

La scarica e la carica del condensatore.

Materiale utilizzato:

- Arduino
- Breadboard
- Condensatore
- Morsetti
- Resistenza
- Oscilloscopio

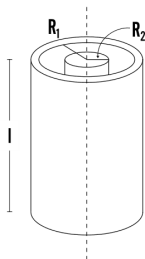
Premessa teorica:

Prima di procedere con l'esecuzione della prima parte dell'esperienza, il cui scopo sarà di visualizzare attraverso l'oscilloscopio il segnale generato dall'uscita di un circuito Rc e il segnale presente ai capi del condensatore e quindi simulare la carica e scarica del condensatore, occorre precisare il funzionamento del materiale utilizzato e chiarire alcuni concetti fondamentali.

Il condensatore

Il condensatore è un dispositivo elettronico che ha la capacità di immagazzinare carica elettrostatica, per questo possiamo definirlo accumulatore di energia. Tale dispositivo modifica il suo comportamento in funzione del segnale di alimentazione utilizzato nell'esperimento in questione (può essere un segnale alternato, continuo ...).

Esistono vari tipi di condensatori ma generalmente esso è costituito da due lastre metalliche poste ad una certa distanza tra loro con geometrie opportune (Noi utilizzeremo un condensatore cilindrico).



Se poniamo le due lastre (inizialmente a differenza di potenziale zero) ad una certa differenza di potenziale tra loro, assistiamo al processo di *carica*, viceversa si parla di *scarica*.

In regime di tensione costante (corrente continua), il condensatore si carica inizialmente fino a raggiungere una situazione di equilibrio dove la carica sulle armature corrisponde esattamente alla tensione applicata tramite il generatore. Una volta carico, il condensatore si comporta come un circuito aperto ovvero interrompe ogni flusso di corrente all'interno del circuito.

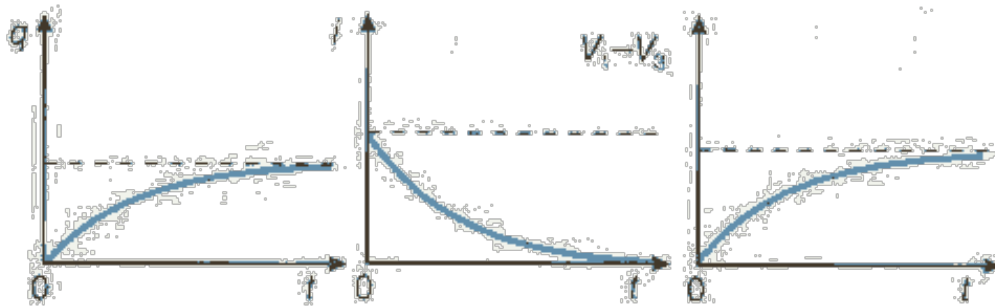
Al cessare dell'eccitazione sul circuito l'energia elettrica accumulata nel condensatore torna a scaricarsi sotto forma di corrente elettrica rilasciata nel circuito.

La funzione matematica di carica e scarica di un condensatore è un'esponenziale con un parametro che dipende dal valore del condensatore e dalla resistenza.

Vediamo nel dettaglio la carica e la scarica del condensatore con le rispettive leggi.

Carica del condensatore

Consideriamo un circuito in cui sono inseriti un condensatore di capacità C ed un resistore di resistenza R . Tramite un interruttore T possiamo inserire o disinserire nel circuito il generatore elettrico G , con il risultato di caricare o scaricare il condensatore. A circuito chiuso, il condensatore viene caricato.



Se osserviamo i tre grafici notiamo che:

La carica elettrica q , accumulata al variare del tempo sulle armature del condensatore, da un valore nullo tende al valore CV . Il suo andamento è descritto dalla seguente equazione:

$$q = CV \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

L'intensità i della corrente elettrica, durante il processo di carica, partendo dal valore iniziale V/R , tende ad annullarsi. Il suo andamento è descritto dalla seguente equazione:

$$i = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

La differenza di potenziale che si instaura tra le armature del condensatore al variare del tempo, da un valore nullo tende al valore V (differenza di potenziale ai capi del generatore). La crescita è descritta dalla seguente equazione:

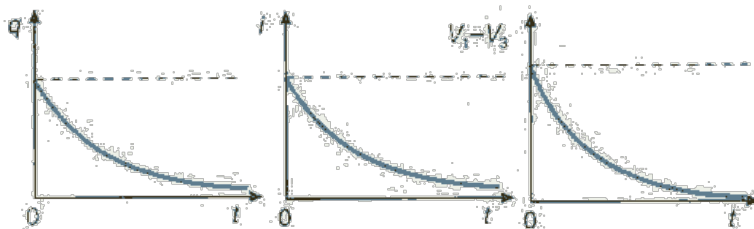
$$V_1 - V_2 = V \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

La legge matematica che esprime la tensione ai capi del condensatore in funzione del tempo è la seguente:

$$V_C(t) = V \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

La scarica del condensatore

A circuito aperto, il condensatore si scarica.



Come si può osservare dai grafici:

In questo caso la carica elettrica q , dal valore iniziale CV tende al valore nullo. Il suo andamento è descritto dalla seguente equazione:

$$q = CV e^{-\frac{t}{RC}}$$

L'intensità i della corrente elettrica, partendo dal valore iniziale V/R , tende ad annullarsi. Il suo andamento è descritto dalla stessa equazione precedentemente citata: $i = \frac{V}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$

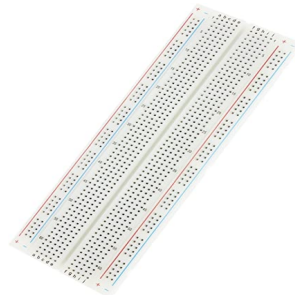
La differenza di potenziale che si instaura tra le armature del condensatore al variare del tempo, da un valore V tende al valore nullo. La decrescita è descritta dalla seguente equazione:

$$V_1 - V_3 = V e^{-\frac{t}{RC}}$$

Breadboard

Questo strumento presenta alcuni fori + e - dove viene collegata l'alimentazione e la massa degli strumenti.

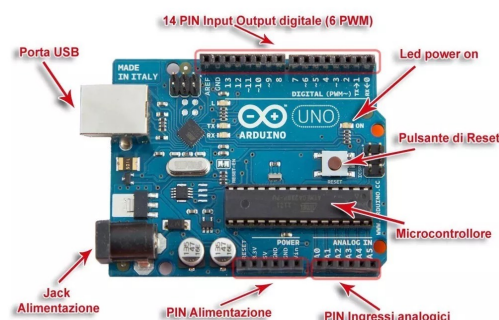
I fori sulla linea rossa hanno tutti lo stesso potenziale e anche quelli sulla linea blu hanno lo stesso potenziale. Lo stesso vale per i fori collocati nella parte simmetrica della breadboard. Per quanto riguarda i fori collegati tra le due linee, essi sono tutti equipotenziali.



Arduino

Arduino, è una scheda che mette in correlazione degli stimoli che possono derivare da fonti varie, captati e trasmessi da sensori, i quali vengono poi associati a un effetto (output). Le fonti di input possono comprendere luce, grado di umidità, movimenti, suoni, accensione/spengimento di pulsanti o altro, e il sistema le traduce in azioni secondo le istruzioni che sono state codificate e impartite.

Nel nostro caso Arduino sarà il generatore di tensione che genererà un'onda quadrata.



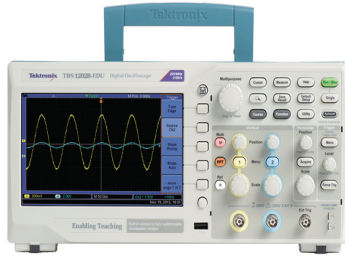
Oscilloscopio

L'oscilloscopio è lo strumento necessario per visualizzare i segnali e il suo principio di funzionamento risulta simile a quello di un tester o di un voltmetro.

Questo strumento presenta un display, su cui verrà riportata la forma dell'onda che andremo a misurare. Il display in questione è in tensione, dunque presenta un asse y, che rappresenta la tensione, e un asse x che rappresenta il tempo.

Questo perché l'oscilloscopio riporta il segnale di tensione variabile nel tempo misurati dall'oscilloscopio stesso attraverso delle sonde.

Queste sonde sono formate da un morsetto ad uncino, da collegare sempre al polo positivo, e da un morsetto a coccodrillo, da collegare a quello negativo. È importante sottolineare che l'oscilloscopio va sempre collegato in parallelo in quanto misura una tensione.



È necessario per comprendere il funzionamento dell'oscilloscopio, illustrare lo schermo dello strumento, dove appunto apparirà il segnale campionato.

Se lo si osserva, si può notare che esso è diviso in quadratini. Ogni quadratino ha una scala, sia per ampiezza verticale sia orizzontale.

È possibile cambiare la scala sull'asse verticale dove ogni quadratino vale 2V, attraverso delle manopole.

È necessario cambiare l'ampiezza orizzontale quando si dispone di segnali periodici per riportare almeno un periodo all'interno del display.

Sperimentalmente è utile, una volta che abbiamo il segnale, girare le manopole finché non rappresentiamo almeno un periodo del segnale all'interno dello schermo.

L'oscilloscopio compie un'azione di campionamento: prima arriva un segnale dalle sonde e lui lo inizia a campionare. Una volta campionato lo disegna sullo schermo, ma per questo è necessario fornire un segnale che faccia capire allo strumento quando iniziare a campionare; si tratta del cosiddetto **segnale di trigger**.

Per provare a visualizzare questo segnale, abbiamo collegato + e - e abbiamo notato sullo schermo dell'oscilloscopio un'onda quadra generata con Arduino.

La linea tratteggiata verde che era apparsa, rappresentava il segnale di trigger.

Questa linea va posizionata finché il segnale non viene congelato, in modo tale che l'oscilloscopio sappia da dove iniziare a campionare il segnale.

Generalmente il trigger va selezionato almeno a metà dell'ampiezza dell'onda.

Abbiamo notato che l'onda quadra di Arduino oscillava. Quando l'onda è alta, quindi vale 5 V, avremo quel determinato circuito, mentre quando l'onda è bassa è come avere un generatore di tensione da zero volt e dunque un circuito aperto, è come non averlo.

Se invece noi abbiamo 18 divisioni orizzontali e conosciamo il periodo dell'onda, dividiamo questo ultimo per diciotto e quindi possiamo comprendere a cosa deve corrispondere ogni quadratino.

In questo modo noi possiamo simulare la carica e la scarica del condensatore.

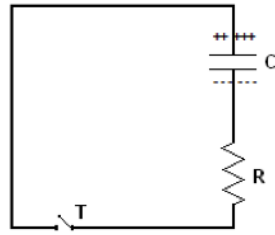
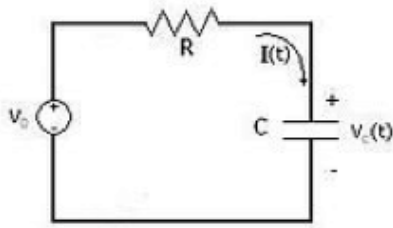
Esecuzione dell'esperienza

Prima di procedere con l'esperienza è essenziale illustrare il componimento del circuito. Il circuito Rc presenta in serie una resistenza e un condensatore e un generatore di tensione, ovvero Arduino.

La resistenza è collegata su due fori della breadboard differenti, per avere una differenza di potenziale.

Il condensatore è collegato con un morsetto su un foro sulla stessa riga dell'altro morsetto della resistenza e l'altro morsetto del condensatore è collegato con il - , quindi con la massa.

La massa e i 5V di arduino sono collegati alla scheda stessa per fornire l'alimentazione.



E' detto segnale a onda quadra un segnale elettrico la cui tensione o corrente presenta un andamento nel tempo che passa alternativamente tra due valori, con rapide commutazioni. Il nome deriva dall'aspetto che assume il diagramma temporale che rappresenta questo tipo di segnale rispetto all'asse dei tempi.

In questa esperienza verificheremo un segnale generato all'uscita del circuito Rc appena illustrato.

Saremo in grado di visualizzare con l'oscilloscopio questo segnale e anche il segnale ai capi del nostro condensatore cilindrico, ovvero la tensione chiamata V_C .

In quanto l'onda generata da Arduino sarà **un'onda quadra**, possiamo immaginare come se ci fosse in serie a quest'ultima un pulsante. Questo pulsante sarà chiuso quando il segnale è alto, aperto quando il segnale dell'onda quadra è basso. Proprio in questo modo potremo vedere come trovare teoricamente il segnale che uscirà ai capi del condensatore. Infatti il circuito si comporterà come il circuito per la carica e scarica di un condensatore, con inizialmente una fase di salita, leggermente smussata perché è presente anche la carica del condensatore, in seguito verrà mantenuto lo stesso potenziale, e infine quando il circuito verrà aperto, quindi quando verrà spento il generatore di tensione, inizierà a decrescere.

Dunque vediamo come trovare il segnale ai capi del condensatore.

Prima di tutto abbiamo scollegato i morsetti dell'oscilloscopio e collegato in parallelo quello ad uncino al polo positivo del condensatore, e quello a coccodrillo a quello negativo.

Dopo aver fatto ciò abbiamo notato l'onda quadra sullo schermo dell'oscilloscopio.

In quanto il trigger non funzionava correttamente, abbiamo congelato l'onda quadra per vedere l'effetto di carica e scarica del nostro condensatore premendo il pulsante "single sequence".

Senza trigger in compenso abbiamo potuto notare la periodicità del segnale.



Onda quadra sul display dell'oscilloscopio

Analizzando attentamente l'onda quadra congelata, possiamo notare la fase di carica, poi la tensione massima che il condensatore riesce ad accumulare (come detto in precedenza il condensatore è come se fosse un accumulatore di cariche), che viene mantenuta finché il circuito è aperto, poi notiamo la fase di scarica quando avviene la messa a terra.



È necessario sottolineare che il nostro è un circuito filtro passa basso.

C'è un teorema nella teoria dei segnali che è detto **teorema di Fourier**. Esso afferma che quando abbiamo a che fare con un segnale periodico, nel nostro caso l'onda quadra, questo lo possiamo vedere come uguale alla somma di tante onde sinusoidali sfasate fra di loro e con frequenze differenti.

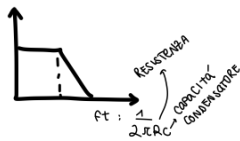
Detto questo, il filtro passa basso si utilizza in elettronica quando si ha anche fare con il rumore, che è sempre presente come disturbo che quindi causa l'errore, e può essere dovuto all'elettronico o ad altre fonti esterne.

Infatti una sinusoide non appare mai in questo modo 
bensì in questo: 

Proprio per il disturbo dovuto dal rumore.

Il compito del filtro passa basso è quello di bloccare delle sequenze elettroniche, filtrando e lasciando passare solamente quelle basse.

Osserviamo la funzione di trasferimento del filtro passa basso:

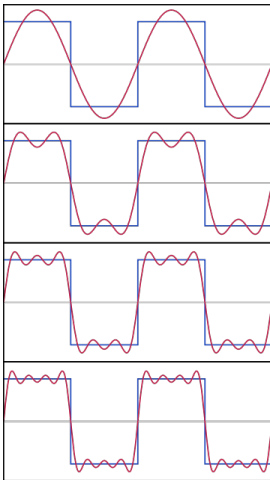


La funzione di trasferimento del filtro passa basso mi comunica quali segnali possono passare e quali invece vengono attenuati.

Al di sotto della cosiddetta frequenza di taglio il filtro passa basso fa passare il segnale senza attenuarlo. Al di sopra lo attenua fino a bloccare alcune frequenze.

Quindi abbiamo in ingresso l'onda quadra, che noi abbiamo visto come somma di varie sinusoidi. All'uscita, quindi ai capi del condensatore, alcune sinusoidi verranno bloccate (tutte quelle con frequenza superiore alla frequenza di taglio del circuito).

Dunque l'onda cambierà un po' la sua forma e diventerà proprio come quella che abbiamo visto all'oscilloscopio.



Conclusioni

Grazie a questa esperienza abbiamo potuto osservare la fase di carica e scarica di un condensatore mettendo in pratica la teoria precedentemente studiata, visualizzando il segnale ai capi del condensatore attraverso l'oscilloscopio.

Inoltre abbiamo sperimentato alcuni strumenti mai usati prima d'ora: Arduino e l'oscilloscopio, e ne abbiamo compreso il funzionamento e le loro applicazioni.

Dunque ora possiamo passare alla seconda parte l'esperienza, dove verificheremo quantitativamente la legge di Malus.

Verifica quantitativa della legge di Malus.

Materiale utilizzato:

- Banco ottico
- Laser rosso
- Filtro polarizzatore
- Lente convergente
- Fotodiodo
- Luxmetro

Anche in questo caso, prima di procedere con l'esperienza, occorre definire il funzionamento del materiale utilizzato, e chiarire il significato di legge di Malus, in quanto lo scopo del nostro esperimento sarà proprio quello di verificarla quantitativamente.

Avendo sperimentato più volte con il banco ottico, con la lente convergente e il laser, possiamo evitare di illustrarne il componimento e le loro funzioni.

Filtro polarizzatore

Il filtro polarizzatore sarà lo strumento essenziale per riuscire a verificare quantitativamente la legge di Malus.

Si tratta di uno strumento ottico in grado di polarizzare la luce visibile, ovvero di "filtrare", e quindi di lasciar passare, solo la luce in cui il campo elettromagnetico vibra in un ben determinato piano, parallelo all'asse *ottico* del filtro e detto *piano di polarizzazione*. La sua direzione è variabile facendo ruotare un'apposita levetta bianca lungo il bordo.

Un esempio di filtro polarizzatore commerciale è un filtro Polaroid, il quale impedisce il passaggio delle onde luminose riflesse dall'acqua o da altre superfici.



Fotodiodo

In elettronica il fotodiodo è un particolare tipo di diodo fotorivelatore che funziona come sensore ottico sfruttando l'effetto fotovoltaico, in grado cioè di riconoscere una determinata lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica incidente e di trasformare questo evento in un segnale elettrico di corrente applicando ai suoi estremi un potenziale elettrico.

Esso funge da trasduttore da un segnale ottico ad un segnale elettrico.



Luxmetro

Il luxmetro è uno strumento digitale utilizzato per misurare l'illuminazione: esso contiene una cella fotovoltaica che produce una corrente elettrica, misurata da un galvanometro. L'Unità di misura dell'illuminamento, cioè del flusso luminoso per unità di superficie (lumen al metro quadrato) è il lux.

La luce diurna del Sole generalmente varia tra i 32.000 e i 100.000 lux.



Legge di Malus

La legge di Malus, prende il nome dal fisico francese Étienne-Louis Malus che la formulò dopo aver studiato i fenomeni di riflessione, rifrazione e birifrazione, scoprendo nel 1809 il fenomeno della polarizzazione della luce per riflessione.

Questa legge afferma che l'intensità luminosa di un raggio di luce che attraversa un filtro polarizzatore, il cui asse di polarizzazione forma un angolo θ_i con il piano di vibrazione dell'onda luminosa, è dato dalla relazione:

$$I = I_0 \cos^2 \theta_i$$

Dove I è l'intensità in uscita dal filtro, I_0 è l'intensità in entrata e θ_i è l'angolo tra l'asse di trasmissione e il piano di vibrazione del campo elettrico.

Questa legge si ricava osservando che l'intensità dell'onda dipende dal quadrato della sua ampiezza, nel caso dell'onda luminosa il campo elettrico E . Il filtro polarizzatore viene attraversato solo dalla componente del campo parallela all'asse di polarizzazione.

Quindi **l'intensità dipende dal quadrato del coseno dell'angolo θ_i** e nel caso di un raggio non polarizzato che attraversa un filtro polarizzatore, l'intensità in uscita è:

$$I = \frac{1}{2} I_0$$

Chiariti questi concetti fondamentali, possiamo passare all'esecuzione dell'esperienza, mostrando il modo in cui abbiamo assemblato il banco ottico e disposto i vari strumenti.

Esecuzione dell'esperienza

Prima di tutto abbiamo posizionato davanti ad un laser rosso sul banco ottico, un filtro polarizzatore come quello spiegato precedentemente, una lente convergente e infine un fotodiodo collegato al luxmetro.



Laser rosso

Filtro polarizzatore

Lente convergente

Foto diodo

Luxmetro

In seguito abbiamo eseguito il cosiddetto allineamento ottico: abbiamo posizionato il laser rosso in modo tale che il fascio laser arrivasse esattamente al centro del fotodiodo, il quale ha un centro di acquisizione, ovvero la parte sensibile dove il laser deve incidere direttamente, altrimenti perderemmo parte dell'intensità del fascio. Il fotodiodo convertirà il segnale luminoso, cioè l'intensità luminosa, in un segnale di tensione.

In questo modo saremo in grado di cercare la polarizzazione del laser, poiché un'onda elettromagnetica oscilla in un piano che è la sua direzione di polarizzazione. Noi inizialmente non conosciamo il modo in cui il laser è polarizzato, ma possiamo affermare che la polarizzazione potrà essere di due tipi: S o P. Quindi orizzontale, parallela al banco, oppure verticale rispetto al banco.

Già prima di iniziare con l'esperimento, abbiamo riscontrato alcuni errori che potrebbero determinare la mal riuscita della verifica quantitativa della legge di Malus.

Infatti abbiamo notato che il luxmetro segnava sempre un certo valore, 5380 lux circa. Coprendo il laser con la mano, il valore si abbassava intorno ai 100 lux ma mai a zero. Questo perché nel laboratorio c'erano altre luci: la luce artificiale del laboratorio, la luce proveniente dalle finestre, e anche quella che riflette il banco.

Procedendo abbiamo posto l'asse ottico del polarizzatore a zero gradi, ma in quanto ci sono errori di montaggio dal punto di vista meccanico del polarizzatore, l'asse ottico risulta sfasato rispetto la scala graduata.



Con un angolo θ di zero gradi, il luxmetro collegato al fotodiodo indicava all'incirca 5240 lux.

L'angolo θ è l'angolo formato tra la direzione di polarizzazione dell'asse e dell'asse ottico, ma in quanto noi non conosciamo la polarizzazione del filtro, è più preciso affermare che θ è l'angolo che forma l'indicatore bianco del filtro polarizzatore.

Successivamente cambiando l'inclinazione di 15° il luxmetro segnava 6975 lux.

A 30° il valore oscillava attorno ai 7300 lux.

Il problema dell'oscillazione deriva oltre che dall'interferenza creata dalle altre luci, anche dall'interferenza dovuta al rumore elettronico, essendo la strumentazione da noi usata elettronica.

A 45° abbiamo osservato che il luxmetro segnava 7000 lux, dunque il valore era diminuito.

A 60° il valore era passato a 5714 lux, dunque più andavamo avanti più l'intensità diminuiva. Ciò significa che avevamo già trovato il massimo ma non dobbiamo trarre una conclusione affrettata: non significa che poiché a 30° abbiamo assistito al picco, il laser è polarizzato a 30° gradi, questo perché come abbiamo detto precedentemente la polarizzazione può essere S o P.

Dal momento che c'è stato un errore dal punto di vista meccanico, in quanto il polarizzatore era stato montato con l'asse ottico **scalzato** rispetto l'asse graduata, ed

essendo il laser polarizzato S, se raggiungo il picco a 30° , significa che in realtà si trovava a zero gradi. Quindi sarà necessario diminuire tutti gli angoli di 30° .

Procedendo, a 75° il luxmetro segnava 3985 lux, e a 90° ne segnava 2183.

Essendo il laser polarizzato orizzontalmente rispetto al piano, avremmo dovuto ottenere zero. Ciò non è accaduto per gli errori citati in precedenza e per errori trascurabili quali la sensibilità della scala graduata e l'errore di parallasse nel leggere i gradi.

A 105° abbiamo registrato un valore di 770 lux, e a 120° di 120 lux.

Essendo l'angolo di sfasamento di 30° , l'angolo in realtà non è di 120° ma di 90° , dunque verrà registrato il valore minimo.

Ponendo una scatola di cartone sopra il fotodiodo per ridurre il disturbo creato dalle luci esterne, il minimo è sceso a 82 lux, e spegnendo la luce del laboratorio a 61 lux anche se a causa della luce emanata dal computer il valore oscillava fra i 61 e i 65 lux.

A 135° ha iniziato a risalire a 508 lux, a 150° a 1875 lux, a 180° il luxmetro segnava 4040 lux.

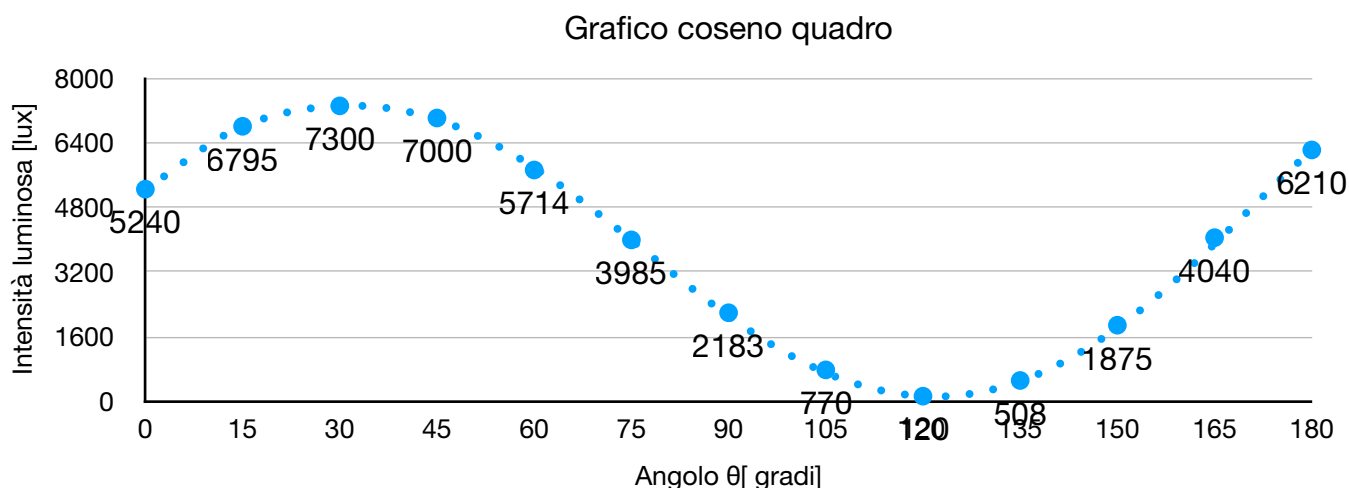
Ora inseriamo in una tabella tutti i dati registrati.

θ	lux
0°	5240
15°	6975
30°	7300
45°	7000
60°	5714
75°	3985
90°	2183
105°	770
120°	120
135°	508
150°	1875
165°	4040
180°	6210

Per verificare la legge di Malus, inserendo i valori in un grafico, dovremmo ottenere un grafico coseno quadrato, senza nessuna traslazione rispetto l'asse delle y, quindi senza nessun offset.

Noi invece otterremo sommato al segnale della legge di Malus, un offset. Questo a causa dei numerosi errori che hanno accompagnato l'esperimento.

Inserendo i valori degli angoli lungo l'asse dell'ex, e quelli dell'intensità luminosa sull'asse delle y, ecco il grafico che otterremo:



Come avevamo previsto, il punto massimo risulta essere a 30° , ma come detto in precedenza, l'angolo di sfasamento è proprio di 30° , quindi il nostro angolo andrebbe diminuito di **30**, e otterremmo proprio zero gradi.

Il minimo, sarebbe a 90° , ma dal grafico risulta essere a 120° .

Ripetendo lo stesso passaggio di prima, sottraiamo 30 a 120 e otteniamo esattamente 90° .

Conclusioni

Grazie a questa esperienza abbiamo compreso il significato di legge di **Malthus**, provando a verificarla sperimentalmente.

Nonostante i vari errori citati in precedenza quali, l'interferenza causata dalle altre luci presenti nell'ambiente, l'errore di montaggio dell'asse ottico del polarizzatore, e i vari errori di parallasse, l'esito dell'esperienza è comunque positivo.

Infatti se non ci fosse stato l'errore di montaggio del polarizzatore, noi avremmo ottenuto un grafico coseno quadrato perfetto.

Infatti l'intensità massima sarebbe risultata a zero gradi, mentre quella minima a 90° .

Quindi complessivamente possiamo dire lo stesso di aver verificato quantitativamente la legge di Malus, mettendo in pratica ciò che avevamo precedentemente studiato nella teoria.