

## Capitolo Sesto

### L'allestimento delle prove sperimentali

#### 6.1 Introduzione

All'analisi teorica del problema ha fatto seguito il lavoro sperimentale costituito da prove al banco di un piccolo motore quattro tempi di 195 cm<sup>3</sup> di cilindrata.

Dal momento che i banchi freno presenti nella sala prove del Dipartimento di Energetica non erano adatti all'esame di motori di piccole dimensioni, è stato necessario l'acquisto di un nuovo banco a bassa inerzia, più indicato alla rilevazione di potenze limitate: la prima parte del lavoro è stato quindi dedicato alla messa in funzione di questo nuovo apparecchio (Figura 6.1).



Figura 6.1-Vista laterale del freno dinamometrico posizionato nella sua sede

Come prima cosa si è reso necessario posizionare il banco freno all'interno della sala prove. Lo strumento era già provvisto di un basamento in acciaio riempito di cemento, tale da rendere, in teoria, sufficiente il semplice fissaggio al suolo: a causa dell'irregolarità della pavimentazione però, è stato necessario collocare il banco su di una piastra di acciaio rialzata.

Una volta completato il posizionamento, sono state eseguite le operazioni di collegamento alla linea elettrica sia del freno che del motorino di avviamento e l'allacciamento alle tubature di mandata e scarico dell'impianto idraulico di raffreddamento.

## 6.2 L'allestimento del prototipo

Per le prove sperimentali è stato utilizzato un piccolo motore per generatore fornito dalla Dell'Orto S.p.A. Nella Tabella 6.1 sono riportate le sue caratteristiche principali.

<b>Produttore</b>	<b>Tecumseh Europa</b>
<b>Nome</b>	<b>Geotec 60 OHV</b>
<b>Tipo</b>	<b>Monocilindrico – 4 Tempi</b>
<b>Cilindrata</b>	<b>195 [cc]</b>
<b>Alesaggio</b>	<b>71 [mm]</b>
<b>Corsa</b>	<b>49,23[mm]</b>
<b>Lunghezza di biella</b>	<b>88,70[mm]</b>
<b>Rapporto di compressione</b>	<b>9.0:1</b>
<b>Distribuzione</b>	<b>2 valvole in testa</b>
<b>Controllo</b>	<b>Regolatore di velocità</b>
<b>Anticipo di accensione</b>	<b>Fisso : 15°</b>
<b>Alimentazione</b>	<b>Carburatore a galleggiante</b>
<b>Raffreddamento</b>	<b>Aria</b>
<b>Applicazione</b>	<b>Generatore</b>

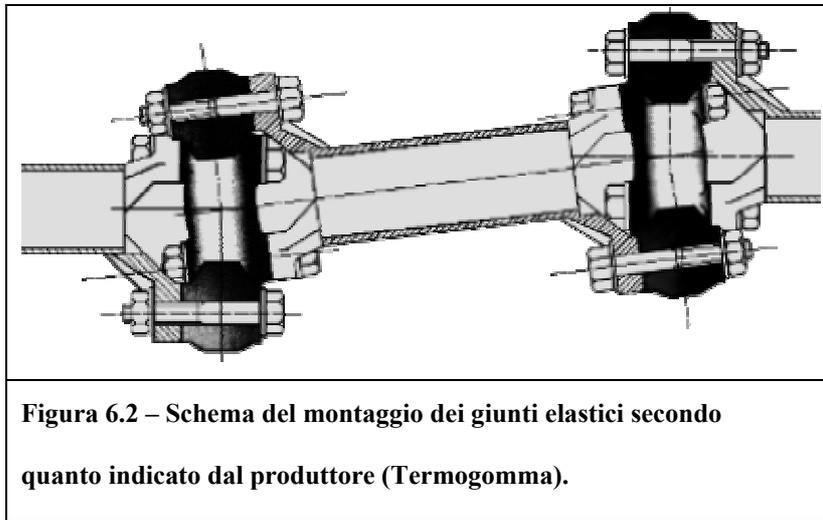
**Tabella 6.1 – Le caratteristiche principali del motore utilizzato**

La prima operazione è stata la realizzazione di un telaio di supporto, per vincolare il motore al ripiano presente davanti al freno dinamometrico. La struttura, visibile in figura 6.3, è costituita da due montanti di forma trapezoidale formati da barre di acciaio saldate, ai quali è imbullonata una piastra orizzontale di dimensione opportuna ad alloggiare sia il motore che eventuali elementi aggiuntivi.

Dopo aver consultato la casa costruttrice del motore, è stata presa la decisione di fissare il motore al telaio con un vincolo rigido, senza l'interposizione dei "silent block": particolare cura è stata dedicata all'allineamento fra l'asse del motore e quello del freno. L'intero lavoro è stato eseguito con l'aiuto dei tecnici del Dipartimento di Energetica.

Una volta posizionato il motore, il passo successivo è stata la realizzazione del collegamento fra motore e freno. Dal momento che il funzionamento dei motori a combustione interna è di tipo impulsivo e soggetto a oscillazioni di intensità elevata, l'utilizzo di un collegamento rigido non è consigliabile. Pertanto nel collegamento sono stati inseriti giunti elastici, del tipo utilizzato sull'Ape Piaggio 200: si tratta di elementi esagonali in gomma nei quali sono incorporati sei inserti metallici con foro passante per il montaggio sugli alberi, i quali devono avere flangie

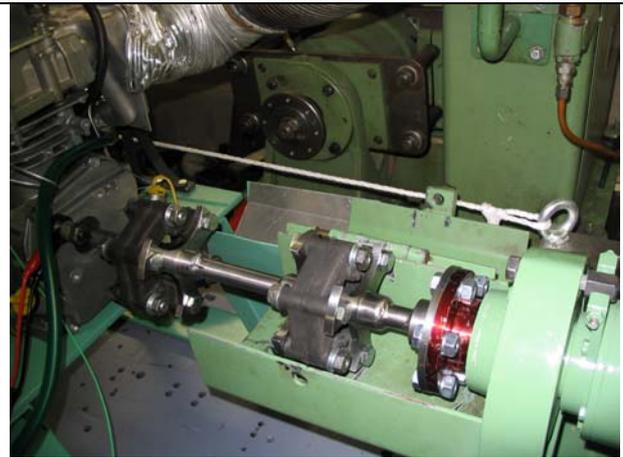
triangolari. Le flangie dispongono di tre fori e vengono montate ruotate fra loro di un angolo di sessanta gradi (Figura 6.2).



Un singolo giunto di questo tipo garantisce una condizione di omocineticità per disallineamenti dell'ordine del grado, mentre, nel caso si prevedano oscillazioni di entità maggiore, è consigliato l'utilizzo di una coppia di giunti. Per assicurare la massima regolarità nella trasmissione del moto è stata adottata la seconda soluzione, sebbene questo comportasse un aumento di massa della struttura, dovuto sia all'elemento in gomma aggiuntivo che alla maggiore lunghezza della trasmissione, necessaria a garantire il corretto funzionamento. Le parti metalliche sono state progettate ponendo attenzione alla leggerezza per ridurre le sollecitazioni su motore e freno, per effetto di forze centrifughe ed eventuali disallineamenti. I disegni costruttivi della trasmissione sono riportati nell'allegato n°2. Gli elementi metallici della trasmissione sono stati realizzati da un'officina esterna all'Università.



**Figura 6.3 – Il telaio di supporto del motore (dipinto in verde).**



**Figura 6.4 – Vista del giunto di collegamento fra motore e freno dinamometrico posizionato nella struttura di protezione. Sono visibili i due corpi in gomma che rappresentano gli elementi elastici della trasmissione.**

Una volta completata l'interfaccia fra motore e freno dinamometrico, sono iniziate le operazioni per la collocazione dei sensori per la rilevazione dei dati.

L'alloggiamento del trasduttore di pressione, che deve operare affacciato all'interno della camera di combustione, ha presentato alcune difficoltà, determinate soprattutto dalle limitate superfici libere presenti sulla testa del motore. Dopo un'analisi preliminare delle possibili soluzioni, si è deciso di intervenire nella zona compresa fra la valvola di aspirazione e la candela. I motivi di questa scelta sono sia la minore sollecitazione termica della zona, tale da rendere meno influente la rimozione delle alette di raffreddamento rispetto al lato della valvola di scarico, sia il maggior spessore a disposizione, fattore importante per consentire la realizzazione di una filettatura sufficientemente lunga e di una lamatura, elementi necessari per un corretto funzionamento del trasduttore.

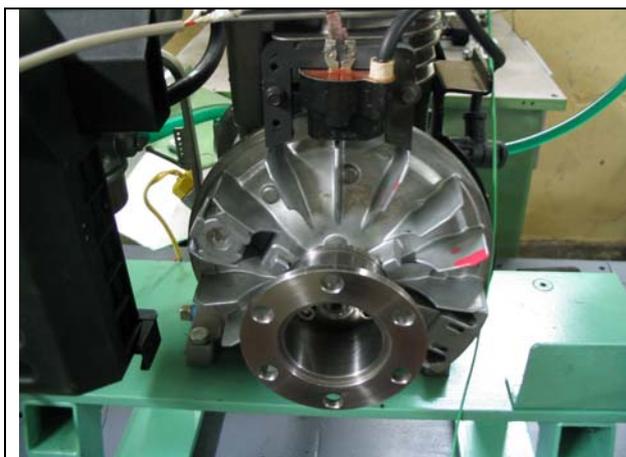


**Figura 6.5 – Vista della testata del motore**



**Figura 6.6 – Vista del posizionamento del trasduttore di pressione. Il sensore è collocato nei pressi della candela: si può vedere il cavo del sensore, di colore verde.**

Ulteriori lavorazioni si sono rese necessarie per la realizzazione dell'interfaccia di collegamento fra sensore di posizione angolare e albero motore. Preso atto del fatto che la parte anteriore del motore era inaccessibile a causa della presenza del giunto di collegamento con il freno dinamometrico, la scelta di posizionare l'encoder sul volano posteriore è stata obbligata. Il motore presentava, in questa zona, l'apparecchiatura per la messa in moto manuale. Dal momento che il freno dinamometrico è provvisto di un motorino di avviamento, si è deciso di togliere il sistema di avviamento manuale, in modo da liberare la superficie del volano per accoppiarvi una flangia. Purtroppo tale superficie, con la sola eccezione del profilo laterale, non era finita alle macchine utensili e per questo si è reso necessario lavorarla per assicurare il corretto posizionamento della flangia. Questa operazione, unitamente alla realizzazione e al montaggio della flangia, è stata eseguita da un officina esterna all'Università.



**Figura 6.7 – Vista della flangia per l'alloggiamento del sensore ottico di posizione angolare del motore.**



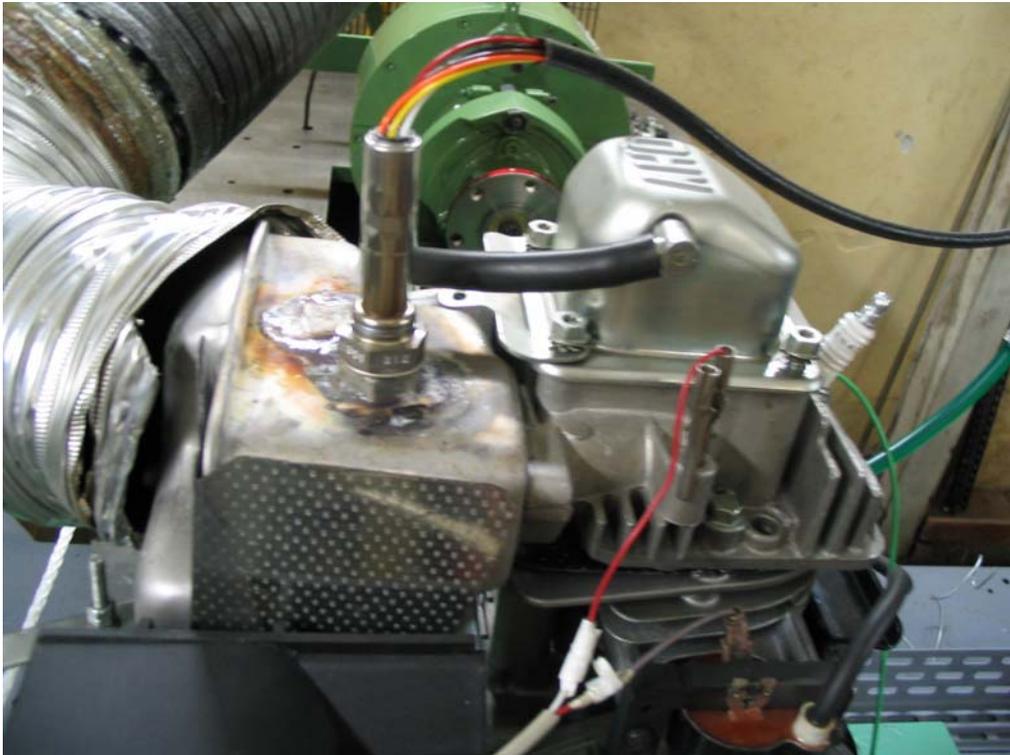
**Figura 6.8 – Il sensore ottico posizionato sul volano. A destra è possibile vedere l'elemento di vincolo fra statore e telaio motore.**

Sin dalle prime prove effettuate è emerso che le vibrazioni che si generavano durante il funzionamento del motore provocavano un allentamento progressivo del dado di serraggio del volano a causa delle imperfezioni nell'accoppiamento conico presente fra volano stesso e albero motore, accoppiamento incapace di fornire il necessario attrito. Già pochi minuti dopo la messa in moto le oscillazioni del volano erano tali da peggiorare sensibilmente la lettura della posizione angolare dell'albero motore e mettere in pericolo il costoso lettore ottico. Dopo alcuni tentativi di riparazione è stato deciso l'acquisto di un nuovo volano. Dal colloquio telefonico avuto con la casa costruttrice del motore è emerso che quel particolare aveva già presentato problemi analoghi, quindi i motori di nuova produzione ne montavano uno con caratteristiche diverse. In particolare il nuovo volano non è più in alluminio pressofuso, bensì in ghisa (figura 6.8).

Si è quindi optato per questo tipo di volano, che ha dovuto essere anch'esso lavorato per permettere la sistemazione della flangia di collegamento col sensore di posizione angolare. Questa volta l'operazione è stata realizzata nell'officina dell'Università con l'aiuto dei tecnici di laboratorio.

La figura 6.9 mostra la sonda per la misurazione del titolo di miscela. Sulle autovetture, le sonde di questo tipo sono montate in genere sul collettore di scarico, ad una distanza relativamente ridotta dalla valvola, per sfruttare l'energia termica dei gas combusti e raggiungere rapidamente le temperature più corrette di funzionamento. A causa delle esigenze di compattezza richieste dal suo impiego, il motore in esame è privo di un collettore di scarico e la marmitta è direttamente collegata alla testa. Per questo motivo il sensore è stato collocato nella marmitta, nella zona

adiacente all'apertura per l'ingresso dei gas. La marmitta è stata forata e vi è stato saldato un raccordo per consentire l'alloggiamento della sonda.



**Figura 6.9 – Vista della marmitta e del sensore UEGO**

Interventi di minore importanza hanno riguardato la realizzazione del comando della valvola a farfalla e di un supporto per il serbatoio del combustibile, allontanato dal motore per liberare la zona della testa per l'applicazione dei sensori.

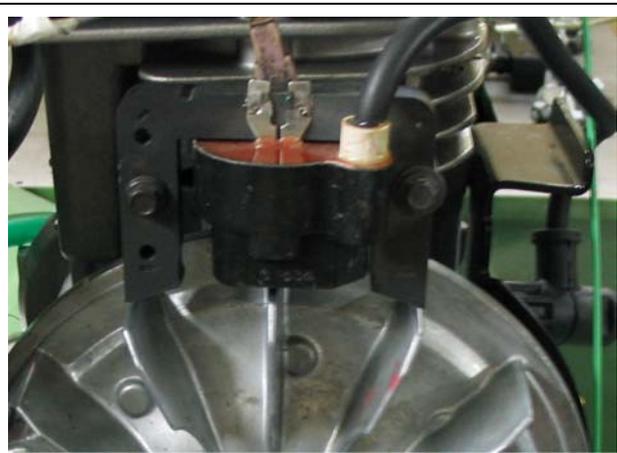
Per quanto riguarda il comando della valvola a farfalla, occorre ricordare che questi motori, costruiti per funzionare a regimi fissi di velocità, utilizzano dei sistemi di regolazione che permettono di mantenere automaticamente una velocità circa costante al variare del carico. Per coprire liberamente il campo di funzionamento del motore, il regolatore è stato rimosso e la valvola a farfalla principale del carburatore è stata collegata ad un cavo Bauden, in modo da comandare, per motivi di sicurezza, l'acceleratore dall'esterno della sala prove.

Nella zona esterna al box è stato collocato anche un interruttore collegato col sistema di accensione, al fine da velocizzare lo spegnimento del motore in caso di malfunzionamento.

Dopo il primo periodo di prove è emerso che il sistema di accensione presente sul motore non consentiva, a causa dell'anticipo fisso e della bassa energia fornita alla candela, un corretto funzionamento del motore nel suo utilizzo con miscele che si allontanavano molto dal titolo

stabilito dal costruttore. Per poter ottenere delle condizioni di funzionamento del motore valide ai fini dello studio da effettuare, si è reso quindi necessario utilizzare un diverso sistema di accensione. Si è deciso di adottare un sistema di accensione ad anticipo variabile, costituito da una centralina elettronica di comando e da un pick up magnetico. Di seguito si riporta il lavoro relativo al montaggio del pick up, mentre il paragrafo successivo è riservato alla descrizione del funzionamento della centralina.

Il pick up è stato collocato nella zona occupata originariamente dalla bobina di accensione (Figura 6.10). La struttura di supporto è stata realizzata in modo da poter registrare facilmente l'altezza del traferro fra il magnete del pick up e il volano per ottenere un segnale in grado di garantire il corretto funzionamento della centralina.



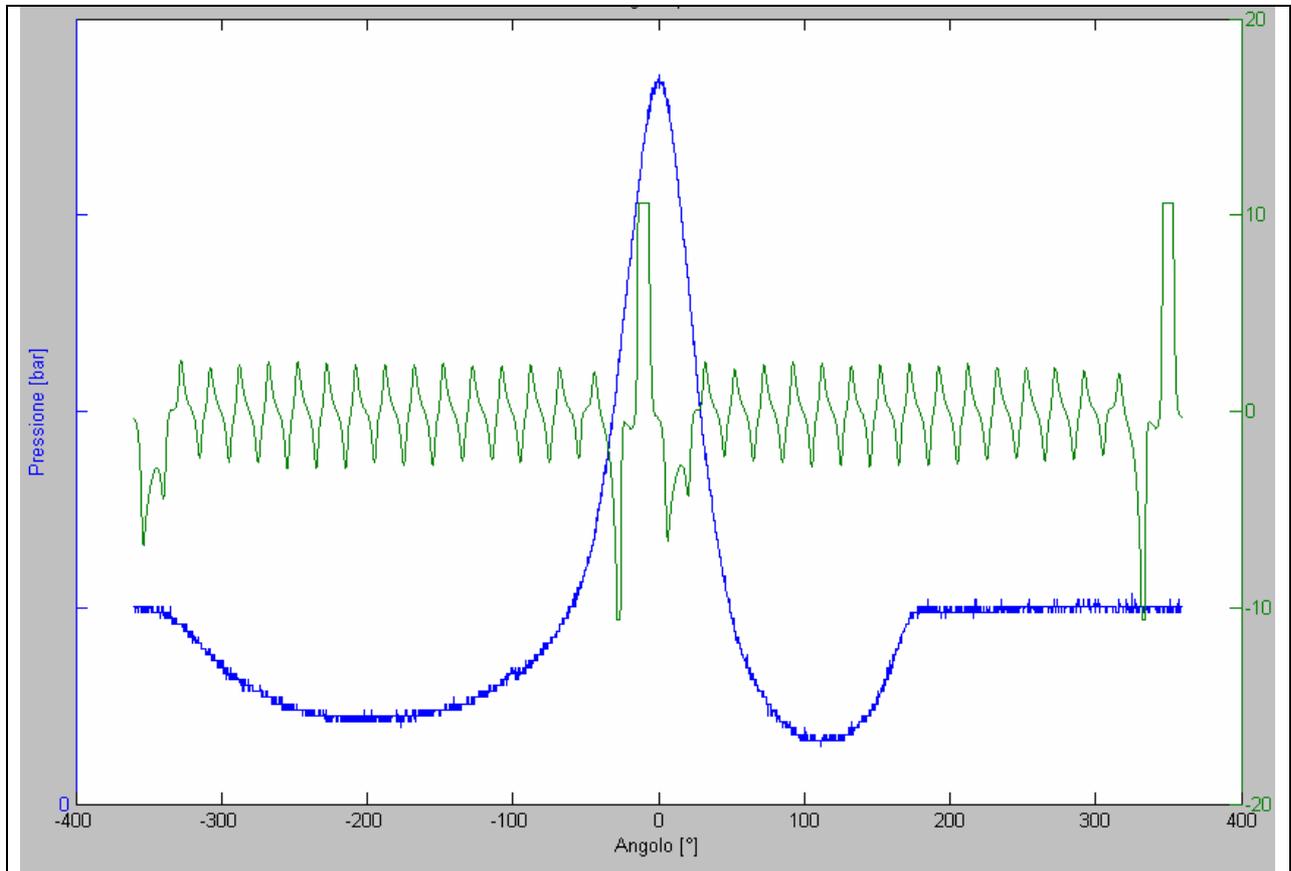
**Figura 6.10 – Il vecchio sistema di accensione: è possibile vedere la bobina, collocata sul ramo centrale del materiale ferromagnetico a forma di E.**



**Figura 6.11 - Il pick up per la generazione del segnale di accensione.**

Questa tipologia di pick up, infatti, è normalmente utilizzata come sensore di prossimità, quindi rileva una differenza nel profilo dell'elemento sottostante. In questo caso, dal momento che, per la generazione dell'impulso doveva essere utilizzato il magnete presente sul volano, c'era il rischio di ottenere un segnale di intensità troppo elevata per la centralina. La tensione generata dal pick up è stata quindi acquisita preliminarmente nella strumentazione utilizzata per l'analisi dei dati. Il risultato è visibile in figura 6.12: curiosamente il pick up non è sensibile solamente al magnete, ma anche alle palettature del volano, essendo la ghisa un materiale ferromagnetico. Il traferro, inizialmente regolato a cinque decimi di millimetro, valore generalmente utilizzato con questo tipo di pick up, è stato progressivamente aumentato fino a raggiungere 1,4 mm, in modo da rendere il segnale dovuto alle palettature non rilevabile dalla centralina e abbassare il

voltaggio in corrispondenza del passaggio del magnete a valori inferiori ai dieci Volt. Agli elettrodi del pick up sono stati saldati in parallelo una resistenza da  $1k\Omega$  ed uno scaricatore al fine di limitare le tensioni a valori inferiori a 24 Volts, per proteggere la centralina da picchi elevati.

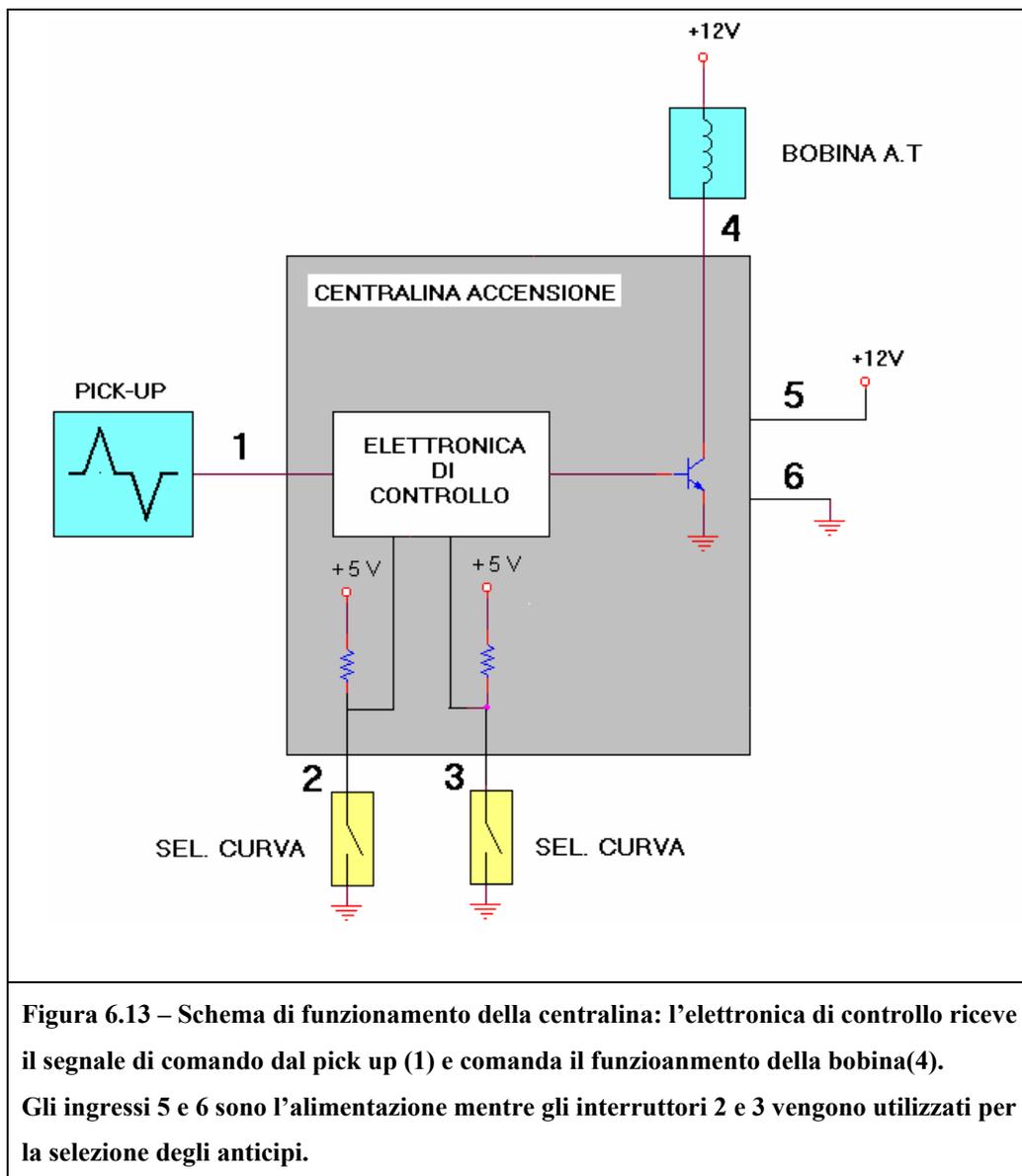


**Figura 6.12 – Andamento del segnale del pick up in funzione dell’angolo di manovella (curva verde). La curva blu esprime l’andamento della pressione ed è stata visualizzata per evidenziare la fasatura del segnale: l’onda generata dal pick up è collocata all’incirca 14° prima del punto morto superiore. Si può vedere come nel segnale del pick up siano presenti le interferenze dovute alle alette presenti sul volano.**

Dalla figura 6.12 si può vedere come il segnale dato dal passaggio del magnete sia composto da un picco positivo e due negativi. I picchi di segno negativo sono eliminati all’ingresso della centralina attraverso l’uso di un diodo, mentre quello positivo è il segnale vero e proprio: la centralina interviene quando la tensione supera i tre Volt.

### 6.3 Descrizione del funzionamento della centralina per la variazione dell'anticipo di accensione

La centralina per la variazione dell'anticipo di accensione utilizzata in questa tesi è stata realizzata dall'azienda SEI (Società Elettronica Italiana), adattando alle specifiche del motore una centralina già in uso su alcuni ciclomotori Piaggio dal settembre 2003.



Lo schema di funzionamento è visibile in figura 6.13: la centralina riceve in ingresso il segnale del pick up (che approssima un'onda quadra) e comanda la bobina di accensione (4).

Il caricamento della bobina, affidato nel sistema precedente al magnete presente sul volano, è in questo caso realizzato da una comune batteria per automobile, che provvede anche all'alimentazione della centralina.

L'anticipo realizzato, che è in realtà un ritardo rispetto al segnale del giro precedente, può assumere quattro valori differenti che vanno ad aggiungersi ai 14° di anticipo rispetto al punto morto superiore del segnale derivante dal pick up.

I vari anticipi possono essere selezionati agendo sugli ingressi rappresentati col numero 2 e 3 in Figura 6.13: ai loro capi è mantenuta dalla centralina una tensione di 5 Volts che può essere annullata eseguendo un collegamento a terra.

La tabella 6.2 riassume le quattro configurazioni possibili.

PIN2 ; PIN3	0 gradi	OPEN	OPEN
PIN2 ; PIN3	5 gradi	OPEN	GND
PIN2 ; PIN3	10 gradi	GND	OPEN
PIN2 ; PIN3	15 gradi	GND	GND

**Tabella 6.2 – Le quattro configurazioni di anticipo**

Le varie configurazioni possono quindi essere selezionate agendo su due soli interruttori: il passaggio da un anticipo ad un altro è consentito anche con il motore in funzione.

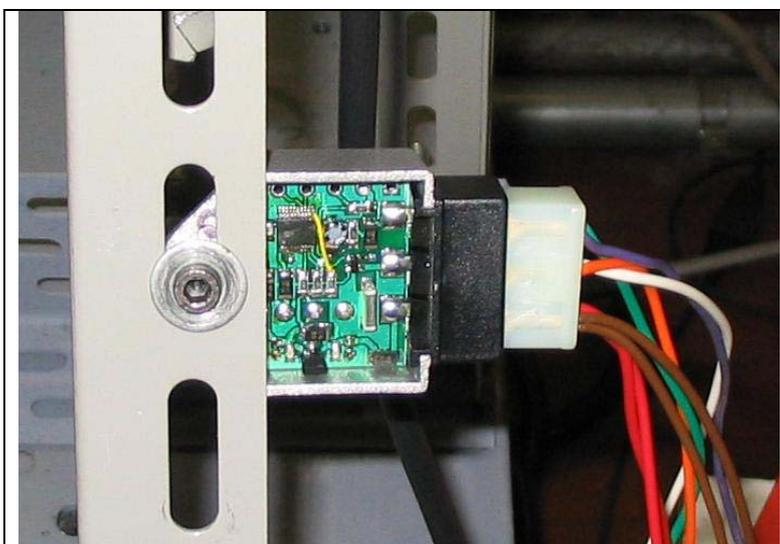
Di seguito si riportano le caratteristiche elettriche e di funzionamento della centralina (Tabelle 6.3 e 6.4), nonché l'installazione della centralina (figura 6.14).

		SIMBOLI	VALORE NOMINALE	CONDIZIONI DI PROVA
<b>1</b>	ALIMENTAZIONE	Tensione Batt.	<b>6 -18 Vdc</b>	
<b>2</b>	MAX. TENSIONE ALIMENTAZIONE	Tensione Batt. MAX	<b>24 Vdc</b>	DURATA MAX. 1'
<b>3</b>	RANGE DI FUNZIONAMENTO	Tamb	<b>-25/+125 °C</b>	
<b>4</b>	RESISTENZA BOBINA A.T	OHM	<b>0,4-0,8 Ω</b>	SPECIFICHE DRIVER PILOTAGGIO
<b>5</b>	INDUTTANZA PRIMARIO BOBINA	mH	<b>6-8 mH</b>	SPECIFICHE DRIVER PILOTAGGIO
<b>6</b>	MAX. CORRENTE BOBINA A.T.	I	<b>6 A</b>	LIMITATA INTERNAMENTE
<b>7</b>	ALIMENTAZIONE BOBINA A.T.	TEMPO	<b>4 ms</b>	TEMPO ATTIVAZIONE COSTANTE PER OGNI GIRO
<b>8</b>	PICK-UP INDUTTIVO	T.POSITIVA GENERATA	<b>Min 7 V</b>	TRASCINAMENTO CON MOTORINO DI AVVIAMENTO
<b>9</b>	PROTEZIONE INVERSIONE BATTERIA	-	-	DURATA ILLIMITATA

**Tabella 6.3 – Caratteristiche elettriche della centralina per la variazione dell'anticipo di accensione.**

		SIMBOLI	VALORE NOMINALE	CONDIZIONI DI PROVA
1	ERRORE MAX. ANTICIPO VS VALORE NOMINALE	(°) MOTORE	$\pm 1^\circ$	REGIME FISSO DI ROTAZIONE MOTORE
2	TEMPO MINIMO DI ATTIVAZIONE BOBINA	ms	<b>1ms</b>	TRANSITORIO DI INCREMENTO GIRI VIOLENTO
3	POSSIBILITA' DI SELEZIONARE DIFFERENTI CURVE DI ANTICIPO	-	N° 4	POSSIBILE SELEZIONE IN FUNZIONAMENTO

**Tabella 6.4 – Specifiche di funzionamento della centralina.**



**Figura 6.14 – La centralina per la variazione dell'anticipo di accensione**

## 6.4 Descrizione delle apparecchiature utilizzate

In questo paragrafo si riporta la descrizione delle principali apparecchiature utilizzate durante le prove. Per eventuali approfondimenti sulle caratteristiche tecniche degli strumenti presentati si rimanda alla consultazione dei rispettivi manuali.

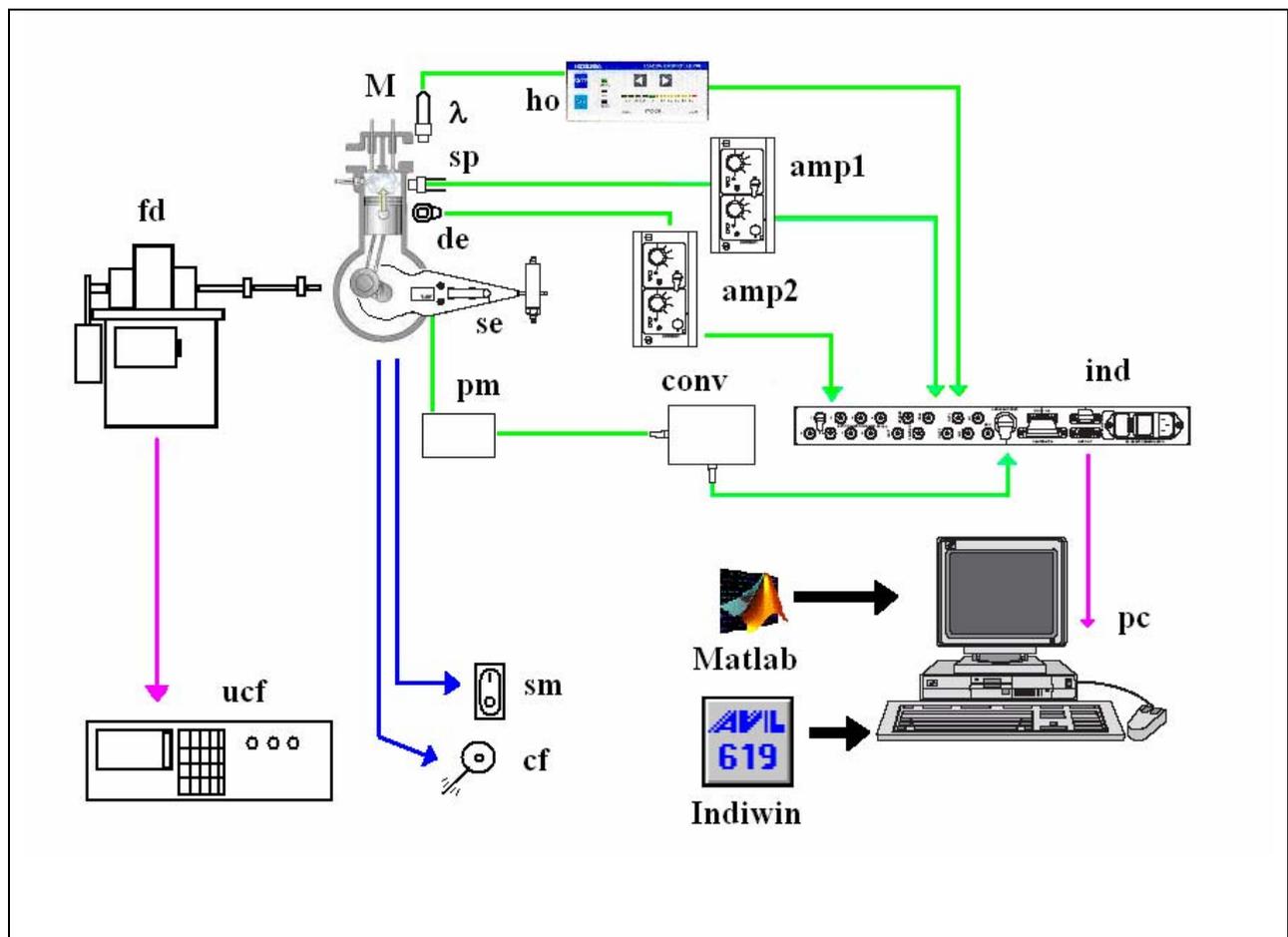


Figura 6.15 – Configurazione delle apparecchiature di acquisizione dati: (M) Motore Tecumseh ; (fd) Freno dinamometrico ; (ucf) Unità di controllo del freno dinamometrico ; (sm) Interruttore di spegnimento del motore ; (cf) Manopola di controllo dell'apertura della farfalla ; (se) Sensore ottico di posizione angolare dell'albero motore ; (pm) Moltiplicatore di impulsi ; (conv) Convertitore di impulsi ; (de) Sensore di detonazione ; (sp) Trasduttore di pressione ; (amp1) Amplificatore di carica del tr. di pressione ; (amp2) Amplificatore di carica del sensore di detonazione; ( $\lambda$ ) Sensore UEGO ; (ho) Unità di controllo del sensore UEGO ; (ind) AVL 619 Indimeter ; (pc) Personal Computer.

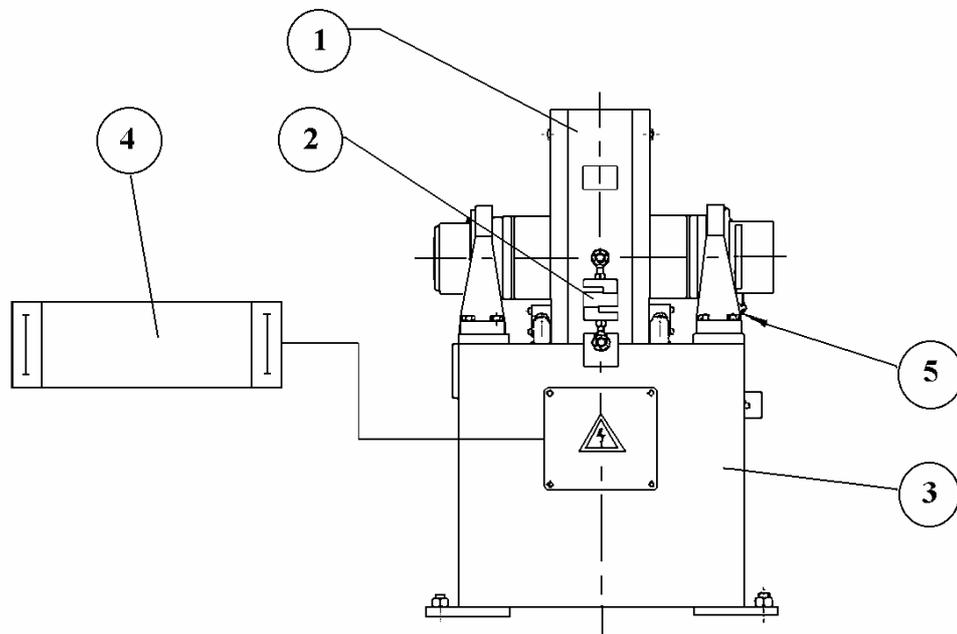
### 6.4.1 Il freno dinamometrico

Le prove sotto carico sono state realizzate accoppiando il motore al banco freno a correnti parassite “FA-20/30 Serie Leggera” della Borghi & Saveri.

I freni dinamometrici sono apparecchiature realizzate appositamente per consentire l'esame del comportamento meccanico dei motori con prove al banco. Mediante il loro uso è possibile

misurare la potenza erogata dal motore e applicare leggi di frenatura predeterminate in modo da simulare il funzionamento del motore sotto carico.

Un freno dinamometrico si compone di cinque parti principali, osservabili in Figura 7.16.



**Figura 7.16 – Gli elementi principali del freno dinamometrico : 1) Corpo frenante, 2) Trasduttore di misurazione della coppia (cella di carico) , 3) Basamento del freno, 4) Apparecchiatura di regolazione e visualizzazione freno, 5) Dispositivo di rilevazione giri/minuto (ruota fonica).**

Il principio di funzionamento di questo apparecchio è basato sul concetto delle correnti parassite, o di Foucault. All'interno del corpo frenante (1) è alloggiato un rotore, formato da un albero e da un disco polare di forma stellare, che ruota fra due camere di raffreddamento integrate nel corpo frenante e sedi di un campo magnetico prodotto da una bobina eccitata in corrente continua. La rotazione del disco polare provoca una variazione nel tempo del flusso magnetico generando delle correnti parassite, o di Foucault, sullo strato di metallo che costituisce la superficie delle camere di raffreddamento. In accordo con la legge di Lenz, le correnti indotte circolano in modo tale da opporsi alla variazione del flusso magnetico e, di conseguenza, al movimento del rotore.

Per il principio di azione e reazione, una coppia uguale e contraria a quella che realizza l'azione frenante viene a prodursi nello statore. Essa viene misurata attraverso la forza che occorre esercitare all'estremità di un braccio per trattenere il corpo frenante, altrimenti libero di ruotare(2). A tal fine viene impiegata una cella di carico che consiste in un insieme di estensimetri a resistenza uniti a formare un ponte di Wheatstone e racchiusi in una custodia

metallica di protezione a tenuta stagna. La forza da misurare deforma leggermente l'elemento di misura, provocando una variazione della resistenza elettrica degli estensimetri proporzionale alla forza stessa. Dalla misura della coppia prodotta dal motore è possibile risalire, grazie alla presenza del segnale del rilevatore del numero di giri (5), alla potenza erogata.

L'energia cinetica sottratta al rotore è convertita per effetto Joule in calore, il quale viene smaltito grazie all'acqua di raffreddamento.

La regolazione della coppia frenante si ottiene variando con un potenziometro l'intensità della corrente continua che percorre l'avvolgimento di campo. L'apparecchiatura elettronica di controllo (4), API MP 2030, permette di ottenere diversi andamenti della coppia frenante in funzione della velocità: si può anche tenere costante la velocità al variare del carico o viceversa. I valori di numero di giri, coppia e potenza sono visualizzati in tempo reale sul display presente nella parte anteriore dello strumento.

#### **6.4.2 La strumentazione per l'acquisizione dei dati derivanti dalle prove sul motore**

L'*AVL 619 Indimeter* è un sistema elettronico per l'acquisizione ad alta velocità e l'elaborazione di dati relativi al funzionamento di motori ai banchi prova. La parte hardware della strumentazione riceve i segnali provenienti dai vari trasduttori utilizzati sul motore ed esegue un campionamento in corrispondenza degli impulsi ricevuti dal sensore di posizione angolare dell'albero motore. Il campionamento non è quindi eseguito ad intervalli temporali, bensì angolari.

L'hardware dell'*Indimeter* è provvisto di una porta seriale per il collegamento con un personal computer, dove il rispettivo software, l'*AVL 619 Idiwin v2.0d*, permette la visualizzazione e la memorizzazione dei dati. Il software dispone anche di alcune funzioni per l'elaborazione dei cicli memorizzati. In particolare è possibile ottenere, dall'andamento della pressione in funzione dell'angolo di manovella, il ciclo motore nel piano pressione-volume e sia la curva di rilascio del calore che la sua derivata rispetto all'angolo di manovella, calcolati dal programma mediante algoritmi che tengono conto dei dati geometrici del motore e del coefficiente delle trasformazioni politropiche seguite dal fluido.

#### **6.4.3 Il sensore ottico di posizione angolare dell'albero motore**

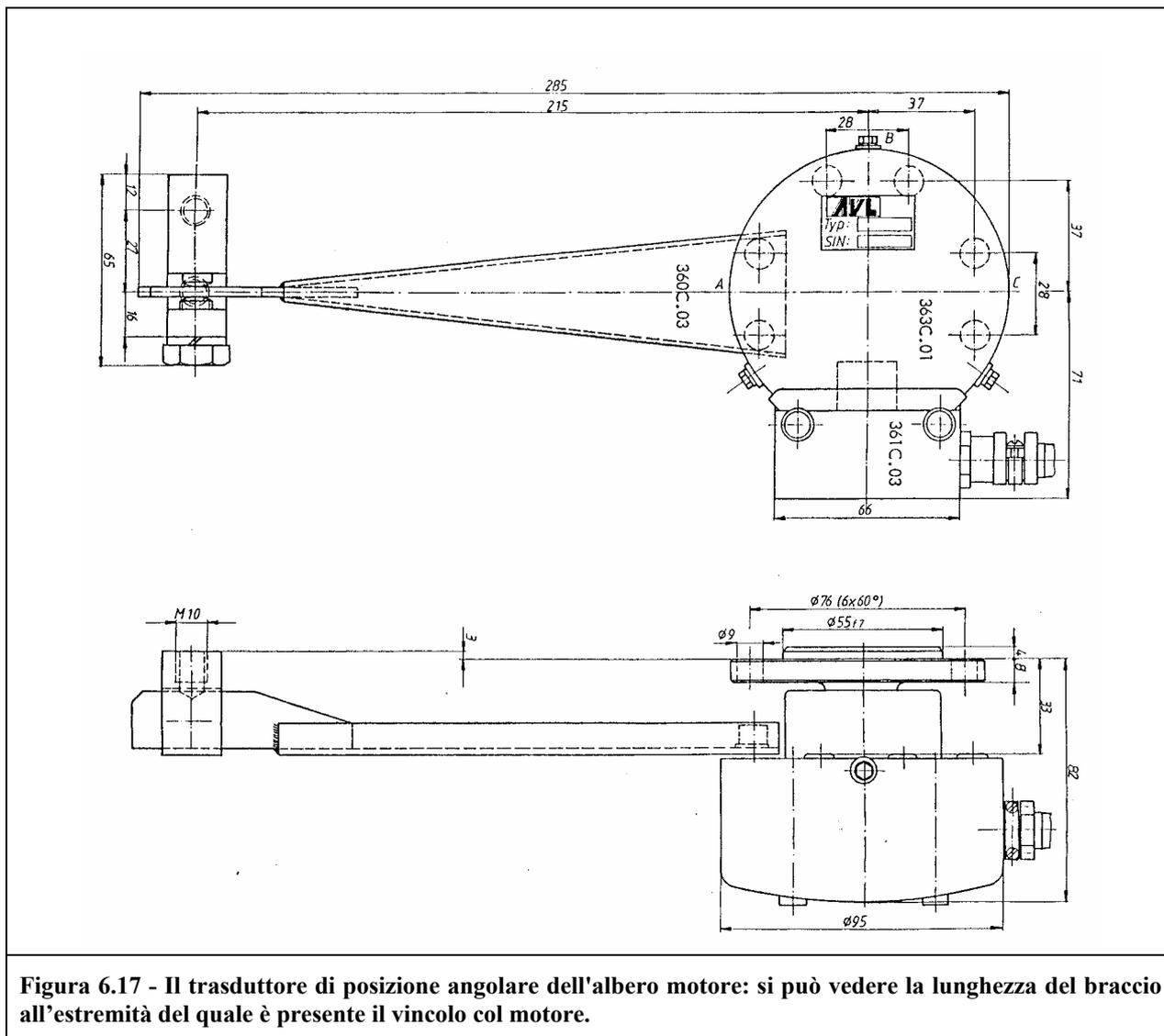
Il sensore utilizzato per determinare la posizione angolare dell'albero motore, l'*AVL 360/C/600*, è un encoder ottico di elevata precisione, in grado di raggiungere una risoluzione di un decimo di grado. Costituito da una parte rotante, rigidamente collegata all'albero motore, e da una parte statorica, vincolata al blocco motore, questo strumento funziona utilizzando un disco finestrato

solidale al rotore e due coppie di trasmettitori-ricevitori di luce infrarossa applicate nello statore. Ogni interferenza provocata dalle tacche presenti sul disco, causa l'emissione di un impulso da parte del diodo ricevitore. Il grosso vantaggio di una misura ottica è la bassa sensibilità alle interferenze di tipo elettrico presenti normalmente nei motori.

I segnali rilevati dalle coppie ricevitore-trasmettitore sono di due tipi: il primo fornisce un impulso ogni sei decimi di grado e rappresenta la misura vera e propria, l'altro segnale fornito una volta ogni giro, è di sincronismo e, oltre ad essere utilizzato per misurare la velocità del motore, serve a correggere il primo segnale, impedendo ad eventuali errori di sommarsi nel tempo.

Per ottenere la massima risoluzione, un moltiplicatore di impulsi aggiunge ad ogni segnale ricevuto due segnali disposti simmetricamente: gli impulsi trasmessi durante un giro diventano quindi 1800, corrispondenti a 3600 fronti di salita-discesa.

Per evitare imprecisioni di misura dovute ai movimenti relativi fra pick-up e disco trasparente che si possono creare a causa delle oscillazioni flessionali dell'albero motore, rotore e statore sono collegati tramite un cuscinetto a gioco molto ridotto. Inoltre il vincolo fra motore e statore è realizzato mediante una coppia sferica applicata all'estremità di un lungo braccio (Figura 6.17) per limitare la rotazione dello statore rispetto all'asse del rotore in seguito alle oscillazioni.

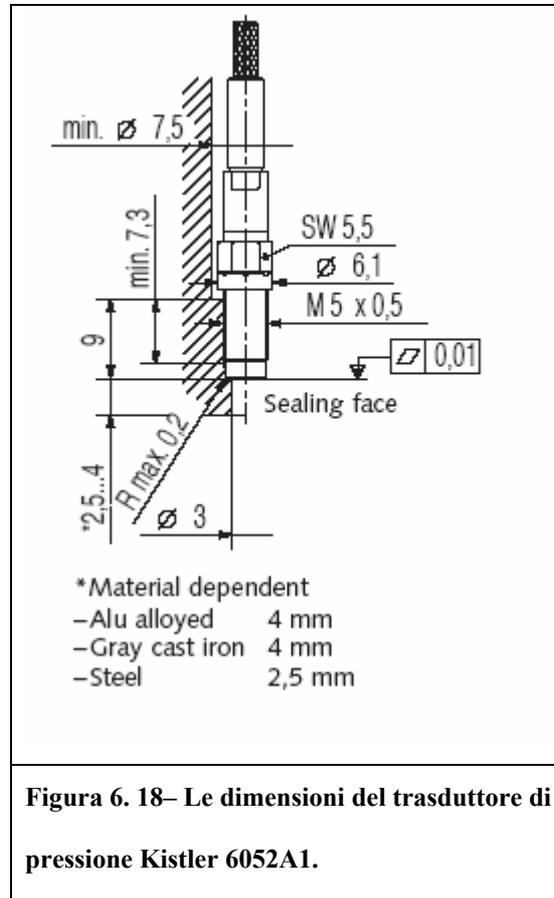


#### 6.4.4 Il trasduttore di pressione

L'andamento della pressione nel cilindro è stato rilevato mediante un *trasduttore piezoelettrico*, posizionato sullo testa e affacciato direttamente all'interno della camera di combustione. Il funzionamento dei trasduttori piezoelettrici si basa sulla capacità dei cristalli di quarzo di emettere delle cariche elettriche in quantità proporzionale alla forza cui sono sottoposti. Le cariche elettriche sono inviate ad un amplificatore di carica che trasforma il segnale in una differenza di potenziale, grandezza trasmessa poi ad uno dei canali di ingresso della strumentazione di acquisizione dati.

Il trasduttore utilizzato, Kistler 6052A1, abbina, alla dovuta resistenza agli stress termici e meccanici della combustione, una elevata precisione di misura ed un ingombro ridottissimo, che

lo rende particolarmente adatto ad essere utilizzato sui piccoli motori, come in questo caso, o sui moderni motori multivalvole che presentano una superficie libera della testa inadeguata ad alloggiare i trasduttori di tipo tradizionale.



**Figura 6. 18– Le dimensioni del trasduttore di pressione Kistler 6052A1.**

L'amplificatore di carica utilizzato è il Kistler 5011 B . Il segnale derivante dal sensore è stato filtrato, escludendo le componenti con frequenza superiore ai 30kHz.

#### **6.4.5 Il sistema di misurazione del rapporto di miscela**

Lo studio richiedeva un'elevata frequenza di misura del rapporto aria combustibile, impossibile da ottenere con la strumentazione presente nel laboratorio.

Dopo un'analisi delle strumentazioni disponibili sul mercato, la scelta è caduta sull' "LD700 – Lambda Checker", prodotto dalla casa giapponese Horiba. L'apparecchio si compone di un sensore UEGO e di un'unità elettronica di controllo.

Il sensore UEGO (Universal Exhaust Gas Oxigen Sensor), prodotto dalla NGK, è molto più complesso dei normali sensori d'ossigeno, o sonde lambda, comunemente impiegati sulle autovetture.

Il sensore, il cui schema è mostrato in figura 6.19, è costituito da una sonda d'ossigeno a banda stretta (indicato col nome di Reference Cell in figura), da una cella di pompaggio e da una piccola camera di diffusione. La cella di pompaggio, attraverso una reazione catalitica che avviene sugli elettrodi della cella stessa, è in grado sia di consumare ossigeno che di provvedere all'ossidazione dei composti derivanti da un eccesso di combustibile nella miscela, mediante un flusso ionico al suo interno.

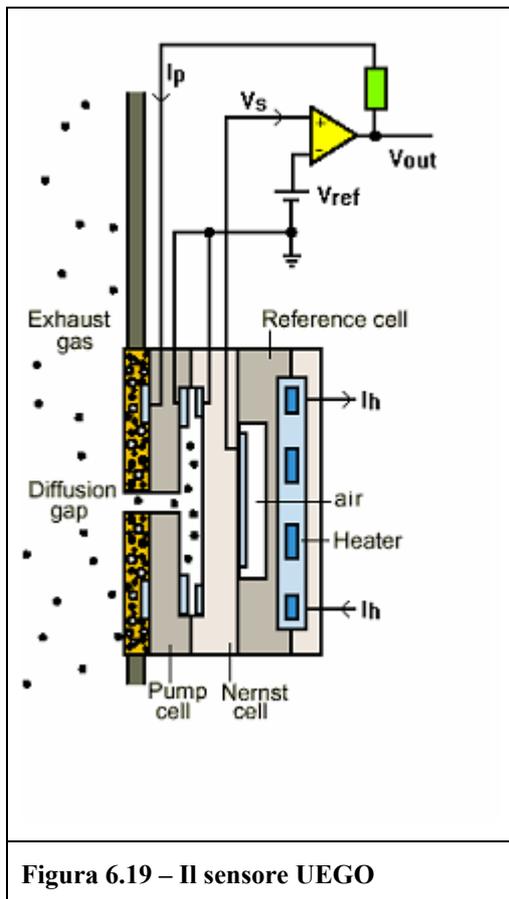


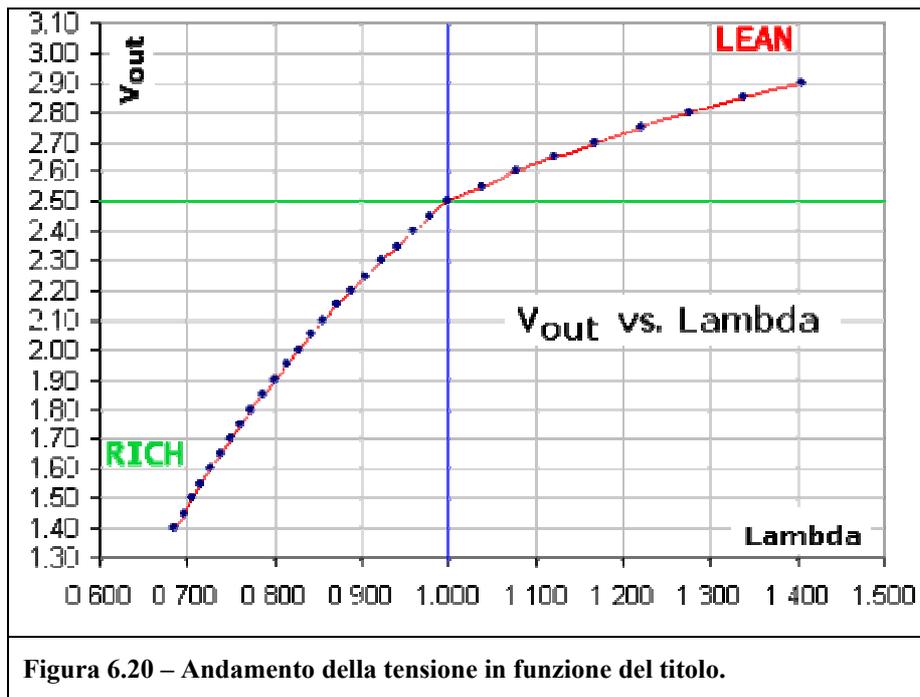
Figura 6.19 – Il sensore UEGO

Nel normale funzionamento, una parte dei gas di scarico entra nella camera di diffusione attraverso una piccola apertura (indicata con Diffusion Gap in figura) e influenza, col la sua composizione chimica, la cella di riferimento che genera un segnale di tensione ( $V_s$ ).

Se i gas combustibili sono il prodotto di una miscela ricca, il potenziale  $V_s$  è maggiore di  $V_{ref}$  e la corrente  $I_p$  che si viene a creare scorre in direzione tale da causare un consumo di idrocarburi incombusti, CO e H<sub>2</sub> nella camera di diffusione. Al contrario, una miscela magra porta ad avere  $V_s < V_{ref}$ , quindi la corrente  $I_p$  scorre in direzione opposta consumando l'ossigeno libero.

L'intensità della corrente dipende dalle reazioni che deve promuovere, quindi dalla percentuale di O<sub>2</sub>, o, nel caso di miscele ricche, di HC, CO e H<sub>2</sub>: dalla sua misura è possibile risalire al titolo.

La misura amperometrica è poi convertita in un segnale di tensione dall'unità di controllo. Il grafico di figura 6.20 presenta il tipico andamento del voltaggio di uscita. Come si può vedere, la pendenza della curva è diversa per miscele ricche e miscele povere. Questo accade perché le reazioni chimiche che avvengono in caso di miscela ricca o povera sono di tipo differente, quindi diversa è anche la corrente di pompaggio.



L'unità elettronica Horiba è provvista sia di una serie di led luminosi per la visualizzazione del valore di lambda che di un segnale di tensione in uscita proporzionale al valore della misura. Proprio quest'ultima grandezza è stata acquisita in uno dei canali di ingresso dell'Indimeter. Il tempo medio di risposta della strumentazione è di 80ms, quello massimo di 150ms.

### 6.4.6 Il sensore di detonazione

I sensori di detonazione sono degli accelerometri, cioè degli strumenti che forniscono in uscita una grandezza proporzionale all'accelerazione cui sono sottoposti. Come per il trasduttore di pressione, anche in questo caso l'elemento principale è un cristallo di materiale piezoelettrico.

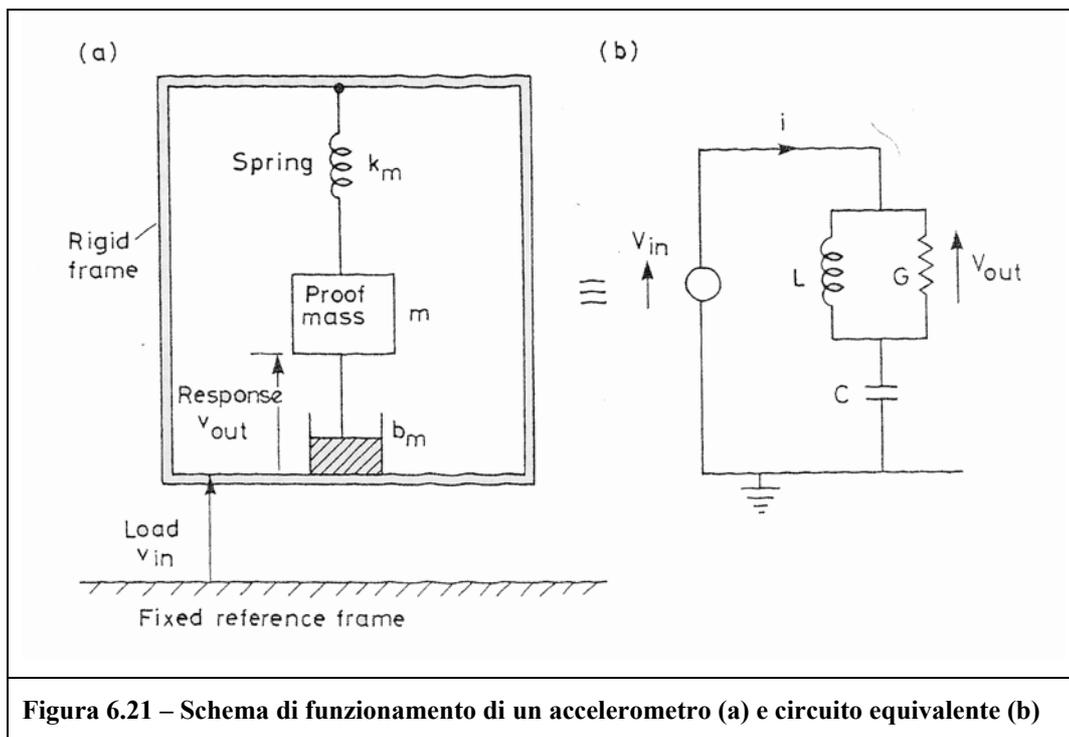


Figura 6.21 – Schema di funzionamento di un accelerometro (a) e circuito equivalente (b)

Il principio di funzionamento è schematizzato in figura 6.21. Una massa è collegata ad un supporto tramite una molla (il cristallo di materiale piezoelettrico) e uno smorzatore, che rappresenta l'attrito di tipo viscoso. La forza di inerzia della massa, in seguito al movimento del supporto, causa una deformazione dell'elemento piezoelettrico che a sua volta produce delle cariche in quantità proporzionale alla forza d'inerzia stessa e, di conseguenza, alla sua accelerazione. Se la permittività dielettrica del materiale rimane costante con la quantità di carica generata, il voltaggio prodotto è proporzionale all'accelerazione. La rappresentazione di figura 6.21 è valida nel caso in cui massa e supporto abbiano rigidità infinita, la molla sia priva di massa e lo smorzamento avvenga solamente fra massa e supporto. I trasduttori reali si allontanano molto da queste condizioni e, generalmente, le equazioni che caratterizzano il funzionamento ideale sono prive di utilità pratica: le frequenze di risonanza reali, in particolare, possono risultare molto più basse di quelle indicate dalla teoria.

Come per qualsiasi tipo di trasduttore, le caratteristiche più importanti del sensore di detonazione sono la sensibilità, cioè il rapporto fra le grandezze in uscita e in entrata, la risoluzione, cioè il più piccolo segnale apprezzabile, il grado di linearità, la sensibilità a variazioni delle condizioni ambientali e il campo di frequenza di funzionamento. Quest'ultima grandezza, in particolare, è l'elemento determinante per la scelta del tipo di sensore di detonazione da utilizzare []. Esistono infatti tre categorie principali di sensori di detonazione. I più comuni, quelli a risposta piatta, hanno alte frequenze di risonanza, quindi presentano una risposta relativamente piatta nello spettro di frequenze che caratterizzano la detonazione, in genere compreso fra 5 e 10kHz. Questa tipologia di sensori è molto utilizzata perché l'ampia gamma di frequenze di funzionamento consente l'utilizzo dello stesso sensore su motori diversi, caratterizzati da frequenze associate alla detonazione diverse, variando semplicemente il filtraggio operato dell'elettronica di controllo.

La frequenza di risonanza degli altri due tipi di sensore, quelli a picco di risonanza (Spike Resonant) e quelli a banda di risonanza larga (Broadband Resonant), è, al contrario, centrata sulla frequenza principale di detonazione del motore. La differenza fra queste ultime due categorie è data dalla larghezza della banda di risonanza: i primi hanno, come dice il nome, una banda stretta, dell'ordine dei 100Hz, gli altri una larghezza di banda all'incirca dieci volte maggiore (Figura 6.22). Un sensore a picco di risonanza richiede una corretta determinazione della frequenza principale di risonanza della camera di combustione e risente di eventuali alterazioni di questa grandezza, variazioni che possono essere causate, ad esempio, da una diversa intensità del moto di swirl [].

La Tabella 6.4 riassume pregi e difetti dei tre tipi di sensore.

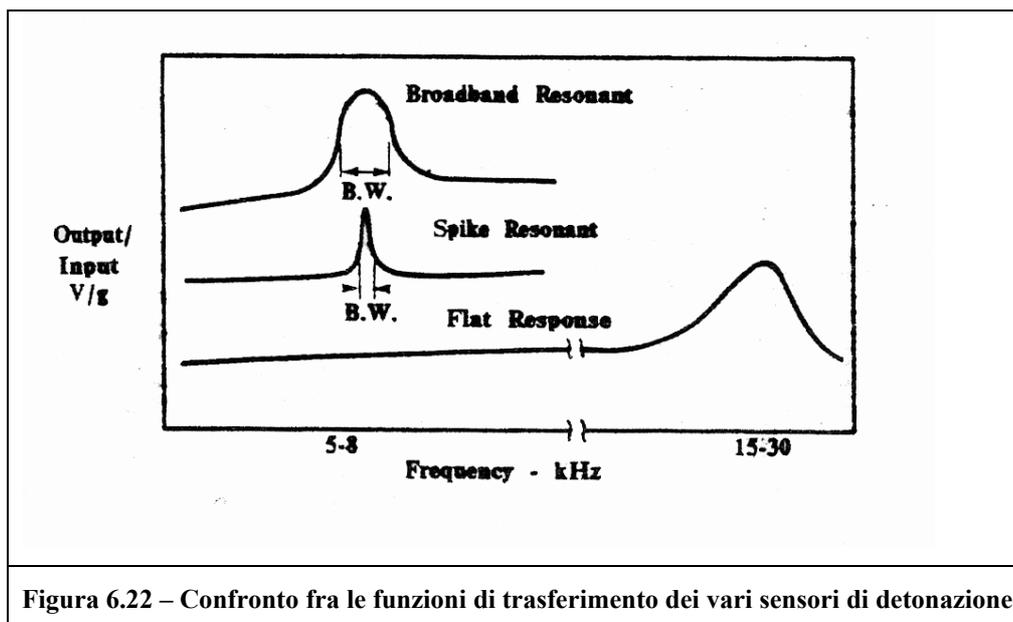


Figura 6.22 – Confronto fra le funzioni di trasferimento dei vari sensori di detonazione

Parametro	Broadband Resonant	Spike Resonant	Flat Band
Livello di segnale	5	3	1
Rapporto segnale/rumore	4	4	3
Facilità di utilizzo	4	3	5
Impatto economico	4	4	2
Sensibilità alle variazioni della frequenza di detonazione	4	1	4
Sensibilità alle alte velocità (>6000 rpm)	2	2	2
<b>Totale</b>	<b>23</b>	<b>17</b>	<b>17</b>

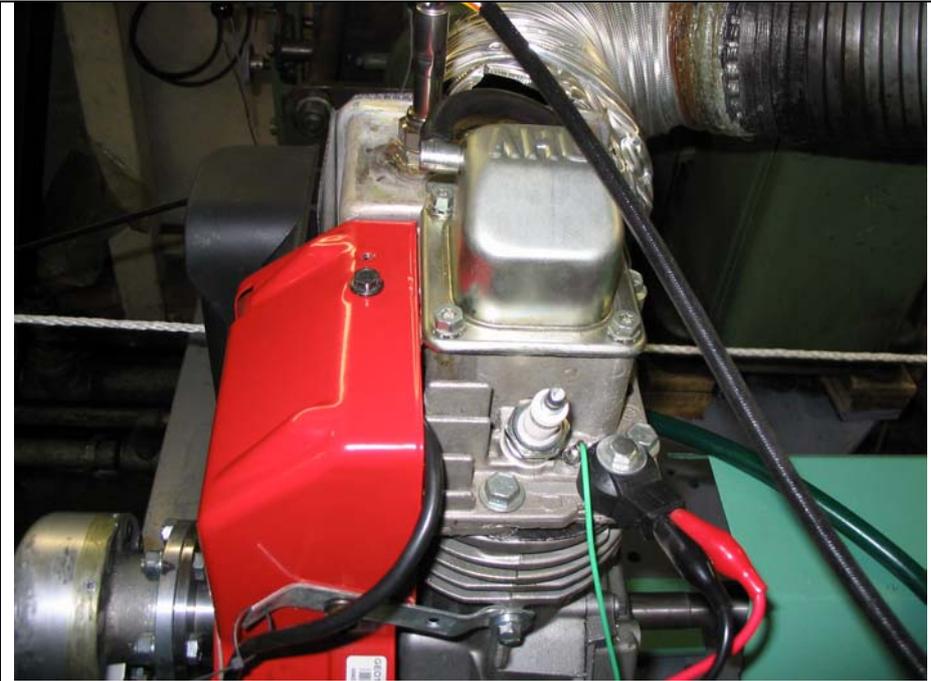
Tabella 6.5 – Confronto fra le prestazioni dei tre tipi di sensore ( 1=minimo , 5=massimo)

Per questa tesi si è scelto un sensore “flat band” impiegato sui sistemi di accensione Marelli. E’ stata preferita tale tipologia perché a priori non erano conosciute le frequenze principali di propagazione delle onde all’interno della camera di combustione e il loro andamento al variare del regime del motore.

La banda di funzionamento del sensore è compresa fra i 5 e i 22kHz, la sensibilità di 30 mV/g a 5kHz.

Data la bassa intensità del segnale generato, si è deciso di interporre, fra il sensore e l’hardware di acquisizione dati, un amplificatore di carica, il “PCB 463 A”.

In figura 6.23 è possibile osservare il sensore posizionato sulla testa del motore.



**Figura 6.23 – Il sensore di detonazione collocato sulla testa del motore  
(a destra della candela)**