

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE**



**LAMPADA A STATO SOLIDO  
CON CONTROLLO DIGITALE DELLA  
TEMPERATURA DI COLORE**

**RELATORE: PROF. SIMONE BUSO**

**LAUREANDO: ROBERTO MONTI**

**ANNO ACCADEMICO 2009/2010**



*Un'assurdità plausibile  
è sempre migliore di una  
possibilità che non  
convince.  
(Aristotele)*



# INDICE

<b>SOMMARIO</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>9</b>
<b>TECNICHE DI ILLUMINAZIONE</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 Lampada a incandescenza</b> .....	<b>11</b>
<b>1.2 Lampada alogena</b> .....	<b>12</b>
<b>1.3 Lampade a scarica in gas</b> .....	<b>12</b>
<b>1.4 Lampade fluorescenti</b> .....	<b>13</b>
<b>1.5 Lampade fluorescenti compatte</b> .....	<b>13</b>
<b>1.6 Lampade al sodio a bassa pressione (SOX)</b> .....	<b>14</b>
<b>1.7 Lampade al sodio ad alta pressione (SON)</b> .....	<b>14</b>
<b>1.8 High Brightness Ligth-Emitting Diodes (HB LED)</b> .....	<b>15</b>
<b>TEORIA DEL COLORE</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Il corpo nero</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 La temperatura di colore</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Miscelazione dei colori</b> .....	<b>20</b>
<b>2.4 Intensità luminosa</b> .....	<b>21</b>
<b>2.5 Resa del colore</b> .....	<b>21</b>
<b>PROGETTO</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1 I LED</b> .....	<b>24</b>
3.1.1 Quale combinazione di colori .....	24
3.1.2 RGB LED.....	25
3.1.3 Rosso verde e bianco freddo Vs blu verde e bianco caldo.....	26
<b>3.2 Colorimetria</b> .....	<b>27</b>
3.2.1 Scelta LED.....	28
3.2.2 Quantità di LED.....	33
<b>3.3 Controllo temperatura di colore</b> .....	<b>35</b>
3.3.1 Controllo di temperatura “feed-forward” .....	36
3.3.2 Controllo con determinazione della temperatura dalle caratteristiche tensione- corrente del LED.....	36
3.3.3 Controllo del flusso luminoso dei LED .....	37
3.3.4 Controllo delle coordinate cromatiche .....	37
3.3.5 Controllo scelto.....	38
<b>3.4 Pilotaggio LED</b> .....	<b>38</b>
3.4.1 Tecnica pilotaggio: PWM vs AM .....	38
<b>3.5 Scelta driver</b> .....	<b>39</b>

<b>3.6</b>	<b>Scelta microcontrollore .....</b>	<b>42</b>
<b>3.7</b>	<b>Acquisizione tensione sui LED.....</b>	<b>43</b>
3.7.1	Dimensionamento circuiti di condizionamento .....	44
<b>3.8</b>	<b>Schema elettrico .....</b>	<b>46</b>
<b>3.9</b>	<b>Layout.....</b>	<b>47</b>
<b>3.10</b>	<b>Montaggio lampada.....</b>	<b>48</b>
<b>3.11</b>	<b>Firmware .....</b>	<b>49</b>
 <b>CARATTERIZZAZIONE LED E CONTROLLO .....</b>		 <b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Caratterizzazione tensione temperatura .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>Caratterizzazione temperatura flusso luminoso .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3</b>	<b>Caratterizzazione delle coordinate cromatiche.....</b>	<b>61</b>
 <b>MISURE E ANALISI DEI RISULTATI.....</b>		 <b>69</b>
<b>5.1</b>	<b>Misure elettriche .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2</b>	<b>Misure fotometriche .....</b>	<b>71</b>
5.2.1	Analisi del funzionamento della lampada senza controllo di temperatura.....	72
5.2.2	Funzionamento con controllo attivo.....	76
5.2.3	Funzionamento del controllo a varie luminosità .....	78
<b>5.3</b>	<b>Resa cromatica della lampada.....</b>	<b>81</b>
5.3.1	Spettri misurati .....	82
 <b>CONCLUSIONI .....</b>		 <b>85</b>
 <b>APPENDICE A CODICE PIC .....</b>		 <b>87</b>
 <b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		 <b>107</b>

## **SOMMARIO**

Scopo del presente lavoro di tesi è progettare e costruire una lampada a stato solido in grado di produrre luce bianca a temperatura di colore e luminosità variabili (con una potenza illuminante di circa 2000 lumen). Questa lampada dovrà essere in grado di mantenere il bianco impostato anche all'aumentare della temperatura dei LED utilizzati come sorgenti.



# INTRODUZIONE

L'invenzione del 1878 di Thomas Edison, la famosa lampadina a incandescenza, è arrivata praticamente invariata fino ai giorni nostri. Tuttavia, è noto già dagli anni '60 che il rendimento luminoso di tale lampadina è davvero basso rispetto alla potenza elettrica consumata. Questo ha portato alla ricerca di fonti luminose ben più efficienti. Attualmente esistono soluzioni che consentono rendimenti molto superiori come le lampade alogene, le lampade a scarica in gas e i LED. Di fatto l'era della lampadina a incandescenza è ormai finita. L'Unione Europea ha infatti sancito la graduale messa al bando delle lampadine a incandescenza vietandone la produzione e la vendita con il seguente calendario:

- Settembre 2009: potenza pari a 100 W;
- Settembre 2010: potenza pari a 75 W;
- Settembre 2011: potenza pari a 60 W;
- Settembre 2012: qualsiasi potenza.

Le alternative a questo metodo di illuminare le nostre case e le nostre città non sono certo mancate negli anni e ora più che mai sono diventate importanti, una o più di queste dovranno sostituire definitivamente le onnipresenti lampadine a incandescenza. Sapere con certezza fin da oggi quale tecnologia prenderà il loro posto non è immediato. I due criteri su cui maggiormente si concentrano le ricerche sono: (i) alto rendimento energetico e (ii) eliminazione delle sostanze inquinanti presenti nelle sorgenti luminose. A fronte di tali vincoli di produzione l'unica alternativa oggi disponibile è rappresentata dall'illuminazione a stato solido, i LED. Tuttavia il rendimento è solo uno dei parametri che caratterizzano una sorgente luminosa. Infatti, una sorgente luminosa dovrebbe avere uno spettro il più possibile ricco di frequenze irradianti, senza buchi o picchi troppo marcati, per non cambiare la percezione dei colori in chi osserva. Questo si traduce in un alto indice di resa cromatica o CRI (CRI che verrà approfondito in seguito nella sezione "*Resa del colore*").

In questo lavoro di tesi viene realizzata una lampada a LED con spettro di emissione controllabile utilizzando la tecnica di miscelazione additiva dei colori. Viene inoltre

implementato un algoritmo che permette di ridurre l'influenza della temperatura sulla luce emessa.

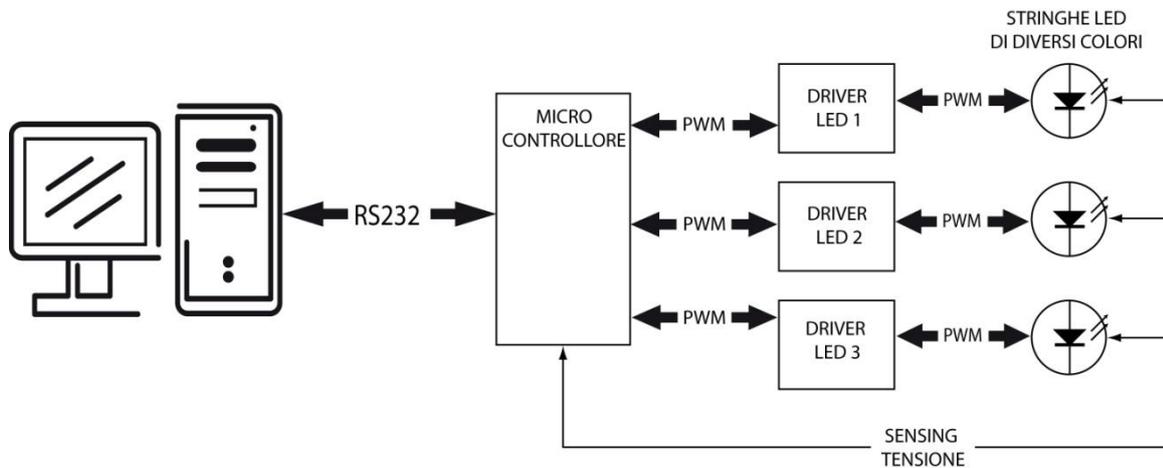


Figura 0.1.1 Schema a blocchi dell'hardware necessario al presente lavoro di tesi.

Lo schema a blocchi di Figura 0.1.1 mostra una sintesi dell'hardware utilizzato. Tramite un PC vengono inviate le richieste di temperatura di colore a un microcontrollore che produce tre uscite PWM che andranno, passando per i driver a corrente costante, a modulare la luminosità dei vari LED utilizzati. Per risalire alla temperatura di giunzione ed effettuare una compensazione che riduca gli effetti del riscaldamento sulla luce prodotta, viene effettuato un sensing di tensione tramite il quale ricaveremo tale informazione. Tutto il lavoro viene svolto da un firmware caricato nel microcontrollore rendendo possibile l'eliminazione del PC dal sistema in una fase successiva a quella di prototipizzazione.

Il lavoro di tesi nel quale viene descritto il progetto si articola in 6 capitoli.

- Nel primo viene effettuata una panoramica sulle attuali alternative di illuminazione in commercio;
- Nel secondo vengono toccati sinteticamente argomenti di illuminotecnica e colorimetria nella quantità necessaria per capire come i colori vengono miscelati per produrre il bianco;
- Il terzo capitolo espone le fasi di progetto, hardware e software, che hanno portato alla realizzazione di questa lampada;
- Il quarto capitolo espone il metodo utilizzato per la caratterizzazione dei LED utilizzati;
- Nel quinto capitolo vengono riportate le misure elettriche e fotometriche e analizzati i risultati ottenuti;
- L'ultimo capitolo riporta conclusioni e possibili miglioramenti.

# CAPITOLO 1

## TECNICHE DI ILLUMINAZIONE

In questo capitolo verranno presentate le soluzioni attualmente disponibili nel mercato evidenziandone le caratteristiche principali e le criticità.

### 1.1 LAMPADA A INCANDESCENZA

La lampada a incandescenza (Figura 1.1) è una sorgente luminosa in cui la luce viene prodotta dal riscaldamento (fino a circa 2700 K) di un filamento di tungsteno attraverso cui passa la corrente elettrica.



Figura 1.1 Lampadina a incandescenza (fonte <http://typesoflightbulbs.com/>).

Durante il funzionamento il tungsteno sublima e il filamento diventa sempre più sottile fino a spezzarsi dopo circa 1000 ore di funzionamento. Oltre che in calore l'energia viene convertita in luce in una misura compresa tra il 5 e il 10%. Nelle lampadine moderne il bulbo di vetro non è vuoto ma contiene un gas inerte a bassa pressione, di solito Argon, più raramente Krypton. Quest'ultimo consente una resa superiore del 10% circa a parità di potenza. Questi gas riducono i rischi d'implosione e prolungano la vita del filamento. Inoltre, la presenza del gas

Argon/Kripton riduce l'annerimento del bulbo dovuto al deposito del tungsteno che evapora. Al momento dell'accensione della lampada, poiché il filamento è freddo e la sua resistenza è bassa, si determina un picco di corrente della durata di pochi decimi di secondo e del valore di 10-12 volte la corrente a regime.

## 1.2 LAMPADA ALOGENA

Le lampade alogene (Figura 1.2) sono lampade a incandescenza all'interno delle quali viene introdotta una miscela di alogeni, essenzialmente bromo, che crea un processo di rigenerazione del filamento di tungsteno senza dar luogo al fenomeno di annerimento del bulbo. Questo tipo di sorgente offre alcuni vantaggi rispetto alle lampade a incandescenza tradizionali:

- superiore efficienza luminosa (circa 22 lumen/watt);
- emissione di luce più gradevole perché più "bianca" con un'eccellente resa dei colori;
- maggior vita media (di circa 2.000 ore).



Figura 1.2: lampada alogena (fonte <http://www.hgcorner.com/>).

## 1.3 LAMPADE A SCARICA IN GAS

La lampada a scarica è un tipo di lampadina basata sull'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un plasma di gas ionizzato (Figura 1.3).



Figura 1.3 :Lampada a scarica in gas (fonte <http://typesoflightbulbs.com/>)

La ionizzazione del gas è ottenuta per mezzo di una scarica elettrica attraverso il gas stesso. Queste lampade sfruttano il principio secondo il quale applicando una differenza di potenziale opportuna tra due elettrodi immersi in un gas o in vapori metallici tra essi si genera una scarica a cui è associata l'emissione di radiazione ultravioletta.

Tali lampade hanno un'efficienza luminosa fino a dieci volte superiore rispetto a quella delle lampade a incandescenza, in quanto è più elevata la quota di energia assorbita trasformata in luce. Le lampade a scarica necessitano di una componentistica particolare, che può essere alloggiata nel corpo lampada (lampade 'integrate') oppure esternamente.

Alla famiglia delle lampade a scarica in gas appartengono le lampade fluorescenti. Ve ne sono di quattro tipi: lampade fluorescenti tubolari; lampade fluorescenti tubolari ad alta frequenza; lampade fluorescenti compatte; lampade fluorescenti compatte integrate elettroniche.

## 1.4 LAMPADE FLUORESCENTI

La lampada fluorescente è un particolare tipo di lampada a scarica in cui l'emissione luminosa visibile è indiretta, ovvero non è emessa direttamente dal gas ionizzato, ma da un materiale fluorescente. Economiche, offrono un'efficienza luminosa più elevata rispetto alle lampade a incandescenza ed hanno una durata sensibilmente maggiore. Nelle lampade fluorescenti il tubo contenitore è rivestito all'interno di polveri fosforiche e contiene piccole quantità di mercurio gassoso. Il mercurio colpito dalla scarica elettrica emette radiazioni ultraviolette che, colpendo i fosfori, eccitano la fluorescenza dando origine all'emissione della luce. Per il funzionamento necessitano di due apparecchiature ausiliare esterne denominate starter e reattore.

## 1.5 LAMPADE FLUORESCENTI COMPATTE

Le lampade fluorescenti compatte sono state introdotte all'inizio degli anni '80 allo scopo di mettere a disposizione degli utenti sorgenti luminose che, pur avendo dimensioni e tonalità di luce simili a quelle delle lampade ad incandescenza, fossero caratterizzate da un'efficienza luminosa e da una durata di vita notevolmente superiori. Per quanto riguarda i principi di funzionamento sono comparabili alle lampade tubolari fluorescenti di cui costituiscono una miniaturizzazione (Figura 1.4).



Figura 1.4 Lampada fluorescente compatta (fonte <http://typesoflightbulbs.com/>).

Le lampade fluorescenti compatte hanno un'efficienza luminosa che varia da 40 a 60 lumen/watt a seconda del tipo, consentono quindi di ridurre di circa il 70% i consumi d'energia elettrica rispetto alle lampade a incandescenza di equivalente flusso luminoso: ad esempio, una di queste lampade da 20 watt fornisce la stessa quantità di luce di una a incandescenza da 100 watt. Di queste lampade esistono versioni con attacco a vite E 27 ed E 14 (comunemente conosciute come "attacco Edison" ed "attacco mignon") nel quale è incorporato anche il circuito elettronico che ne consente il funzionamento. Tali lampade, nel caso di rete a 220 volt, possono perciò essere sostituite direttamente alle lampade ad incandescenza di cui conservano le ridotte dimensioni e la semplicità di collegamento.

## **1.6 LAMPADE AL SODIO A BASSA PRESSIONE (SOX)**

Il principio di funzionamento si basa su una scarica elettrica in un ambiente gassoso composto da Ar+Ne+Na. Durante l'accensione a freddo, il sodio è depositato attorno al bulbo interno e la scarica avviene in una miscela composta da Argon e Neon. La scarica in questa miscela provoca il repentino riscaldamento della lampada, fino a raggiungere la temperatura di fusione del sodio. A quel punto, il sodio vaporizza e viene ionizzato dalla scarica, facendo assumere così la caratteristica emissione monocromatica gialla del sodio.

È usata nell'illuminazione stradale in incroci soggetti a nebbia. Grazie all'emissione monocromatica in una lunghezza d'onda ottimale per l'occhio umano, presenta un'efficienza luminosa molto elevata. Come una comune lampada a vapori di mercurio a bassa pressione, questa non ha bisogno di un ciclo di raffreddamento in caso di black-out ma richiede un tempo di riscaldamento molto lungo (circa 6-10 minuti) durante il quale emette la caratteristica luce rossa/rosata del neon presente al suo interno.

## **1.7 LAMPADE AL SODIO AD ALTA PRESSIONE (SON)**

Aumentando la pressione, il vapore di sodio si allontana dallo stato di gas ideale e il suo spettro di emissione si allarga rispetto alla riga spettrale monocromatica tipica. La luce prodotta da queste lampade è di colore bianco tendente al giallo (2000-2500 K), caratteristica che le rende adatte per applicazioni in cui la resa dei colori è importante (es. l'illuminazione di banchi alimentari). Il rendimento luminoso è elevato (fino a 115 Lumen/Watt) ed elevata è la durata di vita (oltre 16000 ore). Particolari accorgimenti costruttivi fanno fronte all'aggressività chimica del sodio. In caso di black-out, salvo ballast particolari in grado di generare tensioni di 30-70kV, la lampada necessita di un ciclo di raffreddamento di 3-5 minuti.

## 1.8 HIGH BRIGHTNESS LIGHT-EMITTING DIODES (HB LED)

Un LED (*Light-Emitting Diode*, Figura 1.5) è costituito da una giunzione PN che emette luce quando risulta polarizzata direttamente.

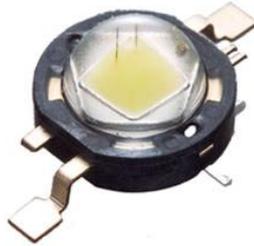


Figura 1.5 HBLED P4 della Seoul semiconductor (fonte <http://www.acriche.com/en/>).

Il fenomeno che lo permette è quello dell'elettroluminescenza: grazie alla polarizzazione diretta della giunzione si ha iniezione di portatori minoritari in eccesso (lacune in zona N ed elettroni in zona P). I minoritari in eccesso tendono quindi a ricombinarsi e la perdita di energia si traduce nell'emissione di fotoni ad una lunghezza d'onda dipendente dal gap di energia del semiconduttore utilizzato (a gap diretto) secondo la relazione:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

dove  $E$  rappresenta il gap di energia del semiconduttore,  $c$  la velocità della luce (circa 300000 km/s) e  $\lambda$  la lunghezza d'onda della radiazione emessa.

Non tutti i portatori minoritari che si ricombinano danno luogo all'emissione di fotoni. A fornire informazioni relative a questa non idealità è l'*efficienza quantica*: essa rappresenta, quando espressa in forma percentuale, il numero di fotoni emessi su 100 coppie elettrone-lacuna che si sono ricombinate. Le di coppie che non danno origine a radiazione luminosa perdono la loro energia cedendola al reticolo attraverso meccanismi di urto, riscaldando la struttura.



## CAPITOLO 2

# TEORIA DEL COLORE

L'occhio umano è in grado di percepire l'esistenza degli oggetti e le loro relazioni spaziali grazie alla luce che raccoglie. Riceve inoltre uno stimolo che genera la sensazione di colore in funzione della lunghezza d'onda della luce emessa o riflessa dalle superfici degli oggetti. Non è possibile dare una definizione più precisa dato che la visione del colore deriva da un processo molto complesso in cui i fattori fisiologici e psicologici si sovrappongono in maniera determinante a fattori fisici. Generalmente, al nostro occhio giunge luce composta da un certo insieme di lunghezze d'onda non separate tra loro che provocano la sensazione del colore. In questo capitolo verranno toccati gli argomenti utili a capire come miscelare più colori per ottenere il bianco desiderato. L'intenzione non è quella di dare una spiegazione esauriente dell'argomento; se il lettore volesse approfondire lo potrà fare consultando il libro di Pietro Palladin "Lezioni di illuminotecnica".

### 2.1 IL CORPO NERO

Un corpo ideale che non trasmette e non riflette l'energia che lo colpisce, ma la assorbe interamente, è chiamato in fisica *corpo nero*. Se un corpo nero viene portato a temperature elevate la sua emissione di energia sarà visibile. Lo spettro di emissione di un corpo nero è uno dei riferimenti in teoria del colore per le sorgenti bianche ed è riportato in Figura 2.1. La sua curva di emissione alle varie temperature è infatti mappata con precisione sul diagramma cromatico come si evidenzia in Figura 2.2.

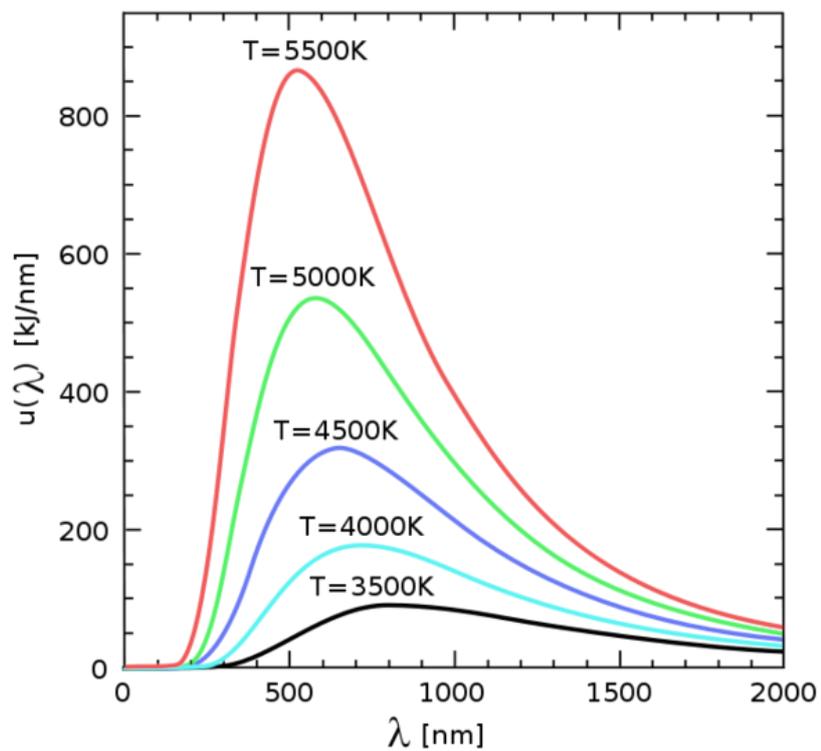


Figura 2.1: Spettro di emissione del corpo nero a diverse temperature (fonte Wikipedia).

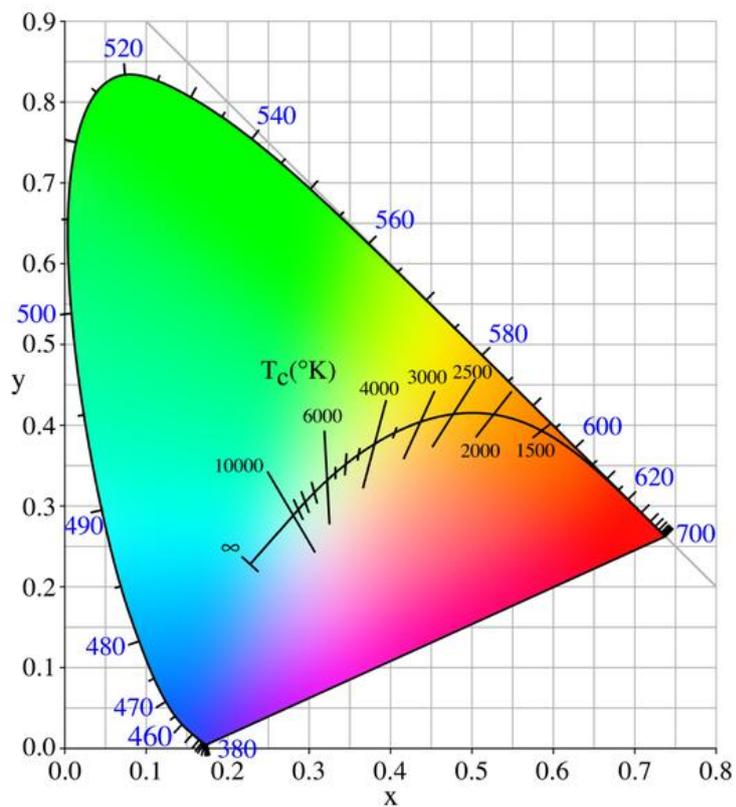


Figura 2.2 Curva di emissione del corpo nero sul diagramma cromatico xy CIE 1931 (fonte Wikipedia).

Nonostante le coordinate cromatiche del corpo nero siano calcolabili con precisione, si ricorre più spesso a formule approssimate per velocizzare il processo di calcolo. Tali formule sono riportate di seguito:

$$\begin{aligned}
 x_c &= \begin{cases} -0.2661239 \frac{10^9}{T^3} - 0.2343580 \frac{10^6}{T^2} + 0.8776956 \frac{10^3}{T} + 0.179910 & 1667K \leq T \leq 4000K \\ -3.0258469 \frac{10^9}{T^3} + 2.1070379 \frac{10^6}{T^2} + 0.2226347 \frac{10^3}{T} + 0.24039 & 4000K \leq T \leq 25000K \end{cases} \\
 y_c &= \begin{cases} -1.1063814x_c^3 - 1.34811020x_c^2 + 2.18555832x_c - 0.20219683 & 1667K \leq T \leq 2222K \\ -0.9549476x_c^3 - 1.37418593x_c^2 + 2.09137015x_c - 0.16748867 & 2222K \leq T \leq 4000K \\ +3.0817580x_c^3 - 5.87338670x_c^2 + 3.75112997x_c - 0.37001483 & 4000K \leq T \leq 25000K \end{cases} \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

Le formule sono divise in intervalli di temperatura per meglio seguire la curva di Figura 2.2, detta anche Plankian Locus.

Sono queste le formule utilizzate in questo lavoro ed inserite nel firmware del microcontrollore. Sarà pertanto sufficiente comunicare la temperatura di colore desiderata e il calcolo delle coordinate verrà effettuato "on-board".

## 2.2 LA TEMPERATURA DI COLORE

Il bianco è un colore con alta luminosità ma senza tinta. Più precisamente contiene tutti i colori dello spettro elettromagnetico ed è chiamato anche colore acromatico. Nella scienza della luce c'è un continuum di colori che possono esser chiamati "bianco". Come abbiamo visto, una parte di questi colori è quella emessa tramite l'incandescenza da un corpo a temperatura molto elevata. Per esempio, il colore di un corpo alla temperatura di 2850 kelvin è uguale alla luce della lampadina domestica. Lo spettro luminoso emesso da un corpo nero presenta un picco di emissione determinato, in base alla legge di Wien, esclusivamente dalla sua temperatura. Una sorgente reale differisce da un corpo nero ideale, ma l'analogia rimane valida. Pertanto, si definisce temperatura di colore di una certa radiazione luminosa la temperatura che dovrebbe avere un corpo nero affinché la radiazione luminosa emessa da quest'ultimo appaia cromaticamente più vicina possibile alla radiazione considerata. Una temperatura bassa (sempre però nell'incandescenza, intorno ai 2000 K) corrisponde ad un colore giallo-arancio. Scendendo si passa al rosso e all'infrarosso, non più visibile, mentre salendo di temperatura la luce si fa dapprima più bianca, quindi azzurra, violetta ed ultravioletta. Quando comunemente si dice che una luce è calda, in realtà questa corrisponde ad una temperatura di colore bassa, viceversa una temperatura maggiore produce una luce definita comunemente fredda. Tale definizione ha una motivazione puramente psicologica,

poiché la nostra mente tende ad associare a colori come il rosso o il giallo-arancio l'idea di caldo ed a colori come il bianco o l'azzurro l'idea di freddo.

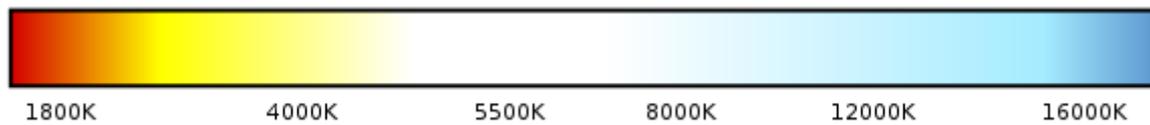


Figura 2.3 Rappresentazione visiva della temperatura di colore (fonte Wikipedia).

## 2.3 MISCELAZIONE DEI COLORI

In accordo con le leggi di Grassmann, le miscele di colori seguono il principio di additività. Per fare delle operazioni corrette di miscelazione dei colori è necessario un modello matematico degli stessi. Quello più comunemente utilizzato si avvale delle coordinate tricromatiche  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . Normalizzandole, come si vede nell'equazione (2.2), rispetto alla somma  $X+Y+Z$ , si ottengono le coordinate  $L$  (luminanza),  $x$  e  $y$ . Queste sono le coordinate che descrivono la posizione di un colore nel diagramma cromatico CIE 1931 visibile in Figura 2.2.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad e \quad L = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.2)$$

Conoscendo le unità cromatiche di due colori è quindi possibile sommarli per ottenere le unità cromatiche del colore risultante. Solitamente un colore viene identificato mediante le sue coordinate cromatiche  $(x, y)$  e la sua luminanza ( $L$ ), quest'ultima proporzionale all'unità cromatica  $Y$ . Prima di eseguire la somma dei due colori occorre sempre calcolarne le unità cromatiche. Se due colori hanno unità cromatiche  $X_1, Y_1, Z_1$  e  $X_2, Y_2, Z_2$  le coordinate cromatiche della miscela sono:

$$x = \frac{X_1+X_2}{D_1+D_2}, \quad y = \frac{Y_1+Y_2}{D_1+D_2} \quad (2.3)$$

Dove:

$$D_1 = X_1 + Y_1 + Z_1 \quad D_2 = X_2 + Y_2 + Z_2 \quad D = D_1 + D_2 \quad (2.4)$$

Dal momento che per qualsiasi colore si ha:

$$X_1 + X_2 = X = x \cdot D \quad Y_1 + Y_2 = Y = y \cdot D \quad (2.5)$$

Possiamo scrivere, sostituendo nelle prime due equazioni:

$$x = \frac{x_1 D_1 + x_2 D_2}{D_1 + D_2} = \frac{x_1 (Y_1/y_1) + x_2 (Y_2/y_2)}{(Y_1/y_1) + (Y_2/y_2)} \quad (2.6)$$

$$y = \frac{y_1 D_1 + y_2 D_2}{D_1 + D_2} = \frac{(Y_1 + Y_2)}{(Y_1/y_1) + (Y_2/y_2)} \quad (2.7)$$

Per più colori si avrà:

$$x = \frac{\sum_1^n x_k \frac{Y_k}{y_k}}{\sum_1^n \frac{Y_k}{y_k}} \quad y = \frac{\sum_1^n y_k \frac{Y_k}{y_k}}{\sum_1^n \frac{Y_k}{y_k}} \quad (2.8)$$

In sostanza, il punto cromatico di una miscela di due colori giacerà sul segmento che li unisce sul diagramma cromatico e il punto di una miscela di tre colori si troverà all'interno del triangolo che ha per vertici le coordinate dei tre colori stessi.

Nel nostro caso il lavoro da fare è l'opposto. Già in partenza siamo infatti a conoscenza sia delle coordinate cromatiche delle tre sorgenti (inizialmente ricavate dai data sheet e poi misurate accuratamente) sia delle coordinate da raggiungere. Queste ultime varieranno con la temperatura di colore desiderata secondo le formule descritte in precedenza. Quella che dobbiamo calcolare è l'intensità luminosa che devono avere le tre sorgenti per fare in modo che la loro miscelazione produca il bianco desiderato.

## 2.4 INTENSITÀ LUMINOSA

L'intensità che dobbiamo ottenere dalla nostra lampada è di 2000 lumen ovvero:

$$\frac{2000 \text{ lm}}{4\pi} = 159,15 \text{ cd.} \quad (2.9)$$

Tenendo presente che l'intensità luminosa totale è data dalla somma dei flussi di tutti i LED, e che questi vengono miscelati in percentuali diverse a seconda della temperatura di colore desiderata, l'intensità massima raggiungibile dalla lampada sarà variabile con la temperatura di colore. In particolare, verrà scelta una quantità di LED tale da garantire i 2000 lumen nel punto di luminosità massima anche in funzione della temperatura di colore, nel nostro caso circa 5000K.

## 2.5 RESA DEL COLORE

L'indice generale di resa cromatica  $R_a$  (CRI Chromatic Rendering Index) di una sorgente è una misura di spostamento cromatico di un oggetto, ovvero di una variazione di colore e luminosità. Lo spostamento è riferito a due situazioni: nella

prima l'oggetto è illuminato da una sorgente incognita e nella seconda dalla sorgente di riferimento. Questo indice è una misura delle proprietà di resa del colore delle sorgenti. Esso è basato su un metodo di test colorimetrico adottato dalla CIE (pubblicazione n° 13/1965; 13.2/1974) attualmente impiegato per valutare la capacità di una lampada di fornire una rappresentazione fedele del colore di un oggetto. Il CRI viene determinato avvalendosi del diagramma cromatico uniforme *uv* piuttosto che del diagramma cromatico *xy* CIE 1931. Questa scelta dipende dal fatto che il diagramma *xy* non ha una scala di cromaticità uniforme: pertanto la differenza di colore percepita tra due punti, che sono a una data distanza l'uno dall'altro su tale diagramma, varia con l'ubicazione dei due punti.

In alcuni casi, anche se complessivamente il valore dell'indice di resa cromatica è alto, può accadere che per qualche particolare lunghezza d'onda la resa cromatica sia scarsa. Ciò significa che una sorgente luminosa con un indice elevato ha la tendenza a rendere bene un ampio spettro di colori, ma non garantisce l'apparenza naturale di un colore specifico. Questo può accadere per due motivi: in primo luogo perché l'indice di resa cromatica nasce da una media di otto (o più) valori associati a diverse lunghezze d'onda, in secondo luogo perché ogni sorgente luminosa presenta dei picchi di maggiore emissione per qualche lunghezza d'onda.

La norma UNI 10380 suddivide l'insieme dei possibili valori dell'indice di resa cromatica in cinque gruppi:

- **1A:**  $R_a \geq 90\%$
- **1B:**  $80\% \leq R_a < 90\%$
- **2:**  $60\% \leq R_a < 80\%$
- **3:**  $40\% \leq R_a < 60\%$
- **4:**  $20\% \leq R_a < 40\%$

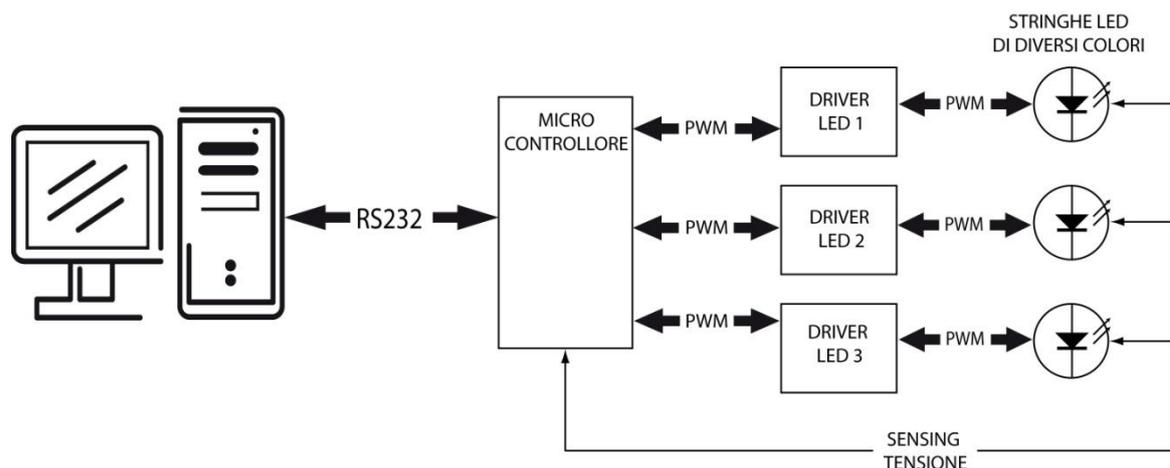
La norma fornisce anche qualche indicazione su quale indice utilizzare a seconda degli ambienti da illuminare:

- **1A:** abitazioni, musei, studi grafici, ospedali, studi medici, ecc.
- **1B:** uffici, scuole, negozi, palestre, teatri, industrie tessili e dei colori, ecc.
- **2:** locali di passaggio, corridoi, scale ascensori, palestre, aree servizio, ecc.
- **3:** interni industriali, officine, magazzini depositi, ecc.
- **4:** parcheggi, banchine, cantieri, scavi, aree di carico e scarico, ecc.

## CAPITOLO 3

# PROGETTO

La realizzazione della lampada oggetto di questa tesi ha comportato numerose scelte in fase di progetto. Le specifiche da soddisfare sono state l'argomentazione principale per alcune di esse, tutte valutate avvalendosi del supporto della letteratura attuale. La quantità di lumen totali richiesta ha imposto il numero di LED necessario, mentre la necessità di controllare la temperatura di colore emessa ha imposto vincoli sul pilotaggio degli stessi. Ogni colore della sorgente richiede infatti di essere regolato in intensità con precisione ed in maniera indipendente. La necessità di mantenere costante la temperatura di colore emessa ci ha obbligati a pensare di utilizzare dei sensori per attenuare il più possibile gli effetti negativi della temperatura. Riportiamo di seguito lo schema a blocchi presentato nell'introduzione, una panoramica delle parti costituenti l'hardware della lampada che dovranno essere progettate ed implementate.



3.1 Schema a blocchi dell'hardware necessario al presente lavoro di tesi.

Sono stati considerati i lavori inerenti pubblicati finora, in particolare [7], dove viene effettuato un controllo di temperatura di colore e luminosità utilizzando quattro colori (rosso, verde, blu e bianco) senza però preoccuparsi delle derivate termiche. In caso di sistemi funzionanti in condizioni normali però, per ottenere un

funzionamento stabile in temperatura, è necessario un controllo di qualche tipo, anche sfruttando la relazione tra tensione diretta e temperatura dei LED stessi[8]. I LED costituenti la lampada andranno montati su di un dissipatore, più vicini possibile tra di loro ed intervallati in maniera da consentire la migliore miscelazione di luce possibile.

### 3.1 I LED

La prima cosa da chiarire è quali LED si dovranno utilizzare per raggiungere il nostro scopo, ovvero una lampada da 2000 lumen di flusso a cromaticità variabile. Il fatto che la temperatura di colore debba essere modificabile a piacimento ci spinge a dover utilizzare un sistema a più LED di diverso colore le cui intensità di flusso luminoso devono essere regolabili con precisione. Questa topologia aggiunge ai normali problemi di gestione di LED ad alta luminosità, riguardanti invecchiamento, variazione di prestazioni con la temperatura e gestione del dimming, quello della miscelazione dei colori.

#### 3.1.1 QUALE COMBINAZIONE DI COLORI.

Tramite la teoria si è stabilito che dalla miscelazione di tre sorgenti luminose poste in tre punti differenti sul piano cromatico si possono ottenere tutti i colori che stanno all'interno del triangolo che ha come vertici i tre punti sorgente. Rimane da stabilire quali sorgenti utilizzare per ottenere il nostro scopo. Le possibilità sono molte sia per tipo che per quantità, la sintesi infatti si può ottenere anche con più di tre fonti luminose distinte ma le formule si complicano parecchio superate le tre unità. Per questo motivo ci si è concentrati su combinazioni di tre colori.

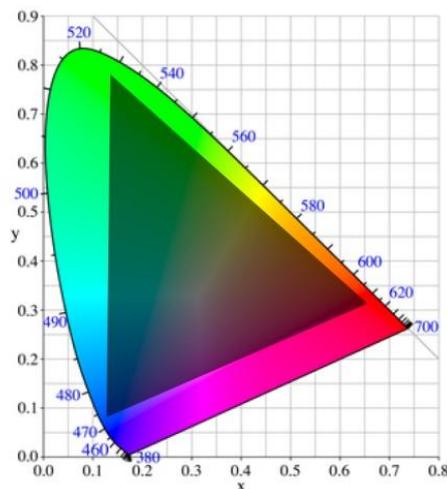


Figura 3.2 Diagramma cromatico con evidenziato in grigio un triangolo contenente tutti i possibili punti raggiungibili usando dei LED rossi verdi e blu.

### 3.1.2 RGB LED

Il primo approccio preso in considerazione è stato il classico rosso-verde-blu [2][3][5][6][8]. La forte saturazione (determinata dalla piccola larghezza dello spettro d'emissione) della luce emessa dai LED, permette la produzione di una grande varietà di colori. Anche la curva di radiazione del corpo nero si trova all'interno del triangolo delle coordinate riproducibili con questo sistema, ma ci si rende subito conto che questa tecnica va bene per creare un determinato colore su di una superficie bianca (come fanno i proiettori) ma non è certamente indicato per l'illuminazione ambientale. Il sistema ottenuto da tre sorgenti LED di questi colori avrebbe uno spettro fatto circa in questo modo:

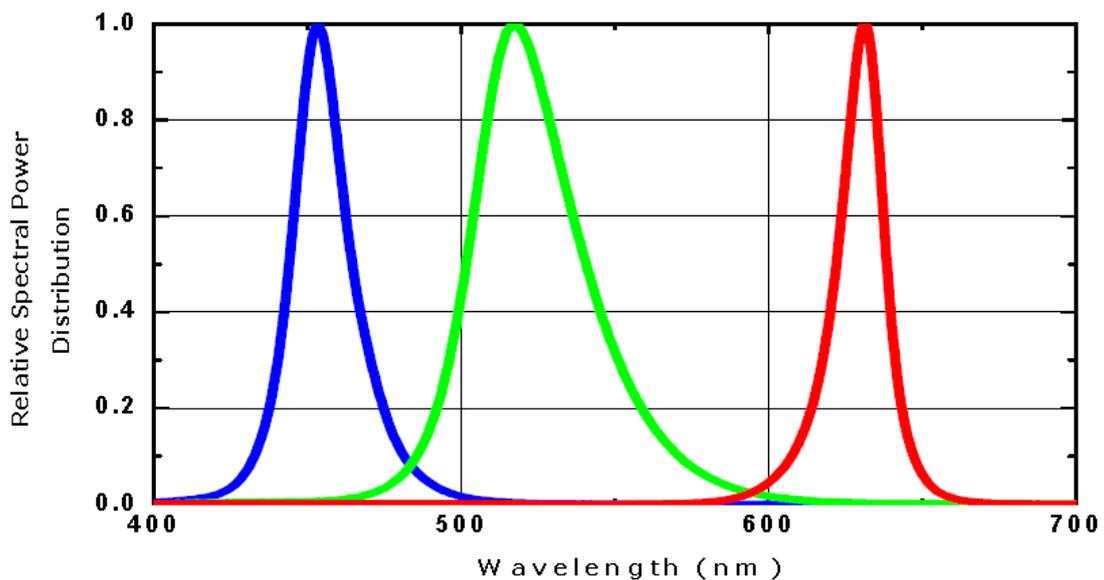


Figura 3.3 Spettri di LED di colore rosso verde e blu mostrati assieme. Si notino le carenze nello spettro tra un picco e l'altro. Fonte datasheet Seoul Semiconductors.

Gli evidenti picchi, intervallati a buchi, si traducono in una resa cromatica molto bassa; questo vorrebbe dire che in un caso come quello dell'immagine un oggetto arancio finirebbe con l'apparire praticamente grigio! Non si possono quindi impiegare soltanto questi tre colori, ma dobbiamo utilizzare nella nostra lampada almeno un LED bianco il cui spettro si presenta del tipo mostrato in Figura 3.4. In particolare si tratta di un bianco freddo della Seoul Semiconductor. Si noti come i fosfori utilizzati per la conversione della luce originariamente blu, della quale rimane un picco evidente, abbiano una copertura dello spettro abbastanza ampia. Aggiungendo due colori ad un LED bianco a fosfori sembra quindi possibile ottenere almeno in teoria una resa cromatica accettabile per l'illuminazione di ambienti.

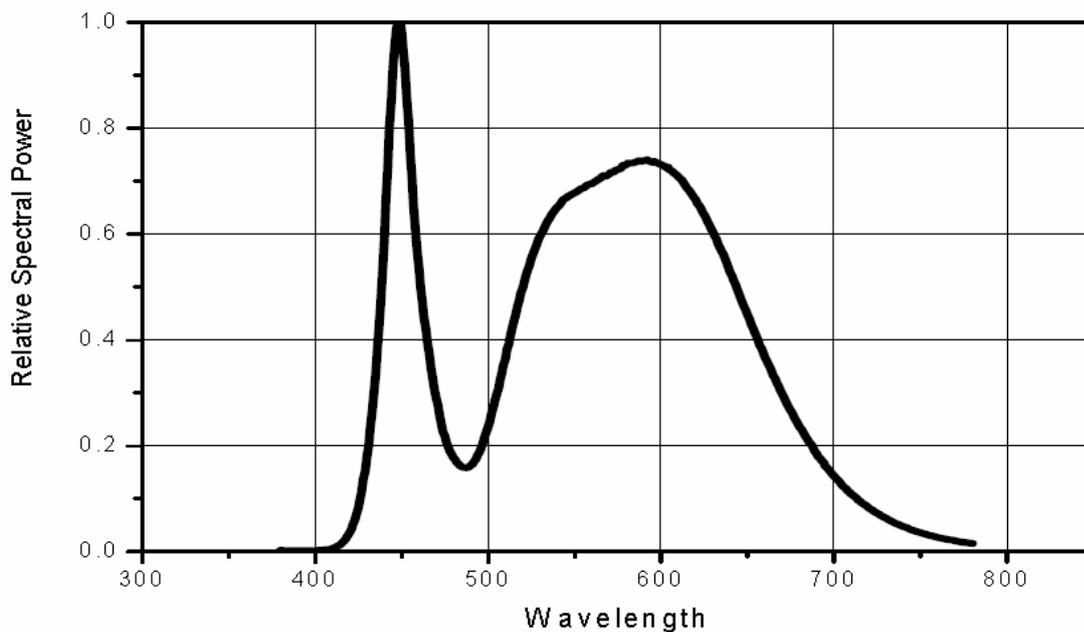


Figura 3.4 Spettro di un LED bianco freddo P4 (fonte data sheet Seoul Semiconductor)

### 3.1.3 ROSSO VERDE E BIANCO FREDDO VS BLU VERDE E BIANCO CALDO

Per migliorare la continuità dello spettro emesso dalla nostra lampada siamo quindi obbligati ad utilizzare dei LED bianchi a fosfori. Questo non ci limita molto dal punto di vista della varietà cromatica dato, che il nostro intento è quello di produrre una luce bianca che stia il più possibile vicino alla curva del corpo nero. Le due combinazioni di colori di LED che fanno al caso nostro sono quelle formate da bianco freddo, rosso e verde oppure da bianco caldo, blu e verde, delle quali sono riportati nella Figura 3.5 i triangoli che racchiudono l'insieme delle coordinate cromatiche raggiungibili. Come si vede dalle immagini una buona parte della curva che rappresenta la radiazione del corpo nero è ottenibile con entrambe le tecniche.

Per effettuare una scelta si sono presi in considerazione perciò altri parametri. Il colore verde è presente in entrambe le configurazioni quindi non pesa in questo senso nella decisione. Sappiamo dai data sheet che i LED rossi hanno un calo del flusso luminoso in funzione della temperatura molto più marcato rispetto agli altri LED il che porterebbe verso l'utilizzo di blu e bianco caldo, ma sappiamo anche che i LED che emettono luce bianca calda, dovendo convertire più energia con i fosfori, hanno un rendimento minore. In questa fase dello studio le differenze non erano così sostanziali da far prevalere nettamente una configurazione rispetto a un'altra. La scelta è ricaduta sulla combinazione rosso, verde e bianco freddo.

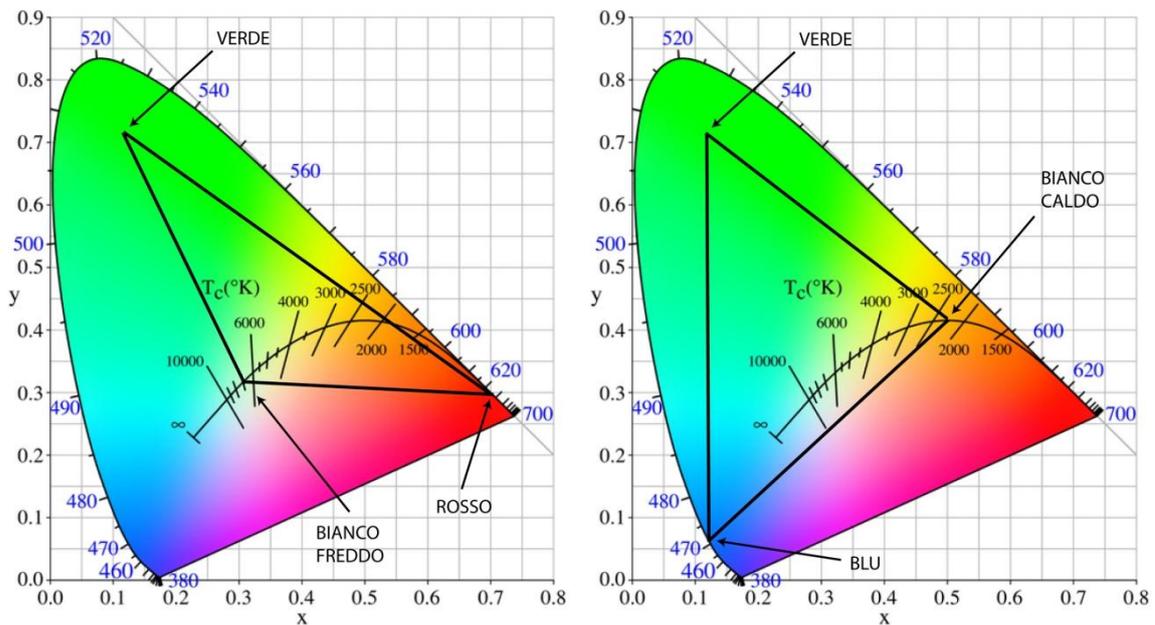


Figura 3.5 Rappresentazione sul diagramma cromatico della gamma di colori raggiungibile con le due diverse combinazioni di colori.

### 3.2 COLORIMETRIA

Scelta la combinazione di colori adeguata per la nostra lampada, rimangono da ricavare le formule che ci serviranno per determinare i rapporti di intensità delle luminosità dei tre colori. Come già accennato, i dati da cui partiamo sono le coordinate cromatiche  $x$  e  $y$ , che rappresentano le sorgenti sul piano cromatico CIE 1931. Le formule di partenza sono le 2.7 che per prima cosa vengono sviluppate ottenendo:

$$x_{res} = \frac{x_w \frac{Y_w}{y_w} + x_g \frac{Y_g}{y_g} + x_r \frac{Y_r}{y_r}}{\frac{Y_w}{y_w} + \frac{Y_g}{y_g} + \frac{Y_r}{y_r}} \quad (3.1)$$

$$y_{res} = \frac{Y_w + Y_g + Y_r}{\frac{Y_w}{y_w} + \frac{Y_g}{y_g} + \frac{Y_r}{y_r}} \quad (3.2)$$

Dove  $x_{res}$  e  $y_{res}$  sono le coordinate cromatiche del punto in cui ci vogliamo portare calcolate partendo dalla temperatura di colore desiderata utilizzando le formule 2.1, mentre  $x_w$ ,  $y_w$ ,  $x_g$ ,  $y_g$  e  $x_r$ ,  $y_r$  sono rispettivamente le coordinate cromatiche di bianco verde e rosso.  $Y_w$ ,  $Y_g$  e  $Y_r$  sono unità cromatiche proporzionali alla luminanza e saranno quindi le unità che ci permetteranno di calcolare i rapporti. Manipolando le

equazioni si possono isolare le luminosità di verde e rosso in funzione di quella del bianco:

$$Y_g = \frac{Y_w \left( \frac{x_{res} - x_w}{y_w} \right) + Y_r \left( \frac{x_{res} - x_r}{y_r} \right)}{\frac{x_g - x_{res}}{y_g}} \quad (3.3)$$

$$Y_r = \frac{Y_g \left( \frac{y_{res}}{y_g} - 1 \right) + Y_w \left( \frac{y_{res}}{y_w} - 1 \right)}{1 - \frac{y_{res}}{y_r}} \quad (3.4)$$

E sostituendo la 3.4 nella 3.3 si ottiene:

$$\frac{Y_r}{Y_w} = \frac{\left( \frac{x_{res} - x_w}{y_w} \right) \left( \frac{x_g - x_{res}}{y_g} \right) + \left( \frac{y_{res}}{y_w} - 1 \right) \left( \frac{x_g - x_{res}}{y_g} \right)}{\left( \frac{x_g - x_{res}}{y_g} \right) \left( 1 - \frac{y_{res}}{y_r} \right) - \left( \frac{x_{res} - x_r}{y_r} \right) \left( \frac{y_{res}}{y_g} - 1 \right)} \quad (3.5)$$

Dalla quale si ricava il rapporto  $Y_g/Y_w$ , sostituendola nella 3.4. Questi calcoli saranno svolti dal microcontrollore scelto.

Una volta calcolati i rapporti, il microcontrollore dovrà generare un'uscita PWM basandosi sui massimi lumen ottenibili per ogni colore, in modo da ottenere le giuste luminosità relative, che porteranno la miscela di luci alla temperatura di colore desiderata. Per diminuire la luminosità sarà sufficiente moltiplicare i vari duty-cycle ottenuti per una costante minore di uno, mantenendo in questa maniera invariati i rapporti.

### 3.2.1 SCELTA LED

In questo periodo i principali produttori di LED ad alta potenza attuali sono Seoul Semiconductor, CREE, Philips e Osram. Il colore più problematico per noi è senza dubbio il rosso, quindi ci siamo concentrati un po' di più sulle performance di quest'ultimo. I LED della Seoul si sono rivelati una scelta migliore per alcuni motivi:

- Minor degrado dichiarato dell'efficienza luminosa del rosso rispetto ai CREE (vedi Figura 3.6 e Figura 3.7 per confronto);
- Reperibilità più semplice dei modelli montati su dissipatore tipo "star", tramite i normali canali di distribuzione (Farnell, RS e Distrelec), nel momento dello sviluppo della tesi;
- Costo generalmente minore.

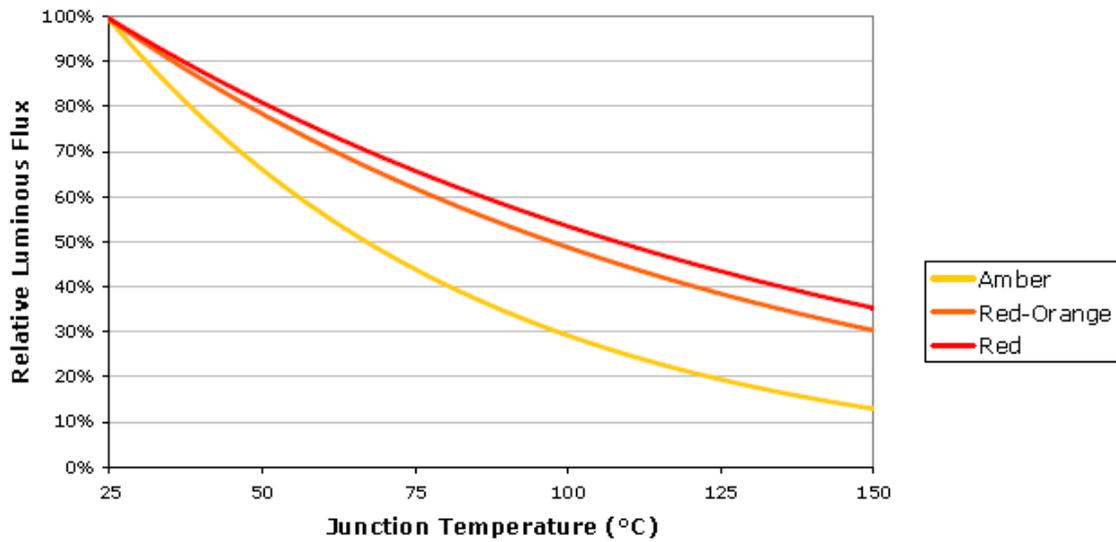


Figura 3.6 Intensità di flusso luminoso emessa dai LED rossi della CREE in funzione della temperatura di giunzione. (fonte data sheet CREE).

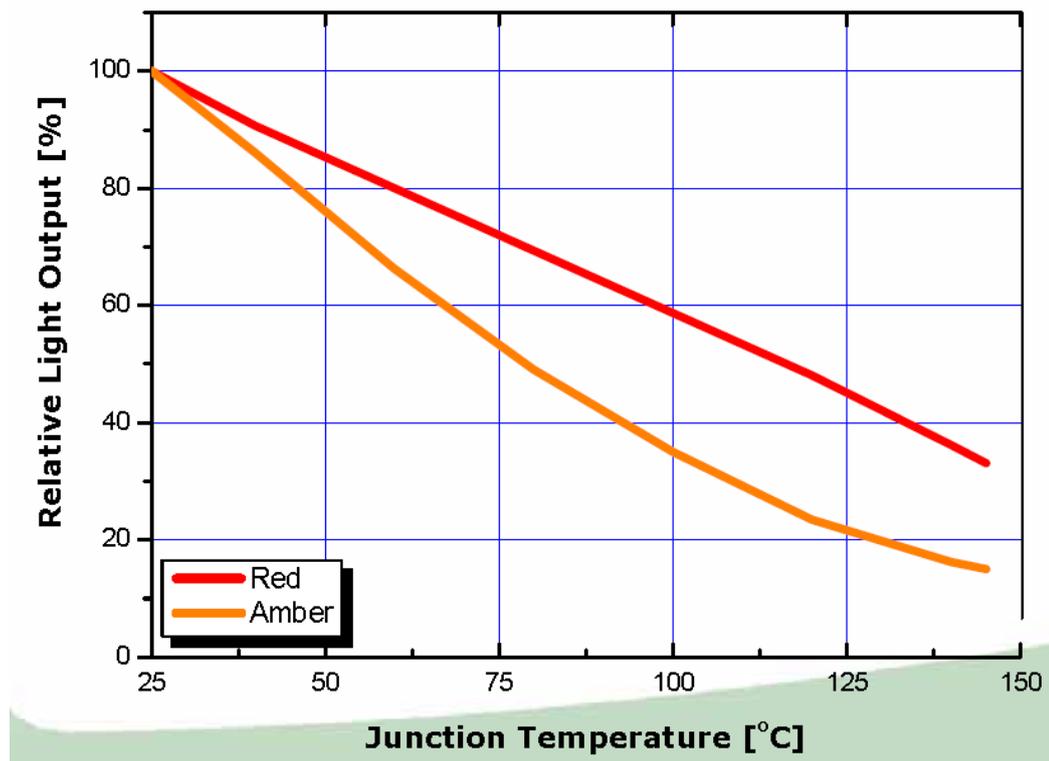


Figura 3.7 Intensità di flusso luminoso emessa dai LED rossi della Seoul Semiconductors in funzione della temperatura di giunzione. (fonte data sheet Seoul Semiconductors).

In questo lavoro di tesi sono stati scelti i LED del modello P4 di Seoul Semiconductor. Più precisamente la lampada sarà composta da LED rossi R42182, verdi G42182 e bianchi W42182, dei quali riportiamo le specifiche principali

rilasciate dal costruttore. Essere a conoscenza del bin (lotto di produzione) di appartenenza è particolarmente importante per i LED bianchi dato che le variazioni di luminosità, coordinate cromatiche e quindi temperatura di colore tra bin diversi sono, nel nostro caso, tutt'altro che trascurabili. Il codice completo che descrive i nostri LED bianchi è il seguente:

W42182-01LF BIN CODE USXP1

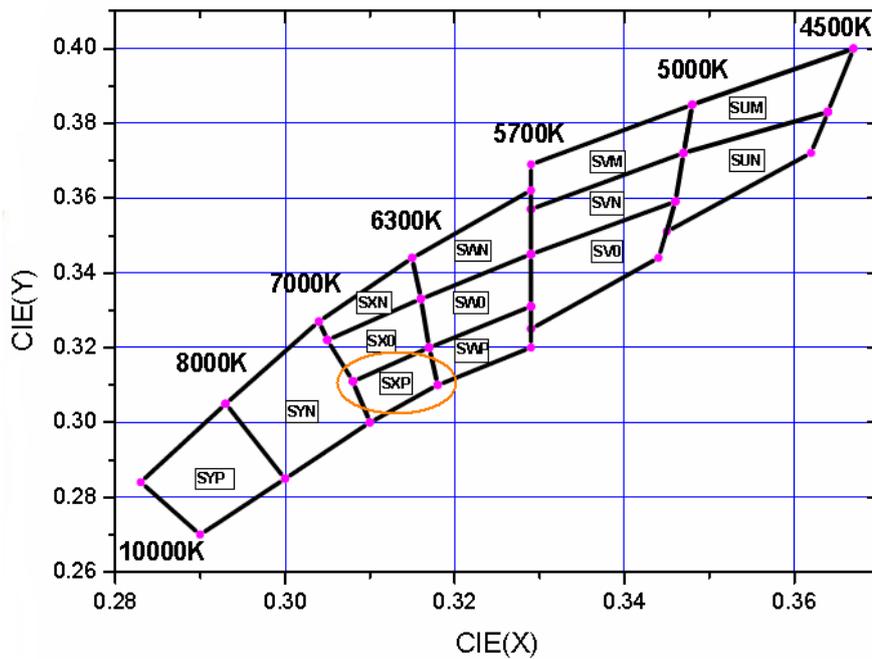


Figura 3.8 Porzione di diagramma cromatico diviso per zone in base al binning effettuato da Seoul Semiconductors. In particolare è evidenziato il riquadro corrispondente ai LED a nostra disposizione. (fonte data sheet Seoul Semiconductors).

**9. Red (R42182)**

9-1 Electro-Optical characteristics at  $I_F=350\text{mA}$ ,  $T_A=25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Value			Unit
		Min	Typ	Max	
Luminous Flux <sup>[1]</sup>	$\Phi_V$ <sup>[2]</sup>	-	48	-	lm
Dominant Wavelength <sup>[3]</sup>	$\lambda_D$	618	625	630	nm
Forward Voltage <sup>[4]</sup>	$V_F$	2.0	2.3	3.0	V
View Angle	$2\theta$ 1/2	130			deg.
Thermal resistance <sup>[5]</sup>	$R\theta_{J-B}$	9			$^\circ\text{C} / \text{W}$
Thermal resistance <sup>[6]</sup>	$R\theta_{J-C}$	7.8			$^\circ\text{C} / \text{W}$

9-2 Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Forward Current	$I_F$	800	mA
Power Dissipation	$P_d$	2.4	W
Junction Temperature	$T_j$	145	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature	$T_{opr}$	-40 ~ +85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 ~ +100	$^\circ\text{C}$
ESD Sensitivity <sup>[7]</sup>	-	$\pm 10,000\text{V}$ HBM	-

\*Notes :

[1] SSC maintains a tolerance of  $\pm 10\%$  on flux and power measurements.

[2]  $\Phi_V$  is the total luminous flux output as measured with an integrated sphere.

[3] Dominant wavelength is derived from the CIE 1931 Chromaticity diagram.

A tolerance of  $\pm 0.5\text{nm}$  for dominant wavelength

[4] A tolerance of  $\pm 0.06\text{V}$  on forward voltage measurements

[5], [6]  $R\theta_{J-B}$  is measured with a SSC metal core pcb. ( $25^\circ\text{C} \leq T_j \leq 110^\circ\text{C}$ )

$R\theta_{J-C}$  is measured with only emitter. ( $25^\circ\text{C} \leq T_j \leq 110^\circ\text{C}$ )

Break voltage of Metal PCB is 6.5kVAC

[7] It is included the zener chip to protect the product from ESD.

Figura 3.9 Tabella che riporta le principali specifiche dei LED rossi utilizzati in questo lavoro di tesi. (fonte data sheet Seoul Semiconductor).

### 8. Green (G42182)

8-1 Electro-Optical characteristics at  $I_F=350\text{mA}$ ,  $T_A=25^\circ\text{C}$

Parameter	Symbol	Value			Unit
		Min	Typ	Max	
Luminous Flux <sup>[1]</sup>	$\Phi_V$ <sup>[2]</sup>	-	70	-	lm
Dominant Wavelength <sup>[3]</sup>	$\lambda_D$	520	525	535	nm
Forward Voltage <sup>[4]</sup>	$V_F$	3.0	3.25	4.1	V
View Angle	$2\Theta$ 1/2	130			deg.
Thermal resistance <sup>[5]</sup>	$R\theta_{J-B}$	9.5			$^\circ\text{C}/\text{W}$
Thermal resistance <sup>[6]</sup>	$R\theta_{J-C}$	8.0			$^\circ\text{C}/\text{W}$

8-2 Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Forward Current	$I_F$	1000	mA
Power Dissipation	$P_d$	4	W
Junction Temperature	$T_j$	145	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature	$T_{opr}$	-40 ~ +85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 ~ +100	$^\circ\text{C}$
ESD Sensitivity <sup>[7]</sup>	-	$\pm 10,000\text{V}$ HBM	-

\*Notes :

- [1] SSC maintains a tolerance of  $\pm 10\%$  on flux and power measurements.
- [2]  $\Phi_V$  is the total luminous flux output as measured with an integrated sphere.
- [3] Dominant wavelength is derived from the CIE 1931 Chromaticity diagram.  
A tolerance of  $\pm 0.5\text{nm}$  for dominant wavelength
- [4] A tolerance of  $\pm 0.06\text{V}$  on forward voltage measurements
- [5], [6]  $R\theta_{J-B}$  is measured with a SSC metal core pcb. ( $25^\circ\text{C} \leq T_j \leq 110^\circ\text{C}$ )  
 $R\theta_{J-C}$  is measured with only emitter. ( $25^\circ\text{C} \leq T_j \leq 110^\circ\text{C}$ )  
Break voltage of Metal PCB is 6.5kVAC
- [7] It is included the zener chip to protect the product from ESD.

Figura 3.10 Tabella che riporta le principali specifiche dei LED verdi utilizzati in questo lavoro di tesi. (fonte data sheet Seoul Semiconductor).

### 1. Pure White (W42182)

1-1 Electro-Optical characteristics at  $I_F=350\text{mA}$ ,  $T_A=25^\circ\text{C}$

Parameter		Symbol	Value			Unit
			Min	Typ	Max	
Luminous Flux <sup>[1]</sup>	T rank	$\Phi_V$ <sup>[2]</sup>	70	80	91	lm
	U rank	$\Phi_V$ <sup>[2]</sup>	91	100	-	lm
Correlated Color Temperature <sup>[3]</sup>		CCT	-	6300	-	K
CRI		$R_a$	-	75	-	-
Forward Voltage <sup>[4]</sup>		$V_F$	3.0	3.25	4	V
View Angle		$2\theta \frac{1}{2}$	127			deg.
Thermal resistance <sup>[5]</sup>		$R\theta_{J-B}$	8.8			$^\circ\text{C} / \text{W}$
Thermal resistance <sup>[6]</sup>		$R\theta_{J-C}$	7.2			$^\circ\text{C} / \text{W}$

1-2 Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Forward Current	$I_F$	1000 (@ $T_j = 90^\circ\text{C}$ ) <sup>[7]</sup>	mA
		1800 (@ 1KHz, 1/10 duty)	
Power Dissipation	$P_d$	4	W
Junction Temperature	$T_j$	145(@ $I_F \leq 700\text{mA}$ )	$^\circ\text{C}$
Operating Temperature	$T_{opr}$	-40 ~ +85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature	$T_{stg}$	-40 ~ +100	$^\circ\text{C}$
ESD Sensitivity <sup>[8]</sup>	-	$\pm 10,000\text{V HBM}$	-

\*Notes :

[1] SSC maintains a tolerance of  $\pm 10\%$  on flux and power measurements.

[2]  $\Phi_V$  is the total luminous flux output as measured with an integrated sphere.

[3] Correlated Color Temperature is derived from the CIE 1931 Chromaticity diagram. CCT  $\pm 5\%$  tester tolerance.

[4] A tolerance of  $\pm 0.06\text{V}$  on forward voltage measurements

[5], [6]  $R\theta_{J-B}$  is measured with a SSC metal core pcb. ( $25^\circ\text{C} \leq T_j \leq 110^\circ\text{C}$ )

$R\theta_{J-C}$  is measured with only emitter. ( $25^\circ\text{C} \leq T_j \leq 110^\circ\text{C}$ )

Break voltage of Metal PCB is 6.5kVAC.

[7]  $I_F$  Max is guaranteed under the  $T_j \leq 90^\circ\text{C}$ .

[8] It is included the zener chip to protect the product from ESD.

Figura 3.11 Tabella che riporta le principali specifiche dei LED bianchi utilizzati in questo lavoro di tesi. (fonte data sheet Seoul Semiconductor).

### 3.2.2 QUANTITÀ DI LED

Le specifiche richiedono che la lampada sia in grado, una volta ultimata, di emettere almeno 2000 lumen di flusso luminoso. Questo dato pone dei vincoli sulla quantità di LED da utilizzare e, rimanendo nei range consigliati dai data sheet, anche sull'intensità della corrente con cui pilotarli. Per prima cosa si considera che la

massima intensità luminosa erogabile dalla lampada non sarà costante al variare della temperatura di colore impostata, essendo la somma delle intensità emesse da ogni singolo colore. Questo risulta ovvio poiché una miscelazione corretta dei colori implica che alcuni LED siano meno accesi di altri. Come visto nei fogli tecnici, l'intensità del flusso luminoso che riesce ad emettere un LED varia a seconda del colore. Quindi per iniziare ci poniamo a una temperatura di colore a cui pensiamo di ottenere la massima intensità luminosa, nel nostro caso 5000K. Con l'aiuto di un foglio di calcolo (vedi Tabella 3.1) siamo in grado, inserendo le coordinate cromatiche dei tre colori, di calcolare quanti lumen per ogni colore saranno necessari per ottenere una determinata temperatura di colore.

Temperatura di colore 5000K					
Coordinate LED bianchi		Coordinate LED verdi		Coordinate LED rossi	
x	y	x	y	x	y
0,299	0,293	0,158	0,678	0,695	0,304
Lumen necessari		Lumen necessari		Lumen necessari	
1136		568,2471		296,5857	
Lumen totali					
2000,83282					

Tabella 3.1 Ripartizione tra i vari colori dei lumen necessari per ottenere 2000lm a 5000K di luce miscelata.

Come si nota dalla Tabella 3.1, per ottenere 2000 lumen a 5000K di temperatura di colore, con i LED della Seoul Semiconductor che abbiamo scelto, servono circa 1136 lumen dai bianchi, 568 lumen dai verdi e 297 lumen dai rossi. Supponendo di lavorare ragionevolmente a regime con una temperatura di giunzione di 75°C e di pilotare i LED bianchi a 500mA e i LED verdi e rossi a 350mA è possibile determinare il numero di LED richiesto. Per questi calcoli sono stati utilizzati i dati presenti nel datasheet, in particolare i lumen tipici emessi, il grafico che riporta il calo percentuale con l'aumento della temperatura ed il grafico che riporta la percentuale di flusso luminoso rispetto a quello tipico in funzione della corrente di pilotaggio.

- *BIANCO*

Un LED bianco a 500mA e 75°C di temperatura di giunzione emette:

$$100 \cdot 0,9 \cdot 1,35 = 121,5lm \quad (3.6)$$

Quindi per ottenere i prefissati 1136 lumen servono:

$$\frac{1136}{121,5} = 9,35 \rightarrow 10 \text{ led} \quad (3.7)$$

- *VERDE*

Un LED verde a 350mA e 75°C di temperatura di giunzione emette:

$$70 \cdot 0,95 = 66,5lm \quad (3.8)$$

Quindi per ottenere i prefissati 568 lumen servono:

$$\frac{568}{66,5} = 8,54 \rightarrow 9 \text{ led} \quad (3.9)$$

- *ROSSO*

Un LED rosso a 350mA e 75°C di temperatura di giunzione emette:

$$48 \cdot 0,7 = 33,6lm \quad (3.10)$$

Quindi per ottenere i prefissati 297 lumen servono:

$$\frac{297}{33,6} = 8,84 \rightarrow 9 \text{ led} \quad (3.11)$$

Questi numeri risultano indicazioni molto preziose per il progetto della lampada. Sapendo che un altro dei problemi che dovremo affrontare è quello della miscelazione, una configurazione di 10 LED bianchi, 10 LED verdi e 10 LED rossi sarebbe perfetta; permetterebbe di ottenere i massimi lumen anche a temperature di colore più basse e di posizionare i LED a gruppi di tre, uno per colore, agevolandone la miscelazione. La scelta finale è quella però di 10 LED bianchi, 10 LED verdi e 12 LED rossi al fine di permettere l'utilizzo di una sola tensione di alimentazione.

### 3.3 CONTROLLO TEMPERATURA DI COLORE

Stabilito che i LED cambiano la loro emissione, sia per quanto riguarda l'intensità luminosa, sia in termini di spettro (in particolare aumento della lunghezza d'onda dominante con l'aumento della temperatura di giunzione), risulta chiaro che per ottenere una temperatura di colore stabile, al variare della temperatura di giunzione, si dovrà effettuare un qualche tipo di controllo. La grandezza d'uscita da controllare per chiudere un eventuale anello di retroazione complessivo sarebbe la posizione della luce miscelata sul piano cromatico, in modo da avere sempre sotto controllo temperatura di colore e coordinate cromatiche per attuare le correzioni necessarie. Nel nostro caso cercheremo di effettuare il controllo senza impiegare sofisticati sensori di flusso o di spettro. In letteratura le tecniche per controllare l'emissione dei LED sono molteplici e si diversificano per le grandezze diverse che

possono essere tenute sotto controllo allo scopo di chiudere un anello di retroazione [2].

### 3.3.1 CONTROLLO DI TEMPERATURA “FEED-FORWARD”

La misura più semplice da implementare è quella di temperatura. Non è molto pratico però misurare direttamente la temperatura di giunzione del LED, quindi viene misurata la temperatura del dissipatore sul quale sono montati i LED. Conoscendo la potenza immessa nella giunzione e le resistenze termiche in gioco, si può ottenere indirettamente la temperatura di giunzione. Avendo a disposizione poi, oltre alla temperatura di giunzione, anche la dipendenza delle caratteristiche di emissione, si può effettuare una correzione sul pilotaggio dei dispositivi che compensi le differenze. Questo tipo di compensazione comporta la conoscenza precisa di tali dipendenze che in prima approssimazione possono essere ricavate dai data sheet dei dispositivi. In ogni caso la distribuzione dei parametri di luminosità e lunghezza d'onda, anche all'interno di uno stesso bin di produzione, potrebbero portare ad errori significativi senza un'adeguata taratura della lampada. Questo tipo di compensazione inoltre non corregge la diminuzione del flusso luminoso che avviene con l'invecchiamento dei LED.

### 3.3.2 CONTROLLO CON DETERMINAZIONE DELLA TEMPERATURA DALLE CARATTERISTICHE TENSIONE-CORRENTE DEL LED

Come si evince dalla letteratura, negli ultimi anni una delle tecniche per determinare la temperatura di giunzione dei LED, senza utilizzare sensori specifici e senza dover passare dalla temperatura del dissipatore, è quella di sfruttare la relazione che esiste tra la caduta diretta di tensione di un diodo e la temperatura a cui si trova la giunzione [8][9]. Questa in termini matematici si ricava dall'equazione del diodo ideale di Shockley:

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV_D}{\eta kT}} - 1 \right) \quad (3.12)$$

dove:

- $I_D$  è l'intensità di corrente sul diodo;
- $V_D$  è la differenza di potenziale tra i due terminali del diodo;
- $I_0$  è l'intensità di corrente di saturazione, che dipende dalle caratteristiche costruttive del diodo, direttamente proporzionale alla superficie della giunzione p-n;
- $q$  è la carica di un elettrone;
- $k$  è la costante di Boltzmann;

- $T$  è la temperatura assoluta sulla superficie di giunzione tra la zone  $p$  ed  $n$ ;
- $\eta$  è il coefficiente di emissione.

Ipotizzando di pilotare i LED a corrente costante, la caduta di tensione diretta ai capi della giunzione dipende solo dalla temperatura della stessa. Andando a misurarla, si potrà risalire alla temperatura della giunzione stessa e da questa informazione effettuare le correzioni necessarie, basandosi o sui dati presenti nel data sheet o effettuando delle misure preventive di caratterizzazione

### **3.3.3 CONTROLLO DEL FLUSSO LUMINOSO DEI LED**

Per misurare l'intensità del flusso di ogni colore presente nella lampada, si possono utilizzare dei fotodiodi [3]. Il controllo in questione non dovrà fare altro che mantenere le proporzioni dei flussi delle tre componenti luminose per mantenere il punto di bianco scelto. Per fare ciò si possono utilizzare tre fotodiodi che misurano indipendentemente la sola intensità luminosa di ogni gruppo di LED. Questo implica alcuni accorgimenti sul posizionamento dei fotodiodi per fare in modo che ricevano la luce di uno solo dei colori presenti. Questo sistema però, misurando la sola intensità e non lo spostamento in lunghezza d'onda dell'emissione, può essere utilizzato con efficacia solo in dispositivi RGB, dato che i LED bianchi a fosfori attualmente cambiano troppo significativamente la loro emissione con la temperatura per poterlo ignorare. Per tale motivo questa tecnica di controllo è stata scartata.

### **3.3.4 CONTROLLO DELLE COORDINATE CROMATICHE**

Il controllo diretto della luce bianca prodotta dalla miscelazione di più sorgenti luminose può essere fatto in maniera molto precisa misurando le coordinate cromatiche del mix ottenuto. Questo tipo di misura richiede sensori con una risposta spettrale compatibile con gli standard dettati dal CIE. I segnali di retroazione che si avranno a disposizione utilizzando questa tecnica di controllo saranno le coordinate dei tre colori primari virtuali utilizzati dalla CIE, ovvero X, Y e Z. Il sensore consiste in una terna di fotodiodi ognuno coperto con dei filtri ottici appropriati. I tre segnali prodotti vengono elaborati per ottenere le informazioni richieste. In questo modo, controllando esattamente la grandezza fisica di uscita del sistema, è possibile un controllo preciso della luce. Il sensore però inizia ad essere costoso se si vogliono ottenere buone prestazioni dato che contiene filtri ottici che, se non ben progettati, possono introdurre errori nella rilevazione delle coordinate.

### 3.3.5 CONTROLLO SCELTO

Confrontando i vari metodi si è cercato di evitare l'utilizzo di sensori costosi. Scartata la tecnica che utilizza tre fotodiodi, visto che utilizzando LED bianchi a fosfori non si possono tralasciare i cambiamenti di spettro dovuti alla temperatura, rimangono le due tecniche per ricavare la temperatura. Tra il metodo che utilizza un sensore sul dissipatore e la tecnica che sfrutta la dipendenza della tensione dalla temperatura si è preferita la seconda, non per risparmiare sul sensore, tra l'altro molto economico, ma perché potenzialmente con tre misure distinte di tensione si può arrivare alla temperatura di giunzione dei vari LED in maniera più precisa e più rapida, non dovendo attendere il riscaldamento del dissipatore, che, di norma, ha una grossa capacità termica. Un ritardo troppo grande nell'acquisizione della temperatura di giunzione potrebbe portare il controllo a non lavorare al meglio. Questa tecnica di misura della tensione viene utilizzata in questa tesi anche perché necessita solo di un convertitore analogico digitale, oltre alla potenza di calcolo di cui avevamo già bisogno per pilotare i LED, e quasi tutti i microcontrollori ne sono dotati.

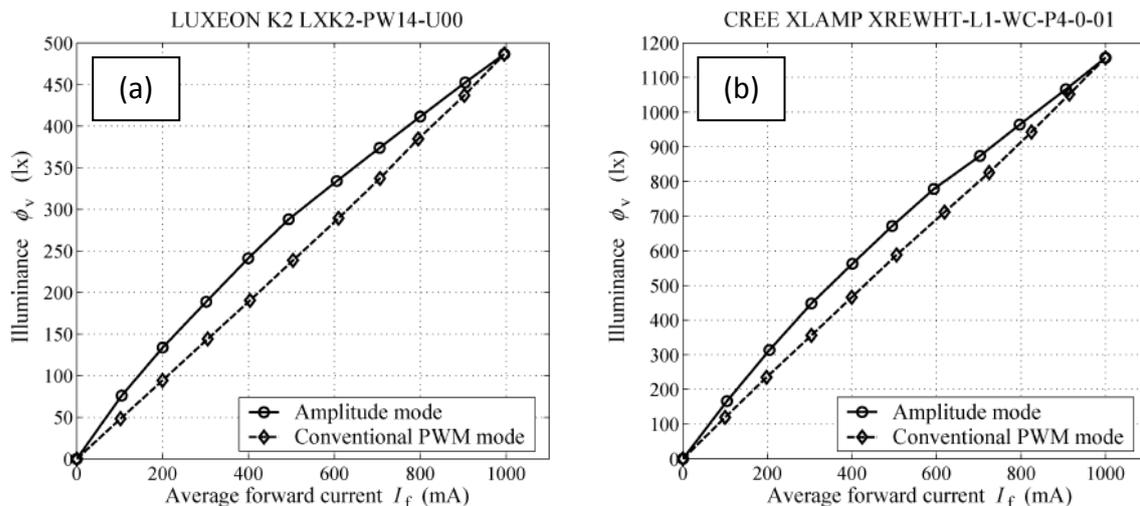
## 3.4 PILOTAGGIO LED

### 3.4.1 TECNICA PILOTAGGIO: PWM VS AM

Non c'è dubbio che la grandezza da controllare quando si utilizza un diodo HBLED è la corrente di pilotaggio. Da questa dipendono la luminosità e anche la lunghezza dominante emessa. Ora rimane da determinare come variare l'intensità luminosa emessa dai LED. Le tecniche principali utilizzate a questo scopo sono due:

- Modulazione **AM** (Amplitude Modulation): consiste nel pilotare il LED ad una corrente continua ma di intensità variabile;
- Modulazione **PWM** (Pulse Width Modulation): la quale mantiene la corrente ad un valore di intensità prossimo a quello nominale, ma per intervalli di tempo di durata variabile.

Queste due alternative differiscono oltre che per il funzionamento elettrico anche per il modo che hanno di influenzare la resa luminosa dei dispositivi utilizzati. Dal punto di vista prettamente funzionale, la prima differenza che salta all'occhio è la maggior linearità che si può ottenere nel rapporto tra corrente media e flusso luminoso ottenuto utilizzando la modulazione PWM [1].



**Figura 3.12** Confronto dell'andamento del flusso luminoso in funzione della corrente media con pilotaggi AM e PWM per LED Luxeon (a) e CREE (b) (fonte [1]).

Dalla Figura 3.12 si nota come la luminosità sia in relazione quasi lineare con la corrente media utilizzando la tecnica PWM per quei due modelli di LED.

Un'altra differenza nell'uso delle due diverse tecniche di dimming diventa importante se consideriamo che, oltre all'intensità luminosa, anche la lunghezza d'onda di emissione dominante dei LED varia al variare della corrente di pilotaggio. Come abbiamo chiarito, entrambe le scelte portano una variazione della corrente media e quindi della luminosità, ma con la modulazione PWM (abbiamo preso in considerazione quella a intensità di corrente costante, anche se non è l'unica possibile) la corrente che scorre nel LED è sempre la stessa nei momenti di accensione. Infatti, la variazione di luminosità si ottiene con una media di tipo temporale tra il periodo di accensione e quello di spegnimento della sorgente, utilizzando una frequenza di modulazione sufficientemente alta da non far percepire sfarfallii al nostro occhio. Quindi, la modulazione PWM ovierebbe a questa ulteriore causa di errore che dovrebbe essere compensata aggiungendo carico all'unità di calcolo. Anche questa differenza pesa quindi a sfavore della modulazione AM.

Essendo inoltre la tecnica a PWM la più utilizzata attualmente e la più semplice da implementare a livello hardware, ne risulta una molto più vasta gamma di driver presenti nel mercato che implementano la possibilità di questo tipo di dimming. Per questi motivi la scelta è ricaduta sulla modulazione PWM a corrente costante.

### 3.5 SCELTA DRIVER

La modalità di funzionamento degli HB LED impone, come già visto, il controllo della corrente che vi scorre. Data la sempre crescente presenza di questi dispositivi nel mercato, certo non manca la scelta di driver a corrente costante per il loro pilotaggio. Appurato che stiamo cercando un driver che permetta di impostare una

corrente costante a piacere (entro certi limiti) e che offra la possibilità di effettuare il dimming con la tecnica PWM, sostanzialmente le tipologie in commercio si possono dividere in due categorie:

- Driver switching: si tratta di driver che permettono il pilotaggio di topologie quali buck e boost con controllo della corrente di uscita tipicamente effettuato con una resistenza di shunt con pochi componenti esterni (in particolare l'induttore). Questi sono particolarmente indicati in campi dove le tensioni di ingresso e uscita hanno bisogno di particolari adattamenti (es. elevatore di tensione per dispositivi a batteria);
- Driver lineari: in questo caso la tensione di uscita è sempre minore di quella di ingresso e il controllo viene effettuato con una resistenza di shunt interna o esterna all'integrato.

Le caratteristiche che il nostro driver deve avere sono sostanzialmente la capacità di erogare almeno 500mA e quella di poter gestire stringhe di LED il più possibile lunghe. Questo si traduce in una tensione di uscita massima elevata: per pilotare 10 LED bianchi a 500mA servono circa 35V, valore che scende all'aumentare della temperatura. Data la necessità di poter accendere solo metà dei LED e di integrare microcontrollore e driver sulla stessa scheda, si è preferito utilizzare dei driver lineari che, nonostante la minor versatilità per quanto riguarda le tensioni di ingresso, semplificano di molto il layout senza penalizzare i rendimenti se utilizzati con criterio. In particolare la scelta è ricaduta sul driver della ON Semiconductor siglato CAT4101.

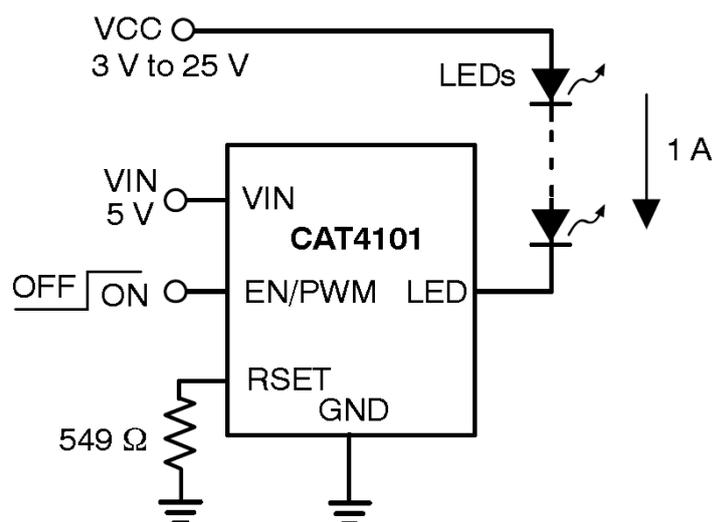


Figura 3.13 Circuito tipico di applicazione dell'integrato CAT4101 (fonte data sheet OnSemiconductors).

Come si vede dalla Figura 3.13, questo integrato ha solo 5 pin e funziona con la sola resistenza per settare la corrente di uscita come componente esterno. Consente di

utilizzare una tensione di alimentazione dei LED fino a 25V, il che ci permette di mettere in serie fino a 6 LED bianchi dalla tensione di alimentazione di circa 3,4V o una decina di LED rossi che hanno una tensione di alimentazione di circa 2,3 V. La tensione di alimentazione va da 3V a 5,5V un buon range per essere utilizzato anche con microcontrollori che necessitano di un'alimentazione di 3,3V senza aggiungere altri regolatori di tensione. La bassa tensione di dropout dichiarata dai costruttori (solo 500mV con una corrente di uscita di 1A) consente, scegliendo con criterio l'alimentazione, di non penalizzare troppo il rendimento. Facciamo un esempio grossolano di caso peggiore per verificare quanto detto.

**Table 3. ELECTRICAL OPERATING CHARACTERISTICS** (Min and Max values in **bold** are over recommended operating conditions unless specified otherwise. Typical values are at  $V_{IN} = 5.0\text{ V}$ ,  $T_{AMB} = 25^{\circ}\text{C}$ )

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
$I_{LED-ACC}$	LED Current Accuracy	$V_{LED} = 1\text{ V}$ , RSET = 1.47 k $\Omega$	<b>315</b>	350	<b>385</b>	mA
		$V_{LED} = 1\text{ V}$ , RSET = 750 $\Omega$		700		
		$V_{LED} = 1\text{ V}$ , RSET = 549 $\Omega$		1000		
$V_{DOUT}$	Dropout Voltage	$I_{LED} = 1\text{ A}$		500		mV
$V_{RSET}$	RSET Pin Voltage		<b>1.17</b>	1.20	<b>1.23</b>	V
$I_Q$	Quiescent Current	No LED, RSET = Floating		0.8		mA
		No LED, RSET = 549 $\Omega$		8.0		
$I_{QSHDN}$	Shutdown Current	$V_{EN} = 0\text{ V}$			<b>1</b>	$\mu\text{A}$
$R_{EN/PWM}$ $V_{HI}$ $V_{LO}$	EN/PWM Pin - Pull-down resistance - Logic High Level - Logic Low Level		<b>1.3</b>	200		k $\Omega$ V V
					<b>0.4</b>	
$T_{SD}$	Thermal Shutdown			150		$^{\circ}\text{C}$
$T_{HYS}$	Thermal Hysteresis			20		$^{\circ}\text{C}$
$I_{LED}/I_{RSET}$	RSET to LED Current gain ratio	100 mA LED current		400		
$V_{UVLO}$	Undervoltage lockout (UVLO) Threshold			2.0		V

**Tabella 3.2 Valori tipici di funzionamento dell'integrato CAT4101 (fonte data sheet OnSemiconductors).**

**Table 6. RSET RESISTOR SETTINGS**

LED Current [mA]	RSET [ $\Omega$ ]
100	4990
200	2490
300	1690
400	1270
500	1050
600	866
700	768
800	680
900	604
1000	549

**Tabella 3.3 Resistenze di set necessarie per la regolazione della corrente di uscita del driver CAT4101 (fonte data sheet OnSemiconductors).**

Supponiamo di utilizzare LED bianchi a 500mA e consideriamo ragionevolmente che abbiano una caduta media di 3,6V da freddi (25°C) che scenderà a circa 3,3V a

regime. Per pilotarne cinque in serie servono 18V. Aggiungendo 0,5V di dropout si deve utilizzare una tensione di alimentazione di 18,5V per garantire il funzionamento del controllo di corrente. La caduta sull'integrato, una volta che i LED andranno a regime, sarà di 2V che a 0,5A provocano una dissipazione di 1W. Ai LED arrivano 8,25W. Il tutto corrisponde ad un rendimento del 89% circa. Sono state omesse nei calcoli le perdite per commutazione che però saranno trascurabili data la bassa frequenza di commutazione della PWM (circa 120Hz), la potenza di alimentazione ( $8\text{mA} \cdot 3,3\text{V} = 26,4 \text{ mW}$ ) e la potenza dissipata dalla resistenza di set della corrente ( $1,2\text{V}^2/1050 = 1,4\text{mW}$ ).

### 3.6 SCELTA MICROCONTROLLORE

Il lavoro che dovrà svolgere il microcontrollore impiegato in questo lavoro di tesi non è di certo estremo, ma gli sarà richiesto di fare dei calcoli tutt'altro che immediati e con una certa precisione. Inoltre dovrà avere la possibilità di gestire almeno tre uscite PWM per il dimming dei tre colori e la comunicazione seriale per poter, in fase di prototipizzazione, comunicare con un PC che gli invierà i comandi e che sarà in grado di visualizzare messaggi inviati dal microcontrollore molto utili in fase di debug. Un'altra periferica che dovrà avere a bordo è un convertitore analogico digitale performante vista la necessità di misurare la tensione ai capi dei LED al fine di effettuare una stima di temperatura. La combinazione di queste specifiche ci ha portati a scegliere tra i microcontrollori della Microchip a sedici bit, e tra questi ci è sembrato adeguato il PIC24FJXXGA002 (fig 3.X). Questo microcontrollore è un ventotto pin con due UART, cinque uscite PWM con risoluzione 16 bit, 5 timer e un ADC da 10 bit 12 canali e 500 kpsps.

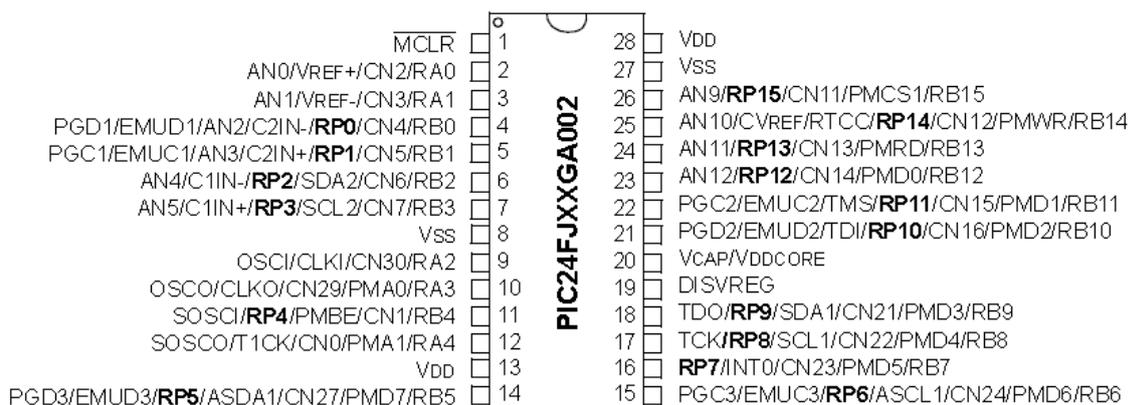


Figura 3.14 Pin-out del microcontrollore scelto (fonte data sheet Microchip).

L'idea, in questa fase di prototipizzazione, è quella di comunicare da un PC al microcontrollore la temperatura di colore e l'intensità luminosa che si vogliono

ottenere dalla miscela dei colori presenti. Sarà quindi compito del PIC ricavare dapprima le coordinate cromatiche della temperatura di colore ricevuta e calcolare poi i duty cycle necessari per ottenere un bianco che si avvicini il più possibile a quello desiderato. Il suo compito sarà poi quello di acquisire la tensione diretta delle stringhe di LED, dedurne la temperatura di giunzione e correggere i duty cycle per far sì che il funzionamento sia il più possibile stabile sottoposto a surriscaldamento.

### 3.7 ACQUISIZIONE TENSIONE SUI LED

Le possibili modalità con cui deve essere condizionato un segnale di tensione, prima di entrare nel microcontrollore, sono molteplici, ma la scelta del circuito adatto deve essere effettuata con criterio per evitare di incorrere in laboriose riprogettazioni. Le cose da tenere a mente nel nostro caso sono sostanzialmente queste:

- La tensione di alimentazione del microcontrollore è di 3,3V. Il segnale quindi non dovrà superare questo valore.
- Con il driver utilizzato, che si colloca tra il catodo dell'ultimo LED di ogni stringa e massa, la tensione dovrà essere acquisita in modo differenziale, dato che non è riferita a massa.
- Anche lo scorrere di una corrente di qualche centinaio di  $\mu\text{A}$  può provocare una leggera accensione del LED che potrebbe evitare alla lampada di potersi spegnere completamente quando lo si vuole. Per questo, l'acquisizione deve essere effettuata con dispositivi ad alta impedenza.
- Lo scorrere delle correnti di pilotaggio sui fili dei LED provoca cadute non trascurabili con le tensioni in gioco, sarà pertanto necessario utilizzare degli ulteriori collegamenti appositi per la misura ed evitare di usare i fili che portano la potenza per effettuare misure.

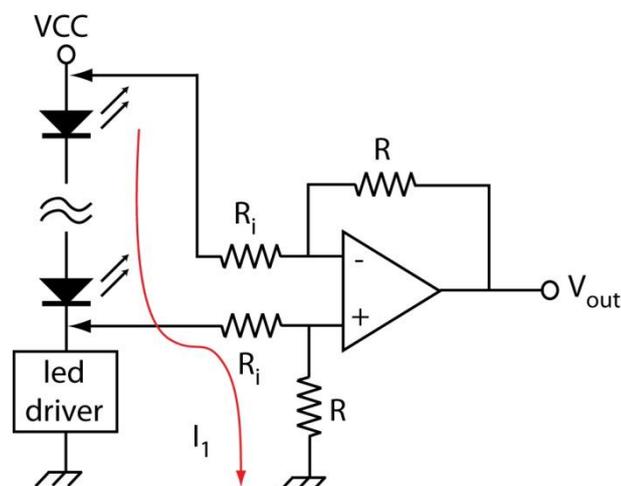


Figura 3.15 Possibile collegamento di un amplificatore differenziale ad una stringa di LED per monitorarne la tensione.

Tenendo presente questi accorgimenti, la soluzione più immediata è quella di utilizzare un amplificatore operazionale in configurazione differenziale collegato con dei fili dedicati ai capi delle stringhe di LED. Lo schema di base è presentato in Figura 3.15. Questa topologia presenta però un problema: aggiunge un percorso a bassa impedenza in parallelo al driver causando lo scorrere di una corrente indesiderata nei LED (indicata come  $I_1$ ) anche quando il driver non eroga corrente. Questo può causare problemi allo spegnimento dei LED che rischiano di rimanere sempre leggermente accesi. Inoltre, è buona norma filtrare le componenti ad alta frequenza che potrebbero causare disturbi sul segnale utile. Per questo il circuito di acquisizione finale implementa un buffer unitario per ridurre quasi a zero la corrente indesiderata e due condensatori in parallelo alle R che aggiungono un polo in alta frequenza ed introducono un'azione anti-aliasing, come si vede in Figura 3.16.

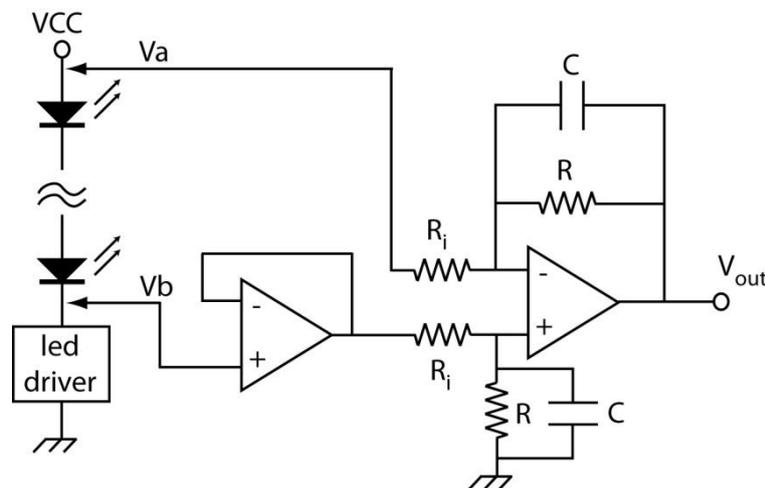


Figura 3.16 Circuito di condizionamento utilizzato per acquisire la tensione delle stringhe di LED.

La funzione di trasferimento che ne risulta è:

$$V_{out} = (V_b - V_a) \frac{R}{R_i} \frac{1}{1+sRC} \quad (3.13)$$

### 3.7.1 DIMENSIONAMENTO CIRCUITI DI CONDIZIONAMENTO

Si utilizzano dieci LED bianchi, dieci verdi e dodici rossi, ogni colore da dividere in 2 stringhe. Il segnale di tensione che si trova ai capi delle stringhe deve essere condizionato in modo da poter essere acquisito dal microcontrollore. Questo significa che i valori da acquisire devono restare sotto i 3,3V per evitare di perdere informazioni.

#### Led bianchi

I LED bianchi vengono pilotati a 500mA, e sono cinque in serie. A temperatura di 25°C la caduta ai capi di ogni LED è di circa 3,55V e scenderà di qualche mV per

grado all'aumentare della temperatura. La tensione della stringa sarà di circa 17,5V. Il rapporto del circuito di condizionamento dovrà essere minore o uguale di  $3,3/17,5=0,189$ . In banda passante questo rapporto è dato da  $R/R_i$ . Sono quindi state scelte:

$$\begin{array}{lll} R_{NOM} = 27 \text{ k}\Omega & R = 26,42 \text{ k}\Omega & R_i/R = 6,847086 \\ R_{i\text{ NOM}} = 180 \text{ k}\Omega & R_i = 180,9 \text{ k}\Omega & \text{Rapporto misurato} = 6,864198 \end{array}$$

Il valore delle resistenze è stato misurato con un ponte di misura Wayne Kerr LCR meter 4225. Per confermare il rapporto calcolato in teoria, aggiustare eventuali errori di misura e compensare l'effetto dei componenti parassiti o degli offset degli operazionali, si effettua una misura del rapporto con una tensione campione. Ovvero, utilizzando come strumento di misura un oscilloscopio WaveRunner da 400Mhz della Lecroy, viene misurata la tensione differenziale campione applicata all'ingresso dell'insieme buffer - amplificatore differenziale, la tensione all'uscita e se ne calcola il rapporto ottenendo i risultati riportati che saranno poi quelli utilizzati nel firmware.

Il valore di tensione che si troverà all'ingresso dell'ADC del microcontrollore sarà quindi, in caso di una tensione di stringa di 17,5V di circa 2,55V, valore adeguato per essere acquisito.

### Led verdi

I LED verdi vengono pilotati a 350mA, e sono distribuiti in due stringhe da cinque in serie. Alla temperatura di 25°C la caduta ai capi di ognuno è di circa 3,45V e scenderà di qualche mV per grado all'aumentare della temperatura. La tensione della stringa sarà di circa 17,25V. Il guadagno del circuito di condizionamento dovrà essere maggiore o uguale di  $3,3/17,25 = 0,191$ . In banda passante questo rapporto è dato da  $R/R_i$ . Sono stati scelti perciò i seguenti valori di resistenza:

$$\begin{array}{lll} R_{NOM} = 27 \text{ k}\Omega & R = 26,47 \text{ k}\Omega & R_i/R = 6,796373 \\ R_{i\text{ NOM}} = 180 \text{ k}\Omega & R_i = 179,9 \text{ k}\Omega & \text{Rapporto misurato} = 6,811159 \end{array}$$

### Led rossi

I LED rossi vengono pilotati come i verdi a 350mA, e sono sei in serie. A temperatura di 25°C la caduta ai capi di ognuno è di circa 2,15V e scenderà di qualche mV per grado all'aumentare della temperatura. La tensione della stringa sarà di circa 17,5V. Il guadagno del circuito di condizionamento dovrà essere minore o uguale di  $3,3/12,9 = 0,256$ . In banda passante questo rapporto è dato da  $R/R_i$ . Sono quindi state scelte:

$$\begin{array}{lll} R_{NOM} = 33 \text{ k}\Omega & R = 32,25 \text{ k}\Omega & R_i/R = 4,626357 \\ R_{i\text{ NOM}} = 150 \text{ k}\Omega & R_i = 149,2 \text{ k}\Omega & \text{Rapporto misurato} = 4,621722 \end{array}$$

### 3.8 SCHEMA ELETTRICO

Il circuito è stato disegnato utilizzando il software Orcad Capture ed è riportato integralmente in Figura 3.17.

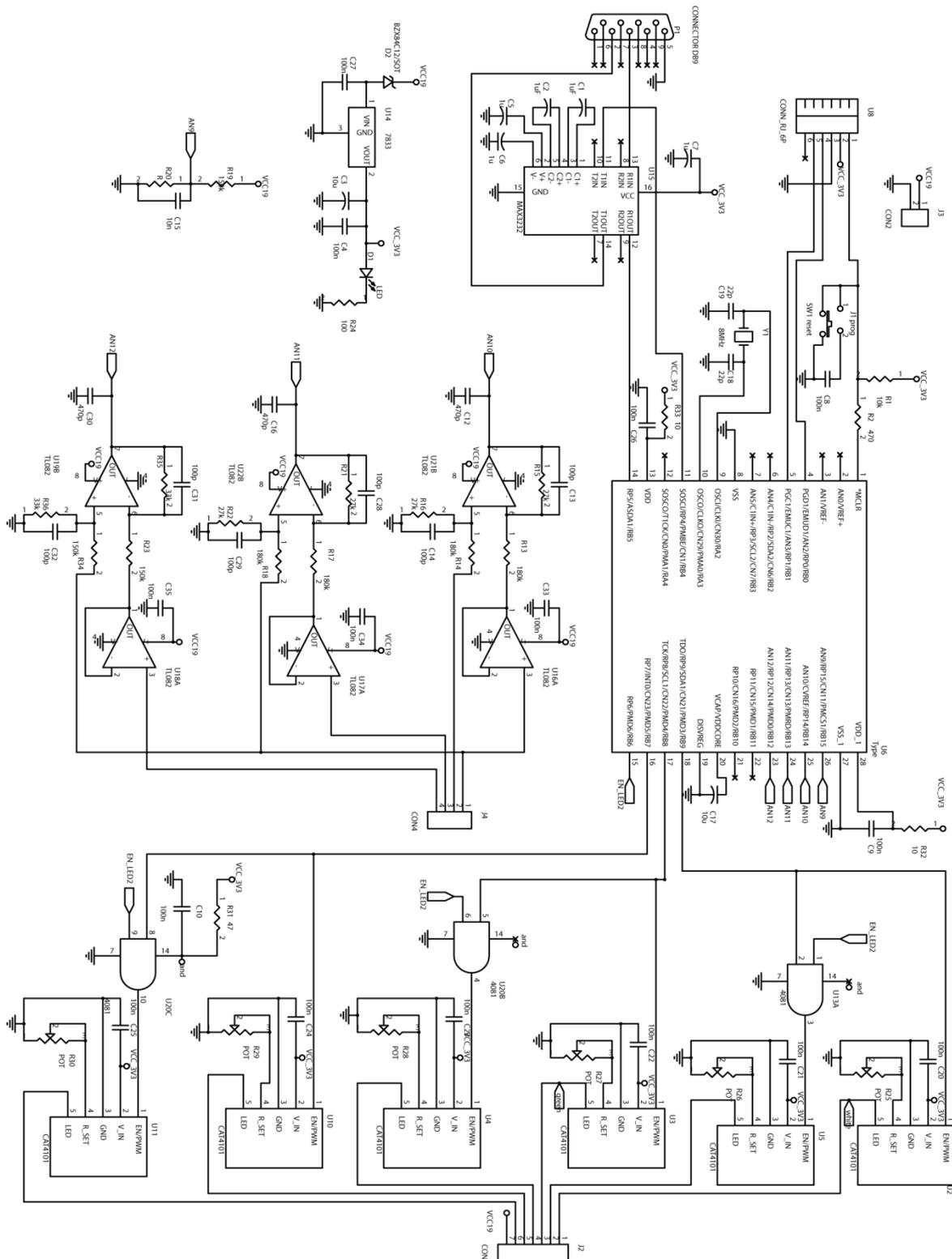


Figura 3.17 Schema del circuito utilizzato per questo lavoro di tesi.

### 3.9 LAYOUT

Il layout di questa tesi è stato sviluppato utilizzando il software dedicato Orcad Layout. Nelle Figure 3.18 e 3.19 vengono riportati il top ed il bottom layer rispettivamente.

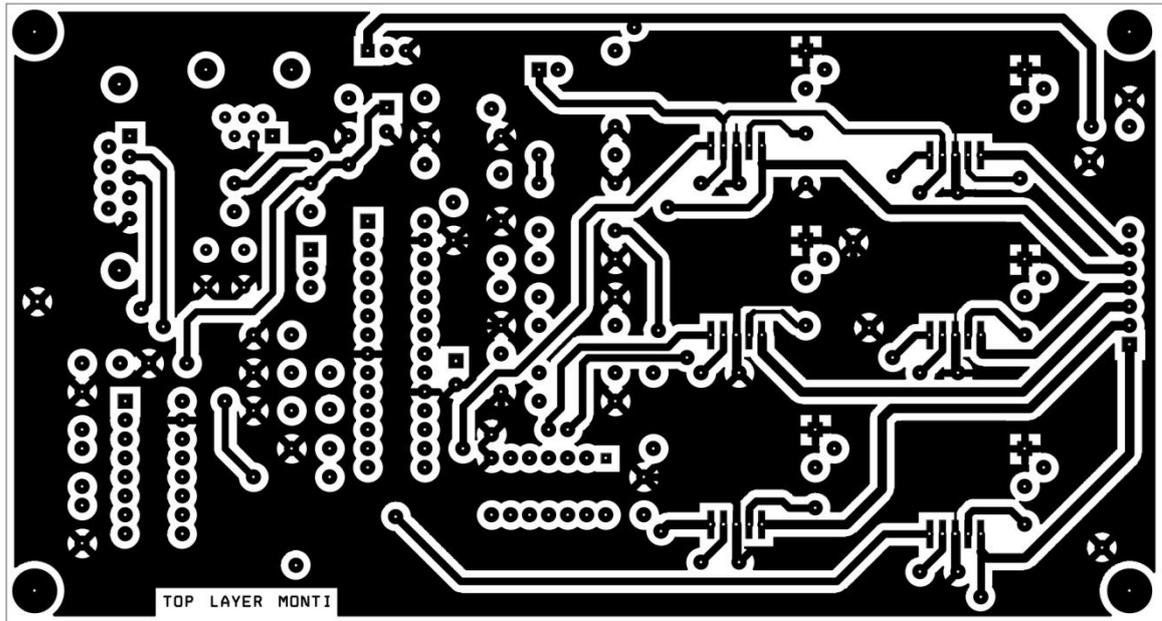


Figura 3.18 Top layer del circuito stampato realizzato.

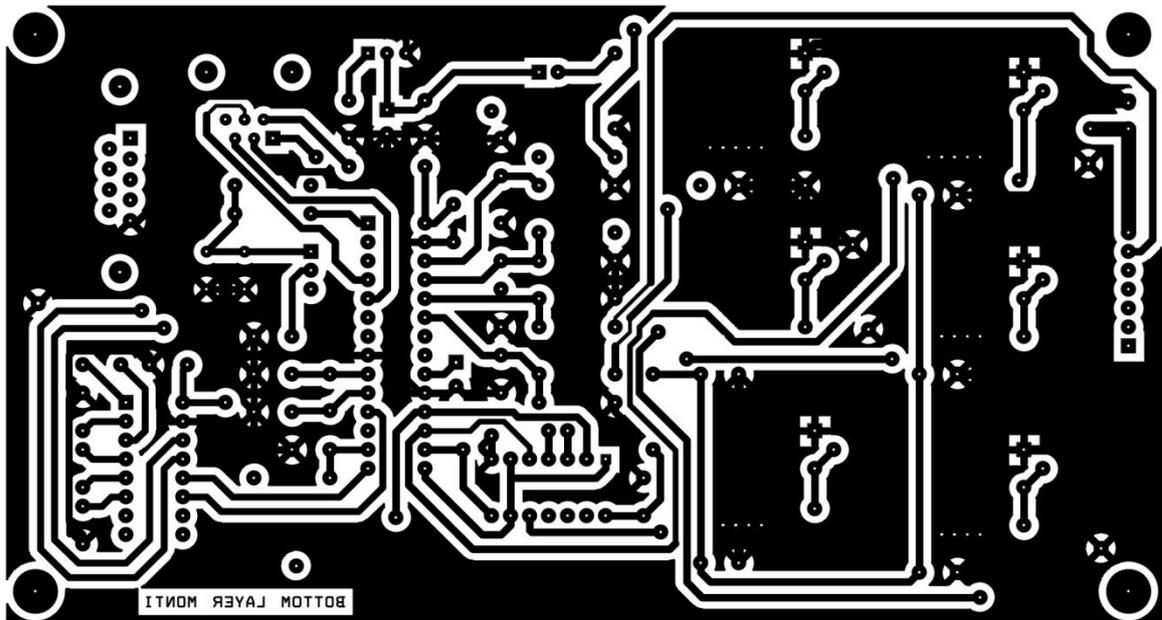


Figura 3.19 Bottom layer del circuito stampato realizzato.

### 3.10 MONTAGGIO LAMPADA

L'assemblaggio della lampada, costituita da ben trentadue LED, ha richiesto qualche accorgimento. Prima di tutto si è dovuto scegliere un dissipatore adeguato in grado di ospitare il gran numero di LED e smaltirne il calore generato. A questo scopo è stato utilizzato un dissipatore in alluminio, alettato, delle dimensioni di 25 x 11 x 3,5cm. Poi si è dovuto pensare a una matrice di disposizione dei LED tale da ottenere la miglior miscelazione della luce proveniente dalle sorgenti e compatibile con lo spazio disponibile (Figura 3.20).

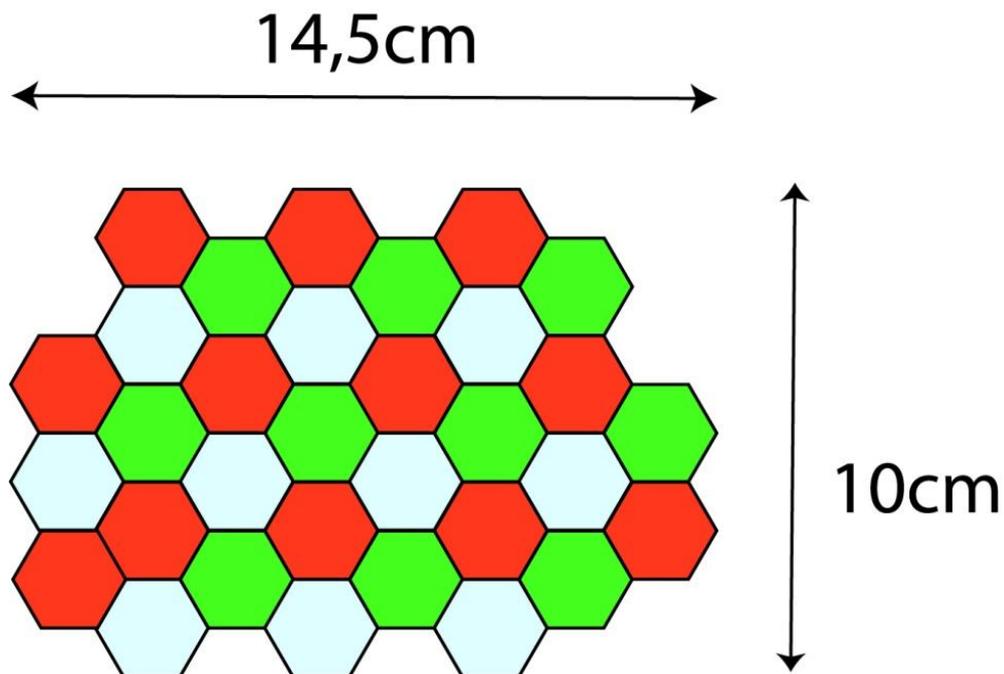


Figura 3.20 Griglia utilizzata per la disposizione dei LED sul dissipatore.

Due dei LED rossi sono “fuori griglia” poiché il numero totale di LED di questo colore è superiore a quello degli altri due. I motivi sono la minore caduta di tensione dei LED di questo colore, la necessità di utilizzare una sola tensione di alimentazione e l'utilizzo di un driver lineare.

Questo in teoria non dovrebbe causare problemi di miscelazione per effettuare le nostre prove data l'apertura angolare di circa 130° per ognuno dei LED. Infatti, come è esposto in Figura 3.21, i flussi dei LED più lontani tra di loro sul dissipatore iniziano a miscelarsi già dopo 3,38 centimetri di distanza dal punto di emissione, come si può notare dalla formula 3.14.

$$h = \frac{7,25}{\cos 25} \sin 25 = 3,38 \text{ cm.} \quad (3.14)$$

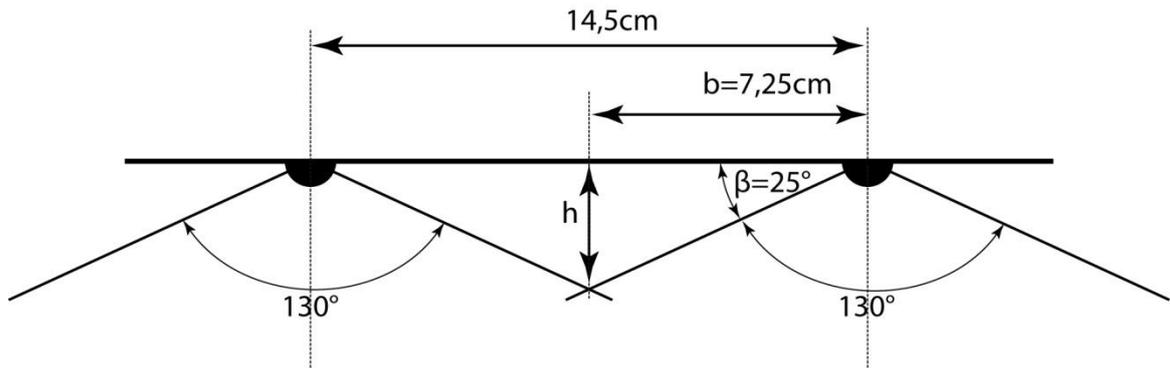


Figura 3.21 Disegno che mostra come i flussi luminosi dei LED più distanti tra loro della nostra lampada si mescolino già dopo pochi centimetri.

Tutte le prove fotometriche che vengono effettuate sulla lampada in questa tesi avvengono con il campione di bianco illuminato ad una distanza di un metro dalla sorgente. Questo ci garantisce un'ottima miscelazione dei colori anche senza l'utilizzo di lenti o elementi diffusori in questa fase di prototipizzazione.

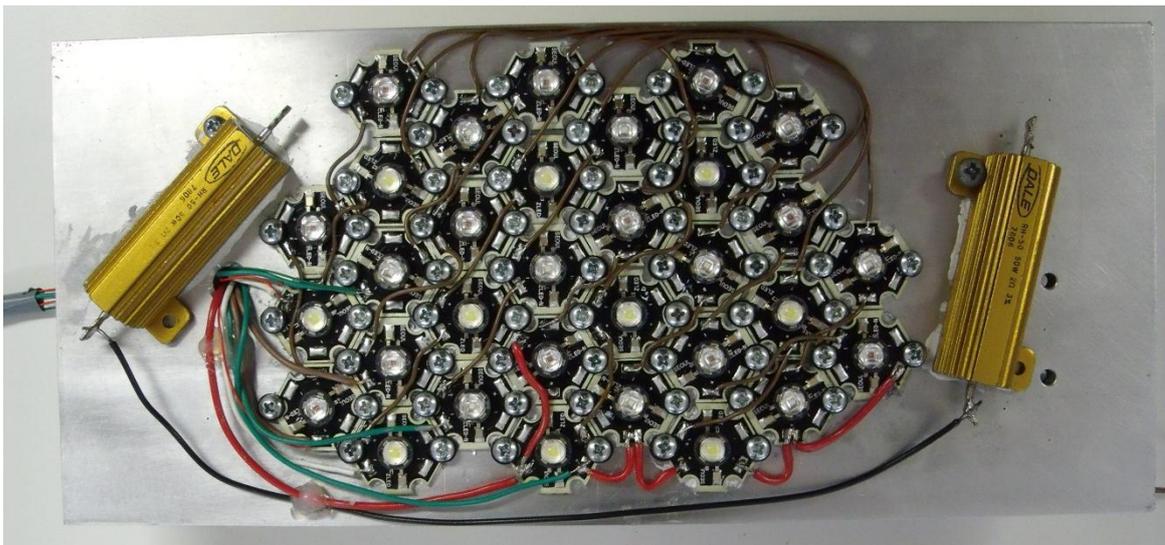


Figura 3.22 Foto del montaggio dei LED sul dissipatore. Si notano ai lati le due resistenze corazzate da 2 Ohm 50W utilizzate per riscaldare il dissipatore.

### 3.11 FIRMWARE

Il cuore pulsante di questo lavoro di tesi è senza dubbio il microcontrollore che ha il compito di gestire la comunicazione con il PC, stimare la temperatura di giunzione dei LED e calcolare i corretti duty cycle per ottenere la temperatura di colore desiderata. In questo sottocapitolo viene descritto il funzionamento generale del firmware, rimandando all'appendice A chi fosse interessato a visionare tutto il codice. Per scrivere e compilare il codice è stato utilizzato il tool di sviluppo messo a

disposizione gratuitamente dalla Microchip, MPLAB IDE. Il codice è stato scritto in linguaggio C utilizzando le librerie a disposizione. Il programmatore utilizzato per caricare il firmware sul microcontrollore è un ICD3. Una visione generale del lavoro svolto dal microcontrollore è rappresentata nel diagramma di flusso di Figura 3.23.

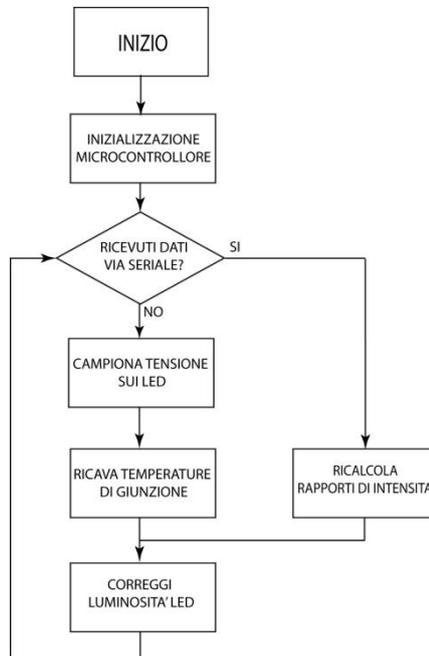


Figura 3.23 Diagramma di flusso che descrive il funzionamento del firmware sviluppato.

La prima parte del codice consiste nell’inizializzazione delle periferiche che vengono utilizzate: la porta seriale UART1, il timer necessario alla generazione della PWM (TIMER3) e l’ADC. Inoltre vengono assegnati i pin di in e out che devono essere programmati per essere assegnati ai piedini fisici del microcontrollore. Per comunicare i comandi dal PC viene implementato un piccolo protocollo riportato in Tabella 3.4.

tXXXX	Dove XXXX è un numero compreso tra 2300 e 7000 invia la temperatura di colore a cui si deve portare la lampada
lumYY	Dove YY è un numero compreso tra 10 e 99 invia l’intensità luminosa a cui si deve portare la lampada
halon	Accende solo metà dei led
allon	Accende tutti i led

Tabella 3.4 Comandi utilizzati per comunicare col microcontrollore.

Il programma principale consiste in un loop che continua a fare rilevazioni di tensione ai capi dei LED, ne fa la media, ricava la temperatura ed effettua la correzione necessaria al mantenimento del bianco impostato.

Se viene inviato un comando via seriale, un interrupt interrompe il normale corso del codice e lo mette in pratica. Se viene ricevuta una temperatura di colore il microcontrollore ricalcola prima le coordinate cromatiche del punto in cui si dovrà portare e poi i duty cycle necessari per pilotare in modo corretto i LED.



# CAPITOLO 4

## CARATTERIZZAZIONE LED E CONTROLLO

### 4.1 CARATTERIZZAZIONE TENSIONE TEMPERATURA

Per fare in modo che la stima della temperatura di giunzione da parte del microcontrollore sia la più corretta possibile, è necessario effettuare una caratterizzazione del variare della caduta di tensione diretta, misurata tra anodo e catodo dei LED, in funzione dell'aumento di temperatura. Usare poi questa caratterizzazione nell'algoritmo di controllo, anziché affidarsi ai dati presenti nel datasheet, porta a svincolarsi da due errori che possono essere presenti:

- Eventuali discrepanze tra i componenti reali e le informazioni contenute nei fogli tecnici;
- Eventuali errori di misura della tensione dovuti a offset nel circuito di acquisizione.

Per essere a conoscenza della temperatura di giunzione dei LED viene usato un artificio che sfrutta l'elevata capacità termica del nostro dissipatore e la relativamente bassa resistenza termica tra il dissipatore e la giunzione stessa. In sostanza si tiene monitorata la temperatura dell'aletta di raffreddamento, temperatura che viene aumentata quanto necessario fornendo potenza a due resistenze corazzate fissate sulla stessa, come visibile in Figura 3.22.

Per eseguire le misure di tensione si utilizza lo stesso circuito stampato che pilota la lampada con solo qualche modifica al firmware. Per evitare che la potenza fornita vada ad aumentare la temperatura della giunzione e del dissipatore, i LED vengono pilotati con impulsi di corrente molto brevi (meno di 1ms) intervallati a periodi dove stanno spenti tali da evitare che l'accumulo dell'energia fornita nella capacità termica della giunzione possa incrementarne la temperatura (circa 200ms). L'acquisizione da parte del convertitore analogico digitale è stata impostata in modo

da avere un tempo di campionamento il più breve possibile (un centinaio di ns) e ritardata rispetto all'accensione del LED del tempo necessario per l'assestamento della tensione sul piedino di acquisizione. Per aumentare la precisione il firmware è stato programmato in modo da compiere cento misure di tensione per ogni stringa di LED, farne la media, dividere questa tensione per il numero di LED presenti nella stringa ed inviare il risultato al PC che lo mostra a video. Le misure vengono riportate di seguito nella Tabella 4.1 e successivamente nei grafici delle Figure 4.1, 4.2 e 4.3.

<b>T<sub>j</sub> [°C]</b>	<b>Tensione bianchi [V] I=500mA</b>	<b>Tensione verdi [V] I=350mA</b>	<b>Tensione rossi [V] I=350mA</b>
20	3,549	3,397	2,124
25	3,512	3,359	2,109
30	3,47	3,327	2,097
35	3,447	3,305	2,089
40	3,407	3,271	2,077
45	3,376	3,242	2,066
50	3,349	3,218	2,057
55	3,322	3,192	2,049
60	3,298	3,169	2,041
65	3,275	3,144	2,033
70	3,251	3,118	2,026
75	3,228	3,093	2,018
80	3,212	3,078	2,013
85	3,197	3,062	2,007
90	3,174	3,039	1,999

**Tabella 4.1** Misure di tensione in funzione della temperatura di giunzione per i LED utilizzati.

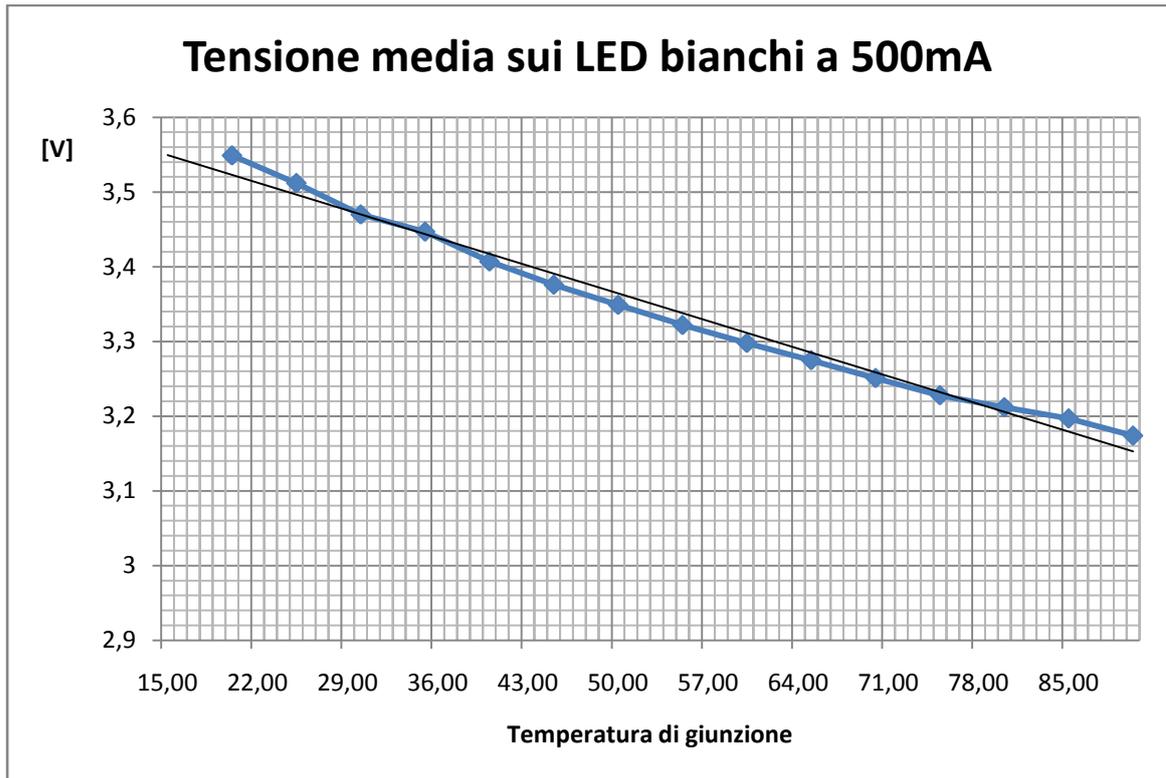


Figura 4.1 Misure statiche di tensione in funzione della temperatura di giunzione per i LED bianchi pilotati a 500mA.

Come si vede nella Figura 4.1, la tensione diretta che cade ai capi dei LED bianchi, in funzione dell'aumento di temperatura, cala con un andamento quasi lineare. Per eseguire una stima della temperatura a partire dalla tensione che viene misurata viene effettuata una linearizzazione dell'andamento rappresentata dalla trendline visibile nel grafico. Questa trendline corrisponde alla funzione (4.1)

$$V_{BIANCO} = 3,63 - 0,0053\bar{3} \cdot T_{J\_BIANCO} \quad (4.1)$$

che porta alla (4.2) da utilizzare nel firmware per ricavare la temperatura dalla tensione:

$$T_{J\_BIANCO} = \frac{3,63 - V_{BIANCO}}{0,0053\bar{3}} \quad (4.2)$$

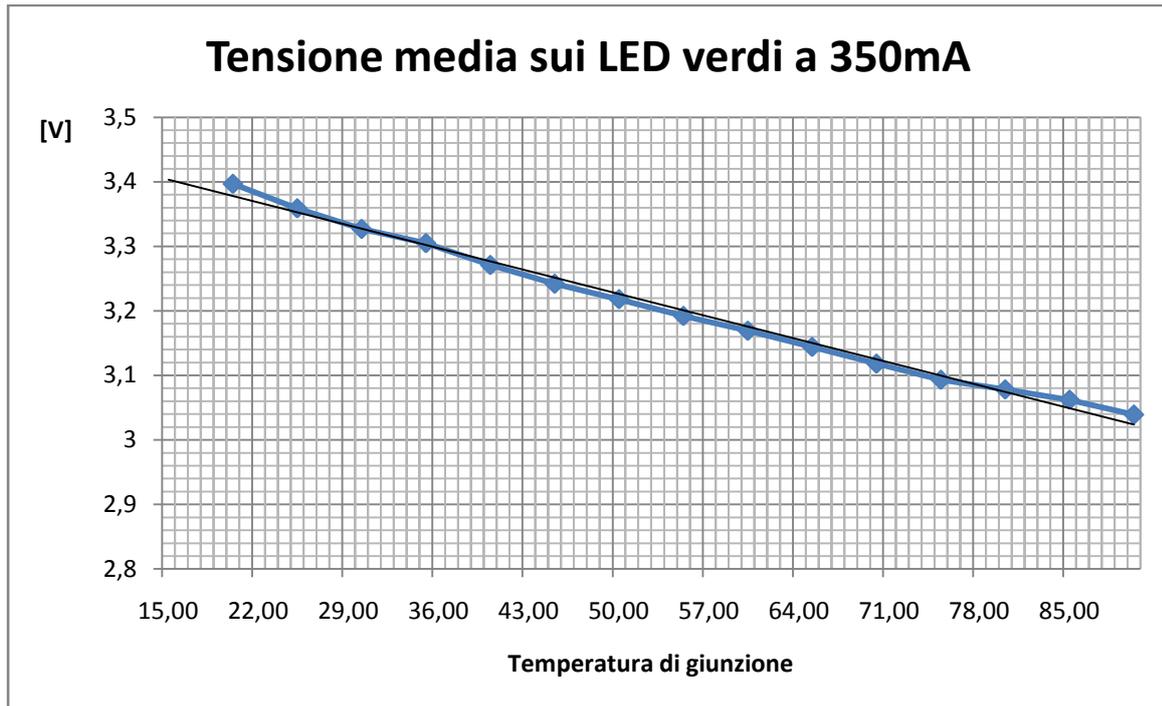


Figura 4.2 Misure statiche di tensione in funzione della temperatura di giunzione per i LED verdi pilotati a 350mA.

Come per i LED bianchi, l'andamento pressoché lineare è stato linearizzato seguendo la trendline visibile in figura 4.2. Questa trendline corrisponde alla funzione (4.3)

$$V_{VERDE} = 3,48 - 0,0050714 \cdot T_{J\_VERDE} \quad (4.3)$$

Questo porta alla (4.3) da utilizzare nel firmware per ricavare la temperatura dalla tensione:

$$T_{J\_VERDE} = \frac{3,48 - V_{VERDE}}{0,0050714} \quad (4.4)$$

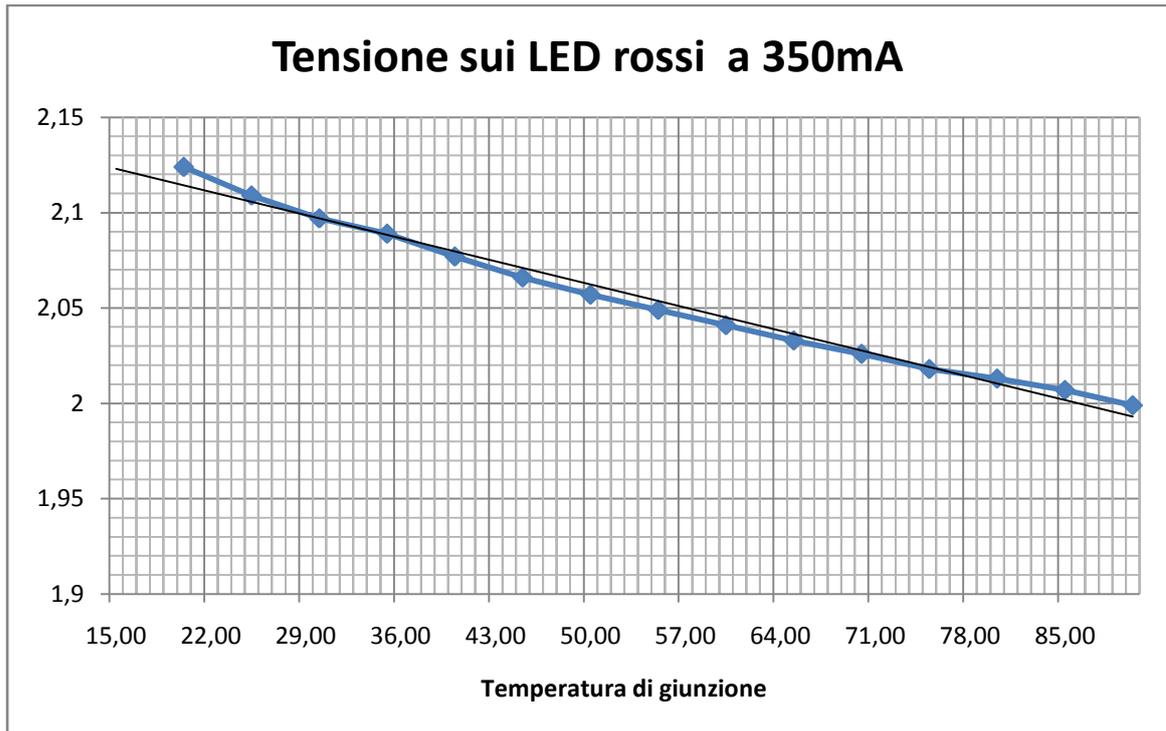


Figura 4.3 Misure statiche di tensione in funzione della temperatura di giunzione per i LED rossi pilotati a 350mA.

Come per i LED bianchi e verdi l'andamento pressoché lineare della tensione diretta, che cade ai capi dei LED rossi in funzione della temperatura, è stato linearizzato seguendo la trendline visibile in Figura 4.3. Questa trendline corrisponde alla funzione (4.5)

$$V_{ROSSO} = 2,149 - 0,0017\bar{3} \cdot T_{J\_ROSSO} \quad (4.5)$$

che porta alla formula (4.6) da utilizzare nel firmware per ricavare la temperatura dalla tensione:

$$T_{J\_ROSSO} = \frac{2,149 - V_{ROSSO}}{0,0017\bar{3}} \quad (4.6)$$

Con queste informazioni, ogni volta che viene effettuata una misura di tensione, costituita dalla media di cento misure, vengono calcolate le tre temperature di giunzione per i diversi colori dei LED, punto di partenza per effettuare le compensazioni necessarie al corretto funzionamento della lampada.

## 4.2 CARATTERIZZAZIONE TEMPERATURA FLUSSO LUMINOSO

Una volta a conoscenza delle tre temperature di giunzione dei LED, si deve effettuare una correzione andando a ritoccare nel firmware la massima quantità di lumen

ottenibile dal gruppo di LED con duty-cycle unitario. Per fare questo ci si è in prima battuta avvalsi dei soli dati presenti nel data sheet. In seguito, data la disponibilità dello spettroradiometro MINOLTA CS-1000, si sono eseguite delle misure di luminosità per ottenere un andamento più prossimo alla realtà da utilizzare per le compensazioni. Le misure di luminanza ( $L_v$ ) riportano le candele al metro quadro rilevate sul campione di bianco certificato posto ad un metro di distanza. Queste informazioni non ci aiutano, se prese in assoluto, ma, se considerate le une rispetto alle altre, ci consentono di correggere l'equazione utilizzata nel controllo per compensare il calo di luminosità delle sorgenti all'aumentare della temperatura di giunzione.

### 1. Relative Light Output vs. Junction Temperature at $I_F=350mA$

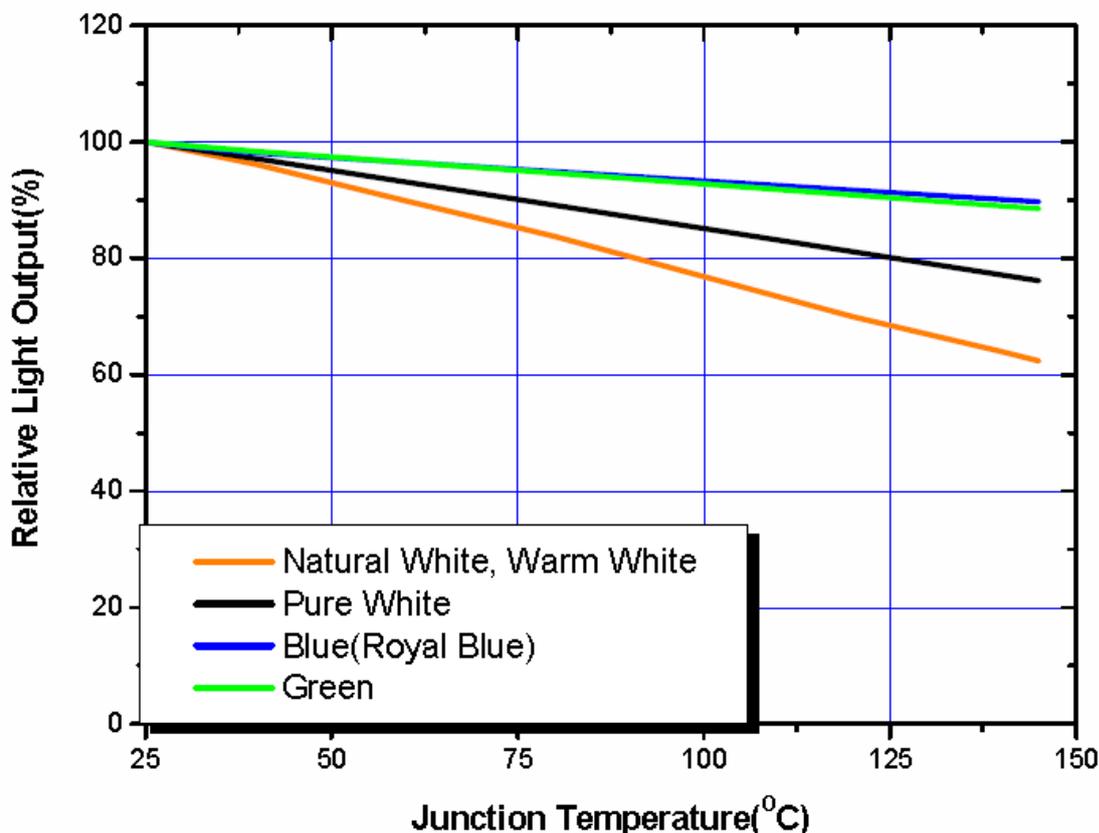


Figura 4.4 Intensità di flusso luminoso in funzione della temperatura di giunzione per i LED bianchi e verdi. Fonte datasheet Seoul Semiconductor.

Dal data sheet sono state estrapolate le equazioni 4.7 e 4.8 che rappresentano il calo di luminosità dei LED, bianchi e verdi rispettivamente, in funzione della temperatura di giunzione degli stessi.

$$\% Flusso_{BIANCO} = 105 - 0,2 \cdot T_{J\_BIANCO} \quad (4.7)$$

$$\% Flusso_{VERDE} = 102,2 - 0,089 \cdot T_{J\_VERDE} \quad (4.8)$$

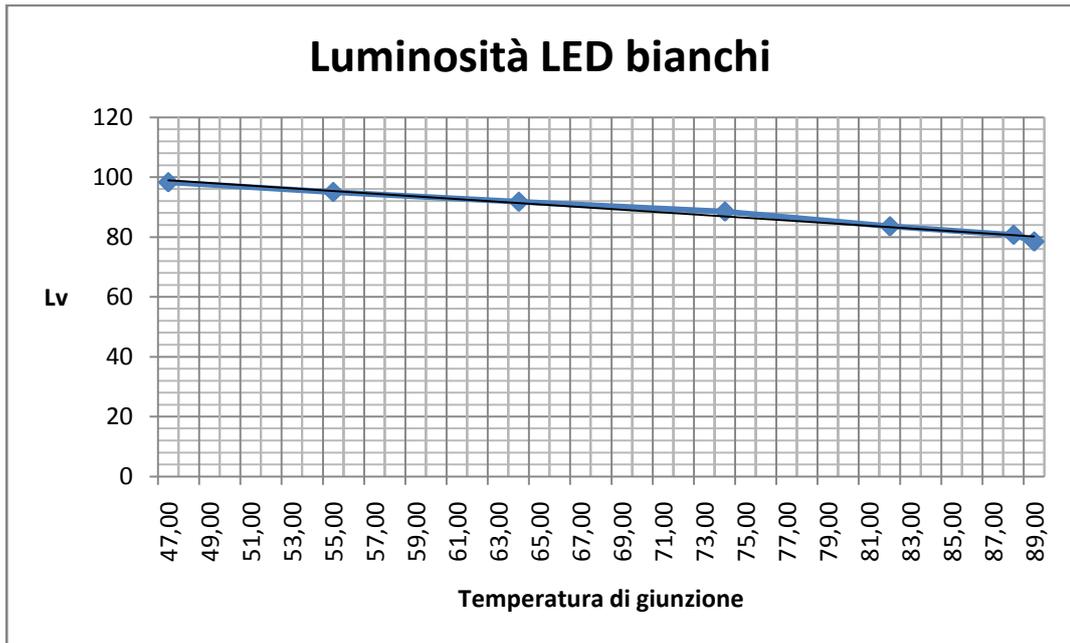


Figura 4.5 Misure di luminosità relativa sui LED bianchi in funzione della temperatura di giunzione stimata dal sistema di controllo a microcontrollore.

Dalle misure di luminosità fatte, si nota come il flusso luminoso dei LED bianchi cali in maniera quasi lineare con l'aumento della temperatura e con una pendenza quasi doppia rispetto alle informazioni contenute nel datasheet. Per questo motivo l'equazione 4.7 viene sostituita nel firmware del microcontrollore con la 4.9.

$$\% \text{Flusso}_{B\_MISURE} = 110,16 - 0,40646 \cdot T_{j\_BIANCO} \quad (4.9)$$

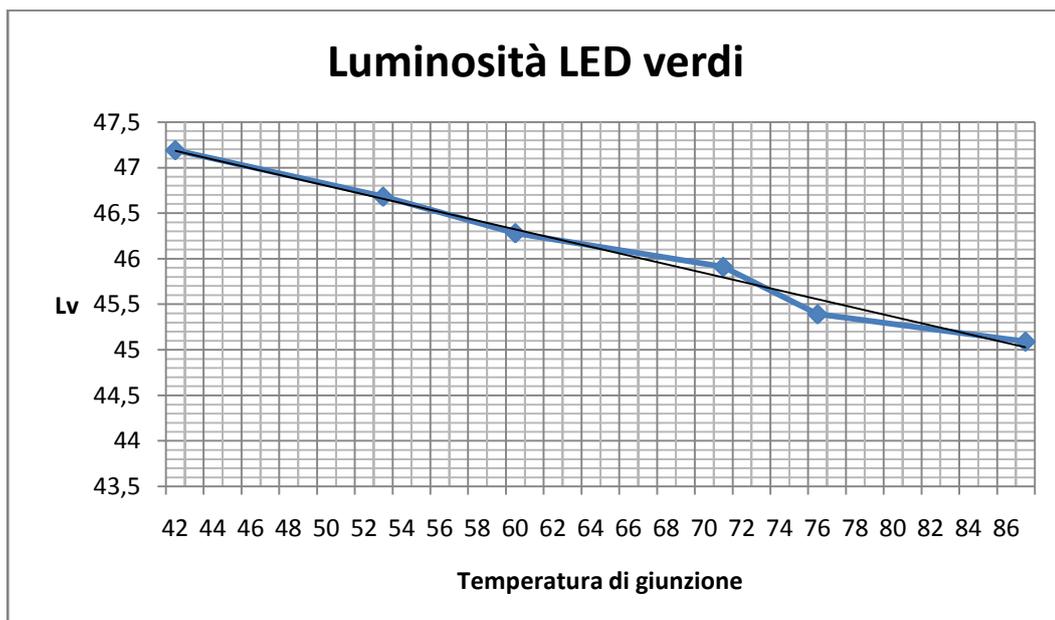


Figura 4.6 Misure di luminosità relativa sui LED verdi in funzione della temperatura di giunzione stimata dal sistema di controllo a microcontrollore.

Anche per i LED verdi l'equazione che regola l'intensità luminosa in funzione della temperatura di giunzione è stata ritoccata affidandoci alle misure. La formula 4.8 viene quindi sostituita nel firmware con la 4.10.

$$\% \text{Flusso}_{V\_MISURE} = 102,5 - 0,10160 \cdot T_{J\_VERDE} \quad (4.10)$$

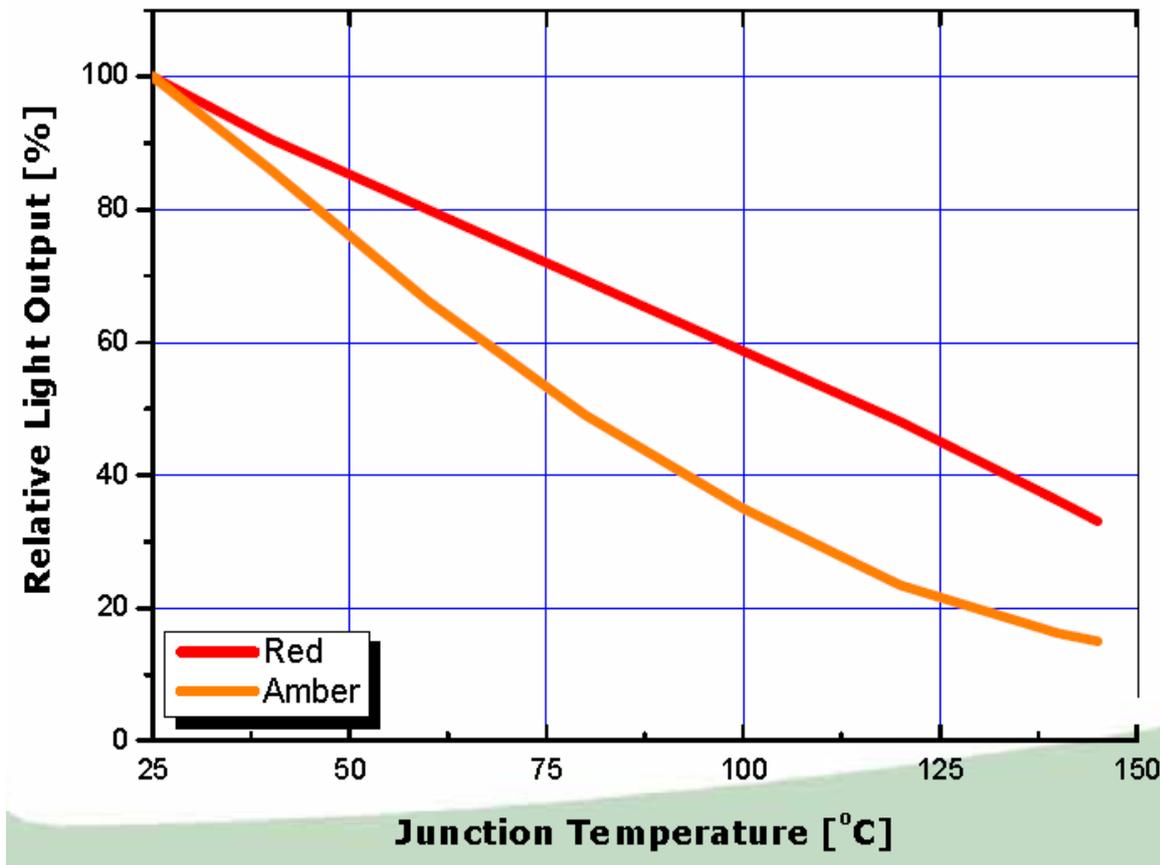


Figura 4.7 Intensità di flusso luminoso in funzione della temperatura di giunzione per i LED rossi. Fonte datasheet Seoul Semiconductor.

Come già accennato, la luminosità dei LED rossi è quella che risente di più della temperatura, al punto che la curva che rappresenta la relazione tra le due grandezze è riportata su di un altro grafico (Figura 4.7). Come per gli altri due colori, dal grafico viene estrapolata la relazione matematica che caratterizza questo comportamento.

$$\% \text{Flusso}_{ROSSO} = 114 - 0,56 \cdot T_{J\_ROSSO} \quad (4.11)$$

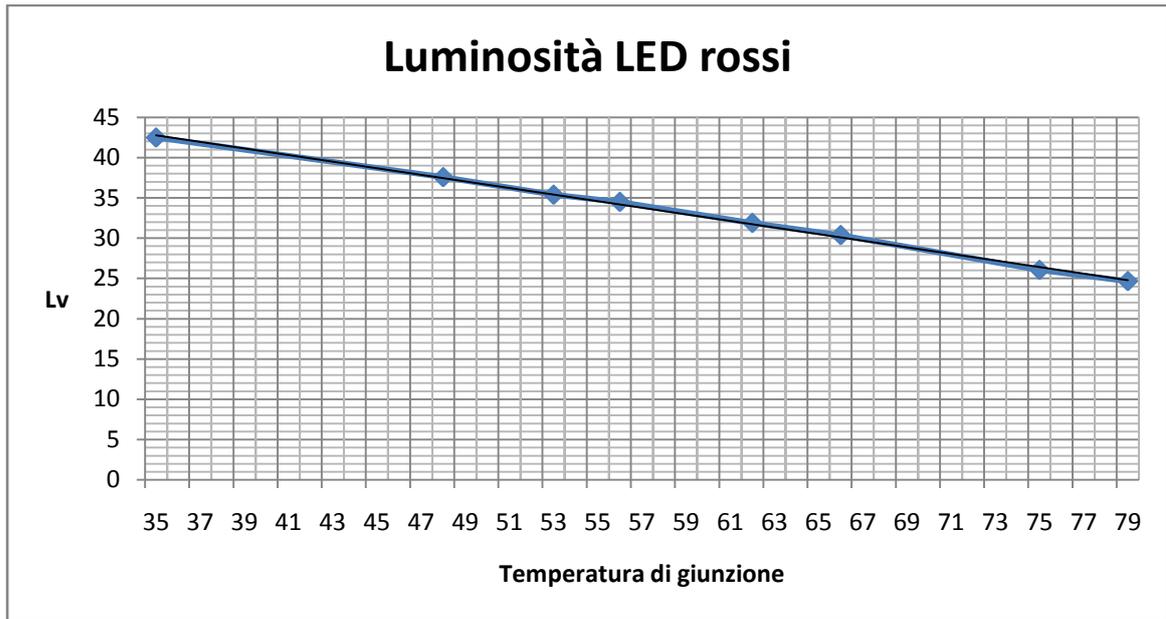


Figura 4.8 Misure di luminosità relativa sui LED rossi in funzione della temperatura di giunzione stimata dal sistema di controllo a microcontrollore.

Anche in questo caso la formula estrapolata dal data sheet (la 4.11) viene poi sostituita con la 4.12, ricavata dalle misure effettuate in laboratorio.

$$\% \text{Flusso}_{R\_MISURE} = 121,76 - 0,87037 \cdot T_{J\_ROSSO} \quad (4.12)$$

In sostanza, poiché per ottenere in uscita i rapporti tra le luminosità dei vari colori si parte dalla luminosità massima ottenibile con duty cycle unitario e se ne utilizza la giusta percentuale sfruttando la linearità della modulazione PWM, basterà correggere il valore massimo di lumen ottenibili alle varie temperature per ottenere un primo controllo sulla stabilità della temperatura di colore.

### 4.3 CARATTERIZZAZIONE DELLE COORDINATE CROMATICHE

Inizialmente si pensava che il peso degli shift di lunghezza d'onda in relazione alle variazioni di temperatura dei vari LED potesse essere trascurato rispetto al calo di luminosità. Per questo motivo le prime prove fotometriche sono state svolte, come si analizzerà in dettaglio nel quinto capitolo, senza implementare un controllo che contrastasse lo sbandamento delle coordinate cromatiche della luce emessa dai LED. Fin dalle prime prove però ci si rende conto che, se questo tipo di approccio può portare ad un errore ridotto in caso di utilizzo di soli LED colorati, la presenza dei LED bianchi a fosfori ci costringe ad implementare un algoritmo che tenga conto anche di questo problema. Infatti, la resa dei fosfori è fortemente influenzata in maniera negativa dall'aumento della temperatura. Ne risulta che la luce prodotta dai

LED bianchi, mano a mano che la temperatura della sorgente sale, diventa sempre più fredda a causa della minor quantità di energia che viene convertita dai fosfori. Dato l'obbligo di inserire questa correzione sui LED bianchi essa è stata implementata anche per i LED rossi e per i LED verdi. Per fare ciò ci si è avvalsi dello spettroradiometro Minolta CS-1000. Per primi vengono analizzati i LED bianchi. In Figura 4.9 si può vedere lo spostamento sul diagramma cromatico della luce prodotta dai soli LED bianchi al variare della temperatura.

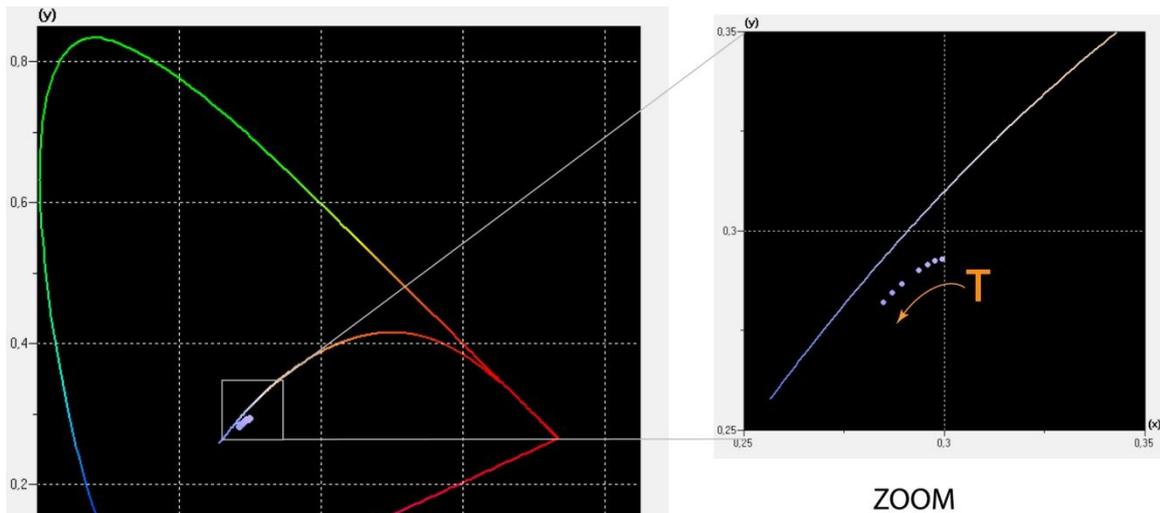


Figura 4.9 Spostamento della luce prodotta dall'insieme di tutti i LED bianchi in funzione della temperatura. La freccia indica la direzione di spostamento in caso di aumento di temperatura.

Per riuscire ad effettuare una correzione si sono estrapolati singolarmente gli andamenti delle due coordinate cromatiche e sono stati riportati in Figura 4.10 e Figura 4.11. Da questi due grafici si vogliono ricavare delle equazioni da poter implementare nel firmware, in modo da stimare la posizione sul diagramma cromatico della luce prodotta da ogni colore in funzione della temperatura di giunzione. Questo tipo di controllo, unito a quello sull'intensità luminosa, ci permette di ridurre al minimo l'errore.

La prima cosa che si nota, osservando i grafici delle coordinate cromatiche del bianco, è che intorno ai 75°C di temperatura di giunzione lo spostamento sul piano cromatico subisce una "accelerazione". La variazione per grado di temperatura che subiscono le coordinate aumenta. Per compensarla vengono quindi implementate due equazioni diverse rappresentate dalle due rette presenti in Figura 4.10 e Figura 4.11 che linearizzano i punti prima e dopo la variazione.

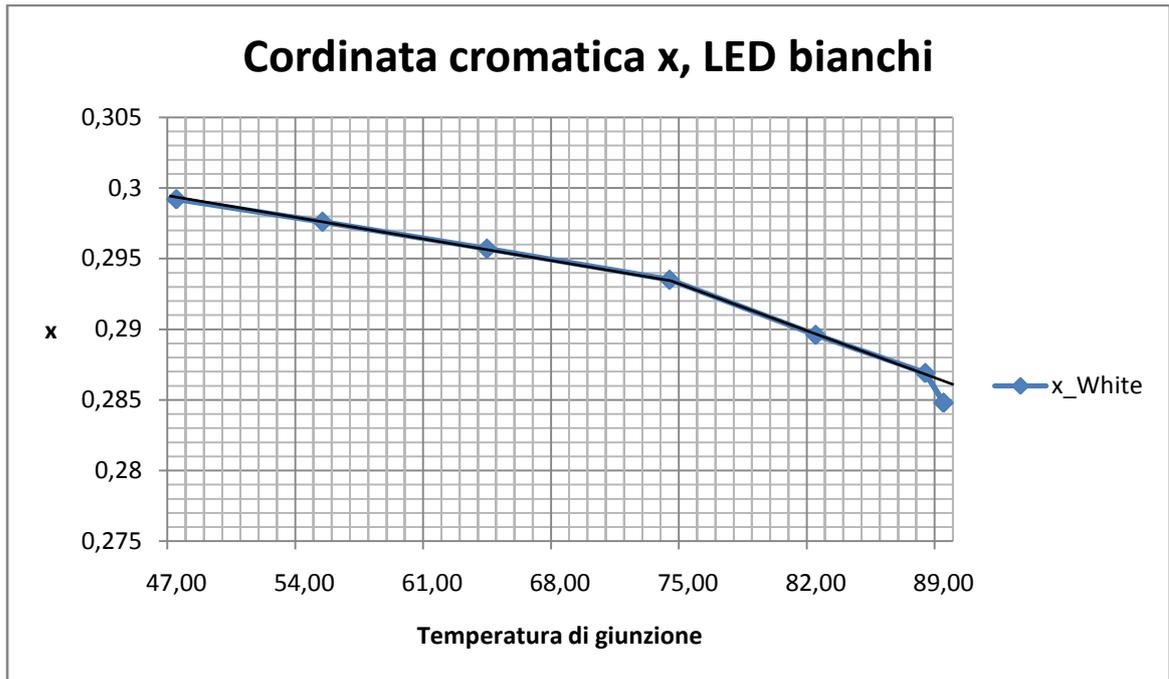


Figura 4.10 Andamento della coordinata cromatica x della luce prodotta dai LED bianchi in funzione della temperatura di giunzione.

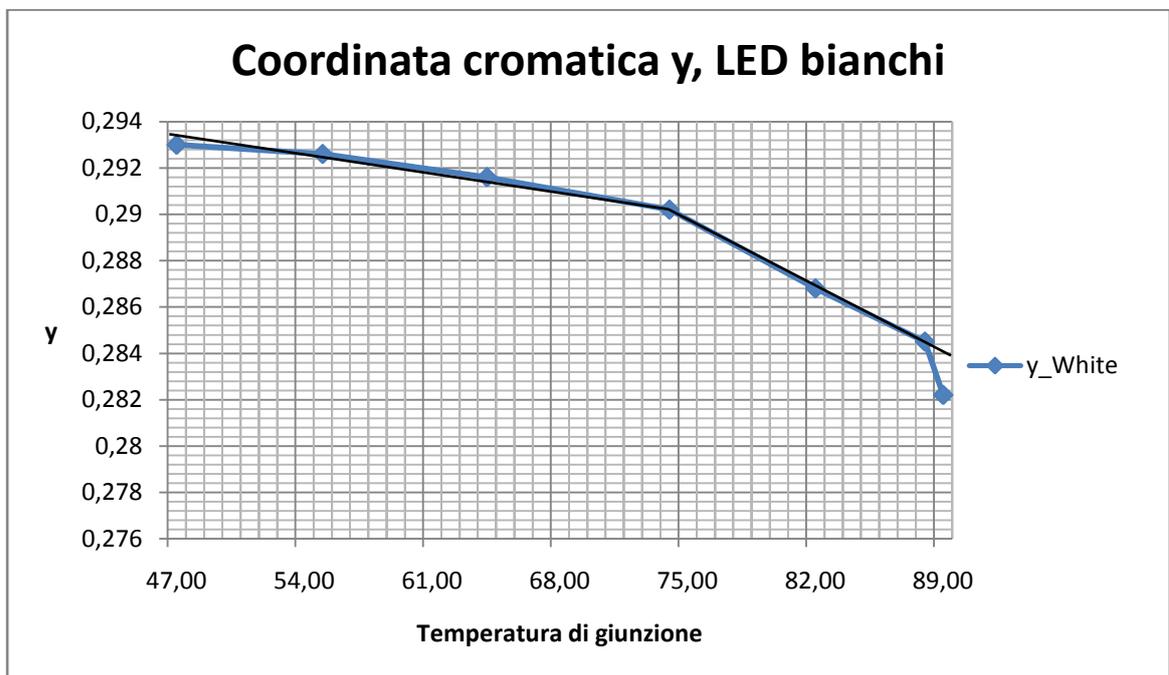


Figura 4.11 Andamento della coordinata cromatica y della luce prodotta dai LED bianchi in funzione della temperatura di giunzione.

Le equazioni 4.13 e 4.14 riportano esattamente quelle che sono state inserite nel firmware per correggere la posizione sul diagramma cromatico della sorgente di colore bianco.

$$\begin{cases} x_w = 0.309329 - TempW \cdot 0.0002118959 & \text{se } TempW < 75^\circ C \\ x_w = 0.329487 - TempW \cdot 0.0004817518 & \text{se } TempW \geq 75^\circ C \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\begin{cases} y_w = 0.297442 - TempW \cdot 0.0000929368 & \text{se } TempW < 75^\circ C \\ y_w = 0.323215 - TempW \cdot 0.0004379562 & \text{se } TempW \geq 75^\circ C \end{cases} \quad (4.14)$$

In questa maniera il microcontrollore riesce a stimare la giusta posizione sul diagramma cromatico della luce emessa dai LED bianchi.

Lo stesso lavoro è stato svolto con i LED verdi e rossi. Sia per gli uni che per gli altri si è potuto linearizzare l'andamento delle coordinate x e y con una sola equazione, dato che il trend è piuttosto lineare come si vede dalle immagini dalla Figura 4.13 alla Figura 4.17.

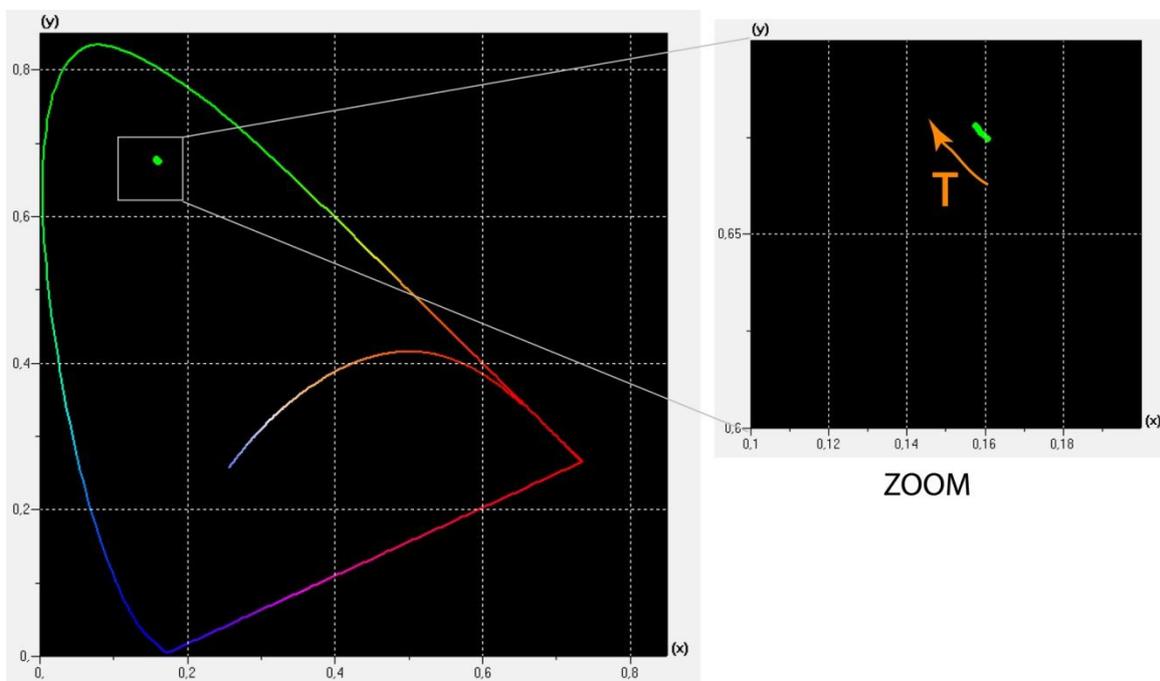


Figura 4.12 Spostamento della luce prodotta dall'insieme di tutti i LED verdi in funzione della temperatura. La freccia indica la direzione di spostamento in caso di aumento di temperatura.

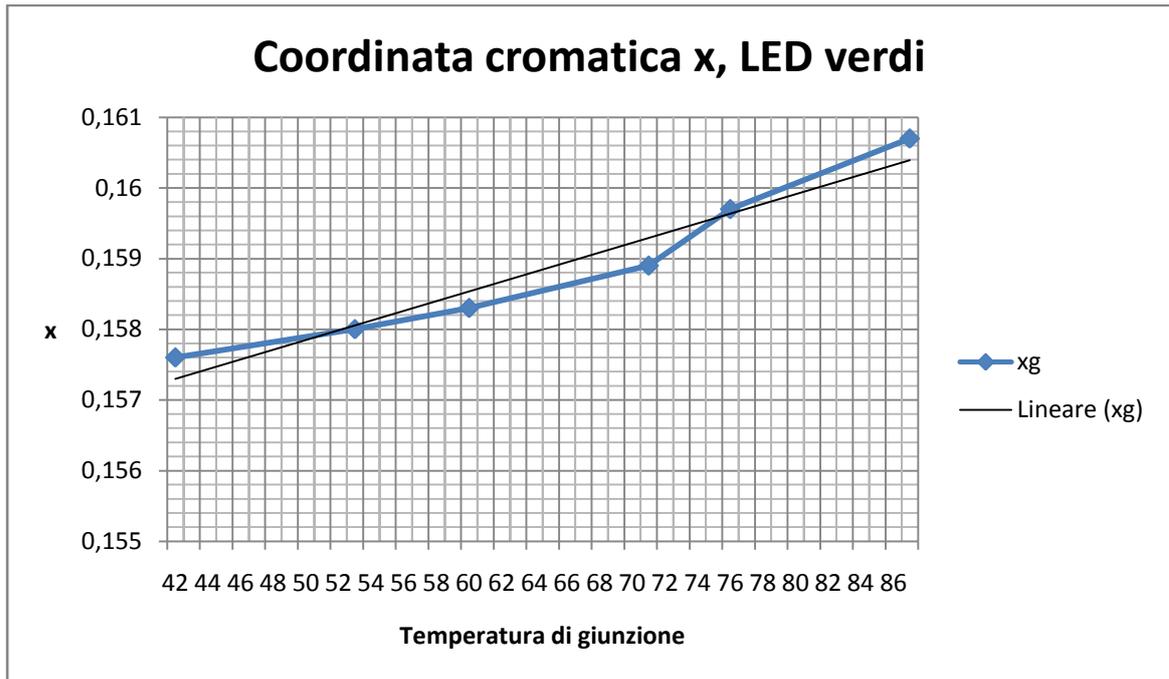


Figura 4.13 Andamento della coordinata cromatica x della luce prodotta dai LED verdi in funzione della temperatura di giunzione.

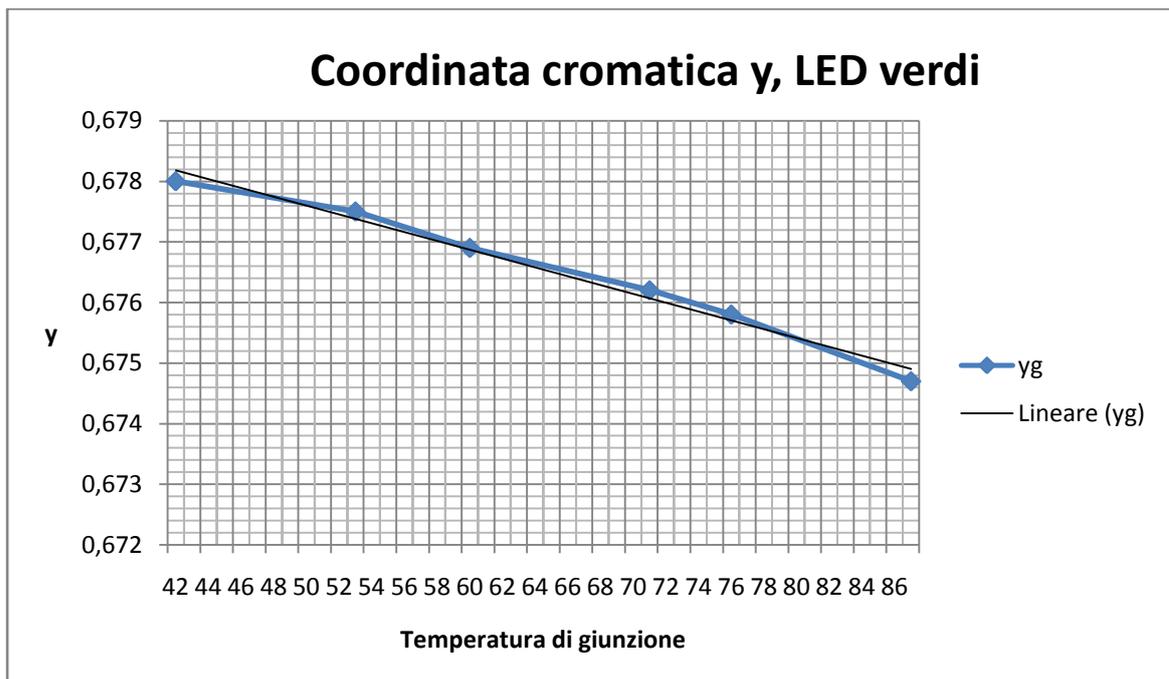


Figura 4.14 Andamento della coordinata cromatica y della luce prodotta dai LED verdi in funzione della temperatura di giunzione.

$$x_g = 0.154341 + TempG \cdot 0.0000704545 \quad (4.15)$$

$$y_g = 0.681304 - TempG \cdot 0.0000739130 \quad (4.16)$$

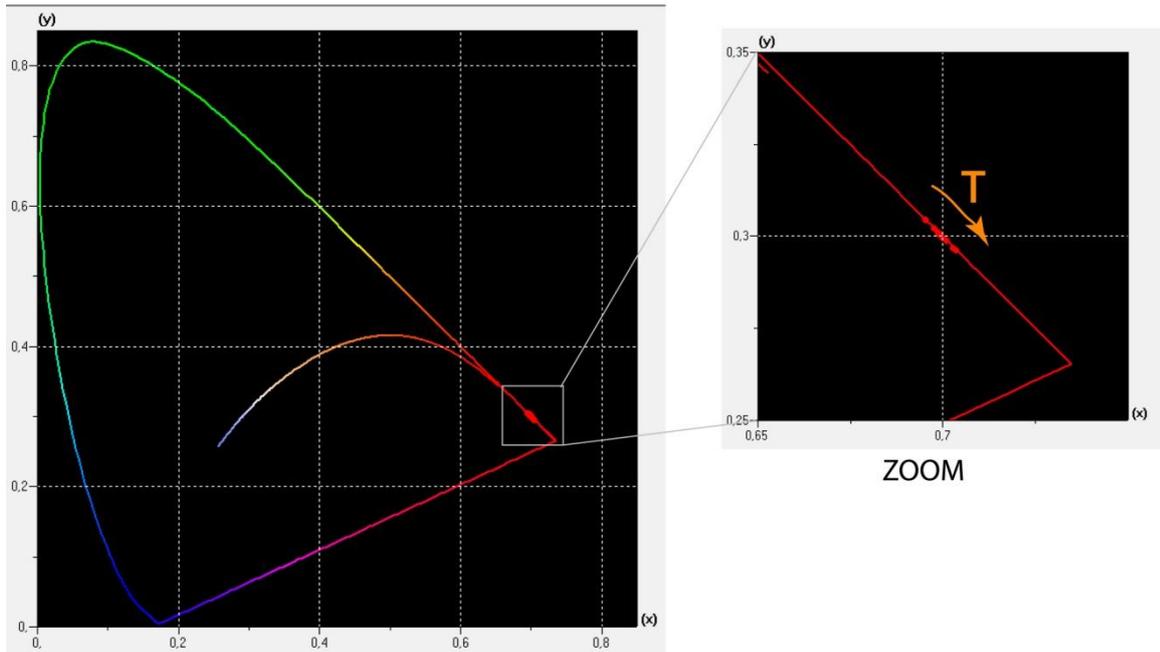


Figura 4.15 Spostamento della luce prodotta dall'insieme di tutti i LED rossi in funzione della temperatura. La freccia indica la direzione di spostamento in caso di aumento di temperatura.

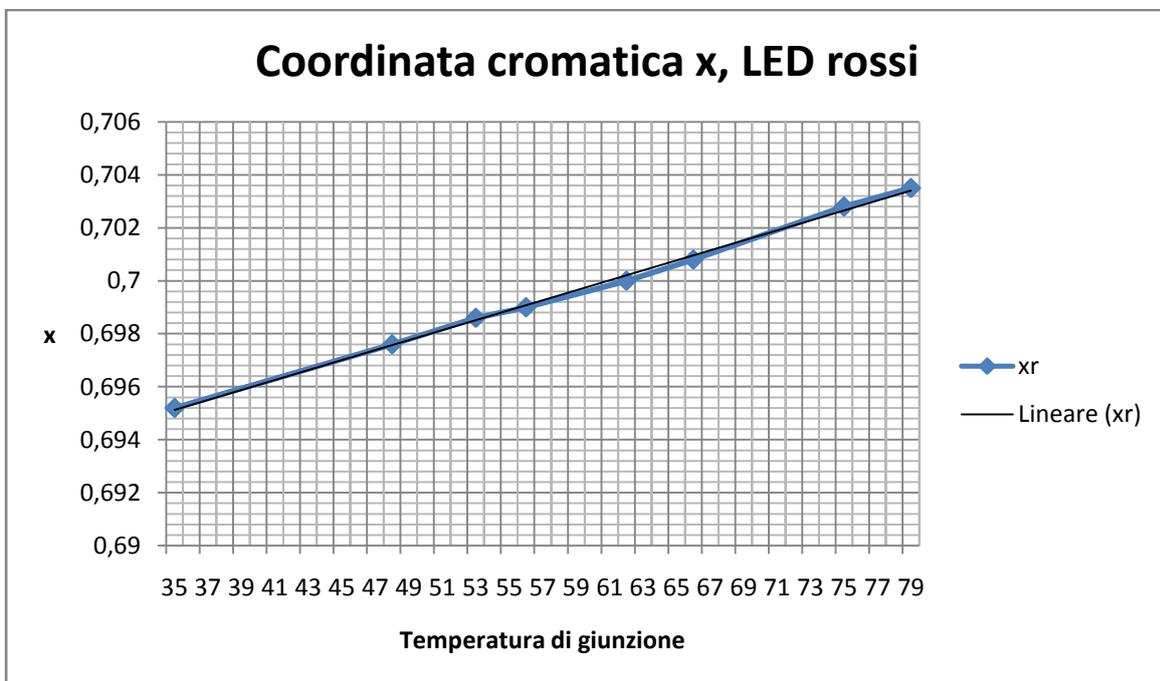


Figura 4.16 Andamento della coordinata cromatica x della luce prodotta dai LED rossi in funzione della temperatura di giunzione.

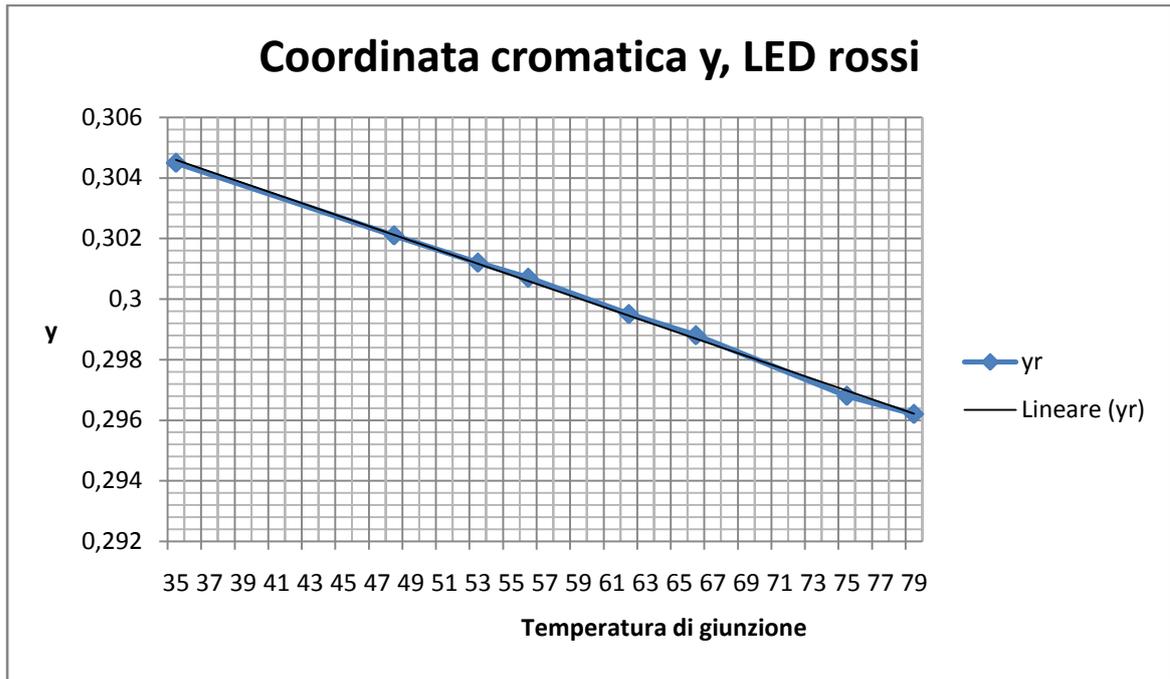


Figura 4.17 Andamento della coordinata cromatica y della luce prodotta dai LED rossi in funzione della temperatura di giunzione.

$$x_r = 0.688311 + TempR \cdot 0.0001911111 \quad (4.17)$$

$$y_r = 0.316444 - TempR \cdot 0.0001955555 \quad (4.18)$$



# CAPITOLO 5

## MISURE E ANALISI DEI RISULTATI

### 5.1 MISURE ELETTRICHE

Prima di effettuare la caratterizzazione ed accendere i LED se ne deve verificare il corretto pilotaggio. In particolare il funzionamento ON OFF deve seguire correttamente il segnale PWM che proviene dal microcontrollore e le correnti che vi scorrono devono essere quelle previste. Le correnti vengono regolate tramite la taratura dei trimmer predisposti per ogni driver e misurate con la sonda di corrente dell'oscilloscopio Tektronix DPO 7054. Dalle misure effettuate e visibili in Figura 5.1, 5.2 e 5.3 si vedono il segnale PWM che esce dal microcontrollore, la corrente che scorre nel LED, la tensione ai suoi capi e un segnale che indica l'intervallo temporale in cui viene effettuata l'acquisizione analogica della tensione.

Si nota come le correnti, oltre a seguire fedelmente l'andamento del segnale PWM in uscita dal microcontrollore, siano correttamente settate a 350mA per i LED rossi e verdi e a 500mA per i LED bianchi.

L'ultima delle quattro forme d'onda riportate evidenzia il funzionamento dell'acquisizione dinamica del convertitore ADC, che va a campionare il segnale di tensione sempre circa a metà del periodo alto del segnale PWM. Questo per ridurre la possibilità di incorrere in segnali di tensione non ancora a regime in caso di duty cycle bassi.

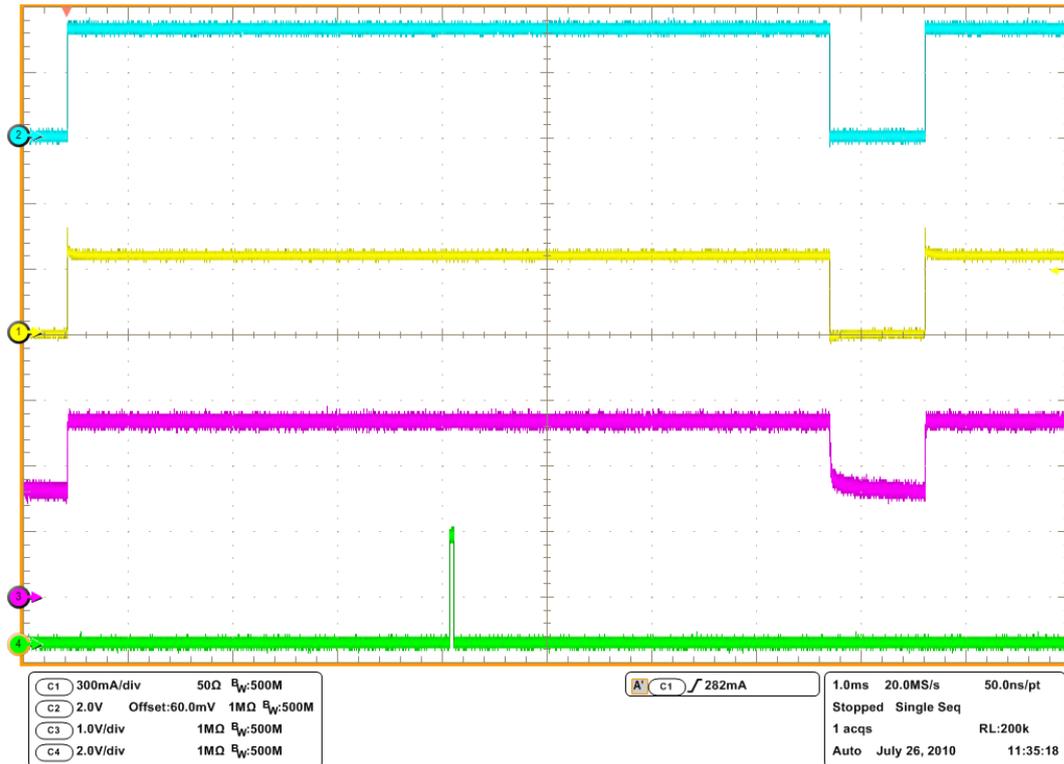


Figura 5.1 Misure riferite ai LED rossi. In particolare le forme d'onda riportano, dall'alto verso il basso: segnale PWM proveniente dal microcontrollore, corrente diretta sui LED, caduta di tensione ai capi di un LED e segnale che indica l'acquisizione dell'ADC.

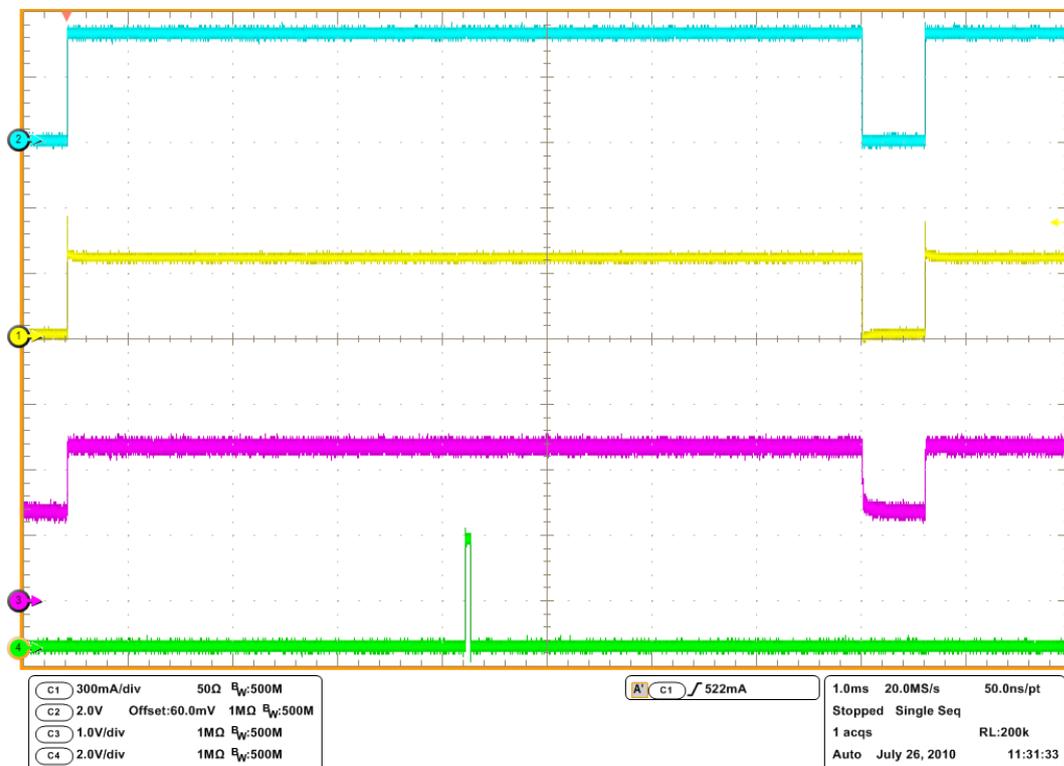


Figura 5.2 Misure riferite ai LED verdi. In particolare le forme d'onda riportano, dall'alto verso il basso: segnale PWM proveniente dal microcontrollore, corrente diretta sui LED, caduta di tensione ai capi di un LED e segnale che indica l'acquisizione dell'ADC.

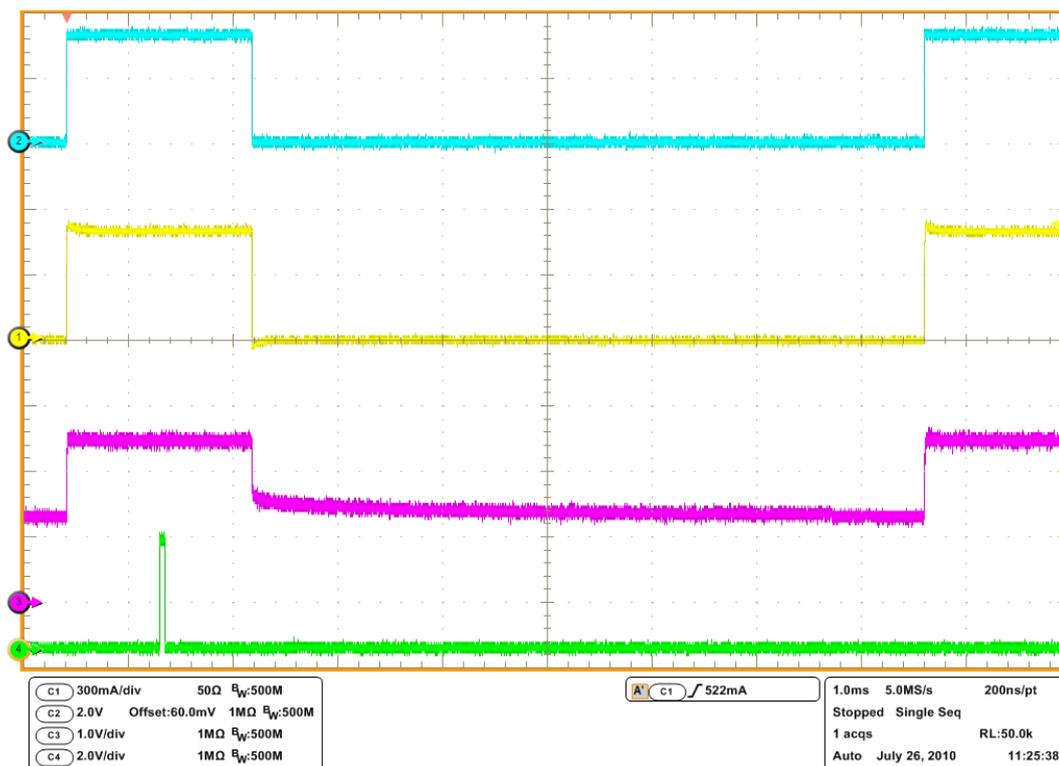


Figura 5.3 Misure riferite ai LED bianchi. In particolare le forme d'onda riportano, dall'alto verso il basso: segnale PWM proveniente dal microcontrollore, corrente diretta sui LED, caduta di tensione ai capi di un LED e segnale che indica l'acquisizione dell'ADC.

## 5.2 MISURE FOTOMETRICHE

Una volta montato tutto l'hardware ed eseguite le prime prove di funzionamento è tempo di analizzare il comportamento fotometrico della lampada in oggetto. Per fare questo tipo di misure oltre agli strumenti serve un luogo adatto allo scopo. In particolare serve un ambiente privo di altre fonti di luce oltre a quella in esame e in grado di minimizzare le riflessioni in modo da misurare solo la luce proveniente in maniera diretta dalla lampada. Infatti, lo spettro della luce alterato dalla riflessione, comprometterebbe le misure. Queste necessità sono state egregiamente soddisfatte dal laboratorio di illuminotecnica e fotometria dell'Università degli studi di Padova dove sono state eseguite le misure. La lampada è stata sistemata sopra ad un banco ottico, su un supporto regolabile in altezza ed inclinazione, in modo da avere la possibilità di regolarne il posizionamento. Sullo stesso banco ottico, su di un supporto scorrevole e regolabile in altezza ed inclinazione è stato posizionato il bianco campione certificato alla distanza di un metro dalla lampada stessa. Lo spettroradiometro MINOLTA CS-1000 è stato puntato e focalizzato sul campione e collegato tramite porta seriale ad un computer con installato il software di gestione MINOLTA CS-S1w. Tramite questo software lo spettro radiometro viene controllato

da remoto ed invia direttamente al PC i dati di misura che grazie al programma di gestione vengono facilmente elaborati e visualizzati nella forma preferita.

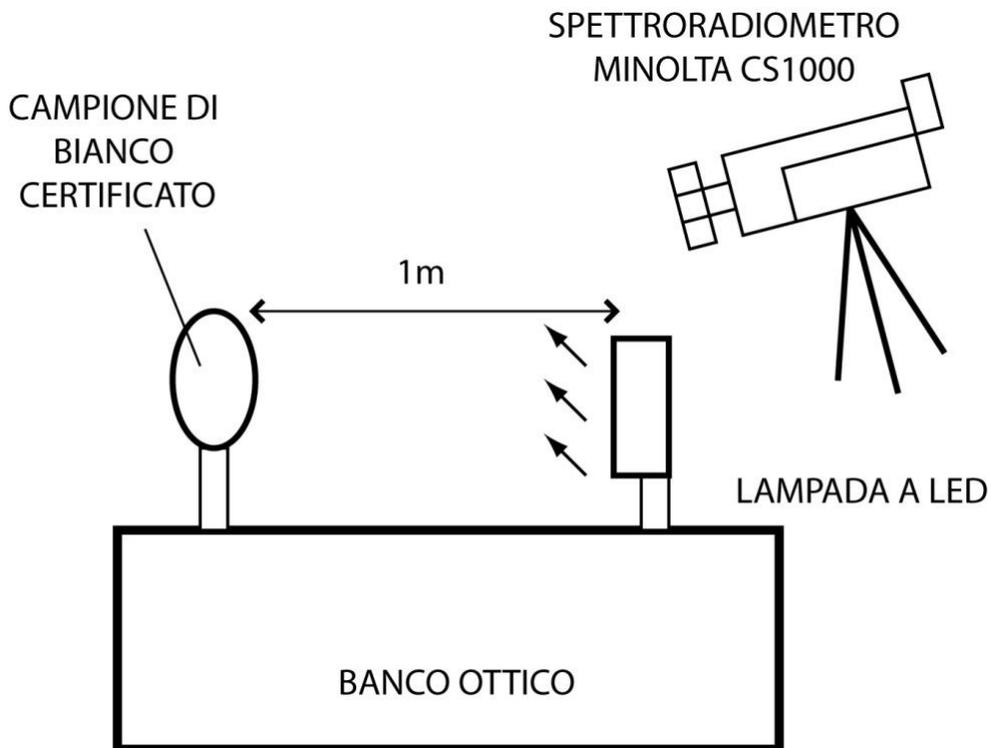


Figura 5.4 Schema del set-up adottato per effettuare le misure fotometriche.

### 5.2.1 ANALISI DEL FUNZIONAMENTO DELLA LAMPADA SENZA CONTROLLO DI TEMPERATURA

In primo luogo si sono fatte misure sulla temperatura di colore al variare della temperatura di giunzione per confermare sperimentalmente le conoscenze teoriche e per avere in seguito un termine di paragone a controllo inserito. Per aumentare la temperatura di giunzione è stata fornita potenza a due resistori corazzati fissati sullo stesso dissipatore su cui sono stati montati i LED costituenti la lampada (visibili in Figura 3.22). Le misure sono state effettuate ad intervalli di temperatura del dissipatore costanti ovvero a 30 40 50 60 e 70 gradi centigradi. La temperatura del dissipatore è stata monitorata con una termocoppia saldamente ancorata al dissipatore stesso, come visibile in Figura 5.5.



Figura 5.5 Collegamento termico tra termocoppia e dissipatore della lampada.

Nelle immagini successive si nota la posizione sul diagramma cromatico xy della luce prodotta dalla lampada. Inoltre è segnata con una croce rossa sul diagramma la posizione corretta della temperatura di colore richiesta alla lampada della quale vengono indicate anche le coordinate cromatiche.

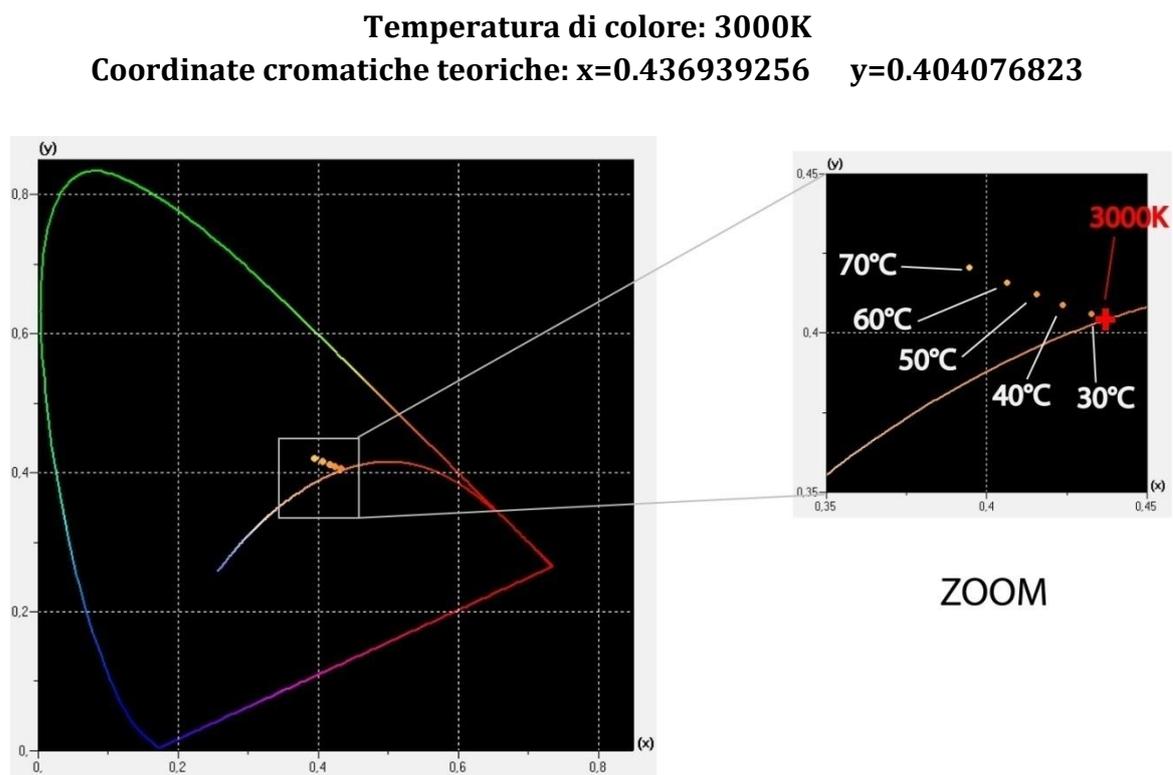


Figura 5.6 Risultati delle misure fotometriche ottenuti a diverse temperature di dissipatore con temperatura di colore impostata di 3000K.

**Temperatura di colore: 4000 K**  
**Coordinate cromatiche teoriche: x:0.380446356 y:0.376751159**

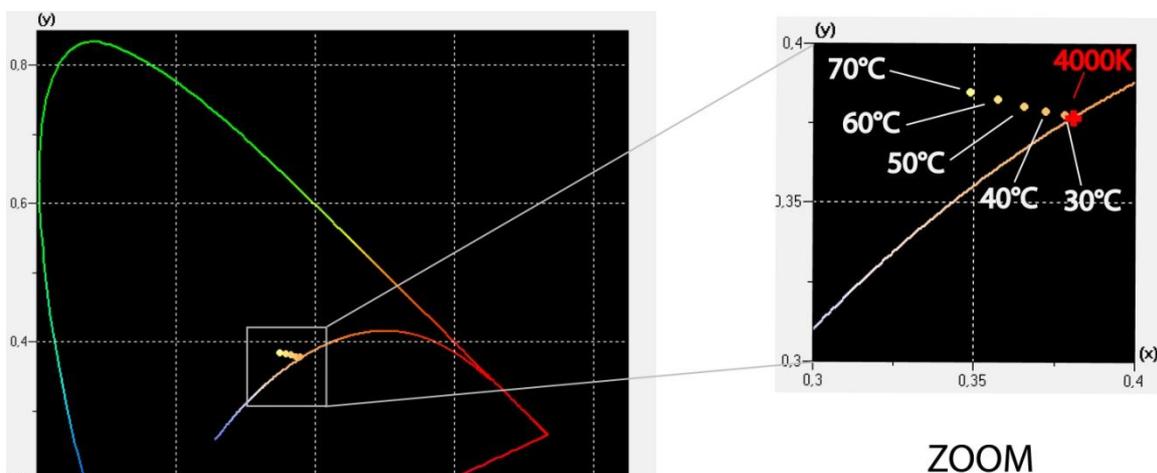


Figura 5.7 Risultati delle misure fotometriche ottenuti a diverse temperature di dissipatore con temperatura di colore impostata di 4000K.

**Temperatura di colore: 5000 K**  
**Coordinate cromatiche teoriche: x:0.345106666 y:0.351612579**

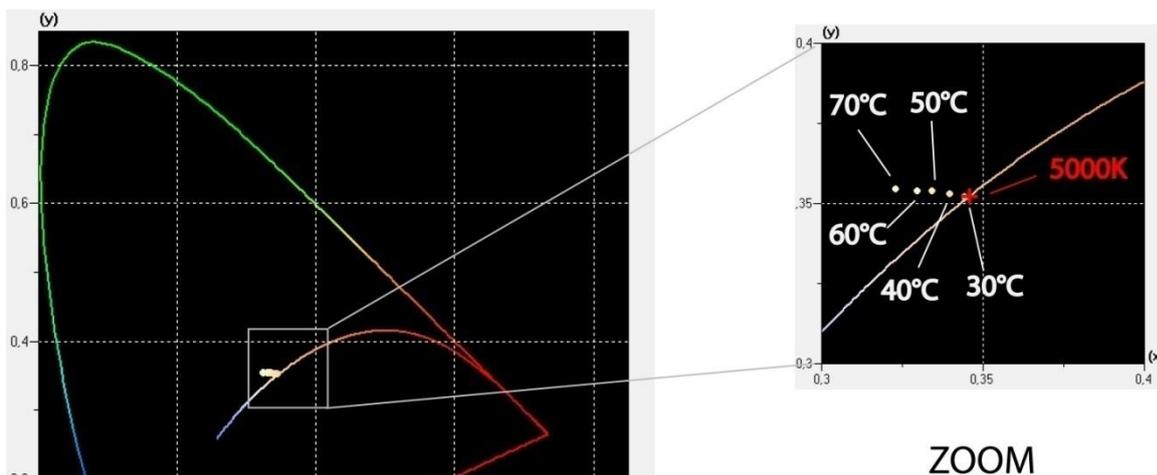
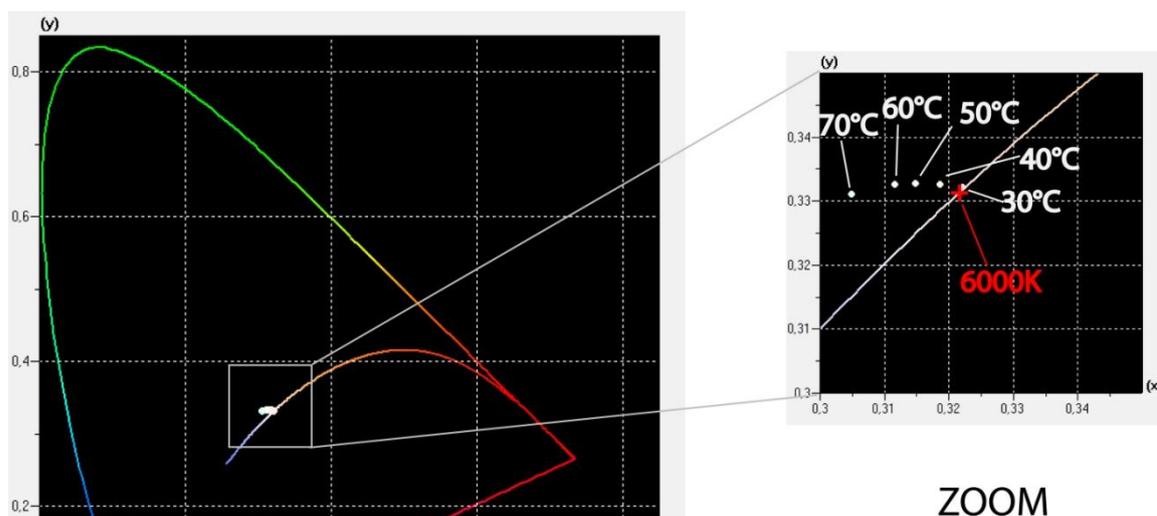


Figura 5.8 Risultati delle misure fotometriche ottenuti a diverse temperature di dissipatore con temperatura di colore impostata di 5000K.

**Temperatura di colore: 6000 K**  
**Coordinate cromatiche teoriche: X:0.32208768 Y:0.331757692**



**Figura 5.9 Risultati delle misure fotometriche ottenuti a diverse temperature di dissipatore con temperatura di colore impostata di 6000K.**

Come si nota nelle immagini precedenti, la dispersione della luce miscelata sul diagramma cromatico in funzione dell'aumento della temperatura è notevole. Per avere un'idea più quantitativa, i risultati numerici delle temperature di colore misurate, rispetto a quelle impostate a varie temperature del dissipatore, sono riportate nella Tabella 5.1.

	3000K			4000K		5000K		6000K	
Td [°C]	T misurata [K]	Errore relativo	T misurata [K]	Errore relativo	T misurata [K]	Errore relativo	T misurata [K]	Errore relativo	
30	3078	1,026	4059	1,015	5029	1,006	5988	0,998	
40	3261	1,087	4239	1,060	5208	1,042	6169	1,028	
50	3442	1,147	4447	1,112	5435	1,087	6365	1,061	
60	3661	1,220	4698	1,175	5615	1,123	6544	1,091	
70	3939	1,313	4982	1,246	5906	1,181	6928	1,155	

**Tabella 5.1 Misure ed errori relativi a temperature di colore di 3000, 4000, 5000 e 6000 K a passi di 10 °C di temperatura di dissipatore (Td).**

Come evidenziato dalla tabella 5.1, se non si effettua nessun controllo la temperatura di colore emessa dalla lampada cambia di quasi mille gradi kelvin passando da una

temperatura di dissipatore di 30°C (ad esempio appena accesa) ad una di 70°C (temperatura di funzionamento ragionevole in caso di funzionamento prolungato con dissipatore leggermente sottodimensionato).

### 5.2.2 FUNZIONAMENTO CON CONTROLLO ATTIVO

Una volta chiarito come si comporta la lampada senza un controllo per contrastare gli sbandamenti in temperatura si è abilitata la parte di firmware che lo implementa. Il setup di misura è rimasto il precedente (con il bianco campione certificato a un metro di distanza dalla lampada) e le misure sono effettuate con lo spettroradiometro MINOLTA CS1000. Le temperature di colore alle quali si compiono le misure sono 3000K, 4000K, 5000K e 6000K per sondare circa tutto il range di bianchi ottenibili dalla lampada.

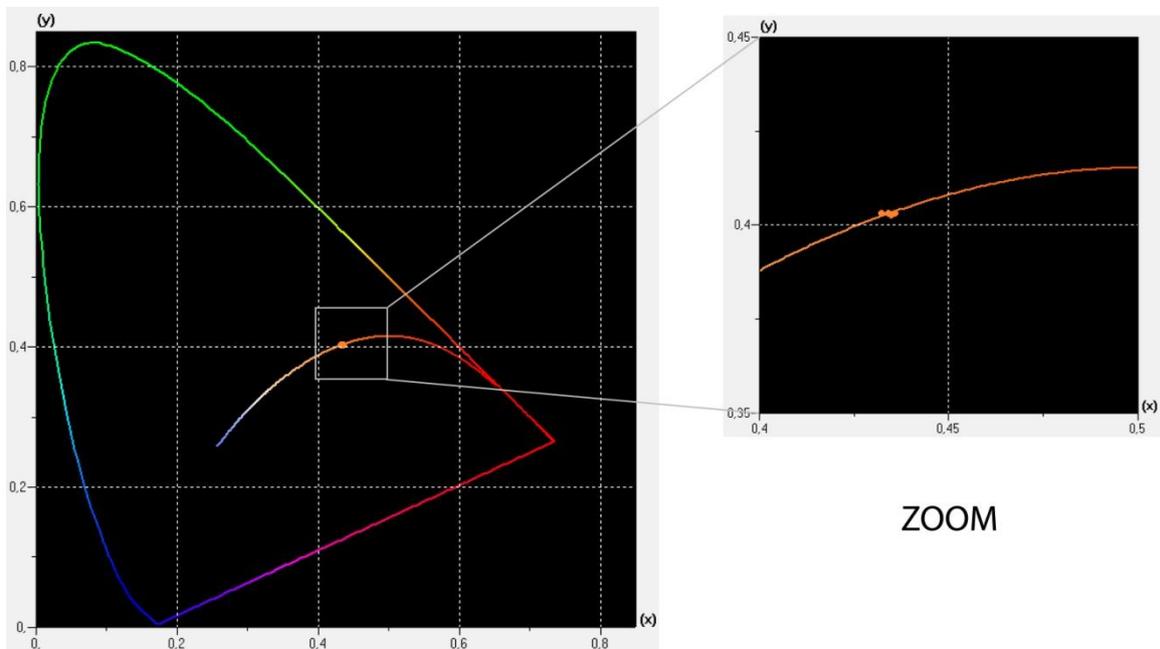


Figura 5.10 Diagramma cromatico che mostra lo spostamento delle coordinate della luce prodotta dalla lampada con il controllo attivo e temperatura di colore impostata di 3000K.

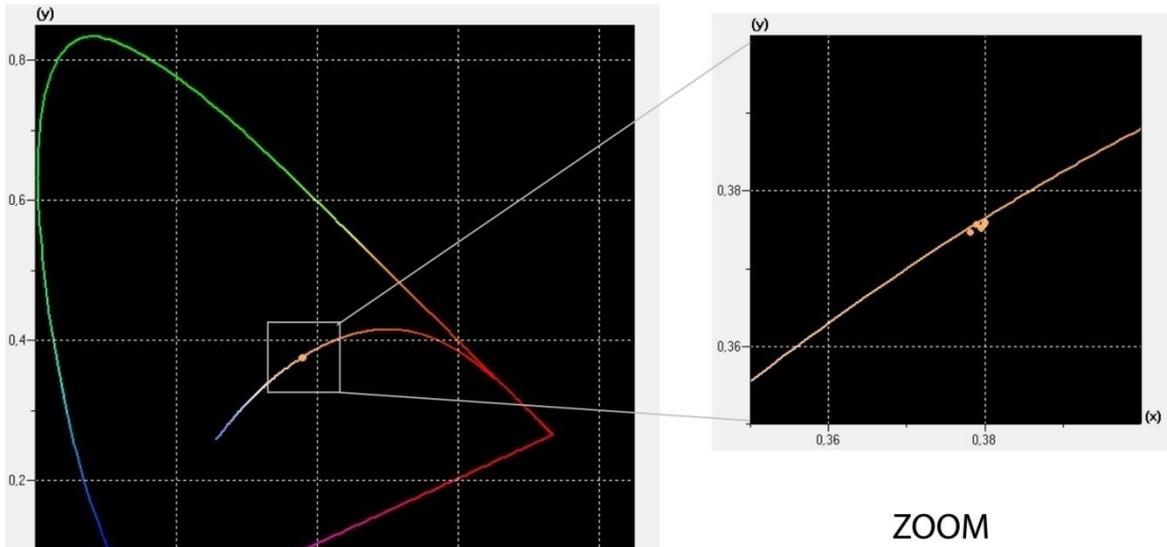


Figura 5.11 Diagramma cromatico che mostra lo spostamento delle coordinate della luce prodotta dalla lampada con il controllo attivo e temperatura di colore impostata di 4000K.

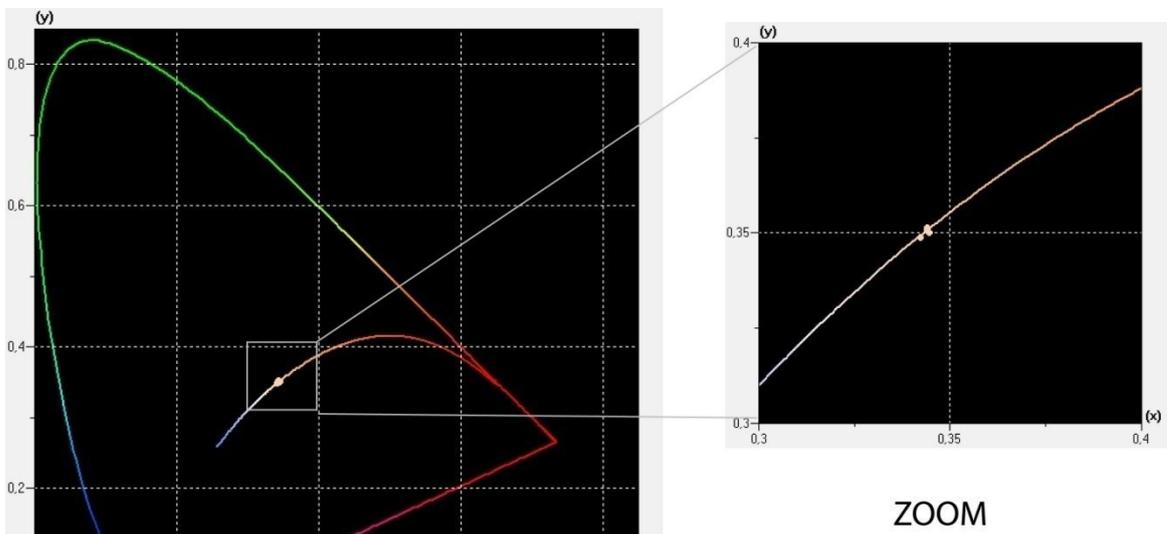


Figura 5.12 Diagramma cromatico che mostra lo spostamento delle coordinate della luce prodotta dalla lampada con il controllo attivo e temperatura di colore impostata di 5000K.

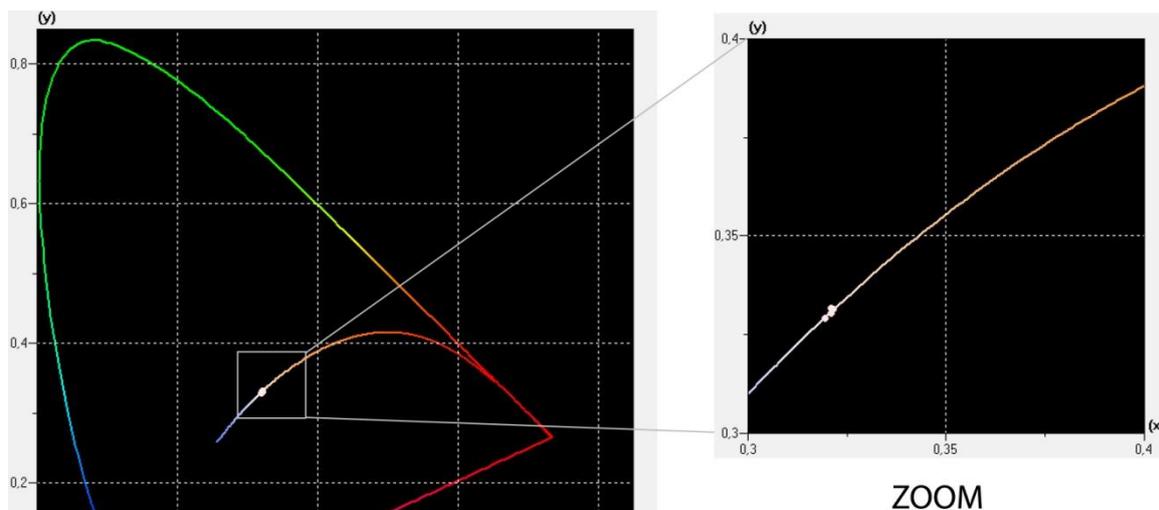


Figura 5.13 Diagramma cromatico che mostra lo spostamento delle coordinate della luce prodotta dalla lampada con il controllo attivo e temperatura di colore impostata di 6000K.

### 5.2.3 FUNZIONAMENTO DEL CONTROLLO A VARIE LUMINOSITÀ

Per verificare che il funzionamento del controllo non sia influenzato dall'intensità luminosa della lampada sono state effettuate misure anche a varie intensità luminose, in particolare al 70% e al 50% della massima intensità luminosa ottenibile alla data temperatura di colore. Come per le altre misure le prove sono state effettuate a 3000K, 4000K, 5000K e 6000K. I risultati ottenuti sono riportati nelle tabelle dalla 5.2 alla 5.5 e nei grafici delle figure dalla 5.14 alla 5.17.

Temperatura di colore impostata = 3000K								
Td	T. ottenuta Senza controllo	Errore relativo	Luminosit à 100%	Errore relativo	Luminosit à 70%	Errore relativ o	Luminosit à 50%	Errore relativ o
30	3078	1,026	3001	1,0003	3007	1,0023	3010	1,0033
40	3261	1,087	3028	1,009	2973	0,991	2984	0,9947
50	3442	1,147	3011	1,004	2979	0,993	2986	0,9953
60	3661	1,220	3010	1,003	3000	1	3001	1,0003
70	3939	1,313	3060	1,02	3059	1,0197	3044	1,0147

Tabella 5.2 Misure di temperatura di colore con controllo attivo a diverse intensità luminose e temperatura impostata di 3000K.

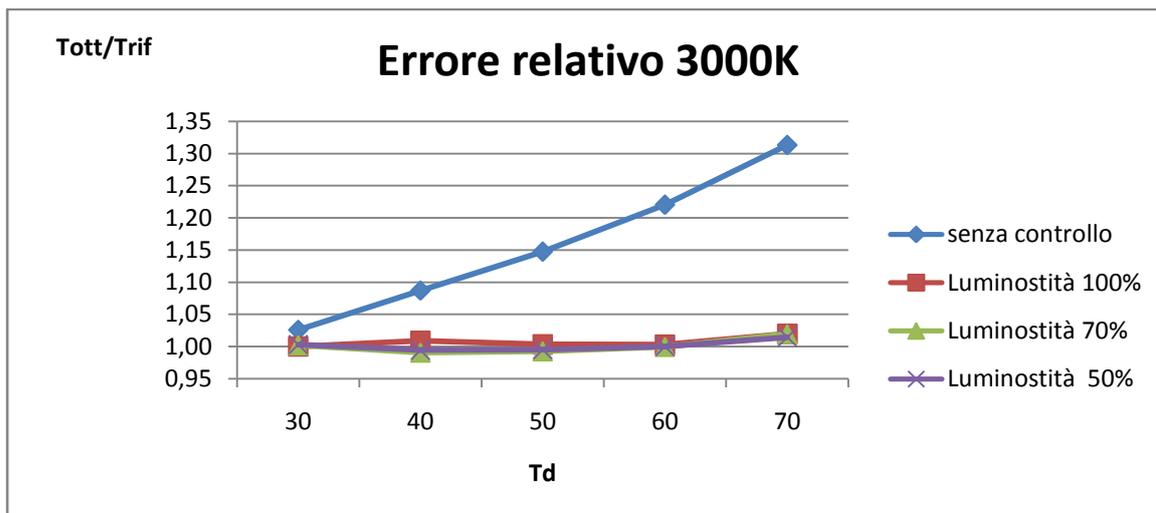


Figura 5.14 Grafico che riporta il confronto degli errori relativi (temperatura di colore ottenuta/temperatura di colore di riferimento) del funzionamento della lampada senza controllo e con controllo attivo, a varie intensità luminose e a diverse temperature del dissipatore (Td) a 3000K di temperatura di colore impostata.

Temperatura di colore impostata = 4000K								
Td	T. ottenuta Senza controllo	Errore relativo	Luminosità 100%	Errore relativo	Luminosità 70%	Errore relativo	Luminosità 50%	Errore Relativo
30	4059	1,0148	3994	0,9985	4001	1,0003	4015	1,0038
40	4239	1,0598	4022	1,0055	3976	0,994	3979	0,9948
50	4447	1,1118	3995	0,9988	3982	0,9955	3982	0,9955
60	4698	1,1745	4000	1	4011	1,0028	4003	1,0008
70	4982	1,2455	4036	1,009	4031	1,0078	4020	1,005

Tabella 5.3 Misure di temperatura di colore con controllo attivo a diverse intensità luminose e temperatura impostata di 4000K.

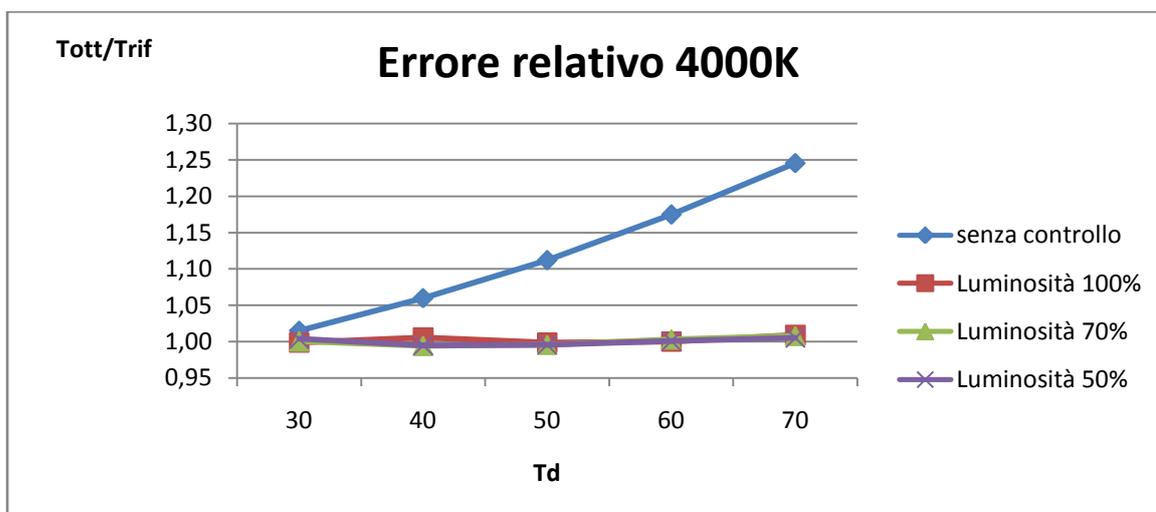


Figura 5.15 Grafico che riporta il confronto degli errori relativi (temperatura di colore ottenuta/temperatura di colore di riferimento) del funzionamento della lampada senza controllo e con controllo attivo, a varie intensità luminose e a diverse temperature del dissipatore (Td) a 4000K di temperatura di colore impostata.

Temperatura di colore impostata = 5000K								
Td	T. ottenuta Senza controllo	Errore relativo	Luminosità 100%	Errore relativo	Luminosità 70%	Errore relativo	Luminosità 50%	Errore relativo
30	5029	1,0058	5030	1,006	5030	1,006	5041	1,0082
40	5208	1,0416	5033	1,0066	4992	0,9984	5005	1,001
50	5435	1,087	5026	1,0052	5001	1,0002	4998	0,9996
60	5615	1,123	5007	1,0014	5030	1,006	5016	1,0032
70	5906	1,1812	5095	1,019	5082	1,0164	5066	1,0132

Tabella 5.4 Misure di temperatura di colore con controllo attivo a diverse intensità luminose e temperatura impostata di 5000K.

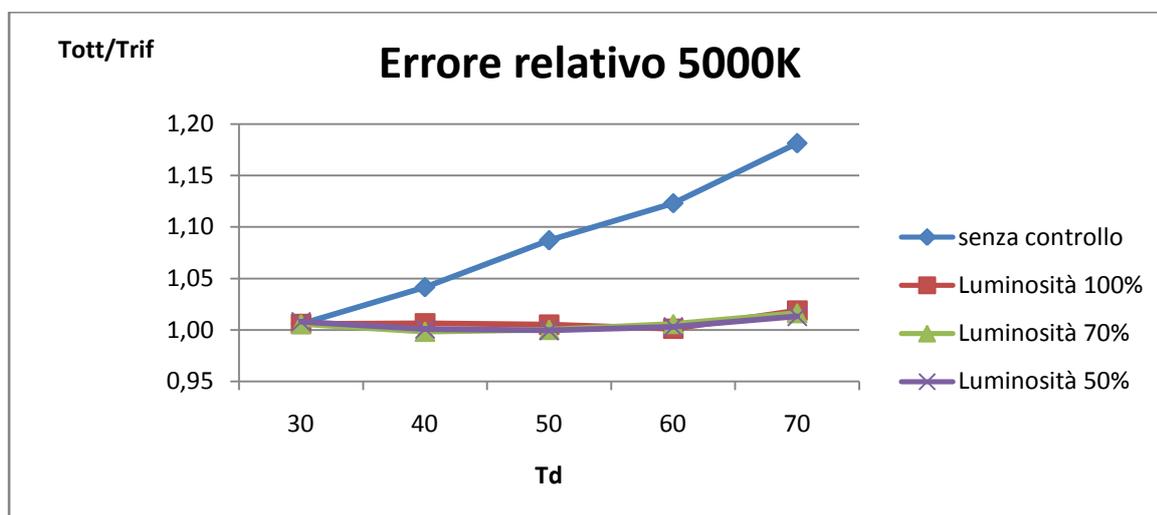


Figura 5.16 Grafico che riporta il confronto degli errori relativi (temperatura di colore ottenuta/temperatura di colore di riferimento) del funzionamento della lampada senza controllo e con controllo attivo, a varie intensità luminose e a diverse temperature del dissipatore (Td) a 5000K di temperatura di colore impostata.

Temperatura di colore impostata = 6000K								
Td	T. ottenuta Senza controllo	Errore relativo	Luminosità 100%	Errore relativo	Luminosità 70%	Errore relativo	Luminosità 50%	Errore relativo
30	5988	0,998	6037	1,0062	6033	1,0055	6046	1,0077
40	6169	1,0282	6042	1,007	6002	1,0003	6006	1,01
50	6365	1,0608	6024	1,004	6002	1,0003	6007	1,0012
60	6544	1,0907	6044	1,0073	6047	1,0078	6014	1,0023
70	6928	1,1547	6129	1,0215	6106	1,0177	6075	1,0125

Tabella 5.5 Misure di temperatura di colore con controllo attivo a diverse intensità luminose e temperatura impostata di 6000K.

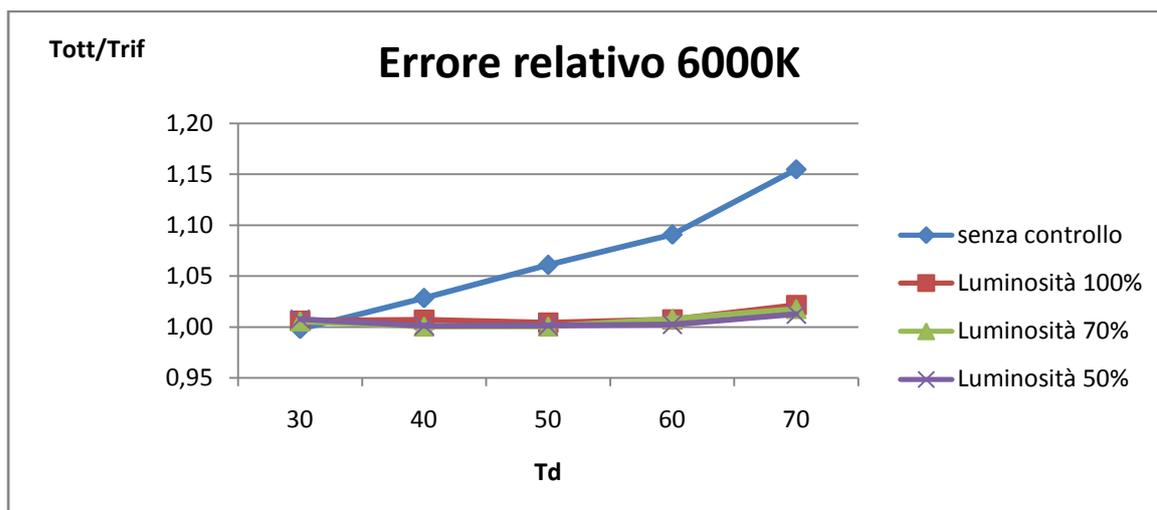


Figura 5.17 Grafico che riporta il confronto degli errori relativi (temperatura di colore ottenuta/temperatura di colore di riferimento) del funzionamento della lampada senza controllo e con controllo attivo, a varie intensità luminose e a diverse temperature del dissipatore (Td) a 6000K di temperatura di colore impostata.

Si nota subito graficamente come l'errore diminuisca drasticamente grazie all'inserimento del controllo e come la differente luminosità, ottenuta moltiplicando i duty cycle calcolati tutti per uno stesso fattore, non influenzi il funzionamento dello stesso.

### 5.3 RESA CROMATICA DELLA LAMPADA

A questo punto del lavoro è stato valutato l'indice di resa cromatica basandosi sulle misure effettuate alle diverse temperature di colore, a 30 °C di temperatura del dissipatore e con il controllo attivo per avere un'idea di massima della qualità della luce prodotta. I risultati sono riportati in Tabella 5.6.

Temperatura di colore	Riferimento corpo nero	Riferimento D65
3001	53	32
3994	73	65
5030	90	68
6037	93	53

Tabella 5.6 Risultati dei calcoli della resa cromatica utilizzando come sorgente di riferimento il corpo nero ed il bianco D65.

Sono riportati i risultati ottenuti utilizzando come riferimento due diverse sorgenti dato che di norma si utilizza il corpo nero per temperature inferiori ai 5000K e una sorgente standard definita dalla CIE per temperature di colore maggiori. Notiamo come a 3000K la lampada oggetto di misura abbia una resa cromatica piuttosto bassa che la classifica nel gruppo 3 definito nel capitolo 2.5. Questo è giustificabile

dal fatto che, a temperature di colore basse, il LED bianco, che è quello con lo spettro più ricco, rimane poco acceso. A 4000K la lampada migliora sensibilmente il suo indice di resa cromatica, grazie ad un contributo maggiore nello spettro dei fosfori del LED bianco, che utilizzando come riferimento il corpo nero, la colloca nel gruppo 2. A 5000K, temperatura di colore a cui si può ancora utilizzare il radiatore di Plank, l'indice raggiunge il valore massimo: 90. In questo caso l'unione dello spettro dei LED bianchi e di quelli verdi e rossi porta ad un risultato di  $R_a$  soddisfacente che la colloca di misura nel gruppo 1A, il primo della lista. A 6000K, dovendo utilizzare come riferimento una tipologia di luce diurna standard (il bianco D65), l'indice di resa cromatica cala drasticamente facendo nuovamente cadere la lampada in oggetto nel penultimo gruppo per quanto riguarda la qualità della luce.

### 5.3.1 SPETTRI MISURATI

Per potersi fare un'idea di quale spettro emette la nostra lampada riportiamo nelle figure 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21 gli spettri ottenuti dalle misure con il controllo attivo a temperatura del dissipatore di 30°C per le quattro temperature di colore che fino ad ora sono state utilizzate per fare le prove.

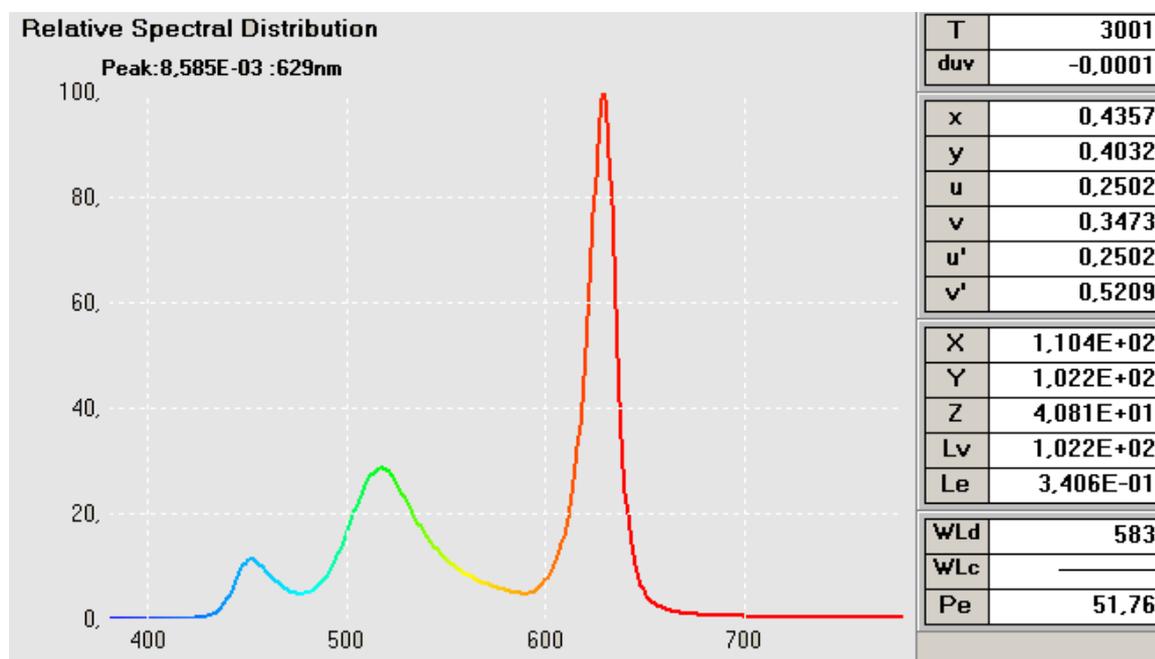


Figura 5.18 Spettro della luce emessa dalla lampada con temperatura di colore impostata di 3000K.

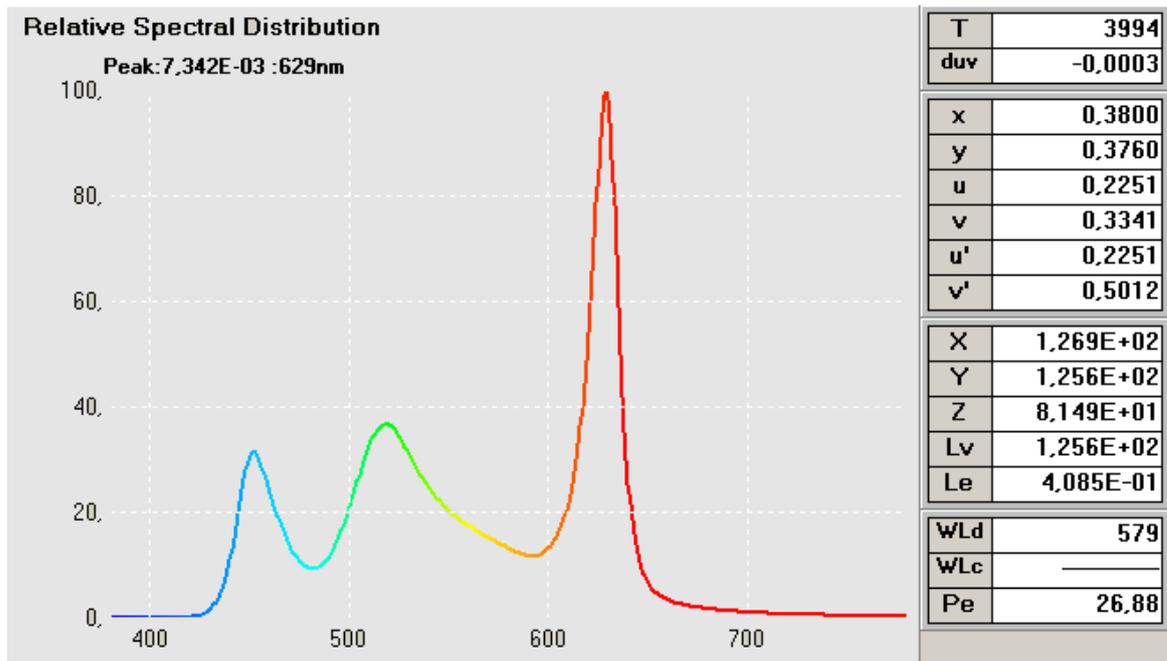


Figura 5.19 Spettro della luce emessa dalla lampada con temperatura di colore impostata di 4000K.

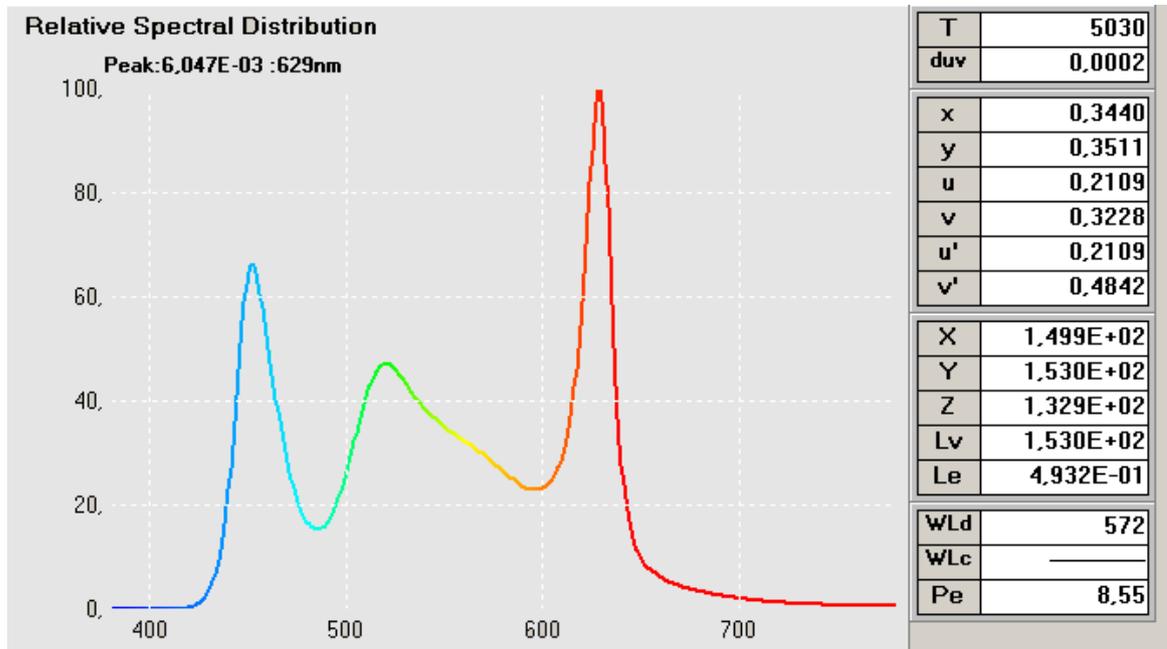


Figura 5.20 Spettro della luce emessa dalla lampada con temperatura di colore impostata di 5000K.

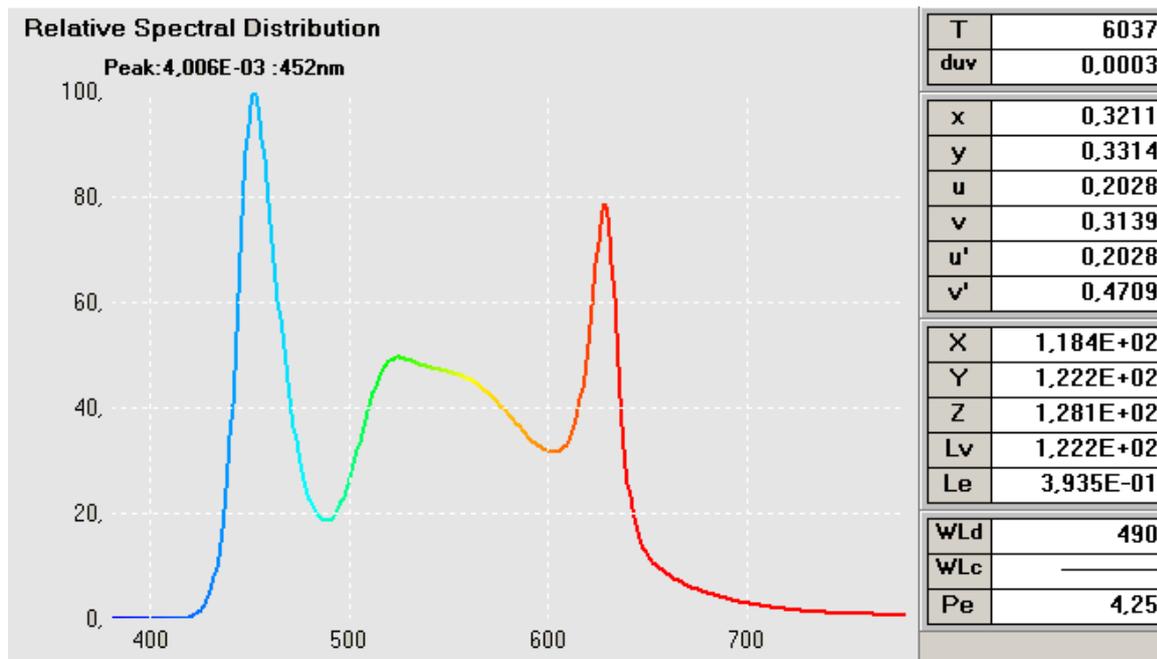


Figura 5.21 Spettro della luce emessa dalla lampada con temperatura di colore impostata di 6000K

In tutte le figure che mostrano gli spettri si notano i picchi corrispondenti alle lunghezze d'onda emesse dai LED rossi e da quelli bianchi i quali hanno la forte componente blu corrispondente alla luce non convertita dai fosfori. I LED verdi, coprendo una zona dello spettro dove si trova anche l'energia emessa dai fosfori, sono generalmente più "amalgamati". Lo spettro presenta pesanti carenze in due punti, intorno ai 490nm e ai 590nm. Queste lunghezze d'onda corrispondono ai colori azzurro/ciano e giallo/arancio. La carenza giallo/arancio potrebbe essere compensata con dei LED ambra, attualmente in commercio con delle specifiche molto simili a quelli rossi, o utilizzando dei LED di colore bianco caldo dove la conversione di energia effettuata dai fosfori è maggiore. La carenza di energia presente intorno ai 490nm invece potrebbe essere colmata con l'aggiunta di LED di colore ciano che normalmente hanno il loro picco di emissione sui 505nm. Con questi ulteriori accorgimenti, di certo non di semplice implementazione, si potrebbero raggiungere indici di resa cromatica migliori.

## CAPITOLO 6

# CONCLUSIONI

La strada intrapresa per realizzare una lampada a stato solido in grado di variare intensità luminosa, temperatura di colore della luce emessa e mantenere un comportamento stabile anche al variare della temperatura di giunzione dei LED si è rivelata efficace. Alla fine di questo lavoro qualche considerazione sui possibili miglioramenti del progetto è d'obbligo.

- I colori dei LED scelti potevano essere diversi. La scelta di utilizzare la combinazione bianco freddo, rosso e verde, è stata sostenuta privilegiando la ricerca di un rendimento maggiore del sistema rispetto alla ricerca della qualità cromatica della luce emessa. La combinazione bianco caldo, blu e verde, porterebbe molto probabilmente a risultati migliori per quanto riguarda lo spettro emesso, e quindi all'indice di resa cromatica, ed eliminerebbe l'utilizzo dei LED rossi che si sono rivelati i più sensibili al surriscaldamento e i meno integrabili in un sistema standard data la loro diversa tensione di alimentazione.
- La scelta di utilizzare dei driver lineari anziché switching si è rivelata troppo stringente per quanto riguarda le tensioni di alimentazione. Data la sempre più massiccia presenza sul mercato di driver LED con topologie switching richiedenti un esiguo numero di componenti esterni, utilizzarli porterebbe una maggior libertà di movimento, se unita ad un corretto sviluppo del layout data l'emissione di armoniche che potrebbero inficiare il funzionamento del microcontrollore e l'acquisizione di dati analogici.
- Dalle misure effettuate si nota come i fosfori, necessari per avere una resa cromatica alta e LED che producono luce bianca, non hanno un buon comportamento quando stressati dall'alta temperatura.
- Per finire prendiamo in considerazione la scelta di utilizzare la caduta di tensione diretta ai capi dei LED per ricavarne la temperatura di giunzione. L'idea ha funzionato bene ma, considerando la necessità di taratura a causa dei dati non sempre precisi nei fogli tecnici e la complessità di realizzazione, una soluzione con un sensore di temperatura collocato sul dissipatore

## CONCLUSIONI

potrebbe svolgere la stessa funzione. In tal caso la stima di temperatura sarebbe fatta considerando la resistenza termica tra dissipatore e giunzione e la potenza elettrica immessa, di cui il microcontrollore è sempre a conoscenza considerando che si conoscono la corrente di pilotaggio e il duty cycle, e che la tensione varia di poco.

## APPENDICE A CODICE PIC

```

/* REVISION HISTORY:
* ~~~~~
* Roberto Monti          6/5/10          Original Release
* ~~~~~
*/

//file di configurazione
#include "p24fj16ga002.h"
#include "uart.h"
#include "PPS.h"
#include "timer.h"
#include "outcompare.h"
#include "stdio.h"
#include "math.h"
#include "adc.h"
#include "stdlib.h"

//definizione etichette d'appoggio
#define U1TX3
#define OC1      18
#define OC2      19
#define OC3      20
#define OC4      21
#define OC5      22

//definizione variabili utilizzate
unsigned char Rxdata[5];          //vettore di 5 caratteri per comunicazione seriale
unsigned int DatoArrivato=0;      //flag dato ricevuto da seriale
unsigned int campioniOK=0;        //flag campioni acquisiti

float X;                          //coordinata x colore desiderato
float Y;                          //coordinata y colore desiderato
float CCT_3;                      //variabile d'appoggio
float CCT_2;                      //variabile d'appoggio
int lum = 9;                      //intensità luminosa totale desiderata da 0 a 100
float temp_col_rx=3000;           //temperatura di colore ricevuta via seriale
                                  //inizializzata a 3000K

```

```

/**coordinate cromatiche x,y dei LED utilizzati**/
float xw = 0.2994;
float yw = 0.2933;
float xr = 0.6952;
float yr = 0.3044;
float xg = 0.1579;
float yg = 0.6783;

const int MAXlumWk=1350; //lumen massimi ottenibili dai LED bianchi Tj 25
                           gradi
const int MAXlumGk=597; //lumen massimi ottenibili dai LED verdi Tj 25
                           gradi typ700
const int MAXlumRk=602; //lumen massimi con 12 rossi a Tj 25 gradi

float MAXlumW=1350; //lumen massimi ottenibili dai LED bianchi
float MAXlumG=597; //lumen massimi ottenibili dai LED verdi
float MAXlumR=602; //lumen massimi ottenibili dai LED rossi

float wlum = 1350; //luminosità bianco
float glum; //luminosità verde
float rlum; //luminosità rosso

float d_w_next=0.5; //duty cycle bianco
float d_g_next=0.5; //duty cycle verde
float d_r_next=0.5; //duty cycle rosso

int ritWHITE=20; //ritardi acquisizione dell'adc
int ritGREEN=20; //dopo che l'uscita pwm
int ritRED=20; //è andata alta, inizializzati a 20

int mt; //variabili di appoggio
int ct; //per la conversione da numero
int dt; //a singoli caratteri per
int ut; //la trasmissione via seriale

int cont=0; //variabili d'appoggio
int cont2=0;
int conts=0;
int campioni=0;
int prev_d_W;
int prev_d_G;
int prev_d_R;

```

```

float vcc=0;
float ratioVCC=      7.851;           //con oscilloscopio
float ratioLEDw_D=  6.864198;        //rapporto per differenziale bianco
float ratioLEDg_D=  6.811159;        //rapporto per differenziale verde
float ratioLEDr_D=  4.621722;        //rapporto per differenziale rosso

float Vwhite =0;
float Vgreen =0;
float Vred = 0;
float Vmicro=3.287;

//variabili per feedback temperatura

float TempRatioW =1;                 //rapporto calo luminosità bianchi
float TempRatioG =1;                 //rapporto calo luminosità verdi
float TempRatioR =1;                 //rapporto calo luminosità rossi

float TempW = 25;                    //temperatura stimata LED bianchi
float TempG = 25;                    //temperatura stimata LED verdi
float TempR = 25;                    //temperatura stimata LED rossi

//Procedura di gestione dell'interrupt dall'ADC
void __attribute__((__interrupt__)) _ADC1Interrupt(void)
{
IFS0bits.AD1IF = 0;                  //resetta la flag di interrupt
}

//Procedura di gestione dell'interrupt dal Timer 3
void __attribute__((__interrupt__, __shadow__)) _T3Interrupt(void)
{
    IFS0bits.T3IF = 0;                //resetta la flag dell'interrupt del TImer3

if (cont==0){                        //se cont è 0 acquisisco tensione bianco
    while (cont2<ritWHITE+4)         //ritardo acquisizione bianco
        cont2++;                      //dinamico per essere sempre al centro
    cont2=0;                          //del periodo di on. (20 per caratt. temp)

//PORTBbits.RB2 = 1;                 //bit di flag per controllare durata e
//                                //posizione lettura ADC
    Vwhite = Vwhite+readADC(10);      //100 campioni e poi media
}
}

```

```

        //PORTBbits.RB2 = 0;

    }
if (cont==1){
verde
    while (cont2<ritGREEN+4)
        cont2++;

    cont2=0;
    //PORTBbits.RB2 = 1;
posizione lettura ADC
    Vgreen = Vgreen+readADC(11);
    //PORTBbits.RB2 = 0;

}
if (cont==2){
    while (cont2<ritRED+4)
        cont2++;

    cont2=0;
    PORTBbits.RB2 = 1;

    Vred = Vred+readADC(12);
    PORTBbits.RB2 = 0;

    cont=-1;
    campioni++;
campioni acquisiti
}
cont++;

if (campioni==100){
    campioniOK=1;
    campioni=0;
}
}

//***** Routine gestione interrupt della seriale *****/
void __attribute__((interrupt, no_auto_psv)) _U1RXInterrupt(void)
{

```

```

static unsigned int j=0;
IFS0bits.U1RXIF=0;           //resetto flag interrupt di UART1
                               RX
while(!DataRdyUART1());     //attendo la fine della ricezione del
                               carattere
Rxdata[j++] = ReadUART1();   //leggo il carattere dal buffer e lo
                               inserisco nel vettore

if(j == 5){                  //tutte le istruzioni saranno di 5
                               caratteri
    j=0;                      //resetto variabile d'appoggio
    DatoArrivato=1;          //setto la flag arrivato dato da
                               seriale
}
}

//***** PROCEDURA DI LETTURA DELL'ADC *****/
int readADC( int ch)         //la procedura richiede il passaggio del
                               numero di canale da leggere
{
    AD1CHSbits.CH0SA= ch;     //seleziono il canale da acquisire
    AD1CON1bits.SAMP = 1;     //inizio il campionamento
    while (!AD1CON1bits.DONE); //attendo che la conversione sia completa
    AD1CON1bits.DONE=0;       //resetto bit di avvenuta conversione
    return ADC1BUF0;          //ritorno il risultato della conversione
}

//Procedura di calcolo dei duty cycle a partire dalla temperatura di colore
desiderata//

void ColorTempReceived(float CCT) { //CCT è la temperatura di colore
    desiderata

//calcolo coordinate x,y corrispondenti alla temperatura di colore ricevuta//
CCT_3 = CCT*CCT*CCT;          //precalcolo CCT^3
CCT_2 = CCT*CCT;              //precalcolo CCT^2

// calcolo delle coordinate x,y della temperatura di colore desiderata
if ((2222 < CCT)&&(CCT < 4001)) { // in questo range uso una formula di
    approssimazione

```

```

// calcolo della x
X = (((-0.2661239e9)/CCT_3) - ((0.234358e6)/CCT_2) +
((0.8776956e3)/CCT) +0.17991);

// calcolo della y
Y = (-0.9549476*X*X*X) - (1.37418593*X*X) + 2.09137015*X -
0.16748867;
}

if ((4000 < CCT)&&(CCT < 7001)) { // altro range diversa formula di
// approssimazione
// calcolo della x
X = (((3.0258469e9)/CCT_3)+((2.1070379e6)/CCT_2)+
((0.2226347e3)/CCT) +0.24039;
// calcolo della y
Y = (3.081758*X*X*X)-(5.8733867*X*X)+3.75112997*X-
0.37001483;
}

// calcolo i rapporti dei tre colori se bianco è max w lum**/
//luminosità bianco è la luminosità massima disponibile attualmente
wlum = MAXlumW;

//calcolo luminosità verde in rapporto al bianco
glum = wlum*(((1-(Y/yw))*((xr-X)/yr))+(((xw-X)/yw)*((Y/yr)-1)))/
(((X-xg)/yg)*((Y/yr)-1))-((1-(Y/yg))*((xr-X)/yr)));

//calcolo luminosità rosso in rapporto al bianco
rlum = (((wlum*(1-(Y/yw)))+(glum*(1-(Y/yg)))))/((Y/yr)-1));

// nel caso non ci siano problemi di saturazione dei colori
if (((glum*lum/10)< MAXlumG)&& ((rlum*lum/10)< MAXlumR)){
d_w_next=(lum*0.1); //calcolo il duty cycle in base alla
//luminosità
OC1RS=d_w_next*0xFFFF; //inserisco il valore nel registro
//OC1RS per cambiare il duty del bianco

d_g_next=(lum*glum*0.1)/MAXlumG; //calcolo il duty cycle del verde in
//base alla luminosità
OC2RS=d_g_next*0xFFFF; //inserisco il valore nel registro
//OC2RS per cambiare il duty

```

```

d_r_next=(lum*rlum*0.1)/MAXlumR; //calcolo il duty cycle del rosso in
//base alla luminosità
OC3RS=d_r_next*0xFFFF; //inserisco il valore nel registro
//OC3RS per cambiare il duty
}
else { //se qualche colore satura
if ((MAXlumR/rlum)>(MAXlumG/glum)){ //satura prima verde
WriteUART1('G'); //segnala saturazione verde
while(BusyUART1());
OC2RS=0xFFFF; //impongo duty-cycle verde a uno
float ratio_G =(MAXlumG/glum); //calcolo rapporto di correzione
//per gli altri colori
d_r_next=((rlum*ratio_G)/MAXlumR); //calcolo il duty cycle rosso
OC3RS=d_r_next*0xFFFF; //registro OC3RS per cambiare il
//duty del rosso

d_w_next=(ratio_G); //next duty = rapp. saturazione
OC1RS=d_w_next*0xFFFF; //OC1RS per cambiare duty
}
else{ //satura prima il rosso
WriteUART1('R'); //segnala saturazione rosso
while(BusyUART1());

OC3RS=0xFFFF; //impongo duty-cycle rosso a uno
float ratio_R = MAXlumR/rlum; //calcolo rapporto di correzione
//per gli altri colori
d_g_next=((glum*ratio_R)/MAXlumG); //calcolo il duty cycle verde
OC2RS=d_g_next*0xFFFF; //OC2RS per cambiare il duty verde
d_w_next=(ratio_R); //next duty cycle =rapp saturazione
OC1RS=d_w_next*0xFFFF; //OC1RS per cambiare duty bianco
}
}
}
}

```

//\*\*\*\*\* programma principale \*\*\*\*\*//

```

int main (void) {
CLKDIVbits.DOZEN =0; //nessuna divisione del clock

//setto pin out
RPOR4bits.RP9R=OC1; //OC1 = PIN18 PWM WHITE
RPOR4bits.RP8R=OC2; //OC2 = PIN17 PWM GREEN

```

```

RPOR3bits.RP7R=OC3;           //OC3 = PIN16 PWM RED
RPOR2bits.RP4R=U1TX;         //U1TX = PIN11

//setto pin in
RPINR18bits.U1RXR = 5;       //PIN 14 = U1RX

//configuro uart1
U1MODEbits.UEN=0;           //modalità U1TX E U1RX
U1MODEbits.PDSEL=0;         //modalità 8 bit no parità
U1MODEbits.UARTEN=1 ;       //abilto la porta seriale UART1
U1STAbits.UTXEN =1;         //abilito trasmissione UART1
U1STAbits.URXISEL=0;        //interrupt ad ogni carattere ricevuto;
U1BRG=416;                  //1200BAUD
IEC0bits.U1RXIE=1;         //abilito interrupt RX
IPC2bits.U1RXIP=4;         //setto la priorità dell'interrupt(MAX è 7)

//configuro ADC
AD1CON1bits.SSRC=0b111;     //autoconversione
AD1CON3bits.SAMC=2;         //auto sample time = 2* $T_{ad}$ 
                             //campionamento rapido
AD1CON3bits.ADCS=2;         // $T_{ad} = 2 * T_{cy}$  min 75ns  $T_{cy} = 62.5ns$ 
AD1PCFG = 0xE1FF;          //setto ingressi analogici da an9 a an12
AD1CON1bits.ADON = 1;      //accendo adc

TRISB = 0b111100000100000; // setto porta B, come uscita 0
while (!(19<vcc)&&(vcc<21)){
vcc = readADC(9);
vcc = vcc+readADC(9);
vcc = vcc/2;
vcc=vcc*ratioVCC*Vmicro/1024;
}

//procedura di controllo tensione di alimentazione//
if ((19<vcc)&&(vcc<21)){
    div_t s;                //variabile per divisioni con resto
    s = div(vcc*100,1000);
    int m=s.quot;
    s=div(s.rem,100);
    int c=s.quot;
    s=div(s.rem,10);
    int d=s.quot;
    int u=s.rem;
}

```

```

vcc=0;

//trasmetto via serale la tensione di alimentazione
WriteUART1('V');
while(BusyUART1());
WriteUART1('C');
while(BusyUART1());
WriteUART1('C');
while(BusyUART1());
WriteUART1('=');
while(BusyUART1());
WriteUART1(m+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(c+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(',');
while(BusyUART1());
WriteUART1(d+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(u+'0');
while(BusyUART1());

//apro timer3
OpenTimer3(T3_ON & T3_GATE_OFF & T3_PS_1_1 & T1_SYNC_EXT_OFF &
T3_SOURCE_INT, 0xFFFF); // (16bit 244Hz cy16MHz)
IEC0bits.T3IE = 1; //abilito interrupt Timer3
IPC2bits.T3IP = 6; //setto priorit  interrupt Timer3

//attivo i tre comparatori Output Compare per generare i segnali PWM
OpenOC1(OC_IDLE_CON & OC_TIMER3_SRC &
OC_PWM_FAULT_PIN_DISABLE, 0x0000, 0x0000);
OpenOC2(OC_IDLE_CON & OC_TIMER3_SRC &
OC_PWM_FAULT_PIN_DISABLE, 0x0000, 0x0000);
OpenOC3(OC_IDLE_CON & OC_TIMER3_SRC &
OC_PWM_FAULT_PIN_DISABLE, 0x0000, 0x0000); //05ff
}

/* else { //altrimenti segnale via seriale.
WriteUART1('w');
while(BusyUART1());
WriteUART1('r');
while(BusyUART1());

```

```

WriteUART1('o');
while(BusyUART1());
WriteUART1('n');
while(BusyUART1());
WriteUART1('g');
while(BusyUART1());
WriteUART1(' ');
while(BusyUART1());
WriteUART1('V');
while(BusyUART1());
WriteUART1('c');
while(BusyUART1());
WriteUART1('c');
while(BusyUART1());
WriteUART1(' ');
while(BusyUART1());

while(!(19<vcc<21)){ //finché la tensione non è corretta
    vcc = 0; //resetto variabile tensione
    vcc = readADC(9); //acquisisco tensione
    vcc = vcc+readADC(9); //per due volte
    vcc = vcc/2; //faccio la media.
    vcc=vcc*ratioVCC*Vmicro/1024; //calcolo valore reale di tensione
}

//procedura per estrapolare le cifre che compongono la tensione di alimentazione.
div_t s;
s = div(vcc*100,1000);
int m=s.quot;
s=div(s.rem,100);
int c=s.quot;
s=div(s.rem,10);
int d=s.quot;
int u=s.rem;
vcc=0;

//procedura che manda via seriale la tesion di alimentazione rilevata
WriteUART1('V');
while(BusyUART1());
WriteUART1('C');
while(BusyUART1());
WriteUART1('C');

```

```

        while(BusyUART1());
        WriteUART1('=');
        while(BusyUART1());
        WriteUART1(m+'0');
        while(BusyUART1());
        WriteUART1(c+'0');
        while(BusyUART1());
        WriteUART1(',');
        while(BusyUART1());
        WriteUART1(d+'0');
        while(BusyUART1());
        WriteUART1(u+'0');
        while(BusyUART1());
    }
*/

ColorTempReceived(3000);
PORTBbits.RB6 = 1;

while(1){ //ciclo infinito

    if (DatoArrivato==1){ //se è arrivato un dato
        DatoArrivato=0; //clear flag
        U1STAbits.OERR=0; //resetta eventuali flag errore
        U1STAbits.FERR=0; //resetta eventuali flag errore
        while(BusyUART1());
        if (Rxdata[0]=='t'){ //se il primo carattere è t è arrivata
            //una temperatura di colore
            mt = (Rxdata[1]-'0')*1000; //migliaia
            ct = (Rxdata[2]-'0')*100; //centinaia
            dt = (Rxdata[3]-'0')*10; //decine
            ut = (Rxdata[4]-'0'); //unità
            temp_col_rx = mt+ct+dt+ut; //ricostruisco dato ricevuto
            ColorTempReceived(temp_col_rx); //richiama procedura di calcolo dei
            // duty cycle
        }

        // Dopo aver calcolato i nuovi duty cycle //
        // calcolo i nuovi ritardi per acquisizione ADC //
    }
}

```

```

ritWHITE = OC1RS /18;    //18 valore estrapolato empiricamente (9 cicli per 1 in
                        while) calcola ritardo LED bianchi
    ritGREEN = OC2RS /18;    //calcolo ritardo LED verdi
    ritRED = OC3RS /18;    //calcolo ritardo LED rossi
    Vwhite=0;                //RESET
    Vgreen=0;
    Vred=0;
    cont=0;
    cont2=0;
    campioni=0;

}

//se i primi tre caratteri sono "lum" arrivato comando di intensità
    if (Rxdata[0]=='l' && Rxdata[1]=='u' &&Rxdata[2]=='m' ){
        int dl = (Rxdata[3]-'0')*10;    //decine
        int ul = (Rxdata[4]-'0');    //unità
        lum = (dl+ul)/10;    //ricavo valore inviato
        if (0<=lum<=10){    //se il dato è sensato
//richiamo procedura di calcolo dei duty cycle//
            ColorTempReceived(temp_col_rx);

// Dopo aver calcolato i nuovi duty cycle //
// calcolo i nuovi ritardi per acquisizione ADC //
//18 valore estrapolato empiricamente (9cicli per 1 in while)
            ritWHITE = OC1RS /18;
            ritGREEN = OC2RS /18;
            ritRED = OC3RS /18;

//resetto tutte le variabili d'appoggio.
            Vwhite=0;
            Vgreen=0;
            Vred=0;
            cont=0;
            cont2=0;
            campioni=0;
        }

        else{    //se il dato di luminosità non è sensato
            lum=0;    //spengo
            ColorTempReceived(temp_col_rx);
            Vwhite=0;    //RESET
            Vgreen=0;

```

```

        Vred=0;
        cont=0;
        cont2=0;
        campioni=0;
    }
}
//se arriva comando "allon" accendo tutti i LED
    if (Rxdata[0]=='a' && Rxdata[1]=='l' && Rxdata[2]=='l' &&
        Rxdata[3]=='o' && Rxdata[4]=='n')
        PORTBbits.RB6=1;

//se arriva comando "halon" accedo solo metà led
    if (Rxdata[0]=='h' && Rxdata[1]=='a' && Rxdata[2]=='l' &&
        Rxdata[3]=='o' && Rxdata[4]=='n')
        PORTBbits.RB6=0;

//se arriva comando white accendo tutti i bianchi
    if (Rxdata[0]=='w' && Rxdata[1]=='h' && Rxdata[2]=='i' &&
        Rxdata[3]=='t' && Rxdata[4]=='e'){
        OC1RS=0xffff;
        OC2RS=0x0000;
        OC3RS=0x0000;
    }

//se arriva comando green accendo tutti i verdi
    if (Rxdata[0]=='g' && Rxdata[1]=='r' && Rxdata[2]=='e' &&
        Rxdata[3]=='e' && Rxdata[4]=='n'){
        OC1RS=0x0000;
        OC2RS=0xffff;
        OC3RS=0x0000;
    }

//se arriva comando red** accendo tutti i rossi
    if (Rxdata[0]=='r' && Rxdata[1]=='e' && Rxdata[2]=='d' ){
        OC1RS=0x0000;
        OC2RS=0x0000;
        OC3RS=0xffff;
    }

}
if (campioniOK==1){
    campioniOK=0;
    //arrivati campioni richiesti
    //resetto flag campioni arrivati
}

```

```

Vwhite=    Vwhite/100;        // media bianchi
Vgreen=    Vgreen/100;       // media verdi
Vred=      Vred/100;         // media rossi
vcc=       vcc/300;          // media vcc
vcc=vcc*ratioVCC*Vmicro/1024; //ricavo valore in volt

//calcolo tensione media ai capi dei LED.
Vred=((Vred*ratioLEDr_D*Vmicro/1024))/6;
Vwhite=(Vwhite*ratioLEDw_D*Vmicro/1024)/5;
Vgreen=(Vgreen*ratioLEDg_D*Vmicro/1024)/5;

//procedura per dividere un numero nelle sue cifre distinte
div_t z;                                //variabile per divisioni con resto
z = div(vcc*100,1000);
int m2=z.quot;
z=div(z.rem,100);
int c2=z.quot;
z=div(z.rem,10);
int d2=z.quot;
int u2=z.rem;

vcc=0;                                  //resetto variabile vcc

//procedura per inviare la tensione via seriale
/*
WriteUART1(' ');
while(BusyUART1());
WriteUART1('C');
while(BusyUART1());
WriteUART1('=');
while(BusyUART1());
WriteUART1(m2+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(c2+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(',');
while(BusyUART1());
WriteUART1(d2+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(u2+'0');
while(BusyUART1());
*/

```

```

//ricavo le cifre della tensione media che cade ai capi di un led bianco
    z = div(Vwhite*1000,1000);
    int mw=z.quot;
    z=div(z.rem,100);
    int cw=z.quot;
    z=div(z.rem,10);
    int dw=z.quot;
    int uw=z.rem;

//ricavo le cifre della tensione media che cade ai capi di un led rosso
    z = div(Vred*1000,1000);
    int mr=z.quot;
    z=div(z.rem,100);
    int cr=z.quot;
    z=div(z.rem,10);
    int dr=z.quot;
    int ur=z.rem;

//ricavo le cifre della tensione media che cade ai capi di un led verde
    z = div(Vgreen*1000,1000);
    int mG=z.quot;
    z=div(z.rem,100);
    int cG=z.quot;
    z=div(z.rem,10);
    int dG=z.quot;
    int uG=z.rem;

//gestione feedback temperatura
//ricavo temperatura di giunzione dei tre colori
//    TempW = (3.63-Vwhite)/0.005333333;           //versione iniziale
//    TempW = (3.65-Vwhite)/0.0049;             // versione ritoccata
//    TempG = (3.4807143-Vgreen)/0.00507143;    //versione iniziale
//    TempG = (3.48-Vgreen)/0.0049;             //versione ritoccata
//    TempR = (2.149-Vred) /0.00173333;         //versione iniziale
//    TempR = (2.153-Vred) /0.00173333;         //versione ritoccata

//resetto le variabili delle tensoni dei led prima di ricominciare il campionamento
Vwhite=0;
Vgreen=0;

```

```

Vred=0;

//calcolo il calo percentuale dell'intenstà luminosa in base alla temperatura
// TempRatioW= 1.05 - (0.002*TempW); //ricavata datasheet
TempRatioW= 1.1016 - (0.004064615*TempW); //ricavata da misure

// TempRatioG=1.022222-(0.0008889*TempG); //ricavata datasheet
TempRatioG=1.025-(0.00101603*TempG); //ricavata misure

// TempRatioR=1.14-(0.0056*TempR); //ricavata datasheet
TempRatioR=1.2176-(0.0087037*TempR); //ricavata misure

//correggo i lumen massimi a disposizione per ogni colore in base alla temperatura.
MAXlumW = MAXlumWk*TempRatioW;
MAXlumG = MAXlumGk*TempRatioG;
MAXlumR = MAXlumRk*TempRatioR;

//compensazione sbandamento delle coordinate del bianco
if (TempW<74,7){
    xw = 0.309329 - TempW*0.0002118959;
    yw = 0.297442 - TempW*0.0000929368;
}
else{
    xw = 0.329487 - TempW*0.0004817518;
    yw = 0.323215 - TempW*0.0004379562;
}

    xg = 0.154341 + TempG*0.0000704545;
    yg = 0.681304 - TempG*0.0000739130;
    xr = 0.688311 + TempR*0.0001911111;
    yr = 0.316444 - TempR*0.0001955555;

//richiamo la procedura di calcolo che aggiusterà i valori
ColorTempReceived(temp_col_rx);

// Dopo aver calcolato i nuovi duty cycle //
// calcolo i nuovi ritardi per acquisizione ADC //
//18: valore estrapolato empiricamente (9cicli per 1 in while)
ritWHITE = OC1RS /18;
ritGREEN = OC2RS /18;
ritRED = OC3RS /18;

```

```

//resetto variabili ausiliarie
    Vwhite=0;
    Vgreen=0;
    Vred=0;
    cont=0;
    cont2=0;
    campioni=0;

//ricavo le cifre della temperatura dei led bianchi.
    z = div(TempW*100,1000);
    int mTW=z.quot;
    z=div(z.rem,100);
    int cTW=z.quot;
    z=div(z.rem,10);
    int dTW=z.quot;
    int uTW=z.rem;

//ricavo le cifre della temperatura dei led verdi.
    z = div(TempG*100,1000);
    int mTG=z.quot;
    z=div(z.rem,100);
    int cTG=z.quot;
    z=div(z.rem,10);
    int dTG=z.quot;
    int uTG=z.rem;

//procedura per trasmettere via seriale la temperatura di giunzione dei LED bianchi.
    WriteUART1(' ');
    while(BusyUART1());
    WriteUART1('T');
    while(BusyUART1());
    WriteUART1('W');
    while(BusyUART1());
    WriteUART1('=');
    while(BusyUART1());
    WriteUART1(mTW+'0');
    while(BusyUART1());
    WriteUART1(cTW+'0');
    while(BusyUART1());
    WriteUART1(',');
    while(BusyUART1());
    WriteUART1(dTW+'0');

```

```
while(BusyUART1());  
WriteUART1(uTW+'0');  
while(BusyUART1());
```

//procedura per trasmettere via seriale la temperatura di giunzione dei LED verdi.

```
WriteUART1(' ');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('T');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('G');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('=');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(mTG+'0');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(cTG+'0');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(',');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(dTG+'0');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(uTG+'0');  
while(BusyUART1());
```

//ricavo le cifre della temperatura dei led rossi.

```
z = div(TempR*100,1000);  
int mTR=z.quot;  
z=div(z.rem,100);  
int cTR=z.quot;  
z=div(z.rem,10);  
int dTR=z.quot;  
int uTR=z.rem;
```

//procedura per trasmettere via seriale la temperatura di giunzione dei LED rossi.

```
WriteUART1(' ');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('T');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('R');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('=');  
while(BusyUART1());
```

```

WriteUART1(mTR+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(cTR+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(',');
while(BusyUART1());
WriteUART1(dTR+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(uTR+'0');
while(BusyUART1());

```

//procedura per trasmettere via seriale la tensione media su un LED bianco.

```

/*
WriteUART1(' ');
while(BusyUART1());
WriteUART1('V');
while(BusyUART1());
WriteUART1('w');
while(BusyUART1());
WriteUART1('=');
while(BusyUART1());
WriteUART1(mw+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(',');
while(BusyUART1());
WriteUART1(cw+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(dw+'0');
while(BusyUART1());
WriteUART1(uw+'0');
while(BusyUART1());

```

//procedura per trasmettere via seriale la tensione media su un LED verde.

```

WriteUART1(' ');
while(BusyUART1());
WriteUART1('V');
while(BusyUART1());
WriteUART1('G');
while(BusyUART1());
WriteUART1('=');
while(BusyUART1());
WriteUART1(mG+'0');

```

```
while(BusyUART1());  
WriteUART1(',');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(cG+'0');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(dG+'0');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(uG+'0');  
while(BusyUART1());
```

//procedura per trasmettere via seriale la tensione media su un LED rosso.

```
WriteUART1(' ');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('V');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('R');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1('=');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(mr+'0');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(',');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(cr+'0');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(dr+'0');  
while(BusyUART1());  
WriteUART1(ur+'0');  
while(BusyUART1()); */  
  
}  
  
}  
}
```

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Wai-Keung Lun, K. H. Loo, Siew-Chong Tan, Y. M. Lai, and Chi K. Tse: **“Bilevel Current Driving Technique for LEDs”** IEEE December 2009.
- [2] Subramanian Muthu, Frank J. P. Schuurmans, and Michael. D. Pashley: **“Red, Green, and Blue LEDs for White Light Illumination”** IEEE JOURNAL ON SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 8, NO. 2, MARCH/APRIL 2002.
- [3] Yong N. Chang, Chung C. Hung, Shih C. Tung and Sun-Yu Chan **“Auto Mixed Light for RGB LED Backlight Module”** IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009) Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009.
- [4] Pietro Palladino **“Lezioni di illuminotecnica”**
- [5] Xiaohui Qu, Siu Chung Wong and Chi K. Tse: **“Color Control System for RGB LED Light Sources Using Junction Temperature Measurement”** The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) Nov. 5-8, 2007, Taipei, Taiwan.
- [6] Fu-Cheng Wang, Member, IEEE, Chun-Wen Tang, and Bin-Juine Huang **“Multivariable Robust Control for a Red-Green-Blue LED Lighting System”** IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 25, NO. 2, FEBRUARY 2010.
- [7] Hoon Kim, Jia Liu, Ho-Sang Jin and Hee-Jun Kim **“An LED Color Control System with Independently Changeable Illuminance”**.
- [8] Xiaohui Qu, Siu-Chung Wong, Senior Member, IEEE, and Chi K. Tse, Fellow, IEEE **“Temperature Measurement Technique for Stabilizing the Light Output of RGB LED Lamps”** IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 59, NO. 3, MARCH 2010.
- [9] Keppens, W. R. Ryckaert, G. Deconinck and P. Hanselaer **“High power light-emitting diode junction temperature determination from current-voltage characteristics”** JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 104, 2008.