

ANNO SCOLASTICO 2016-2017
ESAME DI STATO DI ISTRUZIONE SECONDARIA SUPERIORE
Indirizzo: ITEC – ELETTROROTECNICA ED ELETTRONICA
ARTICOLAZIONE ELETTRONICA

Tema di: SISTEMI AUTOMATICI

Il candidato svolga la prima parte della prova e due tra i quesiti proposti nella seconda parte.

PRIMA PARTE

Una rete sperimentale per la rilevazione della fase *strong motion* dei terremoti, il cui campo di frequenze significative è compreso tra 0,03 Hz e 25 Hz, funziona utilizzando sismometri sia mobili che fissi: i sistemi mobili si avvalgono degli accelerometri interni degli smartphone, quelli fissi sono realizzati come dispositivi dedicati controllati da un sistema programmabile.

In entrambi i casi, al superamento di un valore di soglia dell'accelerazione rilevata α_{TH} pari a $g/20$ (con $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ accelerazione di gravità) viene inviato un segnale di allarme ad un server centrale: sulla rete cellulare per gli smartphone o mediante la rete internet, avvalendosi di una apposita periferica dedicata, per i sistemi fissi.

Ogni sismometro fisso utilizza un accelerometro triassiale che fornisce tre diverse tensioni secondo i tre assi direzionali

$$V_j = K \cdot a_j + 1,5 \text{ con } j = x, y, z$$

essendo:

a_j = accelerazione lungo il generico asse spaziale j

$K = 300 \text{ mV/g}$ sensibilità del sensore

Le modalità di intervento dei sistemi fissi sono così strutturate:

- a partire dall'istante in cui il modulo dell'accelerazione ($\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$) supera il valore di soglia α_{TH} si invia la segnalazione di allarme al server remoto e si inizia la trasmissione di record, la cui struttura è riportata nella seguente tabella:

Codice sismometro (2 byte)	Time Stamp (2 byte)	a_x (2 byte)	a_y (2 byte)	a_z (2 byte)
-------------------------------	------------------------	-------------------	-------------------	-------------------

(I primi due campi riportano, rispettivamente, le coordinate per la localizzazione del sismometro e l'identificativo temporale (Time Stamp) dei campioni inviati; i restanti tre campi contengono i valori delle tre componenti spaziali dell'accelerazione)

- se α supera un valore pari al 125% di α_{TH} si attivano segnalazioni ottiche e acustiche;
- al superamento del 150% di α_{TH} si interrompono le forniture di gas e acqua mediante due elettrovalvole nonché la fornitura dell'energia elettrica mediante un dispositivo di sezionamento;
- la trasmissione dei dati viene interrotta se il modulo dell'accelerazione si riduce, per almeno 100 campionamenti successivi, a un valore inferiore al 10% di α_{TH} .

Il sistema si completa con due pulsanti U e D, gestiti in polling, mediante i quali si può incrementare (U) o ridurre (D) il valore di soglia αTH .

Sono inoltre presenti relè di potenza per attivare l'avvisatore acustico e il segnalatore ottico e per disconnettere la fornitura dei servizi.

Il candidato, formulate le ipotesi aggiuntive che ritiene opportune:

1. Disegni uno schema a blocchi, che utilizzi un dispositivo programmabile di sua conoscenza, del sismometro e descriva i singoli blocchi dal punto di vista funzionale, evidenziando in particolare le modalità di interconnessione tra periferiche e sistema di gestione.
2. Descriva le interfacce hardware necessarie alla corretta acquisizione dei dati provenienti dall'accelerometro, evidenziando in particolar modo le problematiche connesse al campionamento e le tecniche utilizzate per limitare l'effetto dell'aliasing.
3. Indichi, mediante un diagramma di flusso dettagliato o altra rappresentazione idonea, la struttura del software di gestione dell'intero processo.
4. Effettui, in un linguaggio di programmazione coerente con il sistema programmabile scelto, la codifica del segmento di software di gestione che controlla l'acquisizione dei dati provenienti dall'accelerometro e l'attivazione dei relè.

SECONDA PARTE

QUESITO 1

In relazione alla prima parte della prova, si descriva una modifica del sistema che consenta la gestione dei pulsanti U e D con una tecnica di *interrupt* utilizzabile con il sistema programmabile scelto e si specifichino le variazioni da apportare al software precedentemente sviluppato.

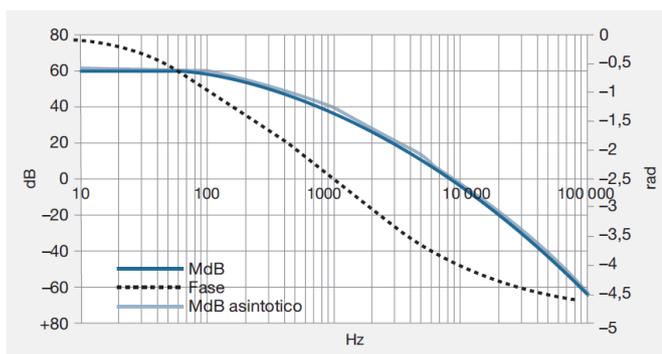
QUESITO 2

In relazione alla prima parte della prova, si descriva una possibile modalità per l'acquisizione dei dati provenienti dai sensori, indicando le modifiche da apportare all'hardware ed al software del sistema, nel caso in cui questi producano dati digitali e comunichino, a scelta del progettista, mediante una delle interfacce seriali SPI o I²C.

QUESITO 3

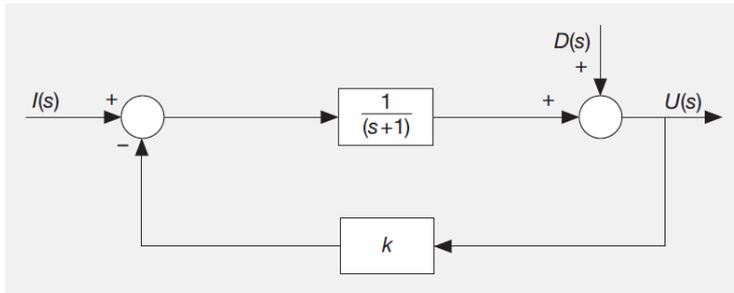
Un sistema di controllo a retroazione è caratterizzato dai diagrammi di Bode ad anello aperto riportati in figura.

Si valuti la stabilità del sistema e si proponga una tecnica idonea per assicurare un margine di fase di $\pi/4$ rad e una banda non inferiore a 1 kHz.



QUESITO 4

Si consideri il sistema rappresentato in figura e si determini il range dei valori possibili di k per i quali l'ampiezza di un disturbo additivo $d(t)$, di natura sinusoidale con pulsazione $\omega=1$ rad/s, venga ridotta di almeno 14 dB rispetto al suo valore originario.



soluzione PRIMA PARTE

Il termine *Strong Motion* identifica il moto sismico che caratterizza terremoti di varia intensità, siano essi deboli o forti.

Le onde sismiche sono rilevabili e misurabili attraverso particolari strumenti detti sismografi, usati comunemente dai sismologi, e visualizzabili sui sismogrammi.

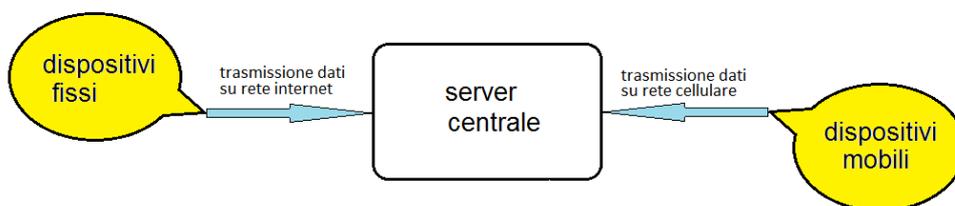
L'elaborazione incrociata dei dati di più sismografi sparsi su un territorio ad una certa distanza dal sisma consente di stimare in maniera abbastanza accurata l'epicentro, l'ipocentro e l'intensità del sisma.

Lo spostamento tettonico della crosta terrestre nelle tre coordinate spaziali in seguito a un forte terremoto può essere misurato accuratamente attraverso tecniche di telerilevamento quali le rilevazioni geodetiche e l'interferometria radar-satellitare tramite SAR nell'intera area colpita a partire dall'epicentro.

Per *Strong Motion Record* si intende la registrazione del moto sismico ottenuta da uno strumento accelerometrico.

1_Schema a blocchi del sistema

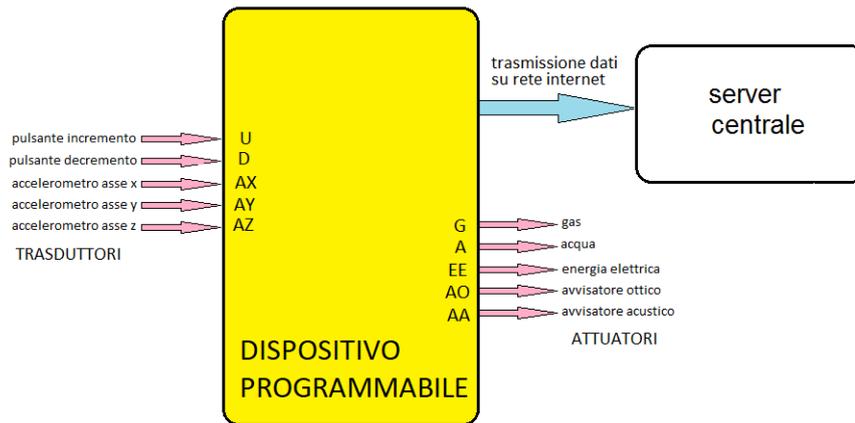
I dispositivi mobili e fissi trasmettono i dati al server centrale come schematizzato nella figura di seguito riportata.



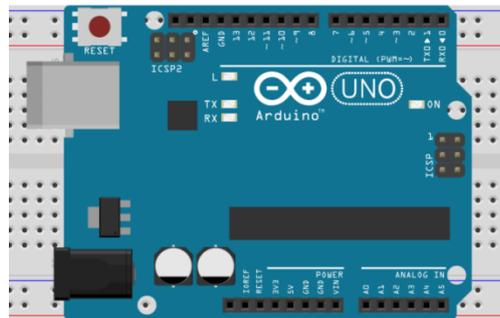
I dispositivi fissi sono dotati di un dispositivo programmabile che acquisisce i dati provenienti dagli ingressi del sistema (forniti dall'accelerometro e dai pulsanti), li elabora e li invia al server centrale.

Inoltre il dispositivo agisce sui dispositivi attuatori (i relè di potenza che interrompono i servizi o emettono gli allarmi acustico e ottico).

Indipendentemente dal sistema programmabile utilizzato lo schema a blocchi di seguito riportato mostra gli ingressi e le uscite del sistema.



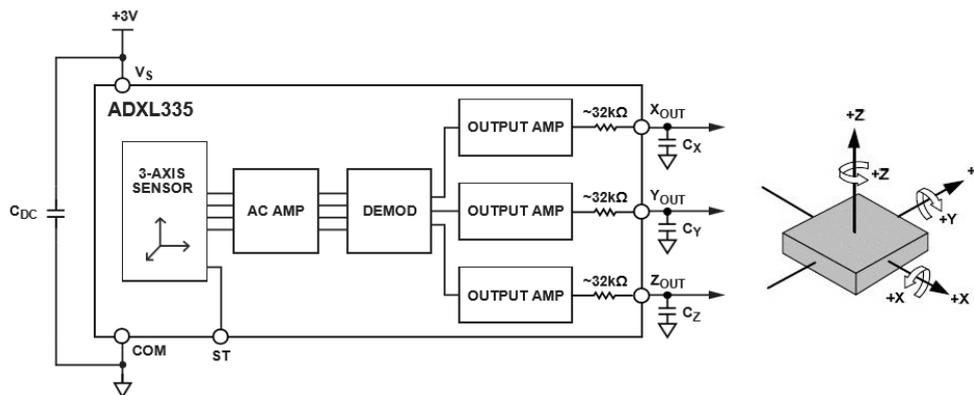
Esclusivamente a scopo didattico si sceglie come dispositivo programmabile la scheda Arduino UNO di seguito riportata.



2_ Interfacce hardware

Si analizza di seguito l'interfacciamento di un accelerometro.

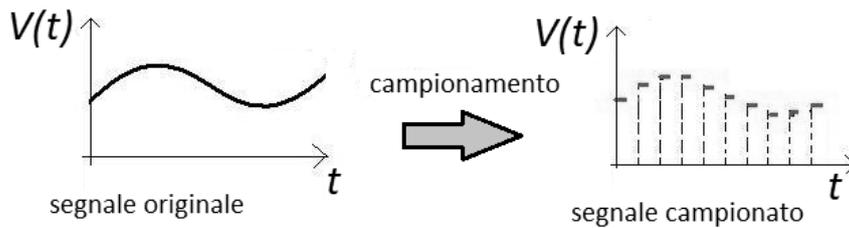
Si consideri, come evidenziato in figura, un accelerometro montato su una scheda fornita di cinque pin di cui tre per le uscite (V_x , V_y e V_z) e due per l'alimentazione (V_{CC} e GND).



I primi tre pin devono essere collegati ad altrettanti ingressi analogici della scheda Arduino.

Si ipotizza che la scheda fornisca direttamente segnali analogici compresi tra 0 V e 5 V da inviare alla scheda Arduino provvista di un convertitore A/D.

Il campionamento di una grandezza analogica, ovvero il procedimento che consente il prelievo di alcuni valori del segnale in corrispondenza di determinati istanti, è ottimale se non comporta perdita di informazioni ovvero se, come evidenziato in figura, è possibile ricostruire la grandezza originaria a partire dai suoi campioni.



Un campionamento ottimale è possibile solo se il segnale ha una banda limitata ovvero un numero limitato di armoniche che cadono entro una determinata banda di frequenze.

Il teorema di Shannon afferma che, per campionare correttamente un segnale a banda limitata, è sufficiente campionarlo con una frequenza di campionamento pari almeno al doppio della massima frequenza del segnale.

La condizione viene espressa con la relazione

$$f_c \geq 2f_M$$

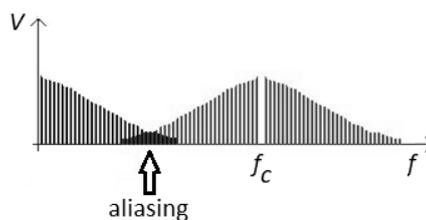
in cui:

- f_c è la frequenza di campionamento;
- f_M è la componente di frequenza più elevata del segnale in esame.

Pur essendo teoricamente infinita la banda di un segnale reale è possibile limitare tale banda (e rientrare quindi nelle ipotesi del teorema di Shannon) prendendo in considerazione solo le armoniche significative ovvero quelle aventi una ampiezza non troppo piccola.

Lo spettro del segnale campionato è formato da una serie di repliche dello spettro del segnale periodico originario centrate intorno a multipli della frequenza di campionamento.

Se il segnale da campionare non ha una banda limitata, le frequenze più alte delle diverse repliche dello spettro si sovrappongono, interferendo fra loro.



Come si può osservare dalla figura, a causa della sovrapposizione delle code dello spettro del segnale originario con quelle prodotte dal campionamento, la ricostruzione corretta del segnale a partire dai campioni non è più possibile; ha così origine il fenomeno denominato aliasing.

Il fenomeno dell'aliasing si verifica sempre quando si campiona un segnale con banda non limitata.

Per evitare gli effetti negativi prodotti da questo fenomeno si deve limitare la banda del segnale usando un filtro passa basso denominato anti-aliasing da interporre a monte del campionatore (in questo caso il convertitore) che elimini le frequenze più elevate.

In pratica il campionamento non viene mai fatto alla frequenza limite ma sempre a frequenze superiori alla frequenza massima del segnale (cinque o dieci volte sono valori tipici usati in campo industriale).

Nel caso in questione, essendo l'estremo superiore dell'intervallo di frequenze di interesse 25 Hz, la frequenza di campionamento deve essere almeno pari a 50 Hz; un esempio di frequenza di campionamento idonea per garantire una misura sufficientemente fedele è 250 Hz.

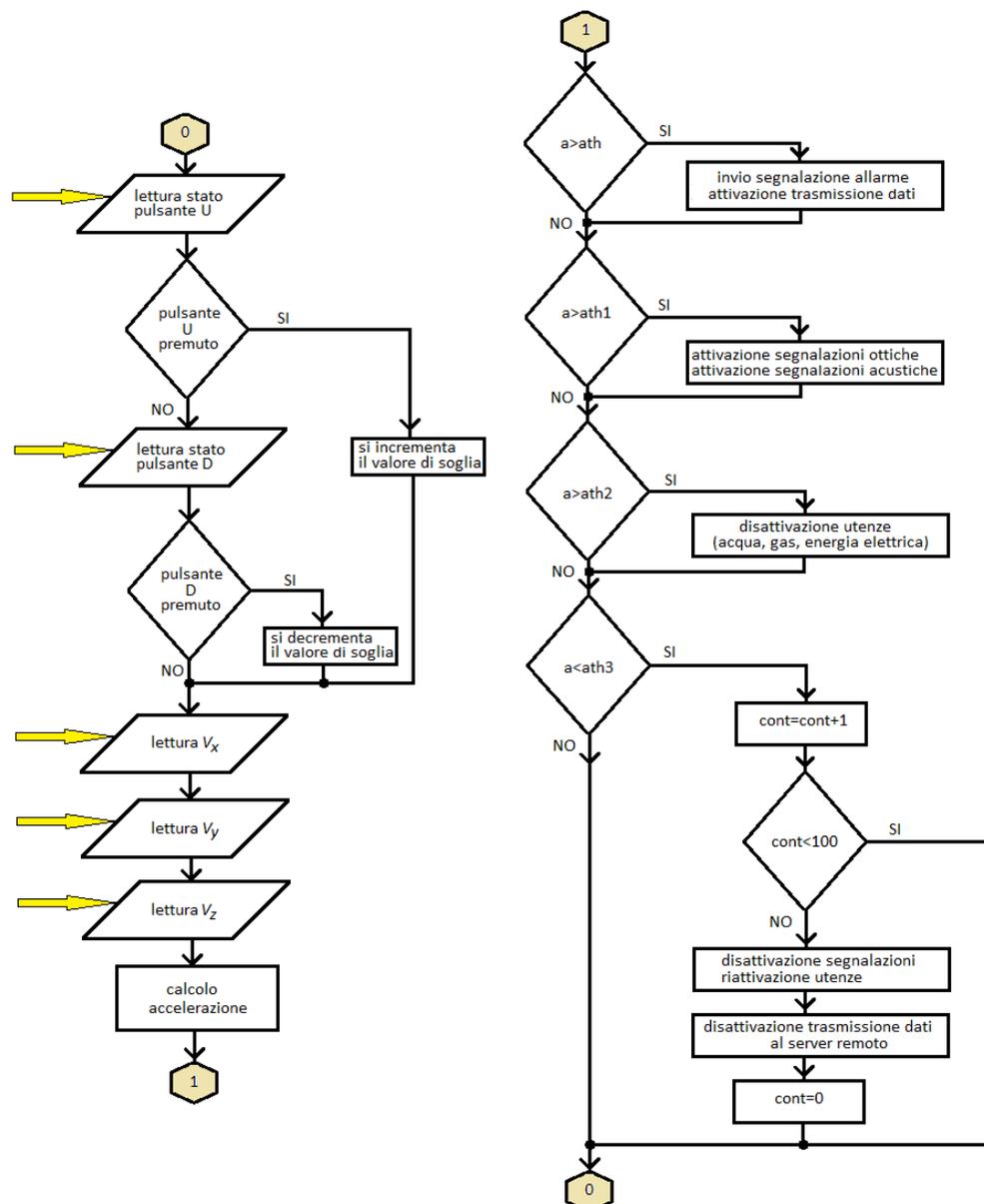
Un filtro anti-aliasing deve in questo caso eliminare frequenze che superano i 50 Hz.

3_Diagramma di flusso

L'intero processo può essere sintetizzato nel modo seguente:

- vengono letti gli stati dei pulsanti che consentono la modifica del valore di soglia;
- vengono letti in successione i tre valori di tensione forniti dall'accelerometro;
- viene calcolato il modulo dell'accelerazione;
- si confronta il modulo dell'accelerazione con i valori di soglia;
- dall'esito dei confronti dipende la trasmissione dei dati al server centrale e l'azionamento degli attuatori.

Viene di seguito proposto lo schema a blocchi corrispondente in cui si evidenziano le diverse sezioni.



Dai valori letti attraverso gli accelerometri si ricava il valore di accelerazione che viene indicato con a .

Il valore calcolato viene confrontato con le quattro soglie che consentono l'attivazione o la disattivazione delle utenze e precisamente:

- una prima soglia, indicata con ath , relativa alla trasmissione dati;
- una seconda soglia, indicata con $ath1$, relativa alle segnalazioni ottiche e acustiche;
- una terza soglia, indicata con $ath2$, relativa alla disattivazione delle utenze;
- una quarta soglia, indicata con $ath3$, relativa al ripristino delle condizioni iniziali.

Per quanto riguarda il ripristino delle condizioni iniziali non si tratta di un semplice confronto con un valore di soglia.

Il ripristino delle condizioni iniziali è infatti condizionato dalla presenza di una variabile contatore che si incrementa ogni volta che il valore di soglia non è stato superato; le condizioni iniziali vengono ripristinate solo quando il contatore ha raggiunto il valore 100.

4_Programma

Come richiesto dal testo il programma di seguito riportato riguarda la codifica del segmento di software di gestione che controlla l'acquisizione dei dati provenienti dall'accelerometro e l'attivazione dei relè.

Dopo aver acquisito lo stato dei pulsanti il programma procede con l'acquisizione dei dati provenienti dai trasduttori.

Alla conversione analogico/digitale dei dati provvede il convertitore a 10 bit che si trova sulla scheda Arduino.

Il risultato della conversione è un valore digitale compreso tra 0 e 1023 che, tramite software, deve essere riconvertito in analogico utilizzando la funzione map o altra relazione di proporzionalità.

Il passo successivo è il calcolo del modulo dell'accelerazione che si ricava utilizzando la relazione

$$V = 0,3 \cdot a - 1,5$$

ottenendo:

$$a = \frac{V - 0,5}{0,3}$$

Per l'attivazione delle utenze al superamento del valore di soglia è sufficiente porre a livello alto il pin corrispondente.

```
// acquisizione dati
// ath1_soglia intervento avvisatori, ath2_soglia disinserzione utenze
double vxa, vya, vza, ax, ay, az, a;
double ath=9.81/20, ath1=1.25*ath, ath2=1.5*ath, inc=ath/10;
int vxd, vyd, vzd, statoPBU, statoPBD;
void setup() {
pinMode (2, INPUT); // pin incremento
pinMode (3, INPUT); // pin decremento
pinMode (4, OUTPUT); // pin gas
pinMode (5, OUTPUT); // pin acqua
pinMode (6, OUTPUT); // pin energia elettrica
pinMode (7, OUTPUT); // pin avvisatore ottico
```

```

pinMode (8, OUTPUT); // pin avvisatore acustico
}
void loop() {
// acquisizione dello stato dei pulsanti
// pulsante incremento soglia
statoPBU=digitalRead(2);
if(statoPBU==HIGH){
ath=ath+inc; // incremento di 1/10 della soglia di confronto
}
delay (50);
// pulsante decremento soglia
statoPBD=digitalRead(3);
if(statoPBD==HIGH){
ath=ath-inc; // decremento di 1/10 della soglia di confronto
}
delay (50);
// acquisizione dati da asse x
// leggo valore digitale compreso tra 0 e 1023
vxd=analogRead(A0);
// trasformo in valore analogico compreso tra a=0 e a=g
vxa=map(vxd,0,1023,1.5,4.443);
delay (50);
// acquisizione dati da asse y
// leggo valore digitale compreso tra 0 e 1023
vyd=analogRead(A1);
delay (50);
// trasformo in valore analogico compreso tra a=0 e a=g
vya=map(vxd,0,1023,1.5,4.443);
delay (50);
// acquisizione dati da asse z
// leggo valore digitale compreso tra 0 e 1023
vzd=analogRead(A2);
// trasformo in valore analogico compreso tra a=0 e a=g
vza=map(vxd,0,1023,1.5,4.443);
delay (50);
// calcolo modulo accelerazione
ax=(vxa-1.5)/0.3; // asse x
ay=(vya-1.5)/0.3; // asse y
az=(vza-1.5)/0.3; // asse z
a=sqrt(ax*ax+ay*ay+az*az); // calcolo
// confronto con soglie attivazione utenze
if(a>ath1){
digitalWrite(7,HIGH);
digitalWrite(8,HIGH);
}
if(a>ath2){
digitalWrite(4,HIGH);
digitalWrite(5,HIGH);
digitalWrite(6,HIGH);
}
}
}

```

soluzione SECONDA PARTE

QUESITO 1

Le modifiche da apportare per la gestione dei pulsanti U e D con una tecnica di interrupt sono essenzialmente di tipo software in quanto i medesimi risultano già collegati ai pin 2 (per l'interupt 0) e 3 (per l'interupt 1).

Le variazioni da apportare al software sono riportate di seguito.

L'istruzione che specifica la funzione da chiamare quando avviene l'interruzione esterna è la seguente:

```
attachInterrupt (interrupt, funzione, modo)
```

Si precisa che:

- *interrupt* rappresenta il numero progressivo che si assegna all'interruzione (0 o 1);
- *funzione* rappresenta il nome sottoprogramma che deve essere richiamato nel momento in cui si verifica l'interruzione;
- *modo* rappresenta il parametro che definisce una delle quattro tipologie di segnale che possono essere inviati ai pin 2 o 3 abilitati alla ricezione delle interruzioni per eseguire il sottoprogramma relativo.

Le quattro possibili modalità sono:

- LOW, per abilitare l'interruzione quando il livello del segnale è basso;
- CHANGE, per abilitare l'interruzione quando avviene un cambiamento di stato sul pin;
- RISING, per abilitare l'interruzione quando si passa da un livello basso ad un livello alto;
- FALLING, per abilitare l'interruzione quando si passa da un livello alto ad un livello basso.

Il segmento di programma che consente la gestione dei pulsanti con la tecnica di interrupt viene di seguito riportata.

```
// dichiarazione variabili modificabili all'interno del sottoprogramma
volatile double ath=9.81/20;
volatile double inc=ath/10;
volatile double dec=ath/10;
void setup()
{
pinMode (2, INPUT); // pin incremento
pinMode (3, INPUT); // pin decremento
// parametri dell'interruzione per l'incremento
attachInterrupt (0, incr, RISING);
// parametri dell'interruzione per il decremento
attachInterrupt (1, decr, RISING);
}
void loop()
{
// si inserisce il void loop del programma principale
// da acquisizione dati asse x in poi
}
void incr() // sottoprogramma interruzione per l'incremento
{
ath=ath+inc;
}
void decr() // sottoprogramma interruzione per il decremento
{
ath=ath-inc;
}
```

QUESITO 2

Le interfacce seriali sincrone *SPI* (*Serial Peripheral Interface*) sviluppata da Motorola e *I²C* (*Inter Integrated Circuits*) sviluppata da Philips sono caratterizzate dalla presenza di un segnale di clock che determina la cadenza con cui i dati transitano attraverso il bus.

In commercio sono reperibili trasduttori e moduli integrati compatibili con Arduino che producono dati digitali e che consentono la comunicazione con una o entrambe le tecnologie.

Un esempio è il sensore **InvenSense MPU-6050** (che, come evidenziato nello schema a blocchi riportato in figura, appartiene alla famiglia MPU-6000) contiene un accelerometro a 3 assi ed un giroscopio a 3 assi.



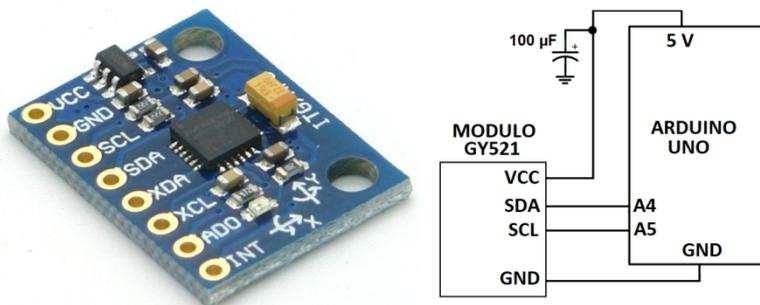
Nel chip è compreso un convertitore AD a 16 bit per ogni canale.

Il sensore possiede un protocollo di comunicazione standard I²C adatto per l'interfacciamento con Arduino.

Può essere alimentato a tensioni comprese fra 3 V e 5 V.

Avendo a disposizione un modulo **GY-521** si hanno a disposizione le sole porte di I/O evitando il cablaggio del trasduttore.

Il collegamento del modulo con la scheda Arduino viene riportato in figura.



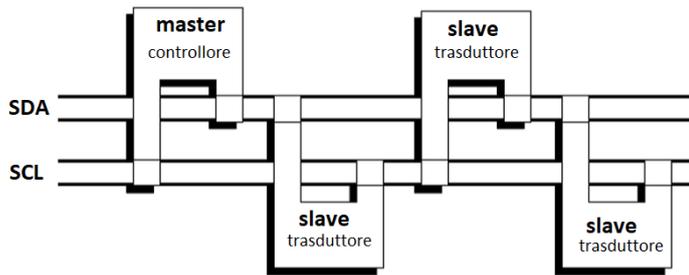
Si consideri ora in particolare il protocollo I²C.

L'impiego delle interfacce seriali che supportano la tecnologia I²C viene facilitato dall'esistenza della **libreria Wire** creata appunto per la gestione di tutti quei dispositivi elettronici che negli anni sono stati sviluppati con questa tecnologia per comunicare su due soli fili con altri dispositivi digitali.

Lo scopo di questa tecnologia era quello di ridurre la complessità del cablaggio per il collegamento fra dispositivi digitali e in particolare fra dispositivi master come un microcontrollore e dispositivi slave come sensori di pressione, memorie EE-PROM, sensori di temperatura, orologi in tempo reale.

Il protocollo I²C gestisce l'indirizzamento e il trasferimento dati bidirezionale utilizzando soltanto, come evidenziato in figura, una linea per i dati (SDA) e una per il clock (SCL); aggiungendo una alimentazione e una massa, con quattro piedini è possibile avere tutto quello che serve per comunicare.

La tecnologia I²C prevede i ruoli di *Master* che controlla e degli *Slave* che eseguono i comandi impartiti dal Master.



Considerando la scheda Arduino configurata come Master, le principali funzioni di libreria sono sinteticamente le seguenti:

- `begin()/begin(address)`: permette di inizializzare la libreria e attribuire il ruolo di Master o Slave alla scheda Arduino;
- `requestFrom(address,count)`: consente di richiedere al dispositivo Slave con indirizzo `address` di inviargli un numero `count` di bytes, che poi andranno letti effettivamente con la funzione `read()`;
- `beginTrasmissione(address)`: consente ad Arduino di iniziare la procedura di trasmissione di dati verso il dispositivo caratterizzato sul bus dall'indirizzo `address`;
- `write()`: consente la scrittura su un buffer di un byte alla volta;
- `endTrasmissione()`: consente l'inoltro dei byte scritti nel buffer di trasmissione al dispositivo Slave il cui indirizzo `address` è stato definito con la funzione `beginTrasmissione(address)`;
- `available()`: consente di ottenere come risultato un byte che indica il numero di byte pronti per essere letti dal buffer di ricezione con la funzione `read()`;
- `read()`: consente la lettura dei byte ricevuti.

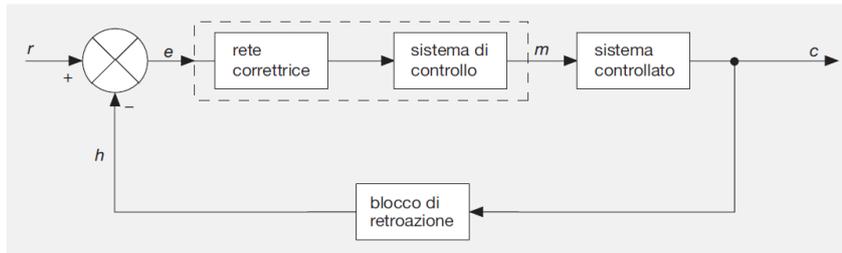
Un esempio di impiego di queste funzioni viene riportato nel programma che segue.

```
// 0x68 è l'indirizzo del modulo MPU-6050 (il dispositivo slave)
// il master è la scheda Arduino
#include<Wire.h> // viene inclusa la libreria Wire
int16_t AcX,AcY,AcZ; // vengono dichiarati valori interi di 16 bit che occupano due locazioni di 8 bit
void setup(){
Wire.begin();
Wire.beginTransmission(0x68); // inizio procedura trasmissione dati verso slave
Wire.write(0x6B);
Wire.write(0);
Wire.endTransmission(true); // fine procedura trasmissione dati verso slave
}
void loop(){
Wire.beginTransmission(0x68); // inizio procedura trasmissione dati verso slave
Wire.write(0x3B); // a partire dal registro 0x3B
Wire.endTransmission(false); // fine procedura trasmissione dati verso slave
// vengono acquisiti i dati di accelerazione
// viene richiesto al dispositivo slave di inviare i sei bytes che poi vengono letti con la funzione read
Wire.requestFrom(0x68,6);
// vengono letti i dati
AcX=Wire.read()<<8|Wire.read(); // legge i dati da 0x3B e 0x3C
AcY=Wire.read()<<8|Wire.read(); // legge i dati da 0x3D e 0x3E
AcZ=Wire.read()<<8|Wire.read(); // legge i dati da 0x3F e 0x40
delay(500); // attesa
}
```

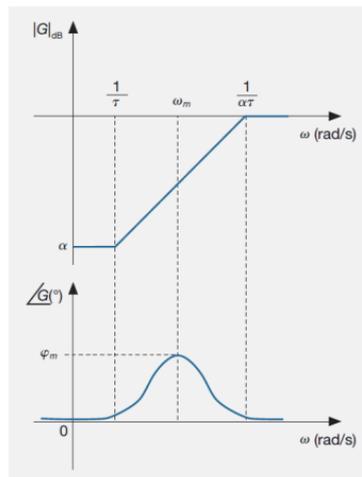
QUESITO 3

Analizzando i diagrammi si deduce che il punto di intersezione con l'asse a 0 dB vale circa -143° con conseguente margine di fase di 27° , non sufficiente per assicurare la stabilità del sistema.

Per ottenere un margine di fase di 45° ed una banda passante di almeno 1 kHz si deve ricorrere all'impiego di una rete stabilizzatrice, in questo caso anticipatrice, che nell'ambito del sistema retroazionato assume la posizione indicata in figura.



Una rete anticipatrice presenta le caratteristiche riportate in figura.



Per ottenere una banda passante di 1 kHz si deve eliminare il primo polo del sistema compensandolo con lo zero della rete correttiva (posto a 200 Hz).

Per ottenere un margine di fase di almeno 45° si deve ridurre la costante di guadagno in modo tale che il punto di intersezione del diagramma del modulo con l'asse a 0 dB avvenga con pendenza -1.

Non essendo richieste specifiche in termini di prontezza di risposta si può ipotizzare una riduzione da 60 dB (1000) a 10 dB (3,16); il punto di attraversamento a 0 dB è situato di conseguenza a $10^{3,5}=3162$ Hz (valore asintotico).

La frequenza del polo della rete correttiva f_p dipende dalla frequenza dello zero e dalla costante di guadagno del sistema (1000) e dalla costante di guadagno che si desidera ottenere (3,16); dalla relazione

$$\frac{100}{f_p} \cdot 1000 = 3,16$$

si ricava $f_p=3165$ Hz.

Viste le specifiche del sistema e della rete correttiva risulta:

$$G(s) = \frac{1000}{\left(1 + \frac{s}{2\pi 100}\right) \left(1 + \frac{s}{2\pi 1000}\right) \left(1 + \frac{s}{2\pi 5000}\right)}$$

per la f.d.t. del sistema ad anello aperto,

$$G_r(s) = 0,0316 \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{2\pi 100}\right)}{\left(1 + \frac{s}{2\pi 3165}\right)}$$

per la f.d.t. della rete correttiva,

$$G'(s) = G(s)G_r(s) = \frac{3,16}{\left(1 + \frac{s}{2\pi 1000}\right) \left(1 + \frac{s}{2\pi 3165}\right) \left(1 + \frac{s}{2\pi 5000}\right)}$$

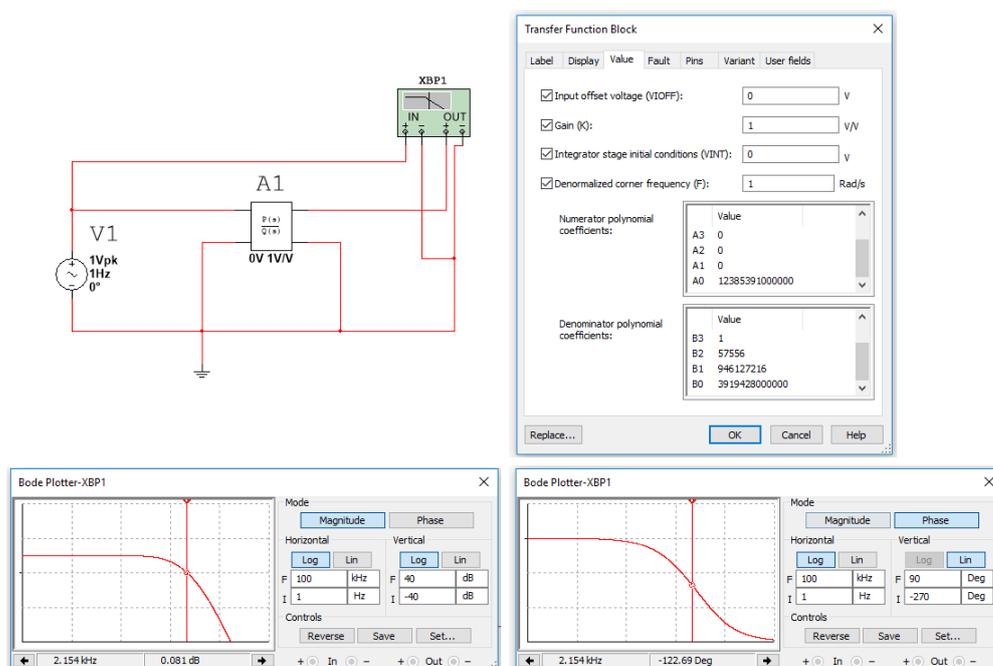
per la f.d.t. del sistema con la rete correttiva.

Con passaggi opportuni si ottiene poi l'espressione della f.d.t. espressa come rapporto tra polinomi:

$$G'(s) = \frac{12385391000000}{s^3 + 57556s^2 + 946127216s + 3919428000000}$$

L'espressione viene utilizzata per tracciare i diagrammi di Bode con il programma Multisim.

Nella figura che segue viene riportato lo schema per la simulazione con Multisim, la tabella dei coefficienti e i risultati della simulazione.



Osservando i diagrammi si evidenzia un angolo di fase di circa 59° , ampiamente superiore a quanto richiesto.

Ai medesimi risultati si perviene anche, in modo più approssimato, senza l'ausilio del computer; risulta infatti

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{f_1}{f_0} = \tan^{-1} \frac{1000}{3162} = 18^\circ$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{f_2}{f_0} = \tan^{-1} \frac{3165}{3162} = 45^\circ$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{f_3}{f_0} = \tan^{-1} \frac{5000}{3162} = 58^\circ$$

essendo:

- f_1, f_2 ed f_3 le frequenze del sistema con rete correttiva;
- f_0 la frequenza del punto di attraversamento a 0 dB.

Per il margine di fase risulta:

$$m. d. f. = 180^\circ - 18^\circ - 45^\circ - 58^\circ = 59^\circ$$

QUESITO 4

Considerando la f.d.t. che ha U come uscita e d come ingresso si ottiene:

$$G(s) = \frac{U(s)}{d(s)} = \frac{s + 1}{s + k + 1}$$

La stabilità si ottiene quando i poli sono situati nel semipiano negativo; pertanto deve risultare:

$$s = -k - 1 < 0$$

e di conseguenza $k > 1$.

Con $\omega = 1$ rad/s risulta $s = j$; pertanto si ha:

$$G(j) = \frac{U(j)}{d(j)} = \frac{j + 1}{j + k + 1}$$

Svolgendo i calcoli per il modulo di $G(j)$ si ha:

$$|G(j)| = \sqrt{\frac{2}{k^2 + 2k + 2}}$$

Essendo

$$-14 \text{ dB} = 10^{-\frac{14}{20}} = 0,2$$

deve risultare:

$$|G(j)| \leq 0,2$$

Dalla condizione limite si ricava l'equazione

$$k^2 + 2k - 48 = 0$$

da cui le soluzioni $k=-8$ e $k=6$.

Vista la condizione di stabilità l'unica soluzione accettabile è la prima.

L'ampiezza del disturbo additivo si riduce pertanto di almeno 14 dB solo se risulta $k \geq -8$.