

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Scuola di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

TESI DI LAUREA

**Illuminazione led per coltivazioni idroponiche
in assenza di luce solare diretta**

Candidato:
Alessandro Franceschin
Matricola 1005411

Relatore:
Prof. Paolo Tenti

Indice

1	Introduzione	4
2	Coltivazione idroponica	5
2.1	Ruolo dell'illuminazione	8
3	Determinazione delle specifiche di progetto	9
3.1	Definizioni	9
3.2	Schema di Principio	11
3.3	Realizzazione dei componenti	13
3.3.1	Lampada	13
3.3.2	Convertitore cc-cc	17
4	Simulazione del Circuito a Catena Aperta	20
5	Schema completo	22
5.1	Rete di retroazione	23
5.1.1	Filtro passa basso	23
5.1.2	Modulatore PWM	26
5.1.3	Regolatore	27
6	Simulazione del Circuito Completo	30
6.1	Conclusioni	33

1 Introduzione

Una delle principali forme di approvvigionamento da sempre utilizzate dall'uomo per soddisfare il proprio fabbisogno è l'agricoltura. Questa, con lo sviluppo della tecnologia, si è evoluta per far fronte a sempre nuove necessità, consentendo di aumentare la produzione e la qualità anche sfruttando ambienti poco adatti.

Tra i vari tipi di coltivazione, sicuramente una delle più interessanti è l'idrocultura anche detta coltivazione idroponica, la quale consiste nel sostituire il terreno con materiali inerti e fornire i nutrimenti necessari in forma liquida. Non essendo necessaria la terra, viene spesso praticata in serre e in ambienti chiusi dove c'è scarso flusso luminoso e per sopperire a tale mancanza si fa uso di illuminazione artificiale.

Nell'ottica di voler rendere questa coltivazione economicamente vantaggiosa è importante la scelta del tipo di illuminazione.

Lo scopo di questo lavoro è quello di dimensionare e simulare lo stadio di conversione di tensione di un alimentatore per lampada a led.

2 Coltivazione idroponica

La coltivazione idroponica, conosciuta talvolta anche come “idrocoltura”, è una particolare metodologia di coltivazione che consiste nel far crescere le piante in assenza di suolo e utilizzando al suo posto una soluzione di acqua e nutrienti. Questi nutrienti, per la maggior parte inorganici, sono gli elementi che la pianta estrae dal terreno come ad esempio composti azotati, fosforo, potassio e microelementi.

Talvolta le radici delle piante non sono libere nell’acqua ma affondano in un substrato inerte, costituito ad esempio da lana di roccia, sabbia, pomice, ghiaia, fibra di cocco, argille (zeolite, vermiculite o perlite) o argilla espansa.

Le colture idroponiche sono un’ invenzione piuttosto recente, dal momento che solo nel diciottesimo secolo si scoprì che le piante assorbono i nutrienti necessari per il loro sviluppo sotto forma di ioni inorganici disciolti nell’acqua.

Il terreno in sè, infatti, svolge esclusivamente la funzione di riserva di nutrienti minerali e supporto fisico, e non è indispensabile per le piante se queste due funzioni vengono svolte da altri substrati di crescita. Praticamente tutte le piante terrestri possono essere fatte crescere con l’idrocoltura, seppur con i dovuti accorgimenti. La coltivazione idroponica presenta numerosi aspetti positivi e per questo è utilizzata a livello globale soprattutto per la produzione di cibo, ma anche per diverse colture ornamentali.



Essa costituisce a tutti gli effetti una branca riconosciuta dell’agronomia. I vantaggi dell’idrocoltura sono principalmente:

- non è necessario l'utilizzo di terreno, perciò la coltivazione idroponica può essere attuata anche in zone sfavorevoli dal punto di vista climatico;



- la somministrazione di nutrienti avviene in maniera controllata, perciò non si verificano gli sprechi legati allo spandimento di fertilizzanti sul suolo, dove alcuni possono essere dilavati dalle piogge o resi non disponibili da reazioni chimiche. Questo si traduce anche nell'assenza di inquinamento per l'ambiente e per le falde. Analogamente, non si verificano le carenze talvolta associate alle colture in terra, dove alcuni nutrienti possono essere presenti in quantità limitate;
- poiché l'acqua può essere riutilizzata all'interno del sistema, è minore il fabbisogno idrico per le colture. In alcuni casi si arriva anche a risparmiare il 70-80 % di acqua. Questo permette di coltivare anche in zone particolarmente aride e di economizzare sui costi per l'irrigazione;
- sono minori gli attacchi da parte di parassiti, virus e patogeni che normalmente vivono nel terreno; in caso di malattia, è più semplice intervenire con i trattamenti fitosanitari;
- la presenza di erbe infestanti è tendente allo zero e questo evita l'utilizzo di diserbanti;

- le rese sono elevate e stabili e possono essere da 2 a 8 volte maggiori rispetto alla crescita in terra;
- la coltivazione può essere condotta tutto l'anno perché in condizioni controllate, quindi si libera dalle esigenze stagionali delle specie.

Fra gli svantaggi della coltivazione idroponica possiamo innanzitutto citare la fragilità del sistema. Poiché le piante non affondano le loro radici nel terreno, ma dipendono completamente dal sostentamento artificiale, qualsiasi problema tecnico al sistema può portare ad una rapida morte delle colture. L'elevato livello di umidità associato alle idrocolture, inoltre, favorisce lo sviluppo di malattie fungine come ad esempio la verticilliosi.

Tracciando un sommario bilancio, comunque, la coltivazione idroponica presenta più vantaggi che svantaggi, soprattutto se paragonata a quella in terra. Un limite di questo metodo è tuttavia rappresentato dall'estensione, che non potrà mai essere eccessiva a causa degli evidenti limiti strutturali del sistema [1]. Ma per tal motivo però sono state sviluppate diverse soluzioni; un esempio è in figura sotto, dove le piante sono state fissate internamente a un supporto cilindrico rotante mediante il quale possono attingere l'acqua posta nella bacinella sottostante.



2.1 Ruolo dell'illuminazione

Le piante si sviluppano grazie a un processo fotochimico chiamato fotosintesi clorofilliana; in questo processo, per mezzo di energia luminosa, l'anidride carbonica (CO_2) viene trasformata in materiale organico (carbonio, proteine, zucchero). Una sorgente luminosa può essere considerata una fonte che rilascia particelle di energia. Queste particelle prendono il nome di *fotoni* o *quanti luminosi*. Questa energia viene assorbita attraverso speciali proteine contenenti molecole di clorofilla che risiedono nelle membrane delle cellule fotosintetiche chiamate cloroplasti [2].

Non tutta la luce però viene assorbita dalla clorofilla, ma solo una porzione dello spettro, principalmente rosso e blu, l'assorbimento della parte verde invece è nullo; per tale motivo qualunque cosa contenga la clorofilla (foglie, erba) ci appare verde, dato che questa lunghezza d'onda viene riflessa piuttosto che assorbita.

Infatti, la clorofilla è così efficiente ad assorbire la luce al di fuori della parte verde dello spettro che questi colori compaiono solo quando la clorofilla si degrada, questo è il motivo per cui in autunno le foglie si colorano di rosso, marrone e giallo, che sono presenti nelle foglie ma sono nascoste dalla clorofilla.

Esistono due tipi di clorofilla, chiamati *clorofilla a* e *clorofilla b*. Questi differiscono significativamente per composizione chimica e per luce assorbita [3].

Come si può vedere in figura 1, il tipo *a* ha due picchi di assorbimento nello spettro, uno in corrispondenza del viola e l'altro in corrispondenza del rosso. Mentre la clorofilla di tipo *b* ha un picco in corrispondenza della luce blu e uno in quella rosso-arancione.

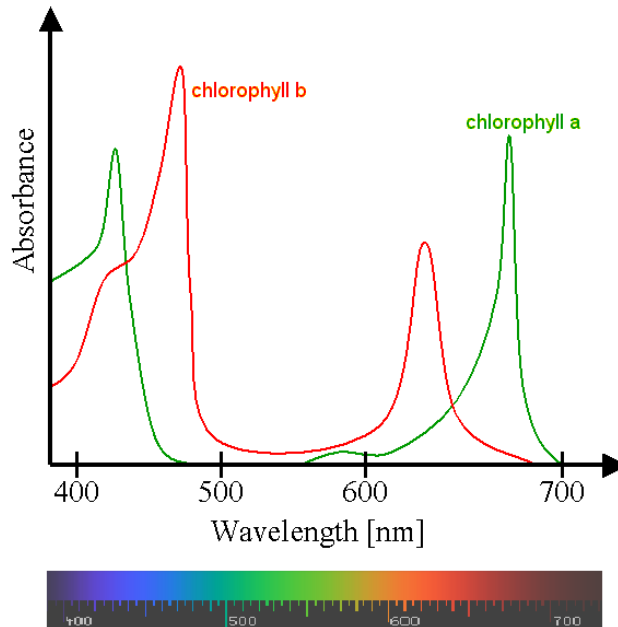


Figura 1: Spettro di assorbimento della *clorofilla a* e *clorofilla b*

3 Determinazione delle specifiche di progetto

Lo scopo di questo lavoro è quello di dimensionare un convertitore cc-cc in grado alimentare un sistema di illuminazione efficiente volto a ridurre i consumi energetici e a massimizzare lo sviluppo delle piante.

Prima di iniziare la progettazione è bene fornire alcune definizioni utili per quantificare le grandezze in gioco.

3.1 Definizioni

- Photosynthetically Active Radiation (PAR):** indica la banda spettrale di luce che va 400 a 700 nanometri che gli organismi vegetali sono in grado di utilizzare nel processo di fotosintesi. Il contenuto energetico di un fotone è funzione della sua lunghezza d'onda. Fotoni a lunghezze d'onda minori trasportano così tanta energia da danneggiare cellule e tessuti e in genere vengono filtrati dallo strato di ozono dell'atmosfera; invece a lunghezze d'onda superiori questi non portano sufficiente ener-

gia da permettere la fotosintesi. Questa regione spettrale corrisponde all'incirca alla regione di luce visibile dall'occhio umano che si estende indicativamente tra i $380nm$ e i $760nm$, ciò che cambia è la diversa sensibilità alle componenti dello spettro; l'occhio umano non è egualmente sensibile ad ogni componente cromatica della luce. La massima sensibilità si colloca a circa $555nm$ (luce gialla-verde) e cala in presenza di lunghezze d'onda più lunghe (rosso) o più corte (blu). Al contrario per le piante sia ha un picco massimo di sensibilità in corrispondenza della luce blu e rossa e un minimo per il verde.

- **Photosynthetic Photon Flux (PPF)**: rappresentano il numero totale di fotoni al secondo emessi da una sorgente luminosa nella banda delle lunghezze d'onda del PAR misurati in $\mu\text{moli}/s$. E' usato al posto del flusso luminoso (misurato in lumen) in quanto è basato sulla reazione sensibile delle piante.
- **Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD)**: rappresentano il numero totale di fotoni nello spettro del PAR che cadono su una superficie di un metro quadro per ogni secondo. Si misura in $\mu\text{moli s}^{-1} m^{-2}$ e vengono utilizzati al posto dei lux in applicazioni agricole.
- **PPF/Watt** : misura l'efficienza di una lampada, è espresso in $\mu\text{moli}/\text{Joule}$. Questa unità di misura rappresenta il numero totale di fotoni nello spettro delle lunghezze d'onda del PAR generati da un Joule di energia elettrica [4].

3.2 Schema di Principio

La figura 2 mostra lo schema concettuale dell'impianto di illuminazione.



Figura 2

In esso sono presenti:

- **Sorgente di Tensione**

Come sorgente di tensione si considera la rete elettrica nazionale. Per semplicità di progetto si ipotizza di porsi a valle di un raddrizzatore di tensione, la cui uscita è una tensione continua di $325V$ con uno scarto percentuale di $\pm 5\%$. Pertanto nel dimensionamento dei componenti del convertitore si suporrà di disporre di una tensione continua compresa tra 308 e 341 Volt.

- **Alimentatore**

Lo scopo dell'alimentatore è quello di fornire alla sorgente luminosa la potenza necessaria al fine di illuminare le piante. Questa potenza viene assorbita dal generatore di tensione e regolata tenendo conto sia delle specifiche elettriche della sorgente luminosa sia delle necessità della pianta.

- **Sorgente Luminosa**

Trasforma l'energia elettrica proveniente dall'alimentatore in energia luminosa utile alle piante. Essa verrà posta all'altezza di un metro dal piano su cui saranno situate le piante e illuminerà un'area di un metro quadro. A causa del fatto che piante diverse necessitano di una quantità ottimale di ppf diversa, la lampada sarà progettata affinché rilasci una quantità variabile di fotoni compresa tra 200 e 650 $\mu\text{mol}/\text{s}$. Si supporrà che le pareti laterali siano riflettenti: questo permette, a parità di luce emessa, di massimizzarne la concentrazione sul piano.

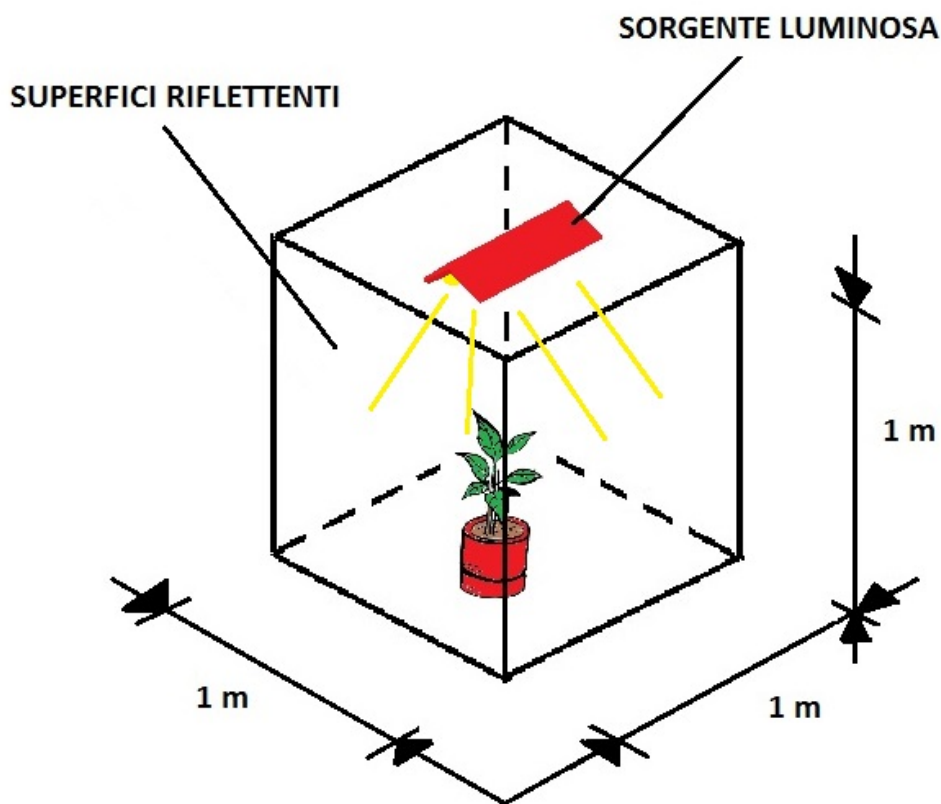


Figura 3

3.3 Realizzazione dei componenti

3.3.1 Lampada

Le caratteristiche che si richiedono a una sorgente luminosa per essere adatte allo scopo di questo lavoro sono:

- Alto rendimento in termini di quantità luce emessa per potenza assorbita: significa un alto numero di fotoni diretti alla pianta e di conseguenza più energia utile per la fotosintesi;
- Emissione di luce concentrata nelle bande che vanno da 450 a 475nm (luce blu) e da 620 a 750nm (luce rossa). Questo permette di ridurre gli sprechi di energia, infatti in questo modo viene emessa solo luce effettivamente utile al sostentamento della pianta.

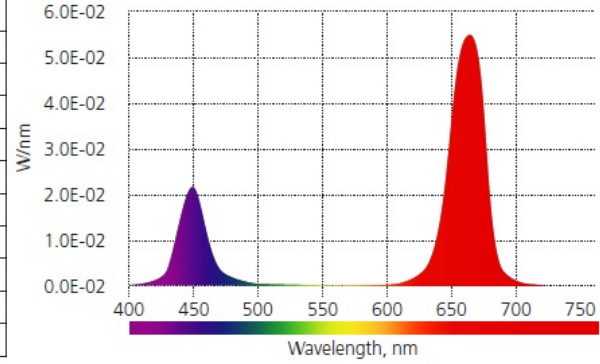
Largamente utilizzate in questo settore sono le lampade a scarica ai vapori di sodio. Tali lampade hanno la caratteristica di emettere una luce tendente al giallo, hanno un elevato rendimento luminoso ed una elevata durata di vita. In alternativa si utilizzano lampade a fluorescenza, simili a quelle ad alta pressione ma con un rendimento luminoso leggermente minore. Una alternativa che sta prendendo piede è l'utilizzo di lampade a led. Questa soluzione presenta diversi vantaggi. In primo luogo è possibile trovare in commercio led in grado di emettere luce alle sole lunghezze d'onda di interesse e in secondo luogo la bassa dispersione di potenza. Il minor calore emesso favorisce lo stabilizzarsi di un clima adatto allo sviluppo della piante consentendo il funzionamento della lampada anche senza sistemi di raffreddamento.

Modellizzazione lampada

La ricerca di componenti è stata rivolta verso quei produttori specializzati nel campo della coltivazione i quali forniscono dati riguardanti i ppf emessi dai loro prodotti. Per questo lavoro è stato deciso di utilizzare il modulo led denominato *SurexiF1* del produttore *Illumitex* [5]; parte del data sheet è riportato in figura 4a. In figura 4b si può vedere la distribuzione spettrale della potenza, è da notare i due picchi in corrispondenza della luce blu e rossa. Il componente è costituito da 16 led; la connessione tra questi ricavabile dal data sheet è riportata in figura 5. Dal data sheet è possibile ricavare inoltre alcuni dati importanti per il dimensionamento della lampada: questi sono i *PPF* emessi dal componente ($8\mu\text{moli/s}$) e la sua efficienza ovvero i *PPF/W*. Grazie al primo dato si ricava il numero di componenti necessari per costruire

		Surexi F1
Beam Angle (FWHM)		50°
Digital Distribution™		DD65
Radiometric Power (W)		1.6
Photosynthetic Photon Flux (μmol/s)		8.0
PPF/W Electrical (μmol/J)		1.6
Forward Voltage (V)	Typical	10.0
	Max	11.0
Forward Current (mA)	Typical	500
	Max	600
Maximum Junction Temperature (°C) Max		115
Operating Case Temperature (°C)		-40 to 85
Thermal Resistance (°C/W)		2.0

(a) Data sheet SurexiF1.



(b) Distribuzione di potenza nello spettro.

Figura 4

la lampada, mentre con l'efficienza, la potenza da fornire alla lampada alle varie condizioni di lavoro.

Dato che la lampada è posta ad una altezza di un metro e che la superficie laterale è riflettente, si può, con buona approssimazione, supporre i PPF coincidano con i $PPFD$.

Seguendo le specifiche del progetto, per garantire una quantità massima di $650 \mu\text{moli s}^{-1}\text{m}^{-2}$ (PPF_{max}) emessi saranno necessari: $650/8 = 81$ moduli con una potenza massima $P_{max} = 650/1.6 = 400W$; con una quantità di $200 \mu\text{moli s}^{-1}\text{m}^{-2}$ (PPF_{min}) ricaviamo un potenza minima $P_{min} = 200/1.6 = 125W$.

Elettricamente gli 81 moduli sono stati collegati come in figura 7. Per ottenere il modello elettrico della lampada è stato impiegato il software di simulazione gratuito *LTspice* grazie al quale è stato possibile ricavarne la caratteristica i-v (figura 8). La curva presenta due tratti pressochè lineari, per tensioni superiori a $65V$ la pendenza della retta che corrisponde alla conduttanza della lampada vale $0.156S$. Risulta quindi conveniente al fine di semplificare i calcoli rappresentare il componente come un generatore di tensione da $V_L = 65V$ in serie a una resistenza $R_L = 6.41\Omega$.

Basandosi sui valori massimi e minimi della potenza e sul modello appena ricavato è possibile calcolare i valori massimi e minimi della corrente.

$$P = V \cdot I = (R_L I + V_L) I = R_L I^2 + V_L I$$

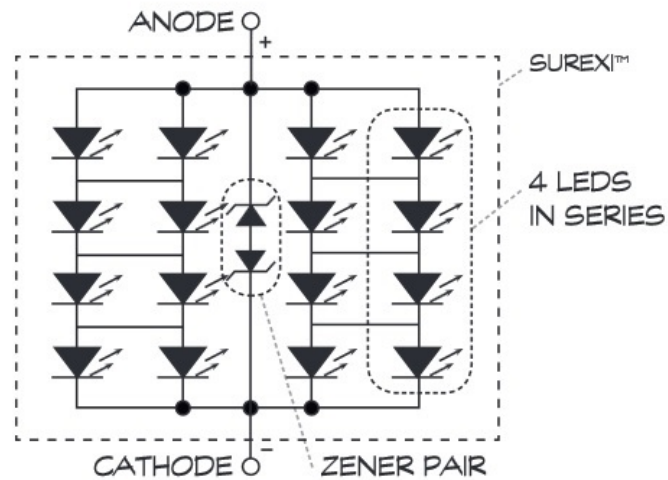
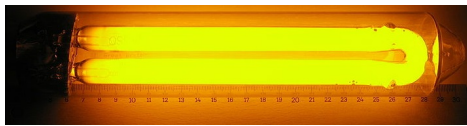
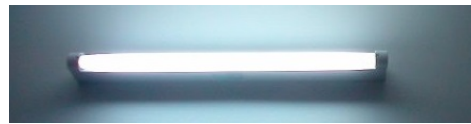


Figura 5: *Schema elettrico del modulo led*



(a) *Lampada a scarica ai vapori di sodio.*



(b) *Lampada fluorescente.*

Figura 6

Ovvero:

$$R_L I^2 + V_L I - P = 0$$

Inserendo $P_{min} = 125W$ e $P_{max} = 400W$ nella formula si ottiene rispettivamente: $I_{min} = 1.6A$ e $I_{max} = 4.3A$; questi valori verranno utilizzati in seguito nel dimensionamento del convertitore cc-cc.

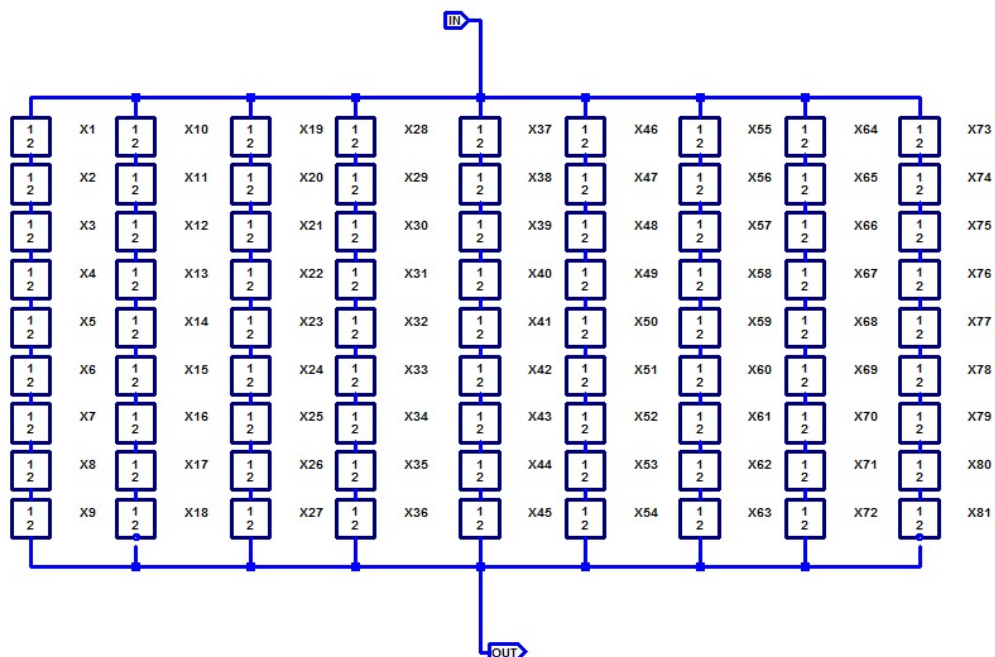


Figura 7: Connessione moduli led

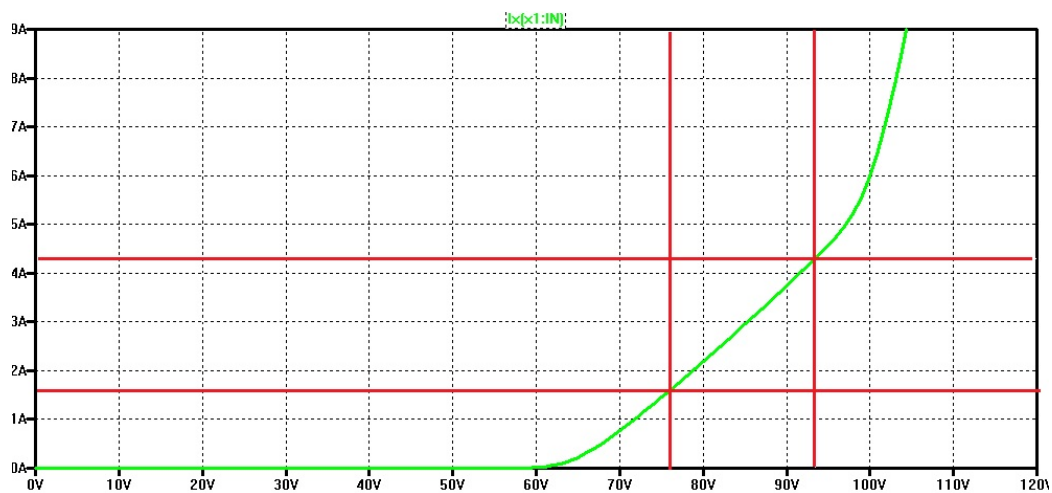


Figura 8: Caratteristica corrente-tensione della lampada. Le linee rosse ne rappresentano i limiti di funzionamento.

3.3.2 Convertitore cc-cc

Il convertitore continua/continua è un convertitore a commutazione alimentato da una singola tensione continua e dà in uscita una tensione continua di valore diverso e regolabile rispetto a quella di ingresso.

In questo lavoro si utilizzerà un convertitore a commutazione di tipo *Buck*. Il convertitore cc-cc di tipo *Buck* converte la tensione continua in ingresso in una continua e di valore inferiore. In figura è riportato lo schema di principio del convertitore. In esso si può trovare:

- Unità di commutazione, composta da un mosfet e dal relativo circuito integrato di pilotaggio;
- Diodo di ricircolo: serve per permettere alla corrente nell'induttanza di richiudersi, evitando così pericolose sovratensioni che potrebbero danneggiare il mosfet;
- Filtro del secondo ordine L-C;
- Carico: nel caso specifico la lampada.

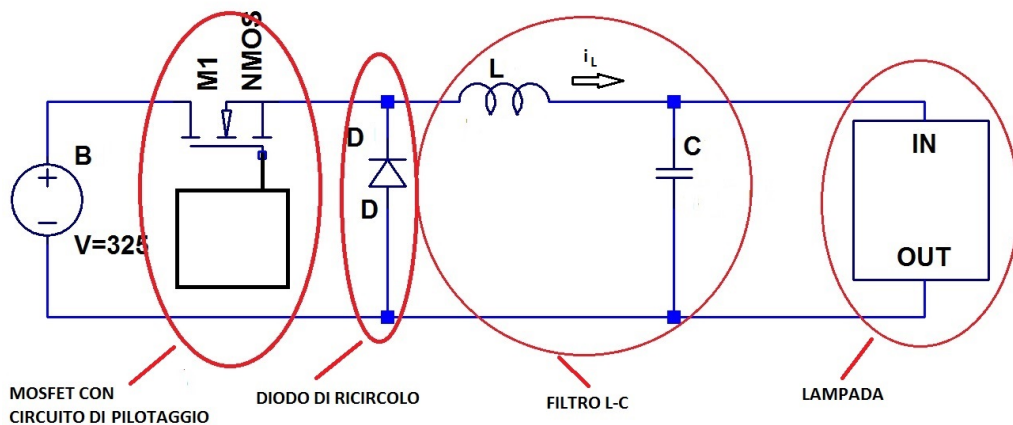


Figura 9: Schema di principio del convertitore buck

La tensione continua di ingresso U_i viene trasformata dall'unità di commutazione in una tensione impulsiva u_D ; quando il mosfet è in conduzione (intervallo t_{on}) il diodo risulta interdetto e la tensione u_D è uguale a U_i , mentre

quando il mosfet è aperto (intervallo t_{off}) il diodo è in conduzione e la tensione u_D è nulla. Come si può osservare questa tensione consta di un termine continuo U_D sommato a componenti armoniche a frequenza multipla della frequenza di commutazione $f_c = 1/T_s = 1/(t_{on} + t_{off})$. Tale tensione viene applicata al filtro di secondo ordine realizzato mediante gli elementi reattivi L e C (filtro non dissipativo) [6].

Dimensionamento filtro L-C

Per il dimensionamento del filtro verrà imposto il *funzionamento continuo* del convertitore ovvero che la corrente i_L sia sempre maggiore di zero in tutto il periodo di commutazione per ogni condizione di lavoro.

Con questa condizione il rapporto di conversione $M = U_o/U_i$ coincide con δ e in particolare è indipendente dalla corrente I_o cosa che non avviene quando il convertitore funziona in *modo discontinuo*, ovvero quando la corrente i_L si annulla nel periodo di commutazione.

Il range di variazione del duty cycle, trascurando le cadute di tensione è:

$$\delta = U_o \setminus U_i$$

$$\implies \delta_{min} \div \delta_{max} = U_o^{min} \setminus U_i^{max} \div U_o^{max} \setminus U_i^{min} = 0.222 \div 0.302$$

Dove U_o^{min} e U_o^{max} sono stati ricavati dalla figura 8 rispettivamente quando la corrente vale I_{min} e I_{max} e valgono: $76V$ e $93V$.

L'ondulazione di corrente nell'induttanza è data dalla formula:

$$\Delta i_L = \frac{U_o \cdot t_{off}}{L} = \frac{U_o \cdot (1 - \delta)}{f_s \cdot L}$$

$$\Delta i_L^{max} = \frac{U_o \cdot (1 - \delta_{min})}{f_s \cdot L}$$

Volendo imporre il funzionamento continuo:

$$\Delta i_L^{max} \leq 2 \cdot I_{min} = 3.2A$$

Da questo ricaviamo il valore dell'induttanza:

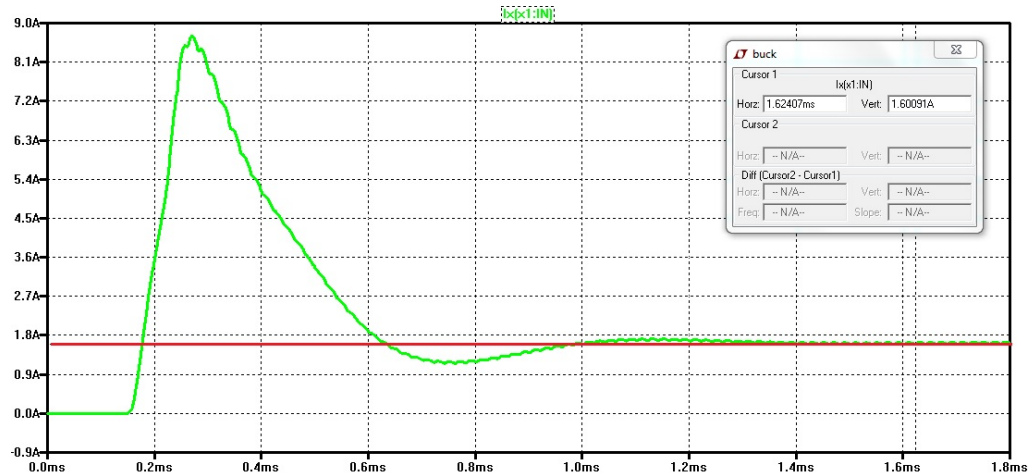
$$L = \frac{U_o \cdot (1 - \delta_{min})}{2f_s \cdot I_{min}} \cong 452\mu H$$

Nel caso limite di distacco di carico, tutta l'energia immagazzinata nell'induttore viene scaricata nel condensatore; mantenere l'errore della tensione d'uscita entro il 5% con $U_o = 93V$ significa soddisfare la condizione:

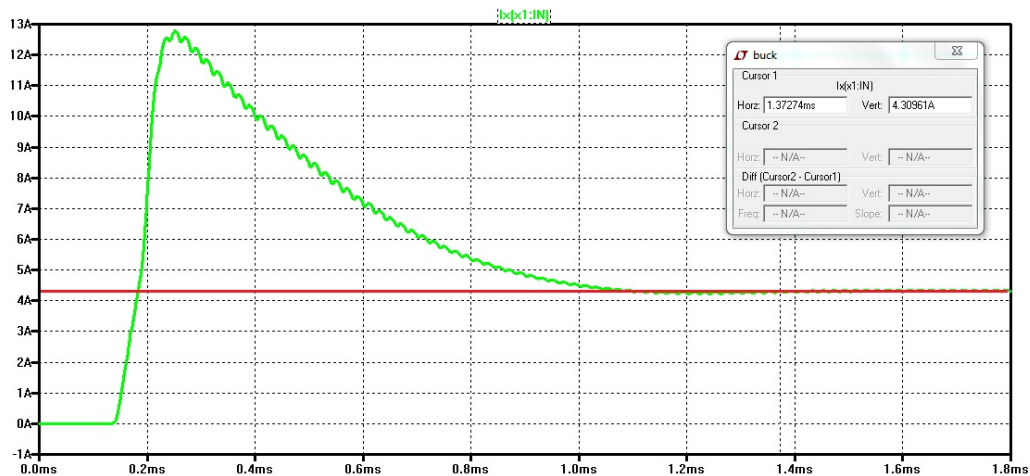
$$C = \frac{0.5 \cdot L \cdot I_{max}^2}{U_o \cdot \Delta U_o} = 9.66\mu F$$

4 Simulazione del Circuito a Catena Aperta

Utilizzando il software di simulazione *LTspice* è possibile ricavare le forme d'onda della corrente di uscita quando la tensione di ingresso vale $325V$. In figura è mostrato il funzionamento del convertitore nei casi limite di corrente.



(a) Andamento della corrente nella lampada con $\delta = 0.233$.



(b) Andamento della corrente nella lampada con $\delta = 0.289$.

Figura 10

Seppur imponendo la tensione in uscita a regime la corrente raggiunga il valore desiderato, questa soluzione presenta diversi svantaggi: in primo luogo l'elevato valore di picco della corrente nel transitorio iniziale non consente l'effettiva realizzabilità della lampada; inoltre la tensione di uscita dipende, oltre che dal duty cycle, anche dalla tensione in ingresso, dal modo di funzionamento (continuo o discontinuo) e a causa di elementi parassiti dalla corrente di uscita. E' necessario quindi introdurre un controllo a retroazione sulla corrente i_L .

5 Schema completo

In figura è rappresentato il circuito del convertitore completo. Rispetto allo schema base esso comprende un circuito di controllo a retroazione. Tale circuito come ingressi presenta:

- **i+**, **i-**: collegati ai capi della resistenza $R_s = 0.1\Omega$;
- **Ref**: da cui proviene il segnale di riferimento di corrente.

E come unica uscita il segnale PWM utilizzato dal driver per pilotare il mosfet.

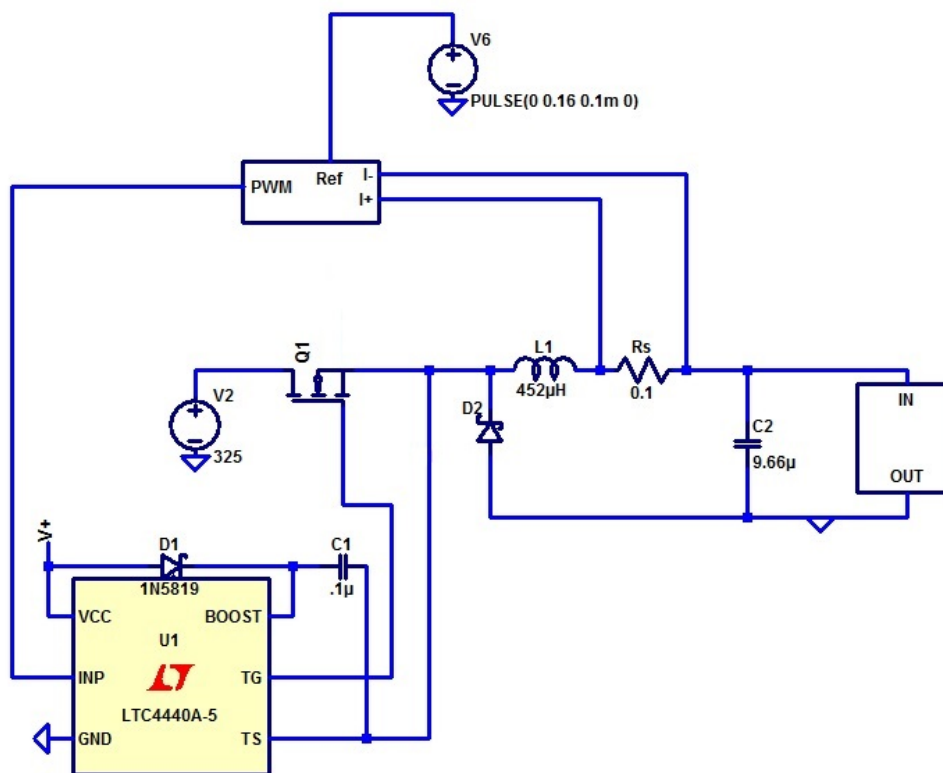


Figura 11: *Circuito completo*

5.1 Rete di retroazione

Per questi progetto si è scelto di utilizzare un controllo di corrente media. In figura 12 è raffigurato il circuito contenuto nel modulo di retroazione. In esso troviamo:

- Rilevatore di corrente: crea una tensione proporzionale alla corrente i_L ;
- Filtro passa basso;
- Sommatore per confrontare il riferimento con la corrente media nell'induttore;
- Regolatore proporzionale integratore;
- Modulatore PWM.

5.1.1 Filtro passa basso

Il primo componente che si trova dopo il rilevatore di corrente è il filtro del primo ordine passa basso. Il compito di tale filtro è attenuare le componenti a frequenza f_c e suoi multipli in modo da ottenere in uscita solo il valore medio del segnale di tensione rappresentate la corrente sull'induttore. Come si può vedere in figura 13, il filtro è realizzato con un amplificatore operazionale invertente la cui frequenza di taglio è $f_t = 500Hz$ questo consente di ottenere una attenuazione di $40dB$ alla frequenza f_c .

Imponendo guadagno unitario in centro banda, si ottiene che:

$$R_1 = R_2 = 10k\Omega$$

e per avere una frequenza di taglio a $500Hz$, deve valere:

$$C = \frac{1}{2\pi f_c R_2} = 31\mu F$$

La funzione di trasferimento è:

$$H_{lpf} = \frac{1}{1 + sR_2C}$$

In figura 14 è rappresentato il modulo di H_{lpf} . Si noti che essendo il filtro invertente è stato inserito in uscita un buffer invertente per riportare il segnale di tensione positivo.

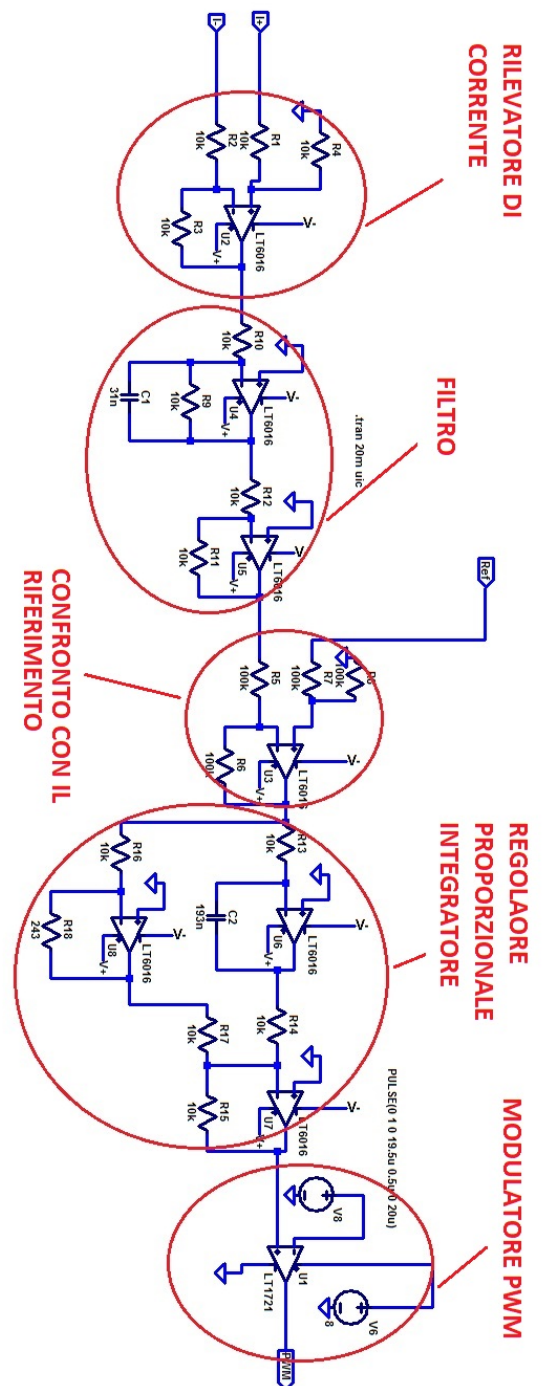


Figura 12: Circuito di controllo di corrente media

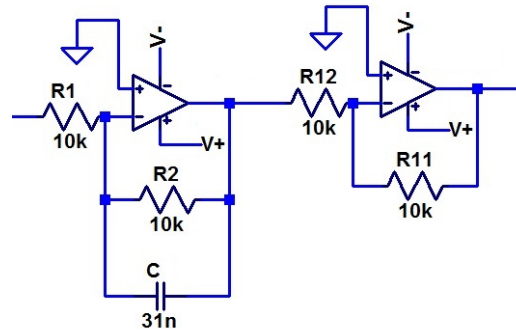


Figura 13: Schema di principio del filtro

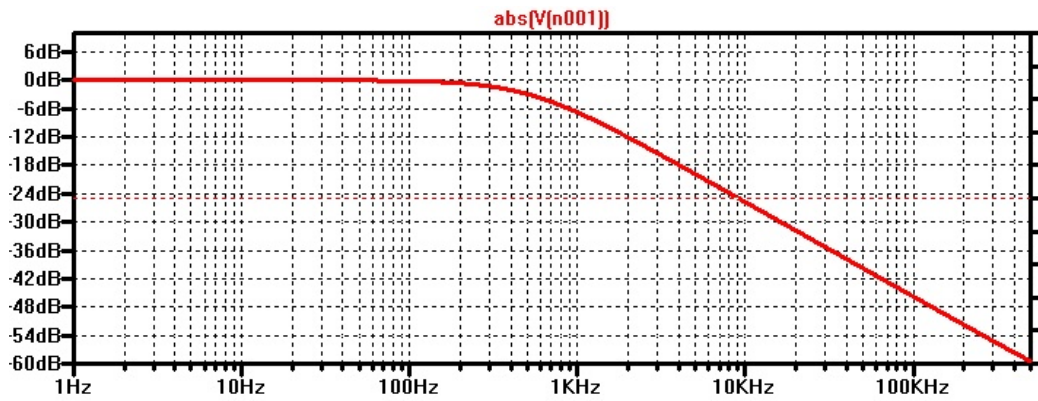


Figura 14: Diagramma di Bode del modulo di H_{lpf}

5.1.2 Modulatore PWM

La figura riporta lo schema di principio di un modulatore PWM: quest'ultimo è composto semplicemente da un comparatore che confronta un segnale triangolare a frequenza f_c detto portante, con un segnale di controllo o modulante m . Il segnale di uscita x è a livello logico alto negli intervalli di tempo in cui il segnale modulante è maggiore del segnale portante. Nell'ipotesi che il segnale modulante m si possa ritenere costante nel periodo di modulazione T_c , il duty cycle del segnale $x(t)$ di uscita risulta:

$$\delta = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{m}{W_{max}}$$

Dove W_{max} è il valore massimo della portante. Questo significa che il duty cycle risulta proporzionale al segnale modulante m .

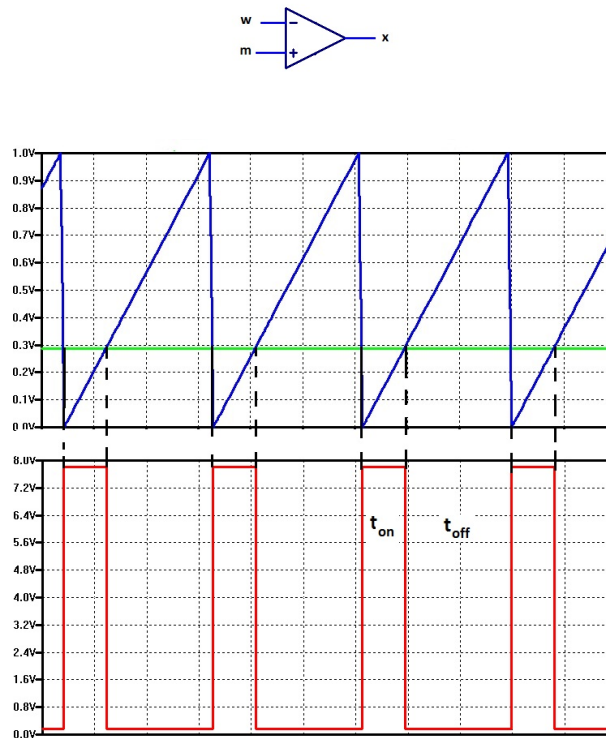


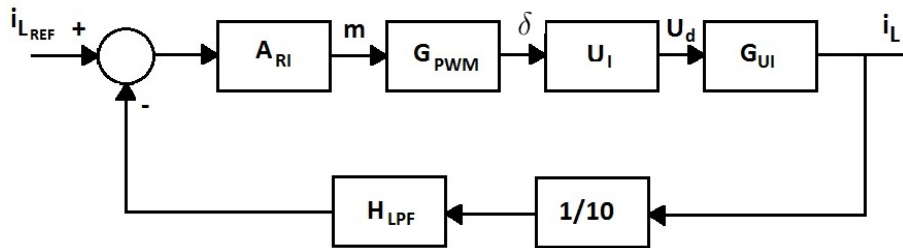
Figura 15: In blu è rappresentato il segnale portante w , in verde la modulante m e in rosso l'uscita x

5.1.3 Regolatore

Il segnale modulante m viene prodotto da un opportuno regolatore (A_{RI}) che processa il segnale differenza tra la corrente i_L (scalata di un fattore 10 dalla resistenza R_s) ed il segnale di riferimento.

Il regolatore A_{RI} deve essere progettato in modo da garantire la stabilità del sistema di controllo e le prestazioni statiche e dinamiche desiderate, in termini di precisione, velocità e tipo di risposta a variazioni dei parametri di ingresso (riferimento, tensione di ingresso e tensione di uscita). Tali prestazioni devono essere verificate in tutti possibili punti di lavoro del convertitore.

In figura è rappresentato lo schema a blocchi dell'anello di controllo di corrente.



Dove:

- G_{PWM} è la funzione di trasferimento del modulatore PWM, essendo il valore massimo della portante uguale a 1, essa vale:

$$G_{PWM} = \frac{1}{W_{max}} = 1$$

- U_i vale 325V
- G_{UI} è la funzione di trasferimento tra la corrente i_L e la tensione ai capi del diodo (U_d) ; essa vale:

$$G_{UI} = \frac{i_L}{U_d} = \frac{1 + sCR_L}{CR_L L s^2 + (L + CR_L R_s)s + R_s + R_L}$$

dove R_L è la resistenza equivalente del carico e vale: 6.41Ω

- il fattore $1/10$ è dato dalla resistenza $R_s = 0.1\Omega$
- H_{lpf} è la funzione di trasferimento del filtro passa basso, e vale:

$$H_{lpf} = \frac{1}{1 + sR_2C}$$

dove $R_2 = 10k\Omega$ e $C = 31\mu F$.

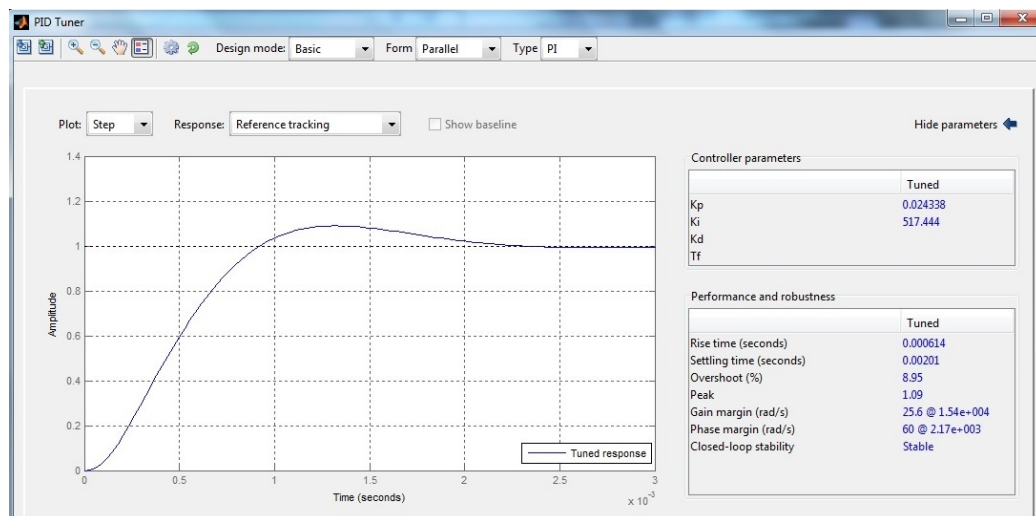
Per il dimensionamento del regolatore è stato utilizzato il software *MATLAB*.

Il programma permette, impostando determinate specifiche, di ottenere in modo automatico i coefficienti K_p, K_i, K_d di un regolatore di tipo PID.

Di seguito è riportato il codice utilizzato:

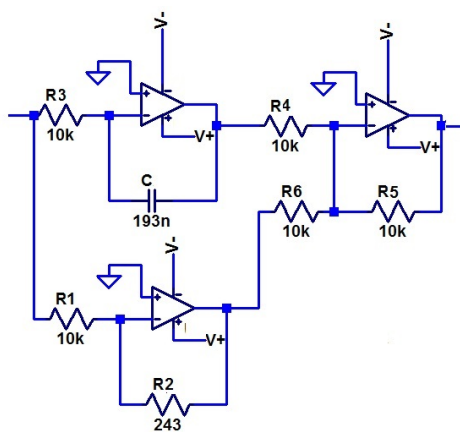
```
C=9.66*10^(-6) %condensatore filtro buck
L=452*10^(-6) %induttore filtro buck
Rs=0.1         %resistenza per il rilevamento della corrente
Rl=6.419      %resistenza di carico
Gui=tf([C*Rl 1],[C*Rl*L L+C*Rl*Rs Rs+Rl]) %f.d.t tra la corrente nell'induttanza
                                                %e la tensione ai capi del diodo
Hlpf=tf([1],[0.0003183 1]) %f.d.t. del filtro passa basso
H3=32.5*Gui*Hlpf %f.d.t. anello di retroazione
pidtool(H3)
```

L'esecuzione del comando *pidtool(H3)* apre una finestra di dialogo in cui è possibile specificare il tempo di assestamento desiderato del sistema retroazionato.



Il programma ci fornisce i valori: $K_p = 0.024338$ e $K_i = 517.444$.

In figura è rappresentato lo schema di principio del regolatore PI.



Fissato $R_1 = R_3 = 10k\Omega$:

$$R_2 = R_1 K_p = 243\Omega$$

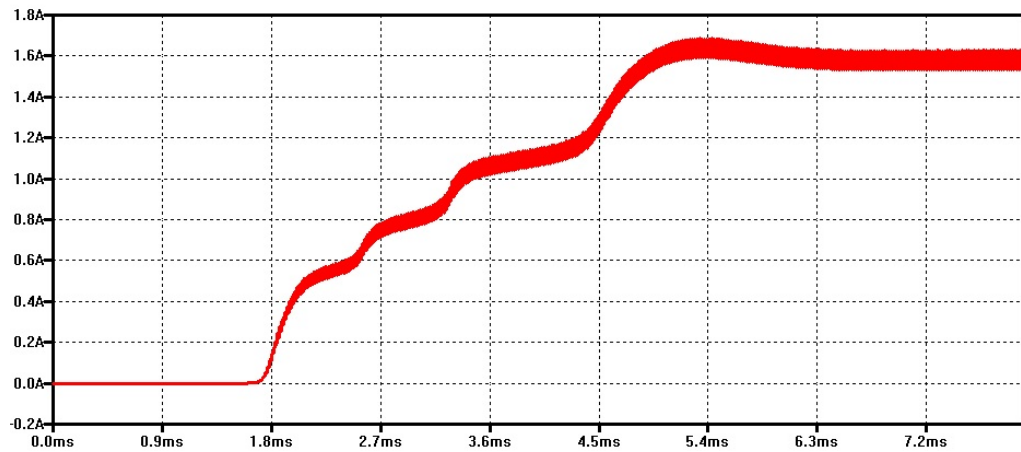
e

$$C = \frac{1}{R_3 K_i} = 193nF$$

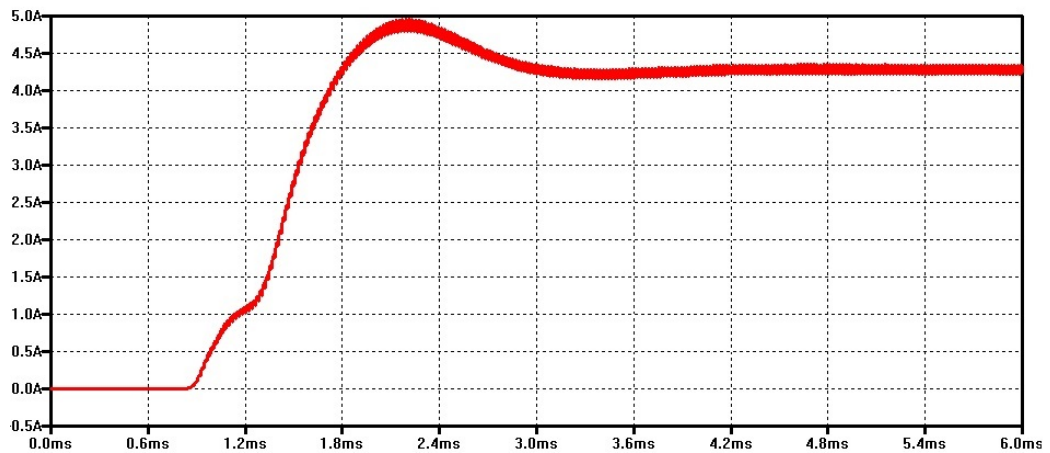
6 Simulazione del Circuito Completo

Così dimensionato è possibile osservare la forma d'onda della corrente in uscita quando:

- Il riferimento vale $1.6A$:



- Il riferimento vale $4.3A$:



In entrambi i casi si può vedere come la corrente a regime raggiunga il valore di riferimento. Da osservare che il picco di corrente nel caso del riferimento massimo è inferiore alla massima corrente ammassa dai moduli led.

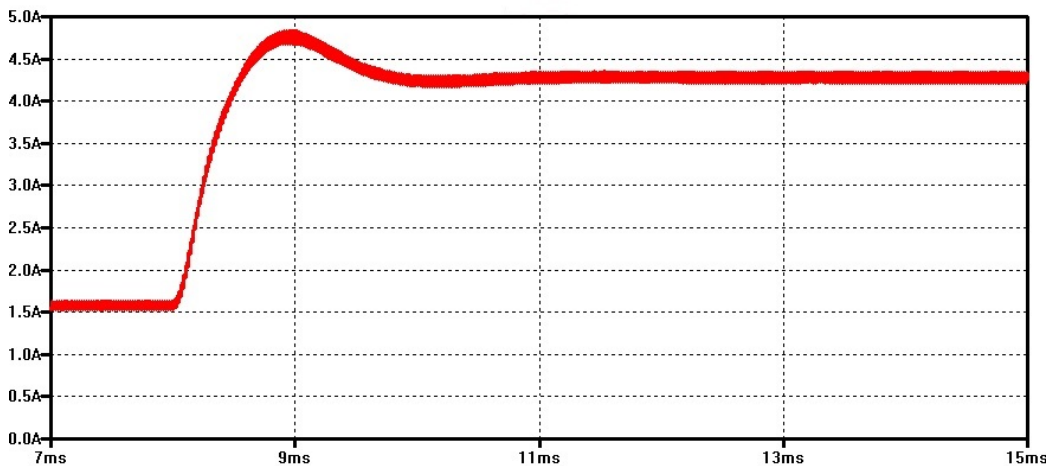
Si può notare che l'andamento della corrente nel transitorio iniziale differisce in maniera sostanziale da quello teorico ottenuto con *MATLAB*. Questo è dovuto al fatto che durante il transitorio il convertitore funziona in modo discontinuo dove il rapporto di conversione M non coincide più con il duty cycle δ ma vale :

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + \frac{2f_s L I_o}{U_i}}$$

che non è lineare e dipende dalla corrente di carico. Questo fatto non è stato contemplato nel dimensionamento del regolatore.

Ai fini pratici però non è un problema: in questo tipo di applicazione la prontezza di risposta non è un requisito cruciale e un tempo di assestamento di $7ms$ è più che soddisfacente.

Con un cambio di riferimento tale da portare il convertitore a erogare una corrente che va da I_{min} a I_{max} è possibile vedere che la forma d'onda è identica a quella teorica, infatti in questa regione di lavoro il convertitore funziona in modo continuo.



Un aspetto del progetto che non è stato ancora discusso riguarda la generazione del segnale di riferimento.

Esso, per esempio, può provenire da un microcontrollore, il quale può essere programmato affinché gestisca in automatico l'intensità luminosa e la

durata di esposizione giornaliera. Inoltre disponendo di un rivelatore di luminosità, come ad esempio di un fotodiodo, è possibile utilizzare la lampada come supplemento alla luce solare. Infatti impostando la quantità di PPF necessaria alla pianta il microcontrollore può, durante il ciclo di illuminazione, regolare la potenza fornita alla lampada a seconda dell'intensità della luce solare.

Esempio

Supponiamo di voler coltivare lattuga in una serra di $9m^2$, saranno necessarie $n = 9$ lampade poste ad una altezza di un metro. Il ciclo di illuminazione giornaliero consiste in 16 ore di luce e 8 di buio. La quantità di $PPFD$ necessaria è $250\mu\text{moli s}^{-1}m^{-2}$, questo significa fornire alla lampada una potenza di:

$$P_{lampada} = \frac{250}{1.6} = 156.25W$$

Dove 1.6 è il valore di efficienza luminosa ricavata dal data sheet.

La massima potenza assorbita dall'impianto è:

$$P_{max} = P_{lampada} \cdot n = 156.25 \cdot 9 = 1406W$$

che corrisponde alla potenza assorbita nelle prime ore del mattino. Tale potenza scenderà fino ad annullarsi durante il giorno per poi ritornare a crescere al calare del sole.

Per fare un confronto, prendiamo dal catalogo del produttore una lampada a scarica da $36W$ in grado di emettere $47\mu\text{moli/s}$ [7].

Per ottenere gli stessi risultati in termini di $\mu\text{moli/s}$ complessivamente emessi sono necessari $1723W$. Ipotizzando il prezzo di 0.27 € per kWh: il costo al mese per la soluzione a led è di 182€ , contro i 223 € di quella a scarica, per un risparmio di 41 € mensili.

6.1 Conclusioni

In questo lavoro è stato dimensionato un convertitore a commutazione per l'alimentazione di una lampada a led per coltivazioni idroponiche.

L'utilizzo di lampade a led, rispetto alle lampade a scarica, ha il vantaggio di ridurre i consumi a parità di risultati. Questo perché le lampade a led hanno uno spettro di emissione concentrato nelle bande utili alla fotosintesi, al contrario della lampade a scarica che hanno uno spettro ampio che comprende lunghezze d'onda riflesse o scarsamente usate. Diversi studi hanno dimostrato che una combinazione di luce rossa e blu in supporto alla luce solare non solo favorisce lo sviluppo della pianta, ma ne migliora la qualità dei frutti [8]. Come nel caso dei pomodori nei quali è stato riscontrato che essi contengono il 50% in più di vitamina *C* [9] .

Riferimenti bibliografici

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydroponics>
- [2] <http://www.treccani.it/enciclopedia/fotosintesi-clorofilliana/>
- [3] <http://www.kulekat.com/led-home-lighting/do-led-grow-lights-work.html/2>
- [4] http://www.illumitex.com/wp-content/uploads/2013/03/Agricultural_Brochure_150dpi_FINAL.pdf
- [5] http://www.illumitex.com/wp-content/uploads/2012/03/CUT_SUREXI_AD44.pdf
- [6] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins *Elettronica di potenza*, Hoepli
- [7] http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/shared/assets/downloads/pdf/horticulture/leaflets/overview_growing_your_profits-hid-en.pdf
- [8] <http://leds.hrt.msu.edu/research/>
- [9] <http://www.wageningenur.nl/en/show/Tomatoes-with-extra-vitamin-C-via-LED-lamps.htm>