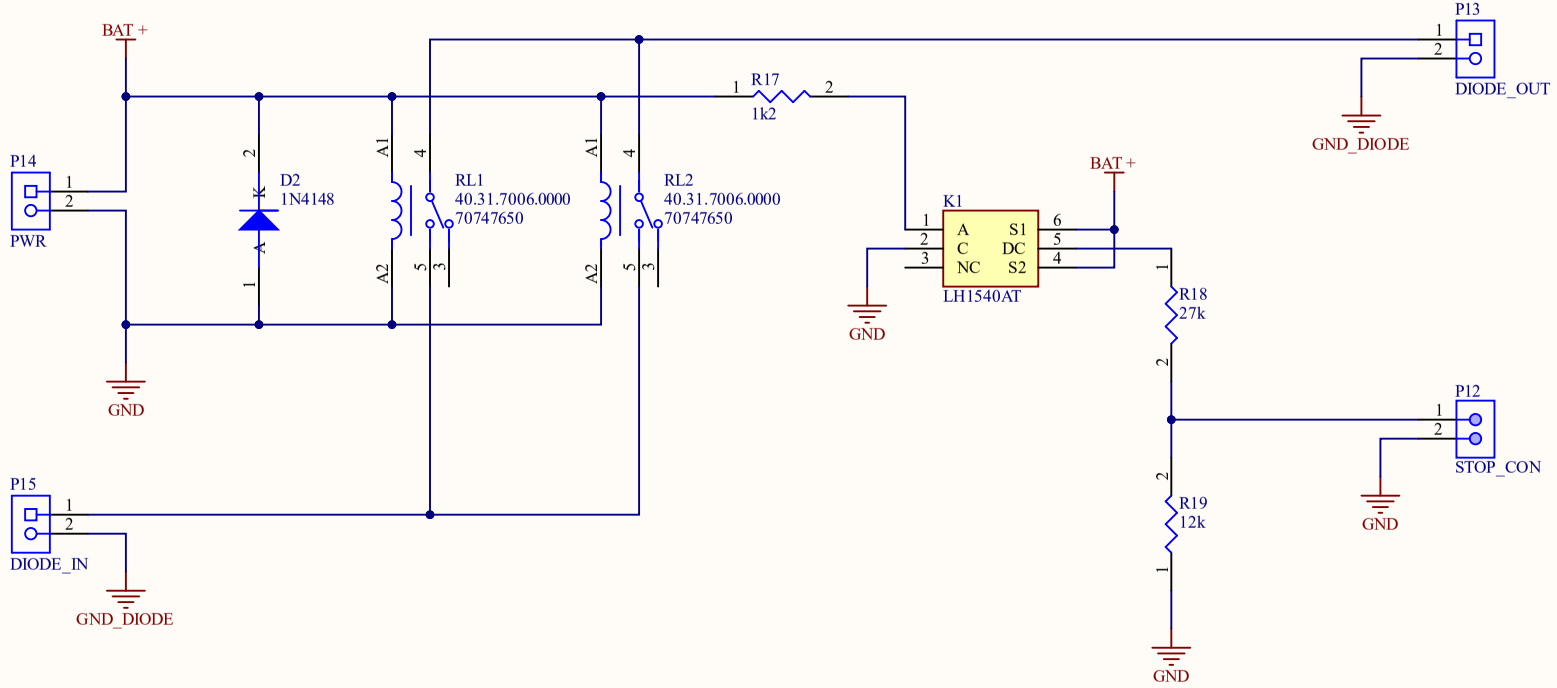
Vengono di seguito riportati gli schemi elettrici per le quattro sezioni realizzate: Controller con PIC16F1708, User Interface con PIC18F2520, scheda di alimentazione (Power Supply) e scheda di sicurezza con relays (Safety Board). Per i dettagli e le scelte progettuali si veda il Capitolo 4.



Title	Power Supply		
Size	Number		Revision
A3			
Date:	11/30/2020	Sheet of	1/4
File:	C:\Users\..\1_Power.SchDoc	Drawn By:	Giuseppe Poma


+5V
R1
22k
MCLR
C6
100n
GND
C2
100n
C3
100n
C4
100n
C5
100n
C1
10u
P1
LED GREEN
R2
1k
BL
OSC1
OSC2
R3
1M
Y1
8MHz
C7
22p
C8
22p
IC1
MCLR/VPP/RE3
RA0/AN0
RA1/AN1
RA2/AN2/VREF-/CVREF
RA3/AN3/VREF+
RA4/T0CKI/C1OUT
RA5/AN4/SS/HLVDIN/C2OUT
VSS_1
OSC1/CLKI/RA7
OSC2/CLKO/RA6
RC0/T1OSO/T13CKI
RC1/T1OSI/CCP2
RC2/CCP1
RC3/SCK/SCL
RB7/KBI3/PGD
RB6//KBI2/PGC
RB5/KBI1/PGM
RB4/KBI0/AN11
RB3/AN9/CCP2
RB2/INT2/AN8
RB1/INT1/AN10
RB0/INT0/FLT0/AN12
VDD
VSS_2
RC7/RX/DT
RC6/TX/CK
RC5/SDO
RC4/SDI/SDA
PIC18F2520-I_SP
RS
E
D4
SCL
D7
D6
D5
SDA
R4
2.2k
R5
2.2k
BL_LED
R7
1k
Q1
IRFD110PBF
R9
10k
R6
10k
V0
J1
SDA
SCL
RTC
J2
ICSP
J3
KEYPAD
J4
R8
82
LCD DISPLAY 20x4
Title
User Interface
Size
A3
Number
Revision
Date:
11/30/2020
Sheet of
2/4
File:
C:\Users\..\2_UI_Sch.SchDoc
Drawn By:
Giuseppe Poma


P4
Panel Switch
P5
Pedal Switch
PE_C
R10
22k
C15
1u
IC2
SN74LS14N
PE_S
KEY_S
P7
STOP
R13
22k
P9
Key Switch
C16
1u
IC3
PIC16F1708-I_SO
MCLR
BUZ
LM35
SCL
SDA
RX
TX
R14
33.2k
R15
8.25k
C14
100n
J8
ICSP
P6
LED_YEL
R11
1k
P8
LED_RED
R12
1k
C19
100n
C20
100n
C21
100n
C22
100n
C17
10u
C18
10u
P10
LM35
R16
6.81k
P11
Buzzer
IC4
MAX232AEPE+
C23
100n
C24
100n
C25
100n
C26
100n
J9
RS 232
NC
+5V
GND
Title
Controller Laser Driver
Size
A3
Number
Revision
Date:
11/30/2020
Sheet of
3/4
File:
C:\Users\..\3_Controller.SchDoc
Drawn By:
Giuseppe Poma



Title	Safety Board		
Size	Number		Revision
A3			
Date:	11/30/2020	Sheet of	4/4
File:	C:\Users\..\4_Safety_Board.SchDoc	Drawn By:	Giuseppe Poma

Appendice B

PCB Layout

Viene di seguito riportato il layout dei PCB (Printed Circuit Board) realizzati: uno per la parte UI + Controller ed uno per la Safety Board. I circuiti stampati sono composti da 2 layers con uno spessore del dielettrico di 1.6 mm. Sono presenti vias coperte (tented) con foro da 0.3 mm e asola da 0.6 mm.

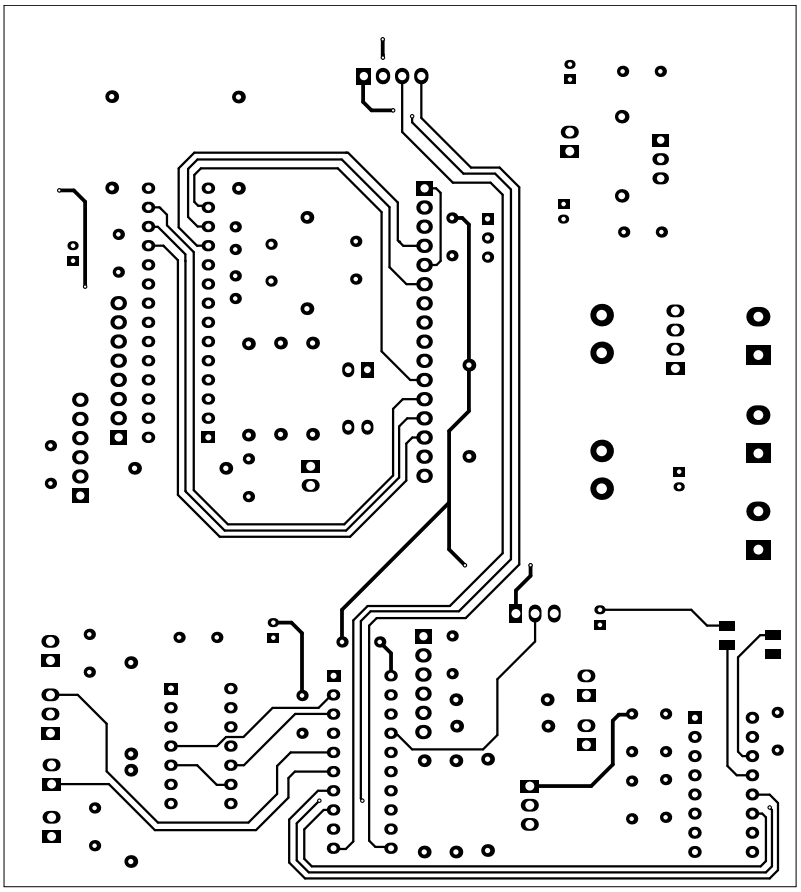


Figura B.1: PCB Layout - Power Supply + UI + Controller (TOP Layer)

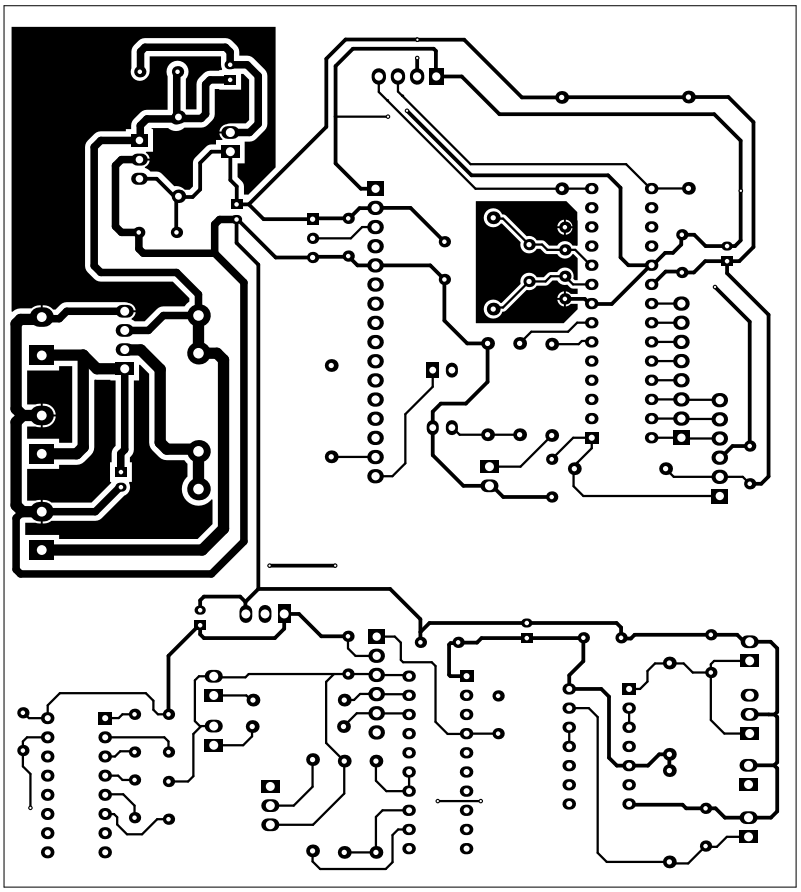


Figura B.2: PCB Layout - Power Supply + UI + Controller (BOTTOM Layer)

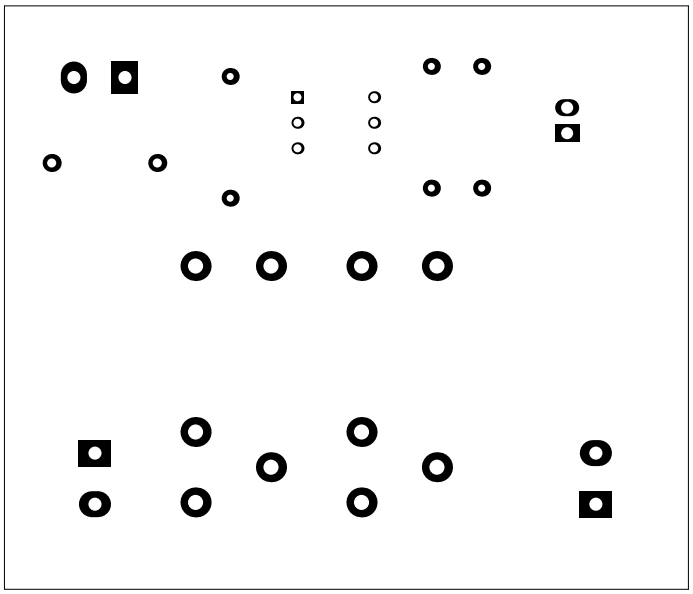


Figura B.3: PCB Layout - Safety Board (TOP Layer)

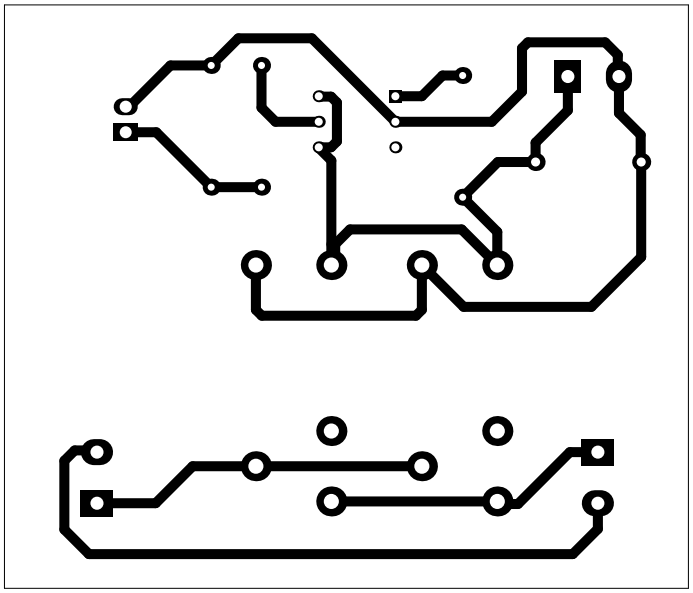


Figura B.4: PCB Layout - Safety Board (BOTTOM Layer)

Appendice C

PCB 3D View

Di seguito è riportata la vista dall'alto in 3D dei due circuiti stampati realizzati: il primo con le tre sezioni: Power Supply, Controller e User Interface e il secondo con la Safety Board. Si evidenzia inoltre la presenza del dissipatore per il regolatore di tensione LM7805 con package TO-220 e il modulo RTC esterno dotato di batteria. Per maggiori dettagli si veda il Capitolo 4.

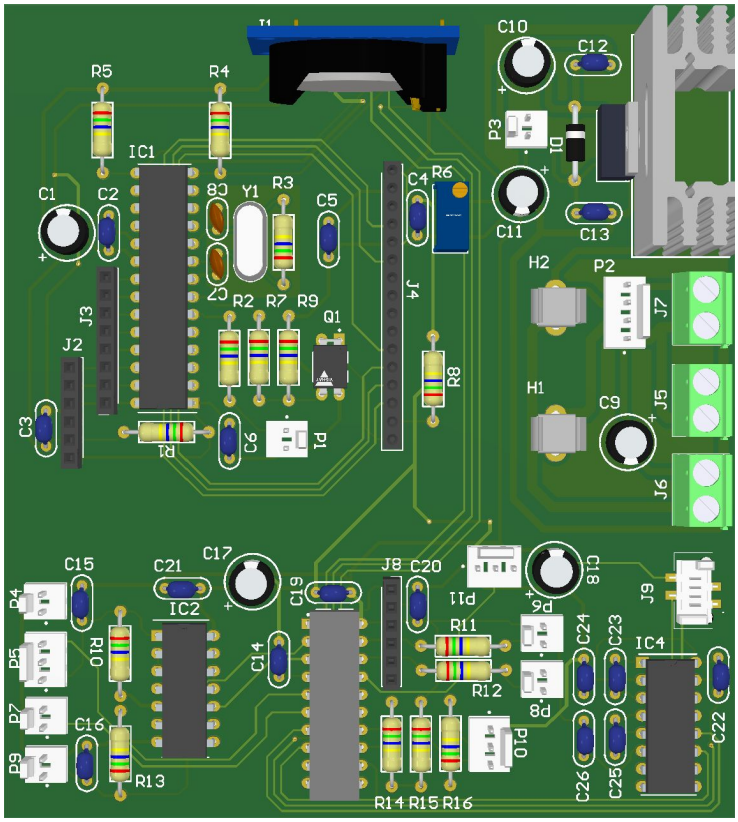


Figura C.1: 3D View - Power Supply + UI + Controller

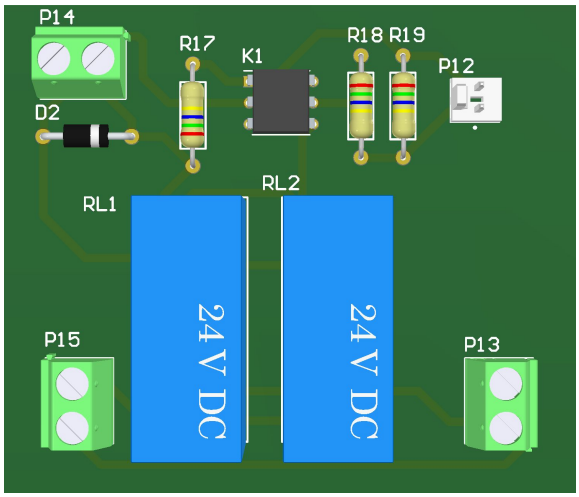


Figura C.2: 3D View - Safety Board

Appendice D

Assembly Drawings

Viene di seguito riportato l'Assembly Drawing per entrambi i PCBs. Questo documento permette di individuare la posizione corretta del componente nelle operazione di assemblaggio; ognuno di questi è individuato dal suo "designator", ovvero, la lettera che indica la tipologia del componente e la sua numerazione all'interno del PCB. Facendo riferimento al "Bill of Materials" è possibile conoscere le caratteristiche del componente da montare (tipologia, valore, dimensioni, codice produttore, ecc).

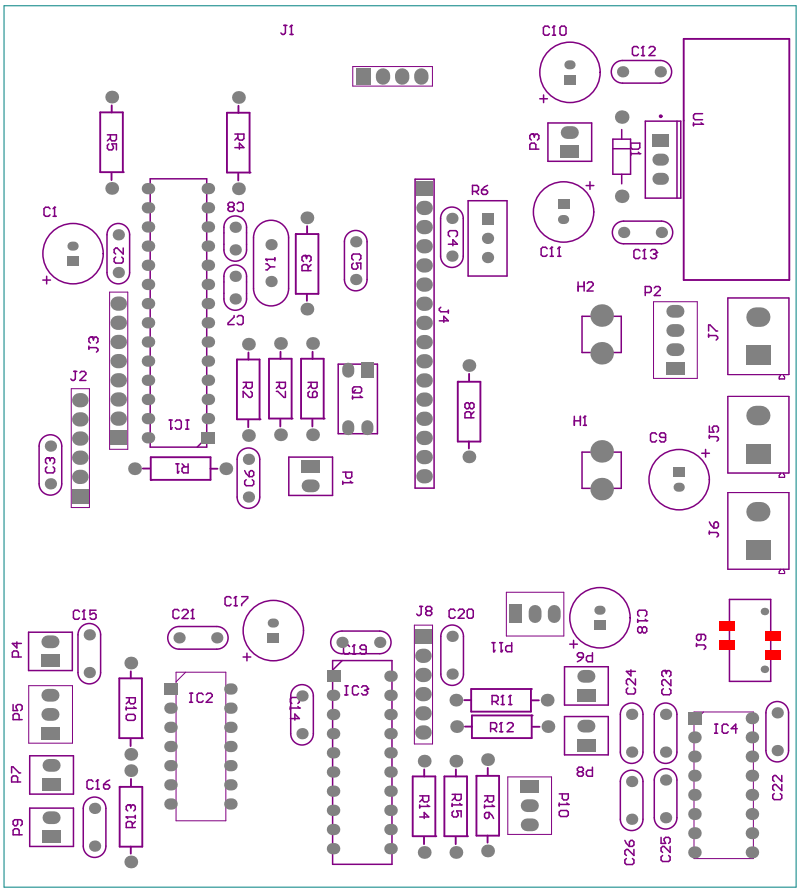


Figura D.1: Assembly Drawings - Power Supply + UI + Controller

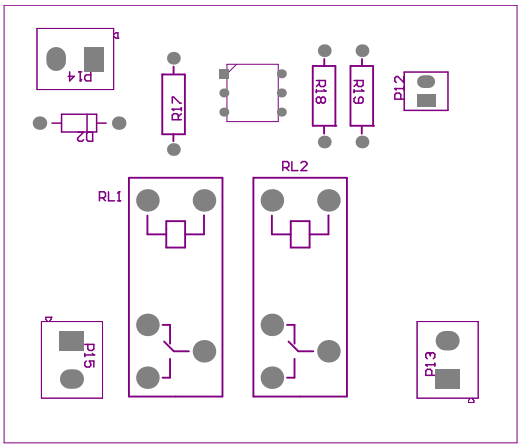


Figura D.2: Assembly Drawings - Safety Board

Bibliografia

[1] *Ablazione Laser*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Ablazione_laser.

[2] *The LEONARDO®-Laser Family: Mobile, efficient, and high-quality diode lasers are our passion*. URL: https://www.biolitec.com/en/products/leonardo-laser-family.html.

[3] *Lasemar ®1500*. URL: https://www.eufoton.com/it/prodotti/laser/lasemar-1500.

[4] *Spectrum ®Dual Boost ®*. URL: https://www.eufoton.com/it/prodotti/laser/spectrum-dual-boost.

[5] *Diode Laser DIOLAS Newton*. URL: https://www.limmerlaser.de/en/products-solutions/diode-laser-diolas-newton.

[6] *Diode Laser DIOLAS Photon*. URL: https://www.limmerlaser.de/en/products-solutions/diode-laser-diolas-photon.

[7] *SAT-M2 Multi-Application Surgical Laser*. URL: https://www.pioon.com/products/medical-surgical-laser.html.

[8] *Gbox Medical Diode Laser Systems*. URL: https://www.darppon.com/medical-laser-equipment/gbox-medical-diode-laser-systems.html.

[9] *VELAS Medical Diode Laser Systems*. URL: https://www.darppon.com/medical-laser-equipment/velas-medical-diode-laser-systems.html.

[10] *neoV Laser Systems*. URL: https://www.neo-laser.com/neov-laser.

[11] *LM78XX/LM78XXA 3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator*. URL: https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/786138.pdf.

[12] *Heat Sink Voltage Regulator 7805*. URL: https://www.petervis.com/electronics/Voltage_Regulator_Heatsink/Heatsink_for_TO-220_Voltage_Regulator.html.

[13] *PIC18F2520 - Microcontrollers and Processors*. URL: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F2520.

[14] *I2C Bus Pullup Resistor Calculation*. URL: https://www.ti.com/lit/an/slva689/slva689.pdf?ts=1604382387297.

[15] *I2C-bus specification and user manual*. URL: https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf.

[16] *PIC16F1708 - 8-bit Microcontrollers - Microchip Technology*. URL: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F1708.

[17] *Debouncing fun with Schmitt triggers and capacitors*. URL: https://mansfield-devine.com/speculatrix/2018/04/debouncing-fun-with-schmitt-triggers-and-capacitors/.

[18] *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors datasheet (Rev. H)*. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf.

[19] *Operational Amplifier Module of 8-Bit PIC MCUs*. URL: http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/90003132A.pdf.

[20] *LDP CW 20 50*. URL: https://picolas.de/wp-content/uploads/2019/10/LDP-CW_20-50_Safety_Manual_Rev1905.pdf.

[21] H.-W. Huang e T.-L. Horng. «"Bioheat transfer and thermal heating for tumor treatment"». In: *Heat Transfer and Fluid Flow in Biological Processes. Elsevier, 2015, pp. 1–42.* ().

[22] Adapted from AF Emery e KM Sekins (1982); K Giering et al. (1995); as reported by S. Andersson-Engels. In: ().

[23] M. A. Caponero F. M. Di Matteo M. Martino-M. Pandolfi P. Saccomandi E. Schena e S. Silvestri. «"Theoretical analysis and experimental evaluation of laser-induced interstitial thermotherapy in ex vivo porcine pancreas"». In: *IEEE Transactions on biomedical engineering, vol. 59, no. 10, pp. 2958 2964, 2012* ().

[24] A. Ishimaru. «"Diffusion of light in turbid material,"» in: *Appl. Opt., vol. 28, no. 12, pp. 2210 2215, Jun. 1989.* ().

[25] A. D. McNaught e A. Wilkinson. *IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book").* 1997.

Elenco delle figure

3.1 Leonardo® Mini di Biolitec® 6
3.2 Leonardo® di Biolitec® 7
3.3 LASEmaR® 1500 di Eufoton® 8
3.4 Spectrum® Dual Boost® di Eufoton® 9
3.5 DIOLAS Newton di Limmer Laser GmbH 9
3.6 DIOLAS Photon di Limmer Laser GmbH 10
3.7 SAT-M2 di Pioon 11
3.8 Gbox Medical Laser di Gigaa Optronics Technology Co. 11
3.9 VELAS Medical Laser di Gigaa Optronics Technology Co. 12
3.10 neoV Laser System® di neoLaser® 13

4.1 Schema a blocchi del dispositivo 17
4.2 Datasheet LM7805 della Fairchild 18
4.3 Diodo Laser BMU7-915 01 R con pigtail multimodo da 105µm 19
4.4 Caratteristica del Diodo Laser con la retta ottenuta tramite interpolazione lineare 21
4.5 LDP-CW 20-50 Laser Driver 22
4.6 Schema convertitore Buck LDP-CW 20-50 23
4.7 Schema a blocchi regolatore PI LDP-CW 20-50 24
4.8 Esempio di comunicazione seriale tramite protocollo I^2C. In azzurro il segnale di Clock (SCL) e in giallo i dati trasmessi (SDA) 25
4.9 Schema a blocchi dell' User Interface 26
4.10 Comunicazione seriale tramite protocollo I^2C tra l'Ui e il Controller 28
4.11 Prototipo su breadboard dell' User Interface 28
4.12 Schema a blocchi del Controller 30
4.13 Comunicazione seriale RS-232 tra il Controller e il Driver Laser 30
4.14 Prototipo su breadboard del Controller 31
4.15 Schema amplificatore operazione in configurazione non invertente [19] . . . 32
4.16 Test del dispositivo completo 40
4.17 Test del dispositivo 41
4.18 Dettaglio scheda di sicurezza a relays realizzata su millefori 42
4.19 Disposizione frontale dei componenti sul contenitore 42
4.20 Vista interna del dispositivo 43
4.21 Dettaglio disposizione interna dei vari moduli 44
4.22 Dettaglio PCB montato (User Interface + Controller + Power Supply) . . 45

4.23 Dettaglio fissaggio del diodo laser all'involucro 45
4.24 Serigrafia finale della parte frontale 46
4.25 Serigrafia finale della parte posteriore 46
4.26 Vista frontale del dispositivo finale 46
4.27 Vista dal retro del dispositivo finale 47

5.1 Set-up della prova di ablazione termica laser 49
5.2 Vista delle fibre ottiche con reticoli di Bragg e la fibra di *delivery* 50
5.3 Grafico che mostra la massima temperatura raggiunta da ogni singolo reticolo 50
5.4 Grafico che mostra l'andamento della temperatura in funzione del tempo. Ogni curva rappresenta un reticolo di Bragg 51
5.5 Particolare della zona di ablazione nella prima prova 51
5.6 Particolare della zona di ablazione nella prima prova 52
5.7 Grafico che mostra la massima temperatura raggiunta da ogni singolo reticolo 52
5.8 Grafico che mostra l'andamento della temperatura in funzione del tempo. Ogni curva rappresenta un reticolo di Bragg 53
5.9 Particolare della zona di ablazione nella seconda prova dove si può osservare una carbonizzazione del tessuto 53
5.10 Particolare della zona di ablazione nella seconda prova dove si può osservare una carbonizzazione del tessuto 54

6.1 Geometria modello 2D 57
6.2 Mesh del modello 2-D 59
6.3 Distribuzione delle temperature a z=0 (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo. 60
6.4 Distribuzione delle temperature a z=1mm (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo. 60
6.5 Distribuzione delle temperature a z=2mm (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo. 61
6.6 Distribuzione delle temperature a z=5mm (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo. 61
6.7 Distribuzione delle temperature a z=10mm (P=2 W, t=180 s, CW). Viene mostrata, a sinistra, la distribuzione finale delle temperature all'interno dell'area considerata e, a destra, la variazione della temperatura in diversi punti in funzione del tempo. 62

7.1 Esempio etichettatura di un laser classe 4 67

B.1 PCB Layout - Power Supply + UI + Controller (TOP Layer) 81

B.2 PCB Layout - Power Supply + UI + Controller (BOTTOM Layer) 82
B.3 PCB Layout - Safety Board (TOP Layer) 83
B.4 PCB Layout - Safety Board (BOTTOM Layer) 83

C.1 3D View - Power Supply + UI + Controller 84
C.2 3D View - Safety Board 85

D.1 Assembly Drawings - Power Supply + UI + Controller 87
D.2 Assembly Drawings - Safety Board 87

Elenco delle tabelle

3.1 Tabella di confronto dispositivi commerciali - Parte 1 14
3.2 Tabella di confronto dispositivi commerciali - Parte 2 15