

***LaurTec***

**Sensori di campo magnetico  
ad effetto Hall e magnetoresistivi**

**Autore :** *Mauro Laurenti*

**email:** [info.laurtec@gmail.com](mailto:info.laurtec@gmail.com)

**ID:** AN2005-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

Siamo interamente avvolti dal campo magnetico terrestre ma nessuno dei nostri cinque sensi è in grado di avvertirne la presenza, la nostra unica esperienza della sua presenza è solitamente racchiusa nell'ago di una bussola.

In questo Tutorial verranno presentati in primo luogo i sensori ad effetto Hall, illustrando alcuni esempi per il rilevamento di campi magnetici generati da magneti permanenti (calamite).

In ultimo verranno presentati i sensori magnetoresistivi che rappresentano lo stato dell'arte dei sensori magnetici allo stato solido. La loro sensibilità è tale per cui possono essere utilizzati per rilevare campi magnetici invisibili anche ai sensori ad effetto Hall.

## Sensori ad effetto Hall

Il nome di questi sensori discende dal ricercatore Edwin Hall, che nel 1879 osservò il fenomeno che avrebbe portato il suo nome. Nonostante sia stato scoperto più di un secolo fa, i primi sensori ad effetto Hall hanno preso luce solamente con la nascita dei primi semiconduttori avvenuta negli anni 50. L'esperienza che fece Hall è riportata schematicamente in Figura 1.

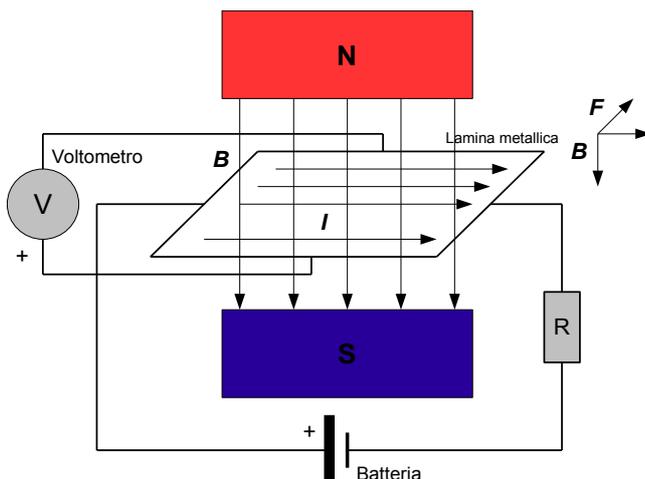


Figura 1: Rappresentazione dell'esperienza fatta da Hall

La lamina di metallo è attraversata da una corrente  $I$  secondo il verso delle frecce

orizzontali. In assenza del campo magnetico generato dalla calamita, la corrente scorre attraverso la lamina in maniera omogenea, senza cioè presentare particolari addensamenti in nessuna parte della lamina. Se viene applicato un campo magnetico ortogonale alla superficie della lamina, come riportato in Figura 1 (per ragioni di chiarezza non sono riportate le altre linee di campo con cui si richiude il campo magnetico) gli elettroni, avendo una velocità non nulla, sono soggetti alla forza di Lorentz. Tale forza risulta ortogonale sia alla corrente che al campo magnetico, tenderà dunque a spingere gli elettroni verso i lati opposti su cui scorre la corrente. In particolare gli elettroni si addenseranno o su un lato o sull'altro a seconda del verso del campo magnetico e della corrente, in Figura 1 si ha un addensamento verso l'alto.

La presenza dell'accumulo di carica dà origine ad una differenza di potenziale (d.d.p) sui lati opposti verso cui scorre la corrente, cosa che in assenza di campo magnetico non è presente.

La forza che determina l'addensamento di carica risulta direttamente proporzionale sia alla corrente che al campo magnetico, dunque la d.d.p che è possibile misurare aumenta sia con l'aumentare del campo magnetico che della corrente  $I$ . Dal momento che si ha interesse a misurare solo il campo magnetico si fa uso di una corrente costante ottenuta per mezzo di un regolatore di tensione interno o eventualmente esterno, in modo da rendere la corrente  $I$  costante. In questo modo l'addensamento di elettroni, e quindi la d.d.p d'interesse, è legata solo al campo magnetico.

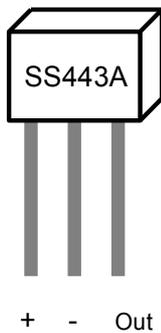
Dal momento che la d.d.p che si viene a creare risulta di poche decine di  $\mu V$  ( $\mu V$  milionesimo di volt) è necessaria un'amplificazione del segnale e una compensazione termica, in modo da rendere la d.d.p, generata ai lati della barretta metallica, di un qualche utilizzo.

Vengono prodotti due tipi di sensori ad effetto Hall, i cosiddetti digitali e gli analogici lineari. Verranno ora presentati due sensori della Honeywell, l'SS443A di tipo digitale e l'SS495A di tipo analogico.

Il nome "digitale" discende dal fatto che l'uscita possiede solo due stati, o ON o OFF. Il

valore in tensione associato ai due livelli è legato all'alimentazione. Al loro interno è presente un trigger di Schmitt che provvede, dopo l'opportuna amplificazione del segnale, a confrontare la d.d.p, presente sulle pareti della lamina, con un livello di riferimento, sopra il quale avviene il cambio di livello logico. Poiché il trigger di Schmitt possiede l'isteresi si ha che il livello di soglia che fa passare dallo stato OFF allo stato ON risulta maggiore del livello di soglia con cui si ha il passaggio dallo stato ON allo stato OFF, come riportato in Tabella 1. In questo modo si evita che l'uscita possa oscillare con rapidi cambi di stato OFF-ON e ON-OFF.

In Figura 2 è riportato il sensore SS443A della Honeywell con la relativa piedinatura, mentre in Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche tecniche.



**Figura 2:** Piedinatura del sensore digitale SS443A

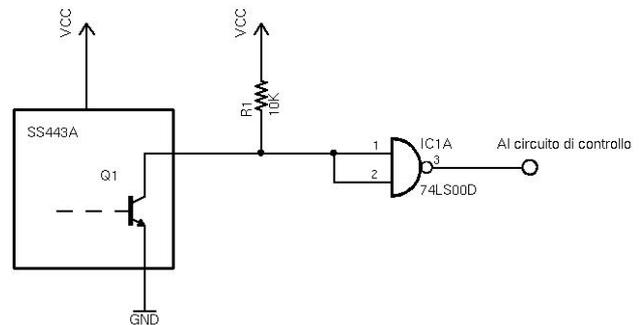
Parametro	Min	Tip	Max	Unità
Tensione di alimentazione	3.8		30	Vdc
Assorbimento			10	mA
Corrente dal carico (open collector)			20	mA
Tempo di salita (dal 10% al 90%)		0.05	1.5	µs
Tempo di discesa (dal 10% al 90%)		0.15	1.5	µs
Livello di riferimento OFF-ON		145		Gauss
Livello di riferimento ON-OFF		115		Gauss

**Tabella 1:** Caratteristiche principali del sensore digitale SS443A

Dal momento che la sua uscita può assumere solo due livelli, si capisce che ben si presta ad applicazioni in cui bisogna interfacciarsi con circuiti digitali. Particolare accortezza deve

essere posta all'uscita che è ottenuta per mezzo di un transistor finale NPN in configurazione open collector<sup>1</sup>. Questo significa che per poter collegare l'uscita out a delle porte logiche, è necessario far uso di un resistore di pull-up, ovvero collegato tra l'uscita e Vcc. In Figura 3 è riportata una tipica applicazione per interfacciarsi con delle porte logiche TTL che potrebbero però rappresentare anche degli ingressi di un qualunque microcontrollore.

Il transistor NPN in configurazione open collector con relativo resistore di pull-up, rappresenta una porta NOT, ovvero un invertitore di livello logico. Dunque quando l'uscita del trigger di Schmitt è 1 logico (livello di tensione alto) la tensione sul collettore del transistor sarà a livello logico 0 (livello di tensione basso). Lo zero logico è rappresentato dalla Vce del transistor che si trova in saturazione.



**Figura 3:** Schema applicativo del sensore digitale SS443A

Quando il livello logico del trigger di Schmitt è basso, si ha che il transistor è interdetto e dunque il livello logico sul collettore è 1 (livello di tensione alto).

Riassumendo, sul collettore si avrà 0 logico quando il campo magnetico supererà il livello di soglia OFF-ON, mentre si avrà un 1 logico quando il livello del campo magnetico sarà al disotto del livello di soglia ON-OFF o OFF-ON a seconda dello stato precedente. Per mezzo della porta NAND contenuta nell'integrato 74LS00 si è realizzata una porta NOT in modo da invertire nuovamente il ragionamento sopra esposto ed ottenere un 1 logico, all'uscita del

<sup>1</sup> Per maggior chiarimenti si veda il Tutorial "1000 domande 1000 risposte".

pin 3, quando il livello del campo magnetico supererà la soglia di riferimento OFF-ON.

Utilizzando una piccola calamita come sorgente di campo magnetico si può ottenere un semplice rilevatore di prossimità dell'oggetto al quale è attaccata la calamita. In particolare se la calamita viene collegata ad un oggetto ruotante è possibile, per mezzo di un frequenzimetro, conoscere il numero di giri. Questa tecnica è utilizzata nei tachimetri per bici, dove, conoscendo il punto in cui viene posta la calamita, è possibile risalire alla velocità e alla distanza percorsa.

Un'altra tipica applicazione, simile al tachimetro da bici, è il encoder incrementale. Questo può essere ottenuto in vari modi ed uno di questi è proprio facendo uso dei sensori ad effetto Hall<sup>2</sup>.

Laddove si sia interessati all'intensità del campo magnetico in maniera continua, è obbligatorio l'utilizzo dei sensori analogici lineari. In Figura 4 è riportata la piedinatura del sensore ad effetto Hall lineare ratiometrico SS495A mentre in Tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche tecniche.

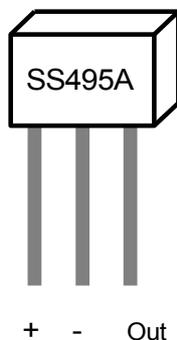


Figura 4: Piedinatura del sensore lineare ratiometrico SS495A

La tensione di uscita di tale sensore, dal momento che l'alimentazione non è duale, ma il campo magnetico può assumere sia valori positivi che negativi (si può cioè ribaltare il magnete di Figura 1) viene fissata a metà del valore dell'alimentazione<sup>3</sup>. Dunque se l'alimentazione è di 5V, in assenza di campo magnetico (0 Gauss) l'uscita varrà 2.5V. Tale

<sup>2</sup> Per ulteriori chiarimenti in materia si faccia riferimento al tutorial "Motori DC e servo".

<sup>3</sup> Da questa caratteristica tali sensori vengono chiamati ratiometrici.

tipo di sensore può essere utilizzato anche al posto dell'SS443A con lo svantaggio però di dover inserire un trigger di Schmitt esterno ma con il vantaggio di poter impostare il livello di soglia del campo magnetico.

Parametro	Min	Tip	Max	Unità
Tensione di alimentazione	4.5		10.5	Vdc
Assorbimento		8.7		mA
Tipo uscita	push-pull			
Corrente uscita		1.5		mA
Sensibilità (25 °C)		3.125		mV/G
Intervallo campo magnetico	-670		670	G
Tempo di risposta		3		µs

Tabella 2: Caratteristiche principali del sensore lineare ratiometrico SS495A

In Figura 5 è riportata una tipica applicazione in cui si fa uso di un'alimentazione singola ma si vuole rilevare anche la presenza di un campo magnetico negativo oltre che positivo.

L'operazionale collegato direttamente al sensore è in configurazione non invertente e il

guadagno è fissato dal rapporto  $\frac{R_2}{R_1}$ .

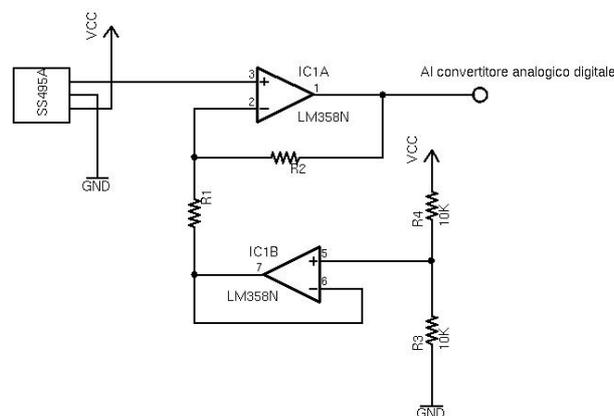


Figura 5: Schema applicativo del sensore lineare ratiometrico SS495A

Si può però osservare che il resistore  $R_1$  non è collegato direttamente a massa come nella configurazione non invertente classica, bensì all'uscita del secondo operazionale contenuto nell'integrato LM358. Questo operazionale è collegato in configurazione buffer, dunque ha un guadagno unitario. Il suo ingresso è fissato

dal partitore di tensione<sup>4</sup> composto dalle resistenze R3 e R4. Dal momento che sono di ugual valore la tensione applicata all'ingresso non invertente del buffer di tensione è pari alla metà, dunque, visto che il guadagno è unitario anche l'uscita è pari alla metà della tensione di alimentazione.

Questo stratagemma permette di emulare un'alimentazione duale in presenza di un'alimentazione singola.

Dal momento che il sensore è di tipo ratiometrico e la sua uscita in assenza di campo magnetico è pari a metà alimentazione, si ha che avendo collegato R1 ad un valore in tensione proprio pari alla metà dell'alimentazione il segnale in uscita all'operazionale collegato al sensore, sarà, se misurato rispetto al riferimento creato pari alla metà dell'alimentazione, pari a 0V.

In particolare si avranno, sempre rispetto a questo riferimento, sia tensioni positive che negative a seconda del livello del campo magnetico.

Dunque se il circuito dovesse essere alimentato a 5V, si avrà, dal momento che l'uscita del sensore è rail to rail<sup>5</sup>, che il range di tensione tra 0V<sup>6</sup> e 2.5V sarà relativo a campi magnetici positivi, mentre il range di tensione tra 0V e -2.5V sarà relativo a campi magnetici negativi.

L'uscita di questo circuito può essere poi collegata all'ingresso analogico digitale di un qualunque microcontrollore. In particolare, se si misura l'uscita rispetto a massa si ha che la situazione di campo magnetico nullo genera una tensione pari a 2.5V, dunque il convertitore analogico digitale darà come risultato di conversione il numero 512 (se è un ADC<sup>7</sup> a 10 bit) per indicare un valore nullo.

Nello schema appena visto si ha che la dinamica del convertitore analogico digitale viene divisa a metà per avere la possibilità di misurare sia campi magnetici positivi che

negativi.

Qualora non si abbia la necessità di misurare i campi magnetici negativi<sup>8</sup> e si voglia sfruttare l'intera dinamica di 5V del convertitore analogico digitale per il solo campo magnetico positivo, generalmente si procede con uno schema simile a quello riportato in Figura 6<sup>9</sup>.

Per poter sfruttare l'intera dinamica si fa in modo che il segnale che non porta informazione venga eliminato. In particolare è possibile osservare che l'operazionale collegato al sensore è in configurazione sottrattore; questo permette di sottrarre il segnale che non porta informazione.

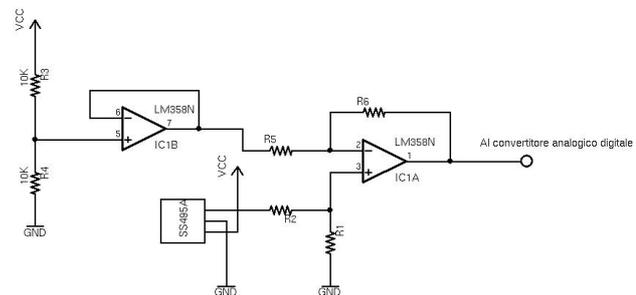


Figura 6: Schema applicativo del sensore lineare ratiometrico SS495A

Dal momento che un'uscita minore di 2.5V indica che il campo è negativo, sottraendo 2.5V all'uscita del sensore per mezzo della configurazione a sottrattore e del riferimento di tensione ottenuto in maniera analoga in Figura 5, si ha che l'uscita del sottrattore sarà fissa a 0V.

Il segnale in uscita al sensore verrà amplificato solo se maggiore di 2.5V e potrà occupare l'intera dinamica di 5V del convertitore analogico digitale. Questo artificio permette di ottenere una miglior risoluzione nella lettura del campo magnetico positivo poiché la dinamica è ad essa dedicata.

Tale tecnica<sup>10</sup>, viene frequentemente usata

<sup>4</sup> Per maggior chiarimenti si veda il Tutorial "Leggi ed applicazioni fondamentali dell'elettrotecnica".

<sup>5</sup> Per maggior chiarimenti si veda il Tutorial "1000 domande 1000 risposte".

<sup>6</sup> 0V rappresenta il riferimento di tensione che se misurato rispetto a massa è pari a 2.5V, ovvero metà alimentazione.

<sup>7</sup> ADC Analog Digital Converter, ovvero convertitore analogico digitale.

<sup>8</sup> Il ragionamento che segue vale anche nel caso in cui si sia interessati ai campi negativi e non a quelli positivi. Per mantenere invariato quanto viene detto basta ribaltare la faccia del sensore SS495A, sul quale viene applicato il campo magnetico.

<sup>9</sup> Per maggior chiarimenti su come dimensionare i resistori si faccia riferimento al Tutorial "Amplificatori da strumentazione".

<sup>10</sup> Tale tecnica rappresenta una forma di ciò che va sotto il nome di condizionamento del segnale. Per ulteriori

quando si deve leggere il segnale in uscita ad un sensore e si è interessati solo ad un intervallo di variazione della grandezza che il sensore è in grado di rilevare; tutto il superfluo viene tagliato fuori.

### Sensori ad effetto magnetoresistivo

La natura dei sensori magnetoresistivi è molto più complessa di quelli ad effetto Hall. Lo scopo di questo paragrafo non sarà quello di rendere il lettore un esperto in materia ma sarà tale da permettergli di sfruttare tali sensori in alcune applicazioni di precisione ma senza sfruttare a pieno le reali potenzialità del sensore stesso. Verranno comunque fornite le basi per poter comprendere come sfruttare nelle sue massime performance tali sensori.

Come per i sensori ad effetto Hall i sensori magnetoresistivi permettono la misura di campi magnetici. Questo avviene sfruttando la proprietà fisica di alcuni materiali chiamati AMR (Anisotropic MagnetoResistive) ovvero materiali anisotropi la cui resistenza varia al variare del campo magnetico esterno. In particolare, la resistività  $\rho$  del materiale è legato al campo magnetico esterno secondo una relazione del tipo  $\cos^2 \theta$ .

L'angolo  $\theta$  rappresenta l'angolo compreso tra il vettore di magnetizzazione  $M$  e il vettore corrente  $I$ .

Il vettore di magnetizzazione è una grandezza vettoriale con la quale si quantificano gli effetti magnetici legati ai mini dipoli che vengono a crearsi o sono presenti all'interno del materiale. In Figura 7 è riportato l'angolo  $\theta$  da cui dipende la resistività.

Il fatto che la resistività venga a dipendere da una relazione del tipo  $\cos^2 \theta$  significa che il sensore non è lineare come nel caso dei sensori ad effetto Hall. Questo significa che in linea di principio per calcolare la tensione di uscita del sensore non è consentito moltiplicare il livello del campo magnetico esterno per una costante (sensibilità).

In realtà sono presenti varie tecniche per mezzo delle quali è possibile ottenere una relazione lineare entro ampi valori del campo

magnetico. Le varie soluzioni adottate sono spesso di proprietà delle case produttrici e vengono implementate all'interno del sensore stesso, dunque su questo aspetto non ci si soffermerà.

In particolare il sensore della Honeywell HMC1001 risulta lineare entro un intervallo di  $\pm 2$  Gauss. L'HMC1001 è un sensore magnetoresistivo ad un asse, ovvero in grado di rilevare il campo magnetico solo lungo un asse. L'HMC1002<sup>11</sup> è invece un sensore magnetoresistivo a due assi.

L'HMC1002 è cioè in grado di scomporre il campo elettromagnetico su un piano, secondo le componenti  $x$  e  $y$ . In Figura 8 è riportata la piedinatura dell'HMC1001 e dell'HMC1002.

E' possibile osservare che l'HMC1001 ha un montaggio verticale mentre l'HMC1002 ha un montaggio orizzontale. Questo discende dal fatto che non esiste un HMC1003 a tre assi dunque per realizzarlo bisogna far uso di un HMC1001 e un HMC1002. Grazie al fatto che il montaggio è uno verticale e uno orizzontale è possibile scomporre il vettore magnetico sui tre assi  $x, y, z$ .

I sensori della Honeywell, appena citati, come materiale AMR, fanno uso di una lega NiFe (Nichel Ferro). Dal momento che ambedue i materiali sono buoni conduttori, al fine di ottenere resistori con elevate resistenze, i resistori vengono realizzati depositando uno strato molto sottile di questa lega su di un materiale di sostegno che non altera le proprietà del campo magnetico esterno.

In particolare il sensore è costituito da 4 resistori, collegati a diamante, costituenti un ponte di Wheatstone. Si capisce dunque che l'uscita del sensore sarà differenziale ed in particolare è rappresentata dai pin Out+ e Out-.

informazioni si faccia riferimento al Tutorial "Misure elettriche e tecniche di condizionamento del segnale".

<sup>11</sup> Un altro sensore commerciale simile a questo è il KMZ51 della Philips.

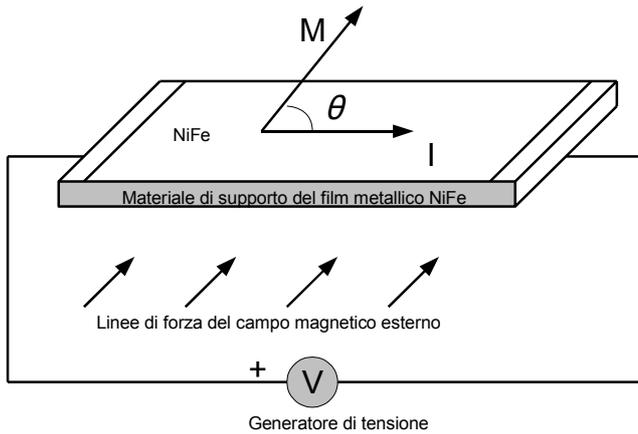


Figura 7: Angolo  $\theta$  compreso tra M e I sul piano x,y.

Il ponte di Wheatstone viene alimentato per mezzo dei pin  $V_{BRIDGE}$  e GND. Per mezzo dei piedini ora introdotti è possibile utilizzare il sensore in molte applicazioni e con una sensibilità superiore ai sensori lineari ratiometrici ad effetto Hall.

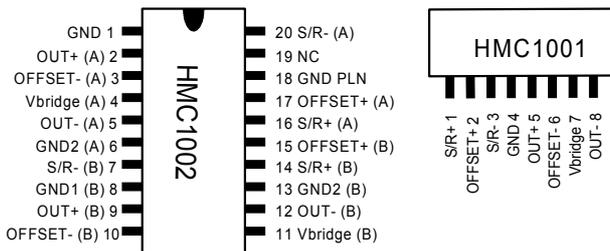


Figura 8: Piedinatura dei sensori magnetoresistivi HMC1001 e HMC1002

La lettura del sensore può essere effettuata come per un comune ponte di Wheatstone, ovvero con un amplificatore in configurazione sottrattore. In Figura 9 è riportato un esempio.

In particolare in sostituzione dell'amplificatore in configurazione sottrattore si è fatto uso di un amplificatore da strumentazione. Si noti che il riferimento è stato posto a metà alimentazione per mezzo del partitore di tensione ottenuto con i resistori R6 e R7. In questo modo l'uscita varierà intorno a 2.5V permettendo di rilevare sia campi magnetici positivi che negativi.

Questa soluzione non è in realtà ottimale poiché il ponte di Wheatstone presenta una tensione di offset in uscita che andrà a sommarsi

o sottrarsi ai 2.5V di riferimento. Per tale ragione è bene sostituire le due resistenze con un trimmer in modo da eliminare la tensione di offset che verrà a presentarsi in uscita<sup>12</sup>.

Sono presenti tecniche più sofisticate per eliminare la tensione di offset ma per farne uso si devono sfruttare gli altri pin, dunque, ancora un momento!

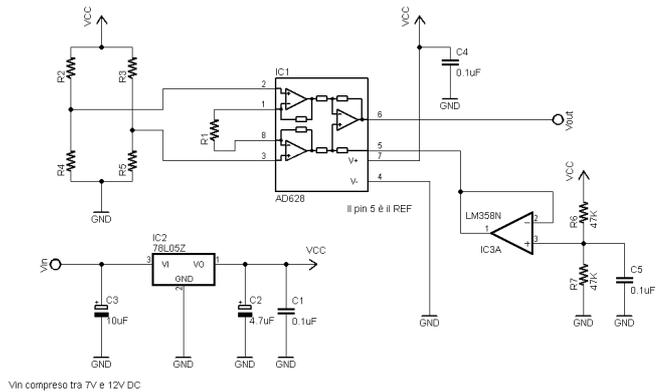


Figura 9: Schema di esempio per la lettura della tensione in uscita al HMC1001 leggendo direttamente l'uscita del ponte di Wheatstone

La tecnica più semplice per l'eliminazione dell'OFFSET del ponte di Whitstone si ha con l'uso dei pin siglati OFFSET+ e OFFSET-. Questi sono collegati ad un piccolo avvolgimento interno al sensore stesso e disposto in maniera tale che il campo magnetico che si viene a generare quando scorre corrente vada a sommarsi o sottrarsi con la componente del campo magnetico rispetto al quale il sensore è sensibile. Il fatto che si abbia un pin con il + e uno con il - è solo legato al fatto che se si vuole sommare un campo magnetico si dovrà rispettare tale polarità, mentre se si vuole sottrarre un campo magnetico si dovrà invertire la polarità della tensione, ovvero invertire il verso della corrente.

Questo avvolgimento interno viene generalmente utilizzato all'interno di un anello di reazione negativa in modo da rendere l'azzeramento automatico.

La corrente che è possibile farvi circolare è generalmente di poche decine di mA. La

<sup>12</sup> Per ulteriori chiarimenti in materia si faccia riferimento al Tutorial "Amplificatori da strumentazione" e "Misure elettriche e tecniche di condizionamento del segnale".

resistenza dell'avvolgimento è compresa tra  $2.5\Omega$  e  $3.5\Omega$ , mentre il campo magnetico generato è mediamente di  $51\text{mA/Gauss}$ <sup>13</sup>.

Vediamo ora una delle parti più complicate con le quali si deve cimentare il progettista ma che fanno dei sensori magnetoresistivi tra i sensori più sensibili per rilevare campi magnetici<sup>14</sup>.

I pin di cui si sta parlando sono S/R+ e S/R-, S ed R stanno per SET e RESET, vediamo a cosa servono.

Come detto la resistività viene a dipendere dal dall'angolo  $\theta$  tra il vettore di magnetizzazione M e il vettore corrente I.

In fase di realizzazione del sensore, ovvero durante la fase in cui si deposita la lega metallica, viene applicato un forte campo magnetico, in modo da orientare rispetto ad un asse preferenziale il vettore di magnetizzazione M.

A causa di forti campi magnetici esterni, come per esempio quelli generati dai magneti permanenti degli altoparlanti, tale direzione può essere alterata causando un deterioramento della sensibilità del sensore stesso. Questo non si danneggia ma a causa di un "effetto memoria" che mantiene il vettore di magnetizzazione M spostato rispetto a quello impostato dall'industria, il sensore non lavorerà nelle sue massime performance.

Per mezzo dei pin S/R+ e S/R-, che sono collegati ad un altro avvolgimento interno al sensore stesso è possibile ripristinare le condizioni iniziali, "smemorizzando" il sensore.

Il campo magnetico generato da questo nuovo avvolgimento deve avere la direzione tale da modificare il vettore M, che è diversa da quella che si deve avere nel caso dell'avvolgimento collegato ai pin OFFSET+ e OFFSET-.

In particolare mentre nel caso dell'avvolgimento legato all'OFFSET scorre una corrente continua di qualche decina di mA,

nell'avvolgimento associato alla funzione di Set e Reset scorrono diversi amper, fino a 4A, ma in maniera impulsiva.

In particolare l'impulso deve avere un'ampiezza di  $2\mu\text{s}$ . L'ampiezza dell'impulso della corrente varia da un minimo di 0.5A a 4A poiché in alcuni casi non si ha interesse ad ottenere la miglior sensibilità consentita dal sensore stesso.

Facciamo un altro passo e cerchiamo di capire poiché si parla di Set/Reset e non solo di Reset, visto che per quanto fin ora detto l'avvolgimento interno di Set/Reset sembra che ripristini solo la condizione ottimale per il vettore di magnetizzazione M.

La ragione è legata alla dipendenza della resistività da  $\theta$  secondo una legge del tipo  $\cos^2\theta$ .

Matematicamente, e questo si ripercuote fisicamente, significa che la soluzione dell'equazione che lega la tensione di uscita al ponte di Wheatstone, con il campo magnetico che si sta misurando, non è una ma due; in particolare una è l'opposta dell'altra.

E' possibile selezionare una soluzione o l'altra per mezzo del segnale di Set e Reset, cioè il vettore di magnetizzazione M viene ruotato opportunamente, mantenendo la soluzione inalterata in modulo ma invertita di segno.

Si sono introdotti i due avvolgimenti come possibili soluzioni per risolvere il problema dell'offset in uscita. Il primo avvolgimento fa capo ai pin OFFSET+ e OFFSET- delegati specificatamente per lo scopo. In realtà è possibile ottenere una soluzione analoga in maniera a dir poco elegante, anche per mezzo dell'avvolgimento di Set e Reset. Questo avvolgimento permette di ottenere la massima sensibilità del sensore grazie al fatto che ripristina in maniera corretta il vettore di magnetizzazione. Per tale scopo è però necessario solo l'impulso di Set o Reset<sup>15</sup>. La distinzione tra i due impulsi sta solo nel verso della corrente, in particolare l'impulso di Set è tale che la corrente entra in S/R+ e esce da S/R- mentre per l'impulso di Reset si inverte il ragionamento, ovvero la corrente esce da S/R+ ed entra da S/R-.

Da quanto fin ora detto si sa che la tensione

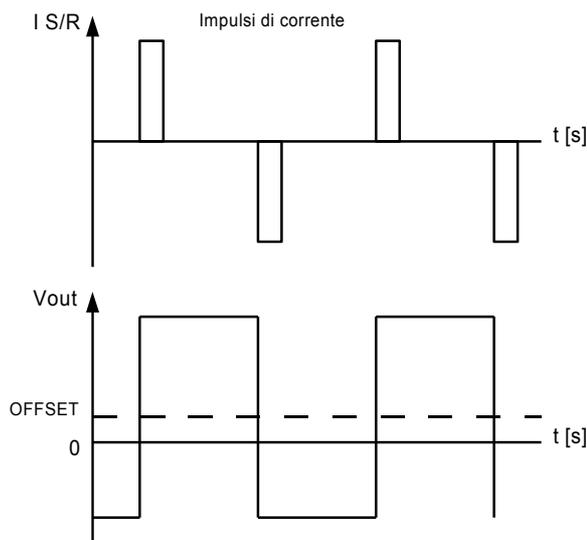
<sup>13</sup> Si faccia riferimento al data sheet dell'HMC1001 per ulteriori dettagli e dati accurati.

<sup>14</sup> In realtà sono presenti sensori che si basano sull'effetto magnetoresistivo ma che riescono ad avere delle variazioni di  $\theta$  superiori ai sensori ora descritti. Nulla viene regalato, ed infatti tali sensori hanno costi intorno a 1000/2000 € contro le poche decine o decina di € dei sensori magnetoresistivi classici.

<sup>15</sup> Per ottenere la massima sensibilità dal sensore viene comunque consigliato l'utilizzo sia di un impulso di Set che di Reset.

in uscita, quando viene applicato un impulso di Set/Reset mantiene la stessa ampiezza ma viene invertita di segno. Questo sarebbe vero se non fosse presente nessun offset in uscita. Dal momento che è sempre presente un offset in uscita si ha che la simmetria della soluzione non è intorno allo zero ma intorno all'offset, il quale rimane invariato<sup>16</sup>.

In Figura 10 è riportato il valore della tensione in uscita a seguito degli impulsi di Set/Reset.



**Figura 10:** Andamento della tensione in uscita a seguito degli impulsi di Set/Reset

E' possibile comprendere che il valore in uscita è a valore medio non nullo, in particolare il valore medio è proprio l'offset, questo può essere sia positivo che negativo. Per esempio sincronizzando la lettura da parte di un microcontrollore provvisto di ADC<sup>17</sup> è possibile, dopo ogni impulso di corrente, leggere il valore di tensione in uscita, che sarà comunque preventivamente amplificato, e fare il valore medio. Questo sottratto al valore positivo di tensione darà il valore di tensione ripulito dall'offset.

Quanto detto, se si vuole ottimizzare la dinamica del segnale all'ADC<sup>18</sup> può essere svolto per mezzo di un hardware esterno. In

particolare bisognerà eliminare il valore medio, per esempio per mezzo del circuito riportato in Figura 11.

La parte che permette di eliminare l'offset è rappresentato dall'operazionale che è a reazione con il sottrattore, questo rappresenta un filtro passa basso.

Questo circuito è poi seguito da un amplificatore con guadagno 1 o -1 a seconda che la soluzione sia positiva o negativa. In questo modo, dopo aver eliminato il valore medio, si ribalta la soluzione negativa ottenendo un segnale continuo<sup>19</sup>.

Il circuito di Set/Reset va opportunamente dimensionato al fine da generare l'impulso di corrente voluto e tale da non causare la rottura del sensore stesso. Sulle Application Notes sono presenti molti circuiti adatti a varie applicazioni.

Generalmente il circuito va scelto in funzione dell'alimentazione disponibile e della sensibilità che si vuole ottenere. La frequenza degli impulsi di Set e Reset viene generalmente a dipendere dai consumi che ci si può permettere ma anche dalla sensibilità che si vuole ottenere.

In ultimo si riportano alcune tipiche applicazioni in cui vengono utilizzati. Senza dubbio la più tipica è la bussola, infatti tali sensori riescono tranquillamente a rilevare il campo magnetico terrestre che raggiunge ampiezze di circa 500 mG. Le bussole ottenute in questo modo vengono spesso utilizzate all'interno dei ricevitori GPS in modo da mantenere il ricevitore informato sulla posizione, per brevi periodi, anche in assenza di segnale satellitare, si pensi ad esempio alle gallerie. Per il sistema GPS è comunque necessaria una bussola per poter rilevare la direzione su cui ci muove.

<sup>16</sup> Si sta escludendo la dipendenza dalla temperatura.

<sup>17</sup> ADC sta per Analog to Digital Converter, ovvero convertitore analogico digitale.

<sup>18</sup> Per ulteriori chiarimenti in materia si faccia riferimento al Tutorial "Misure elettriche e tecniche di condizionamento del segnale".

<sup>19</sup> In realtà è bene mettere un filtro passa basso per limitare i disturbi derivanti dalla funzione di Set e Reset e dei ritardi della circuiteria, che renderanno il segnale non perfettamente continuo.

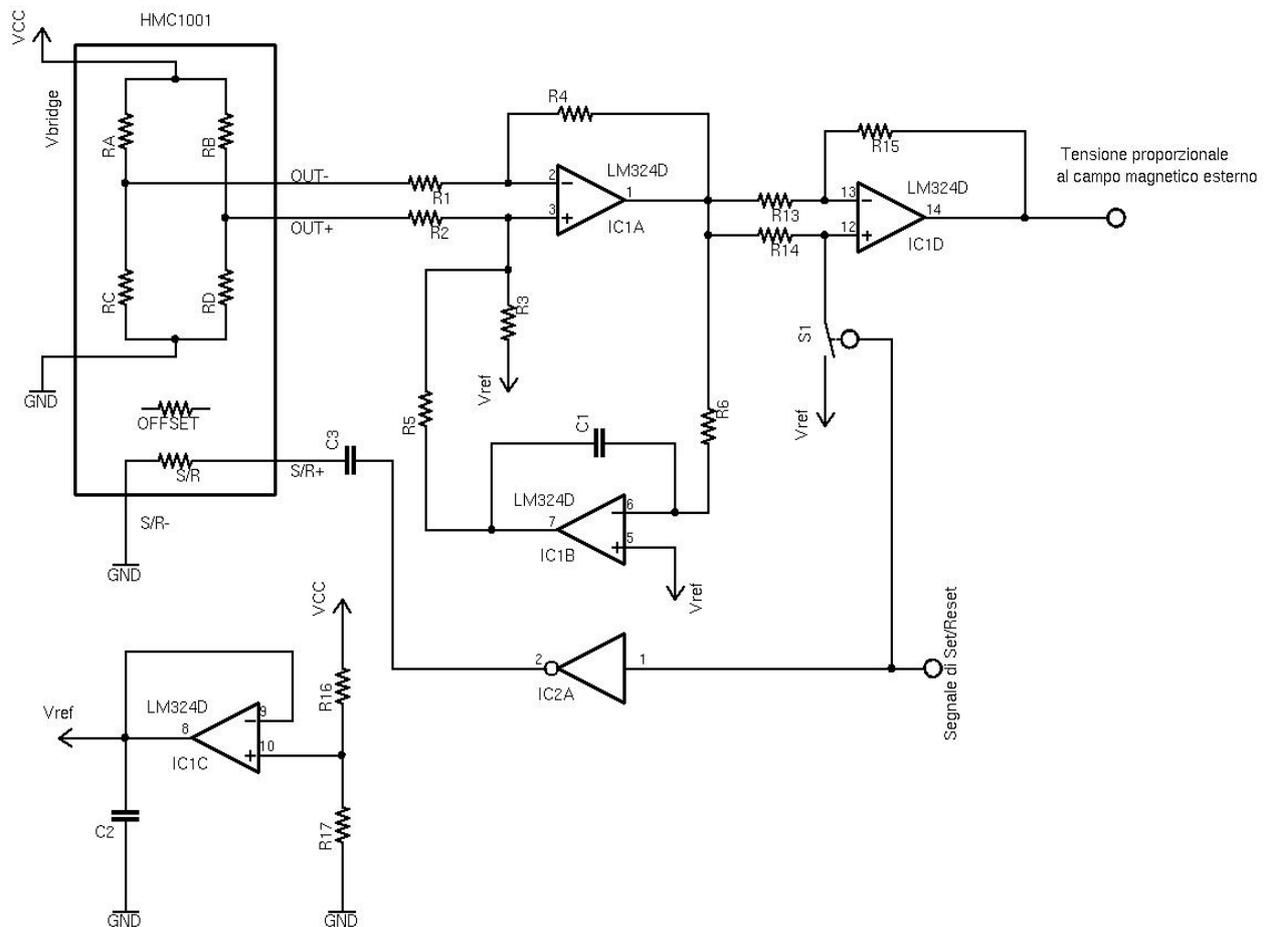


Figura 11: Schema elettrico per eliminare l'OFFSET (valore medio) dal segnale di uscita

Altra tipica applicazione è negli amperometri a pinza, analogamente ai sensori ad effetto Hall. Un'altra insolita applicazione è rappresentata dal rilevamento delle informazioni del traffico. Infatti la sensibilità di questo sensore è tale da rilevare i campi magnetici generati da una macchina e le deformazioni del campo magnetico terrestre generato dalla carrozzeria.

Per mezzo di tale rilevazione è possibile sapere il verso di percorrenza, la velocità e quant'altro possa servire. In maniera simile ai rilevatori del traffico è possibile effettuare dei rilevatori per macchine parcheggiate, funzione utile per parchimetri intelligenti.

Alla fine di tutto, in Tabella 3, si riportano le principali caratteristiche tecniche del sensore HMC1001, per informazioni più dettagliate si rimanda al data sheet della casa produttrice.

Parametro	Min	Tip	Max	Unità
Tensione di alimentazione		5	12	Vdc
Resistenza ponte di Wheatstone	600	850	1200	Ω
Intervallo campo magnetico	-2		+2	Gauss
OFFSET ponte	-60	-15	30	mV
Sensibilità (S/R=3A)	2.5	3.2	4.0	mV/V/G
Risoluzione		27		μG
Resistenza OFFSET strap		2.5	3.5	Ω
Resistenza Set/Reset strap		1.5	1.8	Ω
Impulso di corrente Set/Reset (impulso di 2μs, Duty Cycle 1%)	3.0	3.2	5	A
Campo d'esposizione massimo			1000	Gauss

Tabella 3: Caratteristiche principali del sensore HMC1001

## Bibliografia

[www.LaurTec.com](http://www.LaurTec.com) : sito di elettronica dove poter scaricare gli altri articoli menzionati, aggiornamenti e progetti.

[www.honeywell.com](http://www.honeywell.com) : sito della casa produttrice dei sensori di campo magnetico descritti. E' possibile scaricare i seguenti documenti e Application Notes . [1] Hall Effect Sensing and Application.

[2] Application of magnetoresistive sensor in navigation system.

[3] AN201 : Set/Reset Pulse circuits for magnetic sensors.

[4] AN209 : Magnetic Current Sensing.

[5] AN211 : Application of Magnetic Position Sensors.

[6] AN212 : Handling Sensor Bridge OFFSET.

[7] AN213 : Set/Reset Function for magnetic sensors.

[8] AN218 : Vehicle Detection Using AMR Sensor.

[www.magneticsensors.com](http://www.magneticsensors.com) : sito dove è possibile scaricare la documentazione e Application Notes sui sensori ad effetto Hall e magnetoresistivi della Honeywell.

[www.philips.com](http://www.philips.com) : sito dove scaricare ulteriori documenti sui sensori magnetoresistivi.

[9] Magnetoresistive sensors for magnetic field measurement (2000 Sep 06).

[10] Magnetic field sensor (1998 Jun 12).

[11] Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52 (AN00022).