

LaurTec

PWM
Pulse Width Modulation

Autore : *Mauro Laurenti*

email: info.laurtec@gmail.com

ID: AN4006-IT

INFORMATIVA

Come prescritto dall'art. 1, comma 1, della legge 21 maggio 2004 n.128, l'autore avvisa di aver assolto, per la seguente opera dell'ingegno, a tutti gli obblighi della legge 22 Aprile del 1941 n. 633, sulla tutela del diritto d'autore.

Tutti i diritti di questa opera sono riservati. Ogni riproduzione ed ogni altra forma di diffusione al pubblico dell'opera, o parte di essa, senza un'autorizzazione scritta dell'autore, rappresenta una violazione della legge che tutela il diritto d'autore, in particolare non ne è consentito un utilizzo per trarne profitto.

La mancata osservanza della legge 22 Aprile del 1941 n. 633 è perseguibile con la reclusione o sanzione pecuniaria, come descritto al Titolo III, Capo III, Sezione II.

A norma dell'art. 70 è comunque consentito, per scopi di critica o discussione, il riassunto e la citazione, accompagnati dalla menzione del titolo dell'opera e dal nome dell'autore.

AVVERTENZE

I progetti presentati non hanno la certificazione CE, quindi non possono essere utilizzati per scopi commerciali nella Comunità Economica Europea.

Chiunque decida di far uso delle nozioni riportate nella seguente opera o decida di realizzare i circuiti proposti, è tenuto pertanto a prestare la massima attenzione in osservanza alle normative in vigore sulla sicurezza.

L'autore declina ogni responsabilità per eventuali danni causati a persone, animali o cose derivante dall'utilizzo diretto o indiretto del materiale, dei dispositivi o del software presentati nella seguente opera.

Si fa inoltre presente che quanto riportato viene fornito così com'è, a solo scopo didattico e formativo, senza garanzia alcuna della sua correttezza.

L'autore ringrazia anticipatamente per la segnalazione di ogni errore.

Tutti i marchi citati in quest'opera sono dei rispettivi proprietari.

Introduzione

Il PWM è una sigla frequentemente utilizzata laddove si faccia uso di un microcontrollore che debba interfacciarsi in maniera “analogica” con il mondo esterno o sia necessario il controllo di un motore DC o passo passo. In questo Tutorial, dopo una spiegazione su come generare un segnale PWM, verrà introdotta la tecnica di utilizzo del PWM per ottenere un semplice convertitore digitale analogico e un sistema di controllo della velocità e direzione per motori DC.

PWM, uno sguardo d'insieme

Il PWM (Pulse Width Modulation) è una tecnica di modulazione ottenuta variando la larghezza di un impulso. Questo tipo di modulazione rientra nelle tecniche di modulazione digitali.

Dal momento che l'informazione non è legata all'ampiezza dell'impulso ma alla sua larghezza, si ha una maggiore immunità al rumore.

Tra i parametri caratteristici degli impulsi PWM c'è il periodo T , che rimane costante, e il duty cycle d , che viene variato durante la modulazione.

Il periodo T rappresenta l'intervallo di tempo che intercorre tra un impulso e l'altro, mentre il duty cycle quantifica l'ampiezza dell'impulso in rapporto al periodo, quindi

$$d = \frac{T_{ON}}{T}$$

T_{ON} rappresenta il tempo che l'impulso rimane a livello alto. Si capisce che T_{ON} risulterà sempre minore o uguale al periodo.

Frequentemente il duty cycle viene espresso in percentuale.

$$d = \frac{T_{ON}}{T} \cdot 100$$

In Figura 1 è possibile vedere diversi impulsi di ugual periodo ma con diverso duty cycle.

Nel caso il segnale PWM venga generato per mezzo di microcontrollori, un altro parametro caratteristico è rappresentato dal numero di bit con il quale viene generato. Se per esempio il

numero di bit è 8, il periodo T verrà suddiviso in 256 intervalli. La durata di un intervallo è calcolata facendo il rapporto tra il periodo T e il numero di intervalli.

Per mezzo del periodo si ricava la frequenza che caratterizza il segnale PWM attraverso il seguente calcolo :

$$f = \frac{1}{T}$$

generalmente le frequenze utilizzate vanno da 1KHz a 200KHz.

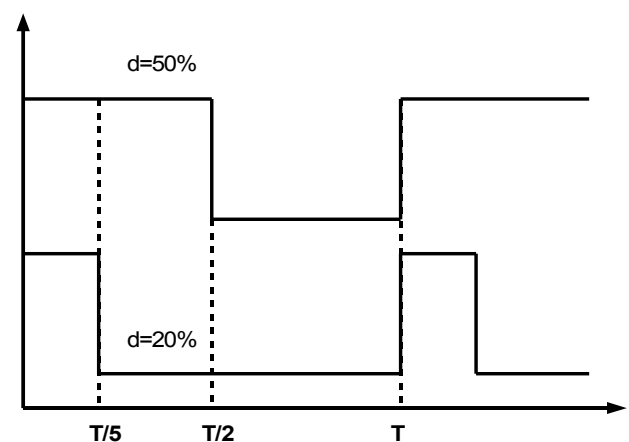


Figura 1: Impulsi con ugual periodo ma diverso duty cycle.

Una semplice tecnica per realizzare un segnale PWM è per confronto con un segnale triangolare.

Se per esempio il segnale che si vuole modulare è una sinusoide a frequenza f_0 la frequenza minima che dovrà avere il segnale triangolare sarà almeno doppia, ovvero dovrà essere maggiore o al più uguale a $2f_0$. In Figura 2 è riportato il segnale PWM, relativo ad una sinusoide, ottenuto per mezzo della tecnica del confronto con un segnale a dente di sega.

In particolare il segnale PWM è alto quando l'onda sinusoidale è maggiore dell'onda triangolare.

Se si dovesse trasmettere su di una linea direttamente il segnale sinusoidale, questo sarebbe soggetto, come ogni altro segnale, al rumore. Un segnale la cui informazione sia legata all'ampiezza è più soggetto alla perdita di informazione.

Con la tecnica PWM, sempre che il rumore non

sia tale da cambiare il livello logico da 0-1 o da 1-0, si ha che il segnale non perde alcuna informazione.

Dalla Figura 2 è possibile notare che, al fine di non perdere informazione legate all'ampiezza della sinusoide è necessario che il segnale a dente di sega abbia un valore massimo non inferiore all'ampiezza massima della sinusoide che si dovrà modulare.

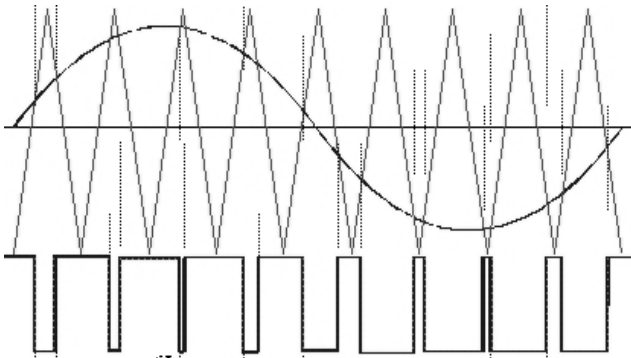


Figura 2: Segnale PWM di una sinusoide, ottenuto per confronto con un segnale triangolare

La potenza che si dissipa su un carico resistivo è pari al prodotto della tensione ai suoi capi per la corrente che l'attraversa¹. Da semplici considerazioni si capisce che, un segnale PWM, oltre che per modulare un segnale, può essere sfruttato per regolare la potenza che si trasmette ad un carico. Infatti variando l'ampiezza dell'impulso si trasmetterà più o meno potenza al carico. In particolare si capisce che la potenza viene trasferita quando si ha una tensione diversa da 0V.

Il carico può essere rappresentato da una lampadina o un motore o qualsivoglia dispositivo compatibile con un'alimentazione impulsiva. Nel caso di un carico quale una lampadina gli effetti della variazione del duty cycle si ripercuotono su una variazione d'intensità luminosa. In particolare l'intensità aumenterà all'aumentare del duty cycle.

In questo caso la frequenza minima del segnale PWM può essere anche inferiore di 1KHz, ma deve comunque essere sufficientemente alta da evitare il tremolio della luce. Eventuali tremolii si hanno per intensità luminose più basse.

Nel caso in cui il carico sia un motore, sarà

possibile regolare la sua velocità. In questo caso frequenze troppo basse possono causare l'impossibilità di girare correttamente.

PWM e convertitore digitale-analogico

Si è detto che la tecnica PWM rappresenta un tipo di modulazione. Come per ogni altra tecnica di modulazione di segnali non avrebbe senso se non fosse possibile risalire all'informazione originale.

In particolare per riottenere il segnale originale è necessario far passare il segnale PWM, che si è ricevuto, attraverso un filtro passa basso.

Le ragioni di questo filtraggio vanno ricercate nello spettro del segnale PWM stesso. In Figura 3 è riportato uno spettro di un segnale PWM alla frequenza f_0 .

E' possibile osservare che prima dell'armonica a frequenza f_0 è presente l'informazione che si voleva trasmettere. Per tale ragione la frequenza di trasmissione PWM deve essere sempre maggiore alla massima frequenza contenuta nell'informazione. E' inoltre possibile osservare che sono presenti anche altre armoniche con frequenza multipla a f_0 . Queste sono legate alla forma ad onda rettangolare del segnale PWM.

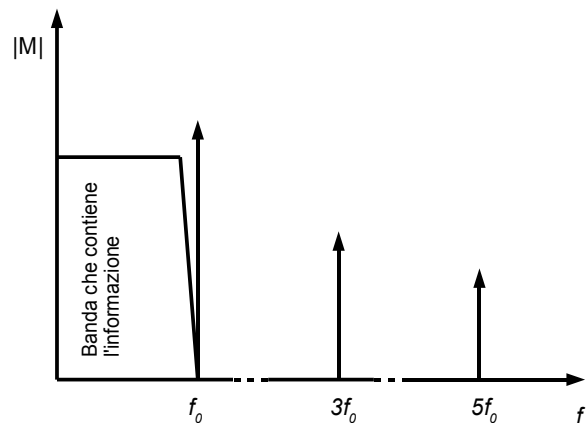


Figura 3: Spettro di un segnale PWM alla frequenza f_0

Dalla Figura 3, si capisce dunque, che se si fa passare il segnale PWM attraverso un filtro passa basso con frequenza legata alla banda in cui è contenuta la nostra informazione, ma certamente inferiore a f_0 , è possibile risalire al segnale originale.

Da quanto esposto si capisce che se un

¹ Per maggiori informazioni si veda il Tutorial "Leggi ed applicazioni fondamentali dell'elettrotecnica".

segnale analogico venisse convertito in digitale e memorizzato all'interno di una memoria, per mezzo della modulazione PWM e di un filtro passa basso, sarebbe possibile effettuare una conversione digitale analogica senza dover far uso necessariamente di un convertitore digitale analogico. Questo significa che nel caso dei PIC, qualora il modello abbia l'hardware per generare un segnale PWM, sarà possibile utilizzare quest'ultimo, assieme ad un filtro passa basso, in veste di convertitore digitale analogico. Qualora il microcontrollore non abbia l'hardware necessario si potrà comunque provvedere a generare un segnale PWM via software.

Il vantaggio di utilizzare un eventuale hardware sta nel fatto che quest'ultimo, una volta impostato, può lavorare indipendentemente dal resto delle periferiche interne al microcontrollore stesso. Questo si traduce nella possibilità di sfruttare quel tempo nella gestione di altri processi d'interesse o comunque semplificare il software.

Vediamo alcune considerazioni per dimensionare il filtro passa basso.

Se per esempio segnale da modulare con il PWM fosse un segnale telefonico, si avrebbe che la frequenza massima sarebbe circa 4KHz^2 .

Per quanto visto in Figura 2 si avrebbe che la frequenza del PWM potrebbe essere impostata a 4KHz . Se così si facesse il filtro passa basso che bisognerebbe realizzare dovrebbe essere ideale, ovvero con i fronti verticali (non realizzabile). Per semplificare la costruzione del filtro è bene che la frequenza del segnale PWM sia almeno 5 volte maggiore.

Anche in questo caso ci saranno degli effetti di disturbo sulla nostra informazione legati alla presenza dell'armonica f_0 e superiori.

Per limitare il disturbo, che comunque si può quantificare a priori, è possibile far uso di filtri più complessi di una semplice resistenza e capacità (filtro del primo ordine). Altra possibile scelta, qualora si voglia realizzare un filtro semplice e l'Hardware lo permetta, è quello di aumentare ulteriormente la frequenza del segnale PWM.

² Per ragioni legate alla potenza necessaria per la trasmissione e per semplificare i filtri, la banda telefonica è in realtà compresa tra 300Hz e 3600Hz .

Un semplice esempio con filtro del primo ordine è riportato in Figura 4.

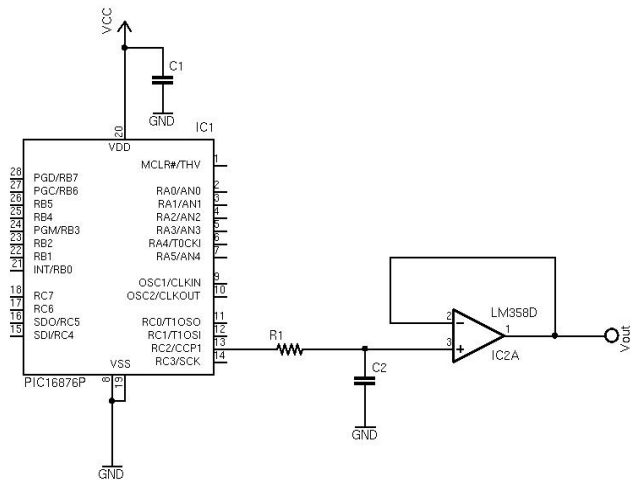


Figura 4: Schema applicativo di un convertitore digitale-analogico

La presenza del buffer di tensione³ è fondamentale nel caso in cui si voglia pilotare un carico a bassa impedenza come un altoparlante⁴. Questo poiché l'impedenza dell'altoparlante influenzerebbe la risposta in frequenza del filtro stesso. Se il carico dovesse essere ad alta impedenza, come per esempio un amplificatore, che al suo interno possiede generalmente un buffer di tensione, il buffer riportato in Figura 4 può essere omesso.

In ultimo si ricorda che la frequenza di taglio del filtro RC (Resistenza-Condensatore) è calcolabile come :

$$f_T = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot RC}$$

La frequenza di taglio è generalmente nota a priori, per esempio in applicazioni telefoniche è 4KHz , in uscita dalla sound blaster del PC dipende dall'impostazione della scheda⁵, ma sarà

³ Il buffer è rappresentato dall'operazionale in configurazione non invertente e a guadagno unitario.

⁴ Sarà comunque necessario l'adattamento dell'impedenza.

⁵ La frequenza massima sarà non superiore alla metà della frequenza di campionamento della scheda sonora. In riproduzione si imposta automaticamente a seconda della modalità di registrazione del file che si sta riproducendo.

nota.

Quindi per il dimensionamento del filtro si procede fissando prima in maniera arbitraria⁶ un valore della capacità, visto che sono presenti meno disponibilità di valori. La resistenza necessaria si calcola con la seguente relazione :

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot C}$$

Nel caso in cui la resistenza non sia un valore commerciale, ed è richiesta una certa accuratezza nella frequenza di taglio, è bene far uso di un trimmer, da impostare al valore calcolato.

PWM per il controllo dei motori DC

Un segnale PWM può essere utilizzato per controllare un motore DC in modalità ON-OFF⁷ o anche per mezzo di un ponte H.

La corrente che scorre all'interno del motore risulta proporzionale al duty cycle. In particolare questa risulta avere un valore costante⁸ legato al fatto che il carico è induttivo. Questo significa che può immagazzinare l'energia che farà scorrere la corrente attraverso il motore, anche quando il livello del segnale PWM sarà 0.

Nel caso non si faccia uso di un microcontrollore per generare il segnale PWM è possibile far uso di dello schema di principio riportato in Figura 5 per realizzarne uno.

In particolare il generatore d'onda quadra, la cui frequenza potrà essere di qualche KHz, può essere ottenuta per mezzo del multivibratore NE555⁹ o se si fa uso di un integrato con 4 operazionali, sarà possibile creare anche un multivibratore astabile oltre che le altre operazioni di cui si parlerà.

L'uscita del generatore ad onda quadra è collegata ad un filtro passa basso. Questo filtro, matematicamente parlando, svolge l'integrale del segnale al suo ingresso¹⁰. Questo significa che alla sua uscita sarà presente un'onda triangolare. La resistenza in parallelo alla capacità evita che le correnti di polarizzazioni degli ingressi dell'operazionale possano caricare quest'ultima facendo saturare l'uscita.

Il filtro passa basso deve avere la frequenza di taglio pari almeno a quella della dell'onda quadra generata.

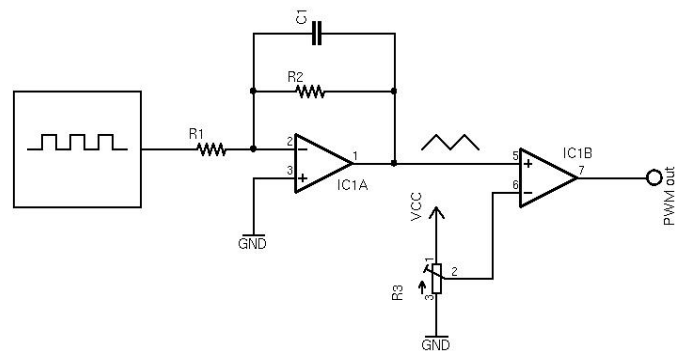


Figura 5: Schema di principio per generare un segnale PWM

Il dimensionamento di questo filtro è identico a quello presentato in Figura 4 , pur avendo un'altra configurazione¹¹.

Il segnale triangolare ottenuto viene posto in ingresso ad un comparatore, che provvede a confrontare questo segnale con uno di riferimento, variabile per mezzo di un potenziometro¹².

In particolare il segnale in uscita al comparatore sarà alto quando l'ampiezza del segnale a dente di sega risulterà maggiore del segnale di riferimento. Questo significa che maggiore sarà il segnale di riferimento minore risulterà il duty cycle.

Il segnale PWM così generato può essere

⁶ Pur essendo arbitraria, in realtà, la frequenza di taglio rappresenta un indice da considerare nella scelta. Si pensi ad esempio al limite che i condensatori elettrolitici hanno alle alte frequenze.

⁷ Lo schema elettrico è quello ON-OFF, ma facendo uso di un segnale PWM sarà comunque possibile regolare la velocità di rotazione, ma non il verso.

⁸ In realtà l'andamento è seghettato. La frequenza del segnale a dente di sega, con un certo valore medio, è legata alla frequenza del segnale PWM.

⁹ L'NE555 può essere utilizzato anche da solo per ottenere un semplice generatore PWM.

¹⁰ Il filtro passa alto matematicamente svolge la derivata, dunque alla sua uscita, nel caso in ingresso sia presente un'onda quadra, si avranno due impulsi in corrispondenza dei fronti di salita e di discesa. Nel fronte di salita si avrà un impulso positivo mentre sul fronte di discesa si avrà un impulso negativo.

¹¹ Anche questo filtro è del primo ordine, quindi ha un'attenuazione di 20dB/dec.

¹² Per mezzo del potenziometro si regola il duty cycle del segnale PWM.

utilizzato per pilotare lo stadio di potenza che controllerà il motore.

Come detto, lo stadio di potenza, può essere per un semplice controllo ON-OFF ad un solo FET, come riportato in Figura 6.

La presenza del diodo è necessaria per proteggere il transistor da i picchi di extratensione generati dal carico induttivo, ovvero il motore. Questo significa che in presenza di una lampadina il diodo non è necessario.

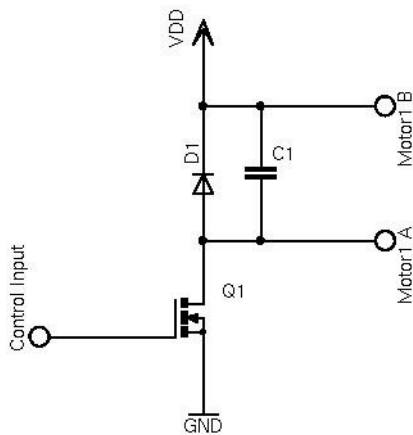


Figura 6: Controllo ON-OFF di un motore DC

Il diodo deve essere di tipo fast (veloce), tipo quelli utilizzati negli alimentatori switching. Inoltre la corrente che devono essere in grado di sopportare deve essere almeno pari a quella che scorrerà attraverso il motore. Quindi se si utilizza un motore che assorbe 1A sarà necessario almeno un diodo faster da 1A. Si fa presente che i classici diodi 1N4001-1N4007 non sono sufficientemente veloci per tali applicazioni.

La capacità serve per ridurre la possibilità di interferenza elettromagnetica con altri apparati elettronici, dovuta alla presenza delle scintille sulle spazzole interne al motore o a rapide variazioni di correnti.

Analogamente, anche il FET deve essere in grado di sopportare una corrente di drain¹³ pari a quella del motore. Per ragioni di sicurezza, è comunque meglio scegliere componenti che sopportano correnti pari al doppio della corrente del motore, sia per il diodo che per il FET. Con

¹³ Nel caso si utilizzi un transistor BJT, la corrente di drain si traduce nella corrente di collettore I_C .

la configurazione ad un solo transistor il motore o starà fermo o girerà ad una velocità proporzionale al duty cycle, ma comunque in un solo verso.

Se è richiesta la possibilità di controllare anche il verso di rotazione sarà necessario l'utilizzo di un ponte H o sue varianti.

In Figura Errore: sorgente del riferimento non trovata⁷ è riportato lo schema elettrico che fa uso dell'integrato L298, che al suo interno possiede due ponti H da 2A l'uno¹⁴. In particolare è riportato lo schema interno di un solo ponte H. La parte dello schema racchiusa nel rettangolo rappresenta l'insieme dei componenti interni all'integrato L298. Si ricorda che a seconda di quale coppia di transistor sia in conduzione il motore girerà in un verso oppure nell'altro. Per mezzo delle due porte NOT esterne, le due coppie di transistor che permettono la rotazione in un verso o nell'altro saranno alternativamente attivate dal segnale PWM. Infatti questo avrà valori 0 o 1, dunque I1 e I2 avranno alternativamente un valore logico in ingresso pari a 0 o 1.

Questo comporta che quando il duty cycle sarà del 50% il motore rimarrà fermo; è come quando si fa un salto in avanti e uno indietro...la posizione non cambia. Se il duty cycle è maggiore del 50% il motore girerà in un verso, mentre se è minore del 50% girerà nell'altro. Tale tecnica può risultare comoda se non si vuole far uso di eccessive linee di controllo.

Utilizzando un multiplexer¹⁵ è possibile deviare il segnale PWM solo sull'ingresso I1 o I2, attivando dunque una sola coppia di transistor alla volta. In questo modo si ricadrebbe in caso simile alla modalità ON-OFF ma con la possibilità di controllare anche la direzione oltre alla velocità.

¹⁴ I due ponti H possono essere collegati in parallelo per ottenere un ponte H da 4A. I diodi di protezione dovranno essere adeguati all'esigenza di progetto.

¹⁵ Il multiplexer dovrà essere controllato da un opportuno segnale che avrà il compito di impostare la direzione di rotazione.

