



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**“Sviluppo e progettazione di un sensore ad
effetto Hall per misura di corrente”**

Relatore: Prof. / Dott. Meneghini Matteo

Laureando: Tadiello Riccardo

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

Data di laurea 16/03/2023

Indice

1	Introduzione	4
2	Legenda simboli e nomi utilizzati	5
3	Introduzione al funzionamento del sensore di ad effetto Hall	6
3.1	Principio di funzionamento dell'effetto Hall	6
3.2	Il sensore ad effetto Hall	7
3.2.1	Sonda Hall con nucleo	8
3.2.2	Sonda Hall planare	9
3.2.3	Sonda Hall Lineare	9
4	Panoramica generale e confronto sulle sonde	10
5	Aspetti fondamentali per lo sviluppo di un sensore	12
5.1	Scelta dell'integrato per la misura	12
5.2	Teoria sul nucleo e sue proprietà	15
5.2.1	Lo scopo del nucleo	15
5.2.2	I materiali ferromagnetici	15
5.2.3	Dipendenza dalla frequenza	16
5.2.4	Scelta dei materiali e principali differenze	18
5.2.5	Caratteristiche costruttive del nucleo	19
6	Test e risultati attesi	21
6.1	Strumenti di misura	21
6.2	Dimensionamento dell'air-gap	23
6.2.1	Teoria	23
6.2.2	Test analitici del nucleo	24
6.2.3	Conclusione	26
6.3	Analisi delle misure	27
6.3.1	Test sul sensore e risposta in corrente	27
6.3.2	Test sul posizionamento del nucleo	30
6.4	Analisi su scheda PCB	34
7	Analisi fattibilità e aspetto economico	42
7.1	Sensibilità dei sensori	43
7.2	Reperibilità dei sensori	43
7.3	Pro e contro delle due soluzioni	44
7.4	Considerazioni finali	47
8	Conclusioni	48
9	Bibliografia	49
10	Ringraziamenti	50

1 Introduzione

Il sensore ad effetto Hall è un sensore che sfrutta un principio fisico legato al campo magnetico generato dal passaggio della corrente in un conduttore. Il trasduttore varia la sua tensione di uscita in risposta alla intensità del campo magnetico. Il fisico statunitense Edwin Hall infatti, durante un esperimento si accorge che una piccola tensione trasversale appariva attraverso una sottile striscia di metallo che trasporta della corrente in un campo magnetico applicato. L'evento prende il nome di "effetto Hall". Da questa scoperta, nasce un nuovo sistema di misurazione, largamente utilizzato poiché molto più semplice, poco costoso ed estremamente efficace. I sensori Hall sono utilizzati come sensori di prossimità, sensori di posizionamento, rilevamento della velocità o come rilevatori di corrente. Hanno una lunga storia di sviluppo e grazie alla loro particolare caratteristica vantano una maggiore versatilità in alcuni settori dove altre tipologie di misuratori non possono garantire la stessa affidabilità, durata nel tempo e usura meccanica. Particolare importanza hanno le sonde di corrente che possono misurare l'intensità della corrente elettrica passante in un cavo senza il bisogno di introdurre uno strumento in serie al circuito o interrompere lo stesso. Si precisa che a fronte delle numerosissime applicazioni che vengono fatte sfruttando tale fenomeno, lo sviluppo di questa tesi si concentra soprattutto sull'aspetto tecnico relativo a teoria, costruzione e implementazione proprie di sensori ad effetto Hall. Al giorno d'oggi esistono numerose aziende che propongono nel mercato sensori di misurazione completi e affidabili: da pinze amperometriche ai circuiti integrati fino a trasduttori per correnti molto elevate. Tuttavia in questa relazione saranno approfonditi quelli che sono gli step indispensabili per la costruzione e il dimensionamento di un sensore a partire dai singoli componenti che lo compongono, soffermandosi sugli aspetti di progetto e di ottimizzazione. Sia dal punto di vista dell'applicazione considerata, sia sull'fronte economico per la realizzazione in quanto aspetto non trascurabile in una strategia aziendale. Si discuterà quindi del circuito integrato e dei canoni per determinare il più adatto ad ogni esigenza dei vantaggi della laminazione, della dimensione e forma del nucleo, degli stili di costruzione nonché del materiale con cui deve essere prodotto. Verranno esaminate le implementazioni dei prototipi, i test su di essi, e commentati tutti i passaggi costruttivi, in modo da garantire infine una panoramica completa riguardo all'universo nascosto dietro ad un comune sensore in commercio. L'obiettivo di questa tesi quindi si concentra fundamentalmente sulla progettazione e sullo sviluppo di una sonda Hall per misura di corrente a partire dalla teoria, passando poi per l'approfondimento delle varie componenti e il loro funzionamento, ai test con strumentazione di laboratorio, all'analisi dei dati e infine alla valutazione complessiva dei risultati ottenuti per decretare quale soluzione debba riferirsi più adatta per la realizzazione di una misura di corrente in un inverter trifase per controllo di un motore elettrico per conto della azienda Askoll©.

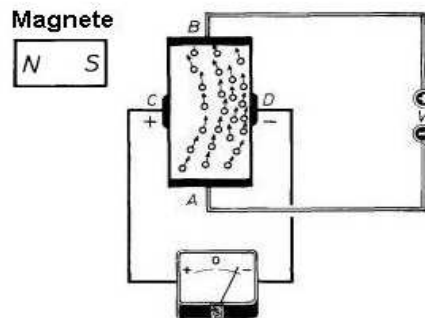
2 Legenda simboli e nomi utilizzati

- \rightarrow : Vettore.
- \vec{F} : Forza di Lorentz.
- q : carica dell'elettrone pari a circa $-1,6022 \times 10^{-19}$ C
- \vec{v} : Velocità di deriva dell'elettrone.
- \vec{B} : Induzione magnetica, espresso in [T] *Tesla*.
- H : Campo di induzione magnetica o campo magnetico, espresso in [A/m] *Ampère/metro*
- E : Campo elettrico.
- I : Corrente elettrica, espressa in [A] *Ampère*.
- d : distanza dell'air-gap.
- *SIP*: tipologia costruttiva di integrati per misura, adotta una tecnologia *through-hole*.
- *SOIC8*: tipologia costruttiva di integrati per misura, adotta una tecnologia *surface-mount*.
- K_e : costante correnti parassite.
- f : Frequenza, espressa in [Hz] *Hertz*.
- H_{fe} : Campo magnetico nel ferro.
- H_h : Campo magnetico nell'air-gap.
- *FMM*: Forza magneto-motrice.
- μ : Permeabilità magnetica del materiale
- μ_0 : Permeabilità magnetica del vuoto, pari a $1,25663706144... \cdot 10^{-6}$

3 Introduzione al funzionamento del sensore di ad effetto Hall

3.1 Principio di funzionamento dell'effetto Hall

Il principio di funzionamento del sensore Hall sfrutta un fenomeno fisico per cui si osserva in un conduttore percorso da corrente elettrica, una tensione trasversale quando questo è sottoposto ad un campo magnetico. L'esperimento iniziale prevedeva l'utilizzo di una striscia di materiale conduttivo (generalmente un metallo) nel quale veniva fatta scorrere una corrente mediante l'utilizzo di una batteria. La tensione ai capi della striscia (A-B) promuoveva un flusso di elettroni uniforme tra i due punti di contatto. Ai capi (C-D) invece non era misurabile alcuna differenza di potenziale. Se invece alla estremità di uno dei due punti sopracitati, veniva avvicinato un magnete durante il funzionamento, il flusso di elettroni subiva una deviazione del percorso, in origine rettilineo. Questo comportava un netto accumulo degli ultimi verso l'estremità opposta della striscia, dovuto al campo magnetico del magnete e di conseguenza un diradamento nella zona in prossimità della calamita. Il risultato più significativo infatti fu quello della presenza tangibile di una tensione fra i punti (C - D) misurata da un voltmetro. Ovviamente, invertendo le polarità del magnete, si osservò un comportamento speculare. La differenza di potenziale misurata fra la parte destra e quella sinistra venne chiamata "potenziale di Hall".



[Fig.1 Schema esperimento di Hall]

Poiché gli elettroni di conduzione si muovono lungo il circuito e risentono del campo magnetico, per definizione su di loro agisce la forza di Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad [1.0]$$

Man mano che gli elettroni si muovono, gli accumuli di carica aumentano. È possibile notare dopo un tempo sufficientemente lungo, una condizione di equi-

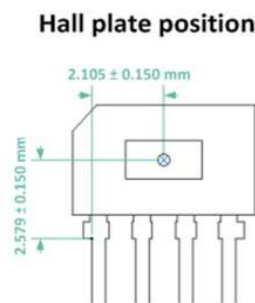
librio dinamico delle forze fra il campo elettrico longitudinale (quello dato dalla tensione di Hall) e la forza di Lorentz. Il processo di accumulo di cariche nelle due superfici si arresta quando le cariche elettriche creano un campo elettrico (quindi una forza di natura elettrostatica) che si oppone alla forza magnetica. La formula seguente ne descrive l'equazione corrispondente:

$$qE = qv_d B \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_s = q\vec{v}_d \times \vec{B} \quad [1.1]$$

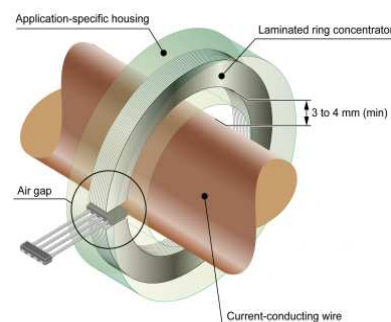
L'approfondimento del fenomeno elettromagnetico ha portato nel corso del tempo a numerose utili applicazioni. Sfruttando infatti il legame tra la corrente che circola nell'elemento di Hall e la tensione di Hall si è riusciti a costruire numerosi strumenti elettronici che sfruttano questo principio.

3.2 Il sensore ad effetto Hall

Il sensore di corrente ad effetto Hall ha lo scopo di misurare una corrente che scorre in un conduttore. È composto da un circuito integrato che racchiude una piastra al suo interno che, investita dal flusso, percepisce la variazione di cariche passanti e trasforma il tutto in una lettura in tensione. La tensione percepita dal sensore è proporzionale alla corrente passante nel conduttore. Ha dimensioni molto contenute ed è possibile configurarlo sia come *through-hole* che *surface-mount*. Nelle illustrazioni seguenti è possibile osservare dove è collocata la piastra metallica del sensore con relative misure (Fig.1) e uno spezzato che mostra sinteticamente la posizione dei componenti in una generica applicazione di misura.(Fig.2)



[Fig. 1]



[Fig. 2]

La decisione del tipo di sensore da utilizzare è frutto di accurate analisi che verranno affrontate successivamente nell'elaborato. Esistono numerose aziende che propongono nel mercato componenti finiti di diversa natura con dimensioni e portate molto varie. Tuttavia, come nel caso in questione, è possibile aprire un dibattito riguardo alla strategia di scelta; l'acquisto di un componente finito,

infatti, ha un costo specifico fisso e in un ottica di produzione di un determinato numero di schede è necessario valutare la decisione di svilupparne uno in casa. A tal proposito, verrà approfondita la questione nel paragrafo [5]. Di seguito verranno introdotte le principali tipologie di sonda realizzabili:

3.2.1 Sonda Hall con nucleo

La sonda ad effetto Hall con nucleo è una delle possibili configurazioni del sensore. È composto da un integrato come in (Fig.1) quindi con *package SIP* affiancato da un toroide. Per poter concatenare al meglio il flusso magnetico, infatti, si utilizza un nucleo di natura ferrosa generalmente composto da una lega madre di ferro e silicio (FeSi) o di ferro e nickel (FeNi). Il conduttore di corrente, generalmente un cavo elettrico o una piastra di alluminio viene avvolto dal nucleo. La corrente che scorre sul cavo produce un flusso magnetico circolare che intrappolato nel nucleo è forzato al passare sul misuratore. Il nucleo infatti ha lo scopo di favorire il passaggio del flusso magnetico su di esso e concentrarlo al suo interno, forzandolo, a passare attraverso il sensore sull'integrato. Una sezione del nucleo viene incisa per poter ospitare il componente "Air Gap" (Fig. 3). La formula che lega il flusso magnetico con la corrente sul conduttore è la seguente ed è derivata dalla legge di Ampère (Vedi formula [6.2]):

$$B[mT] = 1.25 \times \frac{I[A]}{d[mm]} \quad [2.0]$$

Il nucleo viene costruito in lamine sovrapposte in modo tale da limitare il più possibile le correnti parassite che inevitabilmente vengono a formarsi su di esso. È possibile usare anche nuclei di altra natura come nuclei in ferrite ma, per alcune loro proprietà e problemi di usura nel tempo sono generalmente sconsigliati per tale scopo.

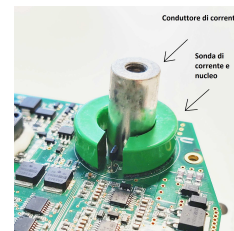
Le dimensioni del nucleo come posizione, diametro interno, diametro esterno, spessore e air gap hanno uno scopo ben preciso e meritano di essere trattate in un'altra sezione dedicata. Sensore e nucleo infine vengono eventualmente fatti alloggiare in un case plastico costruito appositamente con materiali isolanti e resine. Assumeranno una forma simile a (fig.4) o in alcuni casi senza alcuna protezione particolare come in (fig.5) dove è rappresentata una porzione di scheda inverter per controllo di un muletto elettrico.



[Fig. 4]



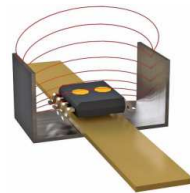
[Fig.3]



[Fig. 5]

3.2.2 Sonda Hall planare

Un'altra tipologia di sensore per misura di corrente è la sonda Hall planare. Essa sfrutta la stessa proprietà ma necessita di essere posta sopra il conduttore. L'integrato ha un *package SOIC8*.



[Fig. 5]

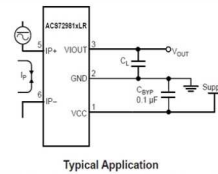
Nella (Fig. 5) è possibile osservare una generica raffigurazione di come deve essere posizionato il sensore. Il componente legge direttamente il campo magnetico che lo investe ortogonalmente, prodotto dal conduttore sottostante. Il conduttore deve alloggiare sulla scheda e il sensore deve necessariamente avere una schermatura metallica per evitare dispersione del campo e imprecisione nella misura. Va da sé che l'utilizzo di questa tecnica di misura è limitata quindi alla dimensione e alla costruzione della scheda che dovrà ospitarlo.

3.2.3 Sonda Hall Lineare

L'ultima categoria di misuratori sono le sonde Hall lineari. Esse sfruttano sempre il principio di Hall per la misura della corrente, con la differenza che questa volta il sensore è posto lungo il verso di percorrenza del conduttore nella quale si vuole effettuare la misura.



[Fig.6]



[Fig.7]

Come è possibile notare in (Fig.6) vi sono alla base del componente, due piedini metallici molto spessi. Un piedino viene utilizzato per l'ingresso del conduttore e l'altro per il proseguimento dello stesso. All'interno del componente vi è la misura di corrente effettiva che può essere variabile in portata a seconda della tipologia di utilizzo. Generalmente hanno costi relativamente alti e, per grosse portate di corrente, sono anche molto voluminosi. In (Fig.7) vi è lo schema del funzionamento del sensore. Si può notare l'ingresso e l'uscita per il conduttore identificati dal (IP+) e (IP-) e e la tensione di uscita al piedino 3.

4 Panoramica generale e confronto sulle sonde

In una strategia aziendale efficace, è indispensabile considerare ogni aspetto della produzione di un componente. La decisione della tipologia di sensore da utilizzare è una di queste. Esistono infatti in commercio numerosi sensori di diverse case costruttrici con costi variabili a seconda delle unità acquistate. Si tenga presente che in questa sezione verranno considerati solamente i sensori ad effetto Hall con nucleo, poiché, per motivi costruttivi, economici e per scelte interne di Askoll©, si è deciso di adottare questa tecnologia costruttiva. É possibile acquistare nel mercato sia sensori completi e pronti all'uso che non: infatti ne esistono di varia natura come trasduttori di corrente con nucleo (quindi componenti finiti) oppure sensori singoli che necessitano quindi del dimensionamento di un nucleo poiché vengono forniti solo come integrato.

Se si dovesse optare sui primi, i principali fornitori da considerare sarebbero:

- HANKOOK
- LEM
- LUKSENS
- SOCAN
- TAMURA

Ognuno di questi propone in commercio una vasta quantità di componenti di taglie e portate variabili a seconda della richiesta. Sono prodotti finiti e quindi già pronti all'uso. Sono comodi perchè non necessitano di alcun sviluppo e possono essere facilmente acquistabili in molte piattaforme online. Ciò nonostante presentano delle problematiche dal punto di vista delle quantità e dei costi. La maggior parte delle aziende, infatti, distribuisce i componenti solamente previo accordo di una quantità minima di pezzi ordinati (generalmente 1000) adeguando i costi ad essa. Di seguito si propone una serie di preventivi di componenti con i loro prezzi al dettaglio. Sono sonde ad effetto Hall che potrebbero essere installate da Askoll© in un inverter per controllo di un motore elettrico. (Si è deciso di considerare solo le sonde che possono essere acquistate al momento, poiché le altre case costruttrici non possono garantire le effettive quantità)

- Sonda LEM HTFS-200P: 18 € al pezzo per 1000 pezzi
- Sonda SOCAN SCK29D-300A: 5.5 € al pezzo per 1000 pezzi
- Sonda LUCKSENS: 3.6 € per 1000 pezzi

Consideriamo ora l'ipotesi che la scheda che l'azienda Askoll© vuole sviluppare contenga due sensori ad effetto Hall e che ci si prospetti di costruire all'incirca 2000 schede l'anno. Il sensore verrebbe alimentato a 5V e dovrebbe essere in grado di convertire in lettura una corrente di 200A. I costi da sostenere se si volesse optare per le tre soluzioni di cui sopra, sarebbero di conseguenza:

- Sonda LEM HTFS-200P 72000€
- Sonda SOCAN SCK29D-300A 22000€
- Sonda LUKSENS 14400€

Tutte e tre le sonde infatti soddisfano i requisiti richiesti. La decisione quindi potrebbe ricadere nell'acquistare la sonda più economica ma questo non terrebbe conto di alcune considerazioni importanti quali:

- LUKSENS è una impresa tedesca ma costruisce fondamentalmente cloni di sensori già in commercio. Potrebbe risultare non adatto a tale scopo o in fase di test, non rispecchiare le aspettative.
- Potrebbe non garantire stabilità nel rifornimento di materiali vista la situazione globale odierna dei prodotti a semiconduttore.
- La dimensione del diametro interno della sonda comporta diversi accorgimenti da compiere in fase di progetto che comporterebbero costi aggiuntivi in produzione.
- La sequenza di passaggi per poter inserire il sensore nella scheda comporta il dimensionamento di uno schema di *pinout* che è circoscritto solamente al componente considerato. Se in fase di progetto si dovesse optare per una alternativa della concorrenza sarebbe necessario ridisegnare nel *layout* della scheda tutti gli alloggiamenti con un danno tangibile in termini di tempistiche.

Tuttavia è difficile anche considerare l'acquisto della sonda LEM poichè sebbene la ditta sia leader del mercato in questo ambito, i costi per unità sono estremamente esosi e quindi insostenibili in termini di fattibilità al bilancio. La scelta quindi ricadrebbe nella sonda SOCAN. L'impresa cinese infatti rappresenterebbe il perfetto compromesso tra affidabilità e costo.

É qui che nasce l'idea dello sviluppo in proprio del misuratore di Hall. Se ci si dovesse affidare solamente ai sensori disponibili in commercio, la scelta ricadrebbe forzatamente sulla sonda descritta sopra. É però interessante considerare infatti che nel mercato degli integrati è possibile acquistare anche solo il componente di misura e il nucleo separatamente.

5 Aspetti fondamentali per lo sviluppo di un sensore

Verranno di seguito analizzati tutti i passaggi indispensabili alla realizzazione di un sensore ad effetto Hall, a partire dalla scelta dei componenti passando attraverso i test su di essi ed infine alla realizzazione di un prodotto finito.

5.1 Scelta dell'integrato per la misura

L'integrato per la misura deve necessariamente essere legato alle stringenti caratteristiche richieste per l'implementazione. Nella scheda in questione deve essere dimensionato un sensore ad effetto Hall in grado di leggere correnti che variano da $[120A \div 200A]$. L'integrato viene alimentato con una tensione di 5V. I parametri da considerare sono:

- Bidirezionalità:
 - La sonda deve essere in grado di misurare sia correnti positive che negative. A tale scopo deve essere necessario che la tensione corrispondente a nessun flusso magnetico investente (ovvero $0mT$) sia dimensionata per poter gestire una escursione in tensione dovuta alla variazione di corrente nel conduttore leggibile sia in positivo che in negativo. Una tensione di 2.5V a riposo può essere sufficiente.
- Tensione di Output:
 - La tensione di output è strettamente legata alla sensibilità. Deve essere infatti tale da poter permettere allo strumento di leggere tutte le variazioni di flusso di campo magnetico. Una sensibilità troppo bassa potrebbe rivelarsi imprecisa e non sfruttare l'intero range di tensione che lo strumento permette. D'altra parte, una sensibilità troppo alta potrebbe far saturare il sensore al suo valore massimo di tensione e far perdere di conseguenza una parte di misura. C'è da aggiungere inoltre che il misuratore non lavora in modo preciso nelle zone limite. É quindi consigliato non portare lo strumento a lavorare nelle prossimità della saturazione.
- Sensibilità:
 - La sensibilità del sensore è espressa in $[mV/mT]$ e sancisce di quanti mV aumenta l'*output* alla variazione di $1mT$.
- Banda:
 - La banda del sensore rappresenta il range in frequenza espresso in $[KHz]$. Maggiore è la banda, maggiore è la capacità dello strumento di operare in diverse circostanze. Nello specifico, nella scheda considerata si chiede una banda di $50KHz$.

Considerando quanto scritto sopra, ipotizziamo quindi di dover cercare un sensore che possa soddisfare:

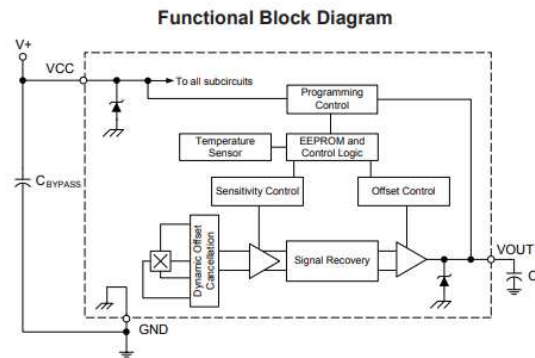
1. Una lettura bidirezionale della corrente di $\pm 200A$
2. Una tensione di output di 5V con un output a riposo di 2.5V
3. Una lettura dell'intensità di flusso magnetico pari a $\sim 85mT$ calcolati usando la formula [2.0] considerando una corrente di picco di 200A.
4. Un range di sensibilità ottimale sui $[18 \div 24] [mV/mT]$. Infatti, considerando una sensibilità di $19[mV/mT]$ e una variazione di densità di flusso magnetico pari a $85mT$ si ha una escursione di:

$$19 \frac{mV}{mT} \times 85mT = 1.615V$$

Questo significa che con una tensione a riposo di 2.5V, per la lettura del flusso magnetico si arriverà a sfruttare lo strumento per una variazione di tensione da $[0.885 \div 4.115]V$.

In rete sono disponibili solo una limitata categoria di sensori che rispettano queste caratteristiche. Di seguito verranno esposte le due principali alternative in commercio:

- **Allegro A1366LKTTN-2-T.** Allegro è il principale leader nella produzione di sensori Hall. Ha una significativa esperienza nella realizzazione dei suoi componenti e propone una vastissima gamma di misuratori. L'integrato A1366LKTTN-2-T ha un *package* di tipo *SIP* e una compensazione in funzione della variazione della temperatura programmata di fabbrica che aggiusta i valori a seconda della temperatura corrente. Presenta anche un controllo di *offset*. Lo schema a blocchi è illustrato in (Fig.8)



[Fig.8]

Ha una tensione a riposo di 2.5V, una banda di $120KHz$ e una sensibilità di $25 \frac{mV}{mT}$; Attualmente non è possibile acquistare la sonda da questo fornitore poiché tutti i rivenditori non dispongono *in stock* del componente, pertanto viene citato solamente per ragioni comparative.

- **MLX91209-CAA-003.** Melexis è un altro importante fornitore di sensori Hall che produce un'ottima alternativa al A1366LKTTN-2-T. Il sensore MLX91209-CAA-003 infatti ha anch'esso un *package* di tipo *SIP*. Ha una caratteristica di trasferimento (guadagno) programmabile così come la sua sensibilità. È possibile infatti modificare la sensibilità che, di fabbrica è di $19 \frac{mV}{mT}$ ma può essere aumentata fino a $150 \frac{mV}{mT}$. Ha una tensione a riposo di 2.5V e una banda di $250KHz$ senza filtro per il rumore e $70KHz$ con filtro ON. Di seguito lo schema a blocchi del sensore (fig.9)

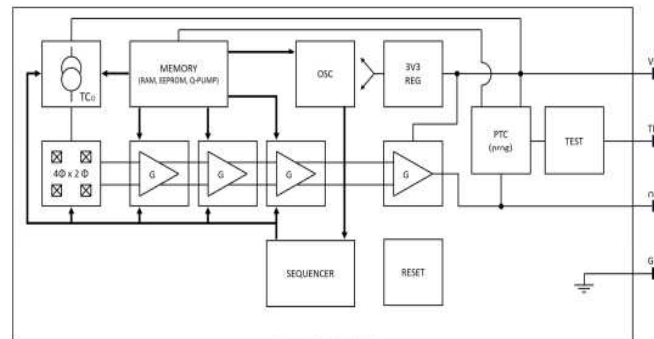


Figure 2: Block Diagram

[Fig.9]

Melexis a differenza di Allegro è disponibile per le ordinazioni e in commercio è possibile trovarlo con prezzi variabili a seconda della quantità. (stima per l'acquisto di 1000 pezzi - 2.53€). Quindi, dal momento che hanno un costo più contenuto di Allegro e le spedizioni hanno tempi di attesa molto brevi, è attualmente il favorito tra i due.

Di conseguenza, nelle considerazioni successive, nelle fasi di test, o in qualunque altra sezione in cui si prenda in esame il sensore ad effetto Hall ci si riferirà sempre al MLX91209-CAA-003, essendo vincolati alla scelta per motivi logistici.

5.2 Teoria sul nucleo e sue proprietà

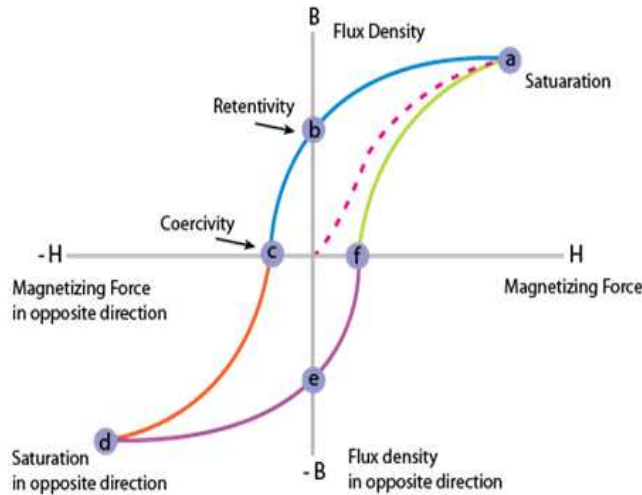
5.2.1 Lo scopo del nucleo

Il nucleo ferromagnetico in accoppiata con il sensore Hall è indispensabile per la misura di corrente. Il sensore, infatti, deve poter leggere una variazione di flusso magnetico necessariamente *perpendicolare* alla superficie della piastra (Fig.1). Inoltre la lettura per poter essere precisa non può essere fatta concatenando solamente il flusso generato dal conduttore ma c'è quindi la necessità di dover concentrare in maniera mirata il campo magnetico. Per fare ciò si sfrutta la caratteristica dei materiali ferromagnetici: essi infatti presentano per natura fenomeni di magnetizzazione spontanea e magnetismo residuo, indispensabili per poter ottenere un risultato soddisfacente.

5.2.2 I materiali ferromagnetici

I materiali ferromagnetici sono dei materiali che hanno la proprietà di magnetizzarsi molto intensamente sotto l'azione di un campo magnetico esterno e di restare a lungo magnetizzati quando il campo si annulla. In questi materiali l'effetto della magnetizzazione non dipende dall'orientamento forzato di un campo magnetico esterno ma da un effetto di *auto-orientamento* dei *dipoli* magnetici dovuti ad un campo di forze generato dai dipoli stessi. Questo significa che sono ottimali per poter concatenare e concentrare il flusso magnetico generato dal conduttore essendo fisicamente predisposti a tale scopo. Esistono numerosi aspetti che meritano di essere approfonditi come il *dipolo magnetico*, descritto nel principio di equivalenza di *Ampere*, la *suscettività magnetica* o il *vettore magnetizzazione*. Tuttavia questi argomenti specifici esulano dallo scopo di questo elaborato e quindi saranno solamente menzionati.

Argomento non trascurabile invece è quello della **isteresi** del materiale. È indispensabile innanzitutto citare la *permeabilità magnetica assoluta*. Essa corrisponde alla grandezza fisica che esprime l'attitudine del materiale a magnetizzarsi in presenza di un campo magnetico. Più è elevata, meglio il materiale si presta a questo scopo. Ebbene, la permeabilità magnetica di un materiale ferromagnetico descritta col simbolo $[\mu]$, infatti, non è costante ma dipende dalla storia pregressa del materiale. Il materiale si ricorda di come è stato magnetizzato in precedenza. Consideriamo ora il campo magnetico $[B]$ in un traferro in funzione del campo magnetizzante $[H]$ (Fig.10).



[Fig.10]

Si può osservare che, partendo dall'origine degli assi e considerando inizialmente il materiale smagnetizzato, la curva tratteggiata (che corrisponde alla curva di prima magnetizzazione) si porta ad un valore limite (a). Lì il materiale raggiunge la saturazione. Invertendo il campo magnetizzante, la curva non ripercorre più il cammino precedente ma subisce una deviazione dovuta alla modifica irreversibile delle sue proprietà fisiche. Nel punto (b), il campo magnetizzante è nullo ma vi è un magnetismo residuo nel materiale. Ciò significa che nonostante non ci sia nessun intervento esterno, il materiale conserva un campo magnetico proprio. Proseguendo la curva si trova il punto (c) che coincide col punto dove il campo magnetico è nullo. Questo punto corrisponde a un valore H_c detto "campo coercitivo", ovvero il valore del campo magnetizzante che serve per portare a 0 il flusso magnetico B dopo che è stato magnetizzato nella prima fase. Proseguendo si arriva al punto (d) ovvero il punto di saturazione inversa del materiale per poi concludere il ciclo nei punti (e) e (f) che formano la curva speculare a quella di partenza.

5.2.3 Dipendenza dalla frequenza

Il percorso appena descritto si ripeterà all'infinito ogni qualvolta il materiale subirà uno stimolo da un campo magnetizzante. Ora, in un ottica di utilizzo a frequenze sull'ordine dei KHz , c'è da chiedersi se questo ciclo possa reggere una tale frequenza di variazione. In effetti, esiste una caratteristica chiamata *hysteresis loss* che descrive, a fronte di una magnetizzazione e demagnetizzazione ripetuta, la quantità di energia persa durante il ciclo. Essa dipende da:

1. densità di flusso massima
2. frequenza di conversione

3. volume del nucleo

La formula [3.0] descrive quanto scritto sopra.

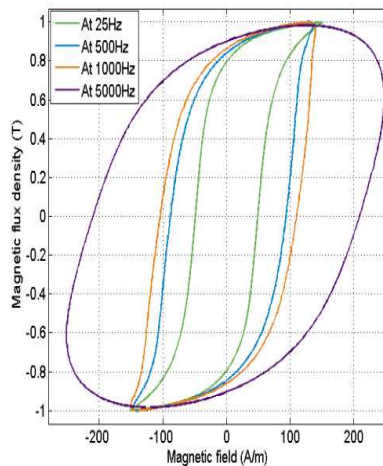
$$Ph = \eta B_m f V \quad \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad [3.0]$$

(η è il coefficiente di isteresi di Steinmetz che varia da $[1.5 \div 2.5]$ a seconda del materiale, B_m è il flusso del campo magnetico massimo, f è la frequenza e V è il volume in m^3) Di conseguenza, più è alta la frequenza più è marcata la *hysteresis loss*, che si traduce in perdita di potenza espressa come aumento della temperatura.

È importante considerare anche che, oltre all'*hysteresis loss* dipende dalla frequenza anche la quantità di correnti parassite circolanti nel nucleo infatti le correnti parassite contribuiscono alla perdita complessiva del materiale. Fenomeno descritto nella formula [3.1].

$$(Pe) = Ke B_m^2 f^2 t^2 V \quad [3.1]$$

(Ke è la costante delle correnti parassite che dipende dal materiale, t è lo spessore della laminazione in [m]) In entrambe le formule è presente la frequenza. Infatti è noto che la frequenza abbia un impatto sulla caratteristica di isteresi: più è alta la frequenza, più è deformata la caratteristica. tradotto, significa che: (1) ci sarà bisogno di più energia per magnetizzare inversamente il materiale, (2) il materiale conserva una magnetizzazione residua più elevata quando non sottoposto ad un campo magnetizzante, di conseguenza (3) il campo coercitivo sarà più elevato. Nella (Fig.11) vi è un esempio della variazione della curva di isteresi a fronte di una variazione della frequenza in un esperimento su piastra metallica.



[Fig.11]

Nel paragrafo [6], verranno analizzati tutti i test effettuati sul sensore e sul nucleo. Le formule descritte in questo capitolo saranno di spunto per poter comprendere meglio i risultati ottenuti.

5.2.4 Scelta dei materiali e principali differenze

La scelta del materiale del nucleo è un aspetto non trascurabile nel dimensionamento. Esistono diverse leghe di diversi materiali che permettono la concatenazione del flusso, tuttavia non tutte le leghe sono adatte alla applicazione in questione. Infatti esistono delle proprietà e dei limiti per ogni materiale che devono essere rispettate. Tutti i materiali che esamineremo hanno una base ferrosa. Il ferro si presta bene a questo utilizzo e presenta una *permeabilità magnetica* molto elevata. Verranno menzionati in questa sezione i due materiali più comuni in commercio per costruzioni di questo tipo, che sono:

- Ferro-Silicio [*FeSi*]: il ferrosilicio ha in genere un contenuto di silicio compreso nell'intervallo 8-95%. Il ferrosilicio più importante dal punto di vista commerciale è il FeSi 75, che ne contiene 75%. Oltre a ferro e silicio, nel ferrosilicio sono contenute piccole percentuali di alluminio, fosforo, zolfo, carbonio, manganese, cromo e titanio.
- Ferro-Nickel [*FeNi*]: molto simile al ferro-silicio. È composto dall'80% di ferro e dal 20% di nickel. Presenta una permeabilità assoluta molto più alta del ferro ma presenta di controparte un livello di saturazione molto più basso che lo rende sconsigliato per applicazioni di misura di correnti elevate.

Nella (Fig.12) è illustrata una sintetica tabella che mostra la permeabilità relativa dei due materiali, il valore a saturazione del campo magnetico e il valore del campo coercitivo.

Table 2: Typical magnetic characteristics of core materials

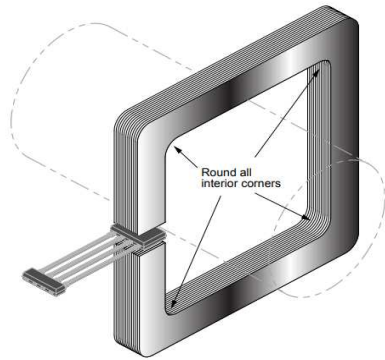
Material	Typical Relative Permeability	Typical Polarization at Saturation (T)	Typical Coercive Field (A/m)
FeSi GO	>10000	1.8	50
FeNi	>50000	0.7	1

[Fig.12]

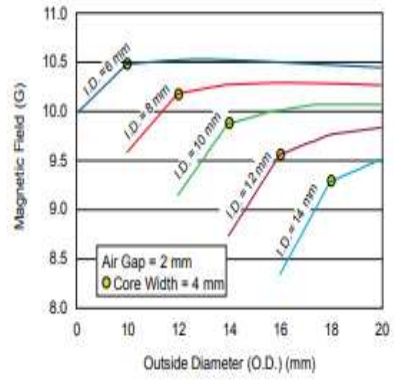
5.2.5 Caratteristiche costruttive del nucleo

Le caratteristiche costruttive indispensabili per il dimensionamento del nucleo sono riassumibili in:

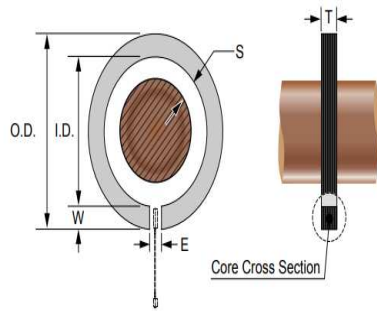
- Geometria del nucleo: la geometria del nucleo non ha un rilevante impatto sul risultato, tuttavia generalmente si sceglie una forma che ottimizzi il materiale usato. Di solito si trovano in forma circolare e quadrata. A tal proposito, vi sono alcuni accorgimenti da fare nel caso si volesse optare per la forma quadrata: infatti, per poter usare un nucleo quadrato è generalmente consigliato stondare gli angoli come in (Fig.13). Il nucleo che verrà utilizzato è di forma circolare.
- Diametro esterno e interno: il nucleo assunto circolare per comodità deve avere uno spessore $[W]$ di circa $3 \div 4$ [mm] per avere la migliore concentrazione magnetica. (Fig.14) Inoltre, più è largo il diametro e più è alto il punto di saturazione. Per questo si usa un diametro più largo possibile compatibilmente con lo spazio a disposizione. Bisogna garantire anche un diametro interno sufficiente da avere circa $3 \div 4$ [mm] di spazio per permettere al toroide di non saturare ad alte correnti. Le dimensioni del nucleo che verrà utilizzato sono: \varnothing O.D [34mm], \varnothing I.D [22mm] spessore [7mm].
- Air-gap: l'air-gap è un intaglio nel corpo del nucleo che serve per sfruttare il flusso concatenato dal nucleo direttamente nella testa del sensore. La larghezza dell'air-gap ha un ruolo chiave poiché definisce direttamente il guadagno del sistema. Più stretto è l'air-gap più alto è il guadagno. Tuttavia non si può ridurre troppo lo spessore poiché spessori troppo piccoli porterebbero a misure meno precise dal momento che l'*isteresi magnetica residua* diventerebbe a questo punto significativa, abbassando l'accuratezza della misura. L'air-gap raccomandato dalle case costruttrici dei sensori è di circa $3 \div 5$ [mm]. Nella (Fig.15) sono rappresentate le nomenclature per la misura mentre nella (Fig.18) il comportamento della corrente in funzione della variazione del campo magnetico con i vari spessori di air-gap. L'air gap nel nucleo che verrà utilizzato è di [3mm].
- Correnti parassite e laminazione del nucleo: le correnti parassite sono correnti non desiderate che si generano involontariamente nel materiale quando questo è sottoposto al passaggio di un campo magnetico. Se il nucleo fosse pieno, la sezione nella quale possono scorrere le correnti parassite sarebbe molto grande. Per ovviare a questo problema si usa *laminare* il materiale, ovvero si costruisce il nucleo con numerosi strati dello stesso conduttore uno sopra l'altro così da limitare il più possibile l'area dove le correnti si generano. Va ricordato che la corrente scorre perpendicolarmente al campo magnetico, perciò la laminazione va fatta in modo che il verso del campo magnetico percorra parallelamente gli strati. La (Fig.16) mostra un esempio appena descritto mentre la (Fig.17) un nucleo nel dettaglio.



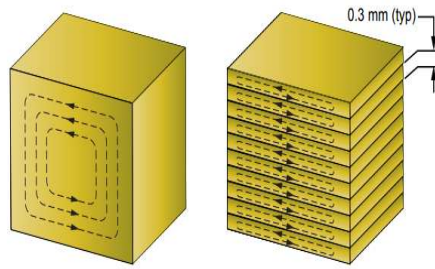
[Fig.13]



[Fig.14]



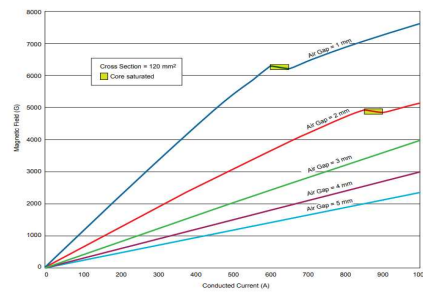
[Fig.15]



[Fig.16]



[Fig.17]



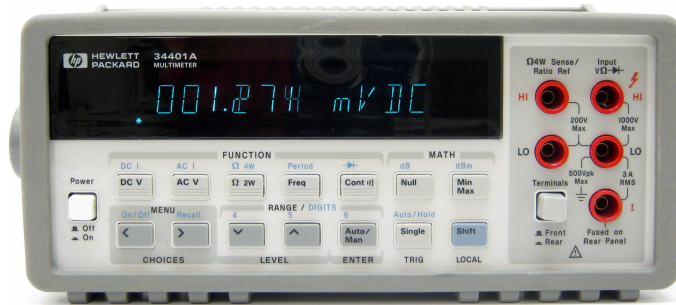
[Fig.18]

6 Test e risultati attesi

In questa sezione verranno approfonditi tutti gli aspetti costruttivi per il dimensionamento del componente e gli strumenti necessari per le misure.

6.1 Strumenti di misura

- HP 34401A:



L'HP 34401A è un multimetro digitale che consente misure di tensione fino a 1000V e frequenze fino a 300Khz. Permette di avere fino a 6 cifre di risoluzione e misurare grandezze DC e AC. Verrà utilizzato per misurare l'uscita di tensione delle varie sonde.

- Lecroy Waverunner 44Xi-A:



Lecroy Waverunner 44Xi-A è un oscilloscopio digitale a 5 canali capace di acquisire segnali fino a 400Mhz. Permette di effettuare qualsiasi tipo di misura ed essere utilizzato da remoto grazie alle numerose periferiche. Viene utilizzato in accoppiata alla pinza amperometrica fornita con lo strumento e verrà usato per acquisire segnali dai componenti della scheda di controllo dove sono montate anche le sonde di corrente.

- Lecroy CP015 current probe:



Lecroy CP015 current probe è una sonda di corrente ad effetto Hall fornita come accessorio con l'oscilloscopio descritto sopra. Si tratta di una sonda di corrente di estrema precisione (fino a 1mA/div) e capace di misurare fino a 500A. Presenta un pulsante di auto-calibrazione per rimuovere gli offset. Verrà utilizzata per misurare la corrente di una delle tre fasi del motore per confrontare la misura della sonda di corrente della scheda con quella di questo strumento.

- AIM TT CPX 400SP:



AIM TT CPX 400SP è un alimentatore DC, singolo output capace di una potenza fino a 420W, di fornire fino a 60V di tensione e 20A di corrente. Verrà utilizzato per fornire la corrente della scheda di controllo in modo tale da verificare il corretto funzionamento della sonda di corrente. Inoltre verrà utilizzato per alimentare la scheda di controllo simulando la batteria dello scooter.

6.2 Dimensionamento dell'air-gap

Come introdotto nel capitolo precedente, il dimensionamento dell'*air-gap* deve essere fatto in modo da ottenere il maggior rendimento possibile e meno dispersione di flusso.

6.2.1 Teoria

Il circuito magnetico formato da sensore e nucleo si risolve partendo dalla legge di Ampère:

$$I = \oint H \cdot dl$$

dove I è la corrente circolante nella linea chiusa l , dove l è la circonferenza interna del nucleo considerata come diametro medio tra l'interno e l'esterno del nucleo. La corrente percorre la lunghezza del nucleo ($l_{fe} = \pi \cdot \phi_{med} - l_g$) e la lunghezza del traferro l_g .

Considerando uniformi i campi H_{fe} nel ferro e H_g nel traferro, la legge di Ampère può essere riscritta come:

$$I = H_{fe} \cdot l_{fe} + H_g \cdot l_g = FMM_{fe} + FMM_g$$

Sapendo la relazione costitutiva dei materiali $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$ e quindi $H_{fe} = \frac{B_{fe}}{\mu \cdot \mu_0} = \frac{B_g}{\mu_0}$, sostituendo si ottiene:

$$I = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{B_{fe} \cdot l_{fe}}{\mu} + B_g \cdot l_g \right) \quad [6.1]$$

Essendo il nucleo ferromagnetico fortemente non lineare, non si possono ricavare facilmente informazioni su B_{fe} o μ e quindi neppure su B_g . Pertanto si accetta di considerare che:

1. $B_{fe} \approx B_g = B$, quindi come se tutto il flusso del nucleo attraversasse il traferro senza dispersione sui bordi. Va precisato che tale approssimazione non è mai del tutto vera, ma lo è tanto più quanto piccola è la distanza l_g rispetto all'area della superficie del traferro.
2. la permeabilità μ del nucleo tende a infinito ($\mu \rightarrow \infty$).

In virtù di queste considerazioni si può affermare che $\frac{l_{fe}}{\mu} \ll l_g$ e quindi la legge di Ampère semplificata diviene quindi:

$$I \cong \frac{B}{\mu_0} \left(\frac{l_{fe}}{\mu} + l_g \right) \cong \frac{B \cdot l_g}{\mu_0} \quad [6.2]$$

In sostanza la funzione del nucleo è di "annullare" la caduta di FMM_{fe} al suo interno, in modo che la caduta di FMM totale I si "concentri" solo nel percorso del traferro. Si nota che nel calcolo non entra in gioco la sezione del nucleo. Ciò sarebbe corretto se fosse vera l'ipotesi 1, basata sull'equiparazione della sezione di nucleo e traferro. Questo non deve indurre a pensare di potere

ottenere un vantaggio economico dall'adozione, per il nucleo, di una sezione troppo ridotta, perché in questo caso il flusso disperso sui bordi del traferro diverrebbe preponderante e andrebbe a saturare il nucleo stesso.

Dalla legge di Ampère nella forma appena descritta ([6.2]) derivano le relazioni:

- $CF = \frac{B}{I}$, dove $CF = \text{Coupling Factor} = \frac{\mu_0}{l_g}$ (Formula derivata dal datasheet del componente Melexis)
- $B[\text{mT}] = 1.25 \cdot \frac{I[\text{A}]}{d[\text{mm}]}$ dove 1.25 deriva dal fatto che $\mu_0 \cdot 10^6 \approx 1.25$ (formula [2.0])

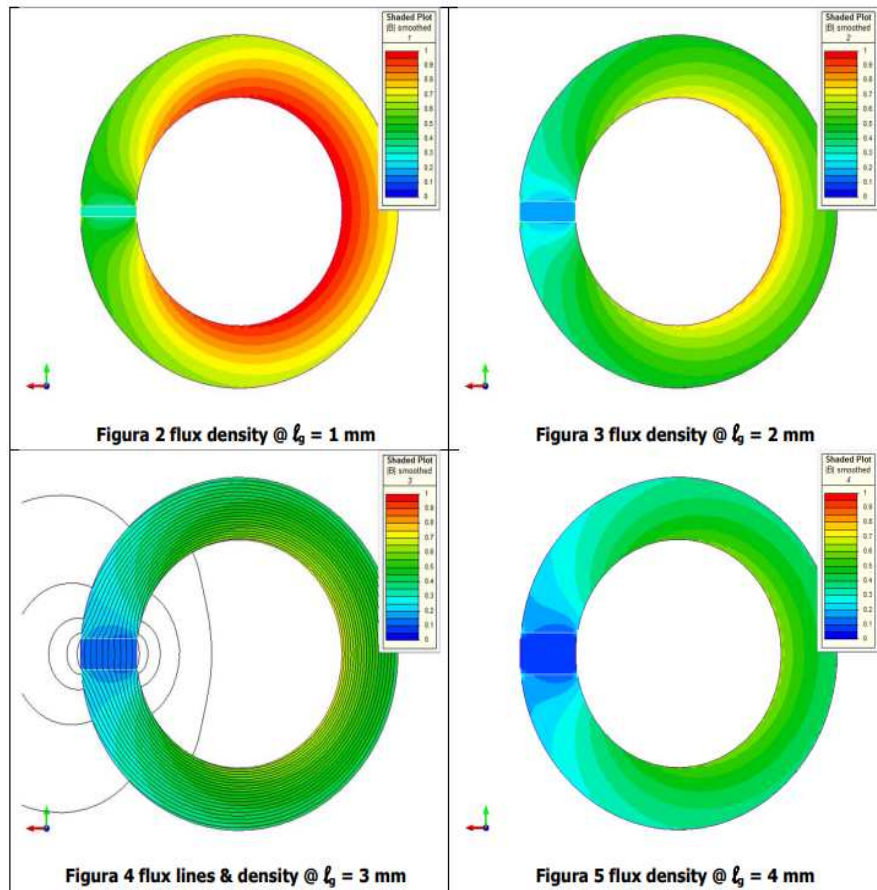
Nelle fasi di test si considereranno correnti di picco dell'ordine di $200\sqrt{2}$. Il traferro teorico, quindi, dalla formula [2.0] con B_{fs} (sapendo che il sensore Melexis ha fondoscala impostabile da 15 a 450 mT) risulta: $l_g = \frac{1.25 \cdot 200\sqrt{2}}{450} < 1_{mm}$ sapendo che il nucleo proposto dal fornitore ha le caratteristiche della tabella seguente (Fig.19)

Diametro interno	Φ int	22
Diametro esterno	Φ ext	34
Altezza assiale	H	7
Spessore radiale $\frac{\Phi_{ext} - \Phi_{int}}{2}$	W	6
Traferro	l_g	4
Materiale		35C270

[Fig.19]

6.2.2 Test analitici del nucleo

Si procede a simulare con software FEM 3D le densità di flusso al variare dell'*air - gap* da $[1 \div 4]mm$ e si riportano i risultati in (Fig.20). La legenda a fianco delle foto rappresenta le varie intensità di flusso e come si distribuiscono all'interno del nucleo.



[Fig.20]

Si può già notare come la sezione da 1mm stressi il nucleo in maniera più accentuata delle altre tre e come la sezione da 3mm sia la più proporzionata tra le quattro considerate. Di seguito si mostra la tabella che riassume quanto detto fin ora (Fig.17)

l_g	$B = 1.257 \times \frac{I[A]}{l_g}$	B_g FEM	Errore $\frac{B}{B_g} - 1$	B_{Fe} min/max FEM	FMM gap $\int_{-l_g/2}^{l_g/2} H \cdot dl$	$\frac{FMM_g}{I}$	$\frac{FMM_{Fe}}{I}$ $(= 1 - \frac{FMM_g}{I})$	Rif. figura
[mm]	[mT]	[mT]	%	[mT]	[A]	%	%	
1	355.4	347.0	2.4	703/1000	276.12	97.6	2.4	2
2	177.7	174.8	1.7	508/792	278.16	98.3	1.7	3
3	118.5	116.7	1.5	440/680	278.95	98.6	1.4	4
4	88.9	87.2	1.9	396/612	279.41	98.8	1.2	5

[Fig.20]

Dalla (Fig.19) si vede che, causa il flusso disperso, l'induzione massima nel nucleo (sulla sezione opposta al traferro) è 2-3 volte quella nel traferro e tutt'altro che uniforme. Quindi la condizione (1) non è verificata.

Nonostante questo i risultati analitici semplificati rimangono paragonabili a quelli numerici in quanto il nucleo è ancora lontano dal saturare e la sua caduta di FMM_{fe} è trascurabile rispetto alla FMM_g . La permeabilità relativa μ infatti si mantiene oltre a 7000 in tutti e quattro i casi e l'induzione B calcolata analiticamente è superiore al calcolo FEM al più di un 2%. Inoltre l'accuratezza della misura del sensore risente della non-linearità del materiale, che ha un ciclo di isteresi caratterizzato da campo coercitivo e induzione residua, oltretutto variabili con la frequenza. Ad ogni modo, tralasciando il caso $lg = 1$ mm, le non-linearità si sommano con un peso inferiore al 2%, come si vede nella tabella in (Fig.17). Maggiorando il traferro si ha non solo una riduzione di sensibilità $\frac{B}{I}$ del dispositivo, ma anche l'uniformità del campo nel traferro si riduce e occorre quindi prestare maggiore attenzione alle tolleranze geometriche di posizionamento del sensore al suo interno.

L'isteresi e le *correnti parassite* giocano un ruolo non trascurabile sul comportamento del nucleo. Tuttavia, per quanto riguarda la prima, il flusso a corrente zero dovuto all'induzione residua del materiale trova sul suo percorso la riluttanza del traferro e pertanto non si ritiene possa costituire un problema per l'accuratezza della misura.

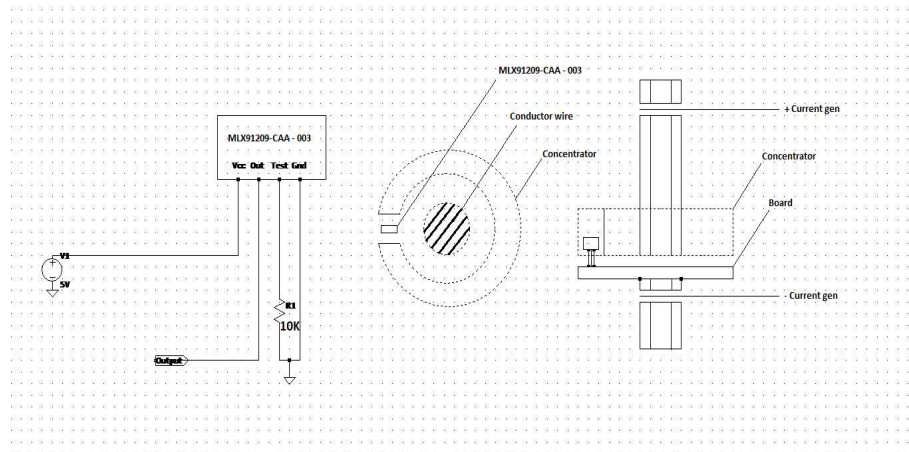
Le *correnti parassite* invece, inducono un flusso aggiuntivo a quello della corrente principale che altera sia il modulo che la fase temporale del flusso risultante al traferro. Saranno quindi oggetto di studi nei test di misura.

6.2.3 Conclusione

Il confronto tra l'analisi numerica FEM e le formule analitiche semplificate presentate in questo capitolo mostrano l'affidabilità di queste ultime. Per aumentare la sensibilità, nel campione fisico è stato scelto un traferro da $lg = 3$ mm, ma l'analisi non evidenzia problemi anche con traferro inferiore. Di conseguenza verrà utilizzato per la costruzione del sensore un nucleo con *air-gap* di 3mm.

6.3 Analisi delle misure

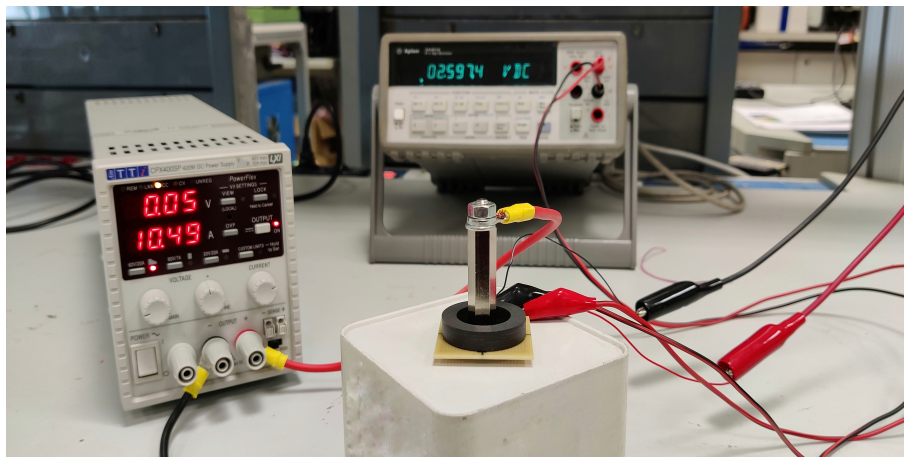
Nel seguente capitolo verranno analizzati i risultati ottenuti dalle misure acquisite sulla interazione tra nucleo e sensore. In virtù delle analisi sperimentali sul nucleo descritte nel capitolo precedente, si vuole misurare qual è la risposta del sensore alle variazioni di corrente e flusso magnetico concatenate nel nucleo dimensionato in precedenza. Si procede quindi all'implementazione di un banco prova con schematico descritto in (Fig.21)



[Fig.21]

6.3.1 Test sul sensore e risposta in corrente

Per questa fase si procede alla costruzione di un banco prova artigianale (Fig.22) che sarà collegato ad un generatore di corrente capace di erogare fino a 20A affiancato ad un multimetro che sarà incaricato di leggere la tensione di *output* del sensore.



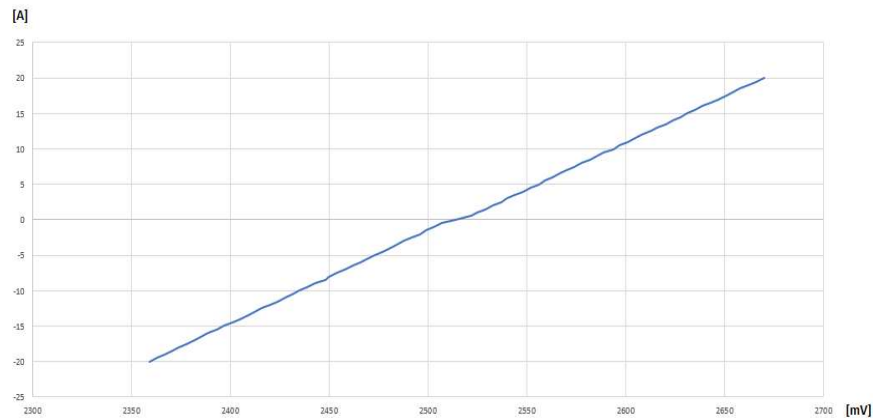
[Fig.22]

Si procede quindi ad alimentare il tutto e a verificare che le condizioni sperimentali corrispondano a quelle rilevate. Secondo il datasheet del componente disponibile nella sezione *Bibliografia*, in condizione di riposo, il *quiescent output* è di 2.5V. A seconda che la corrente sia positiva o negativa, il valore a riposo della tensione di uscita aumenterà o diminuirà a seconda del campo magnetico rilevato in relazione alla formula [2.0]. Si ricorda che la sensibilità è di $19 \frac{mV}{mT}$. La corrente viene fatta passare attraverso il conduttore ad intervalli di 0.5A e per ogni incremento si salva il valore di tensione restituito dal sensore. Per le correnti negative si ripete l'esperimento invertendo le polarità sul generatore. Le misure acquisite sono riportate di seguito.

Corrente [A]	Out [mV]						
-20	2359						
-19,5	2363	-9,5	2439	0,5	2522	10,5	2597
-19	2367	-9	2443	1	2525	11	2601
-18,5	2371	-8,5	2448	1,5	2529	11,5	2605
-18	2374	-8	2450	2	2533	12	2608
-17,5	2378	-7,5	2454	2,5	2537	12,5	2613
-17	2382	-7	2458	3	2540	13	2616
-16,5	2385	-6,5	2462	3,5	2544	13,5	2620
-16	2389	-6	2466	4	2548	14	2624
-15,5	2393	-5,5	2469	4,5	2552	14,5	2628
-15	2397	-5	2473	5	2556	15	2631
-14,5	2401	-4,5	2477	5,5	2559	15,5	2635
-14	2405	-4	2481	6	2563	16	2639
-13,5	2409	-3,5	2484	6,5	2567	16,5	2643
-13	2412	-3	2488	7	2570	17	2647
-12,5	2416	-2,5	2492	7,5	2574	17,5	2651
-12	2420	-2	2496	8	2578	18	2654
-11,5	2424	-1,5	2499	8,5	2582	18,5	2658
-11	2428	-1	2503	9	2586	19	2662
-10,5	2431	-0,5	2507	9,5	2589	19,5	2666
-10	2435	0	2514	10	2594	20	2670

[Fig.23]

Che generano di conseguenza una transcaratteristica riportata in (Fig.24)



[Fig.24]

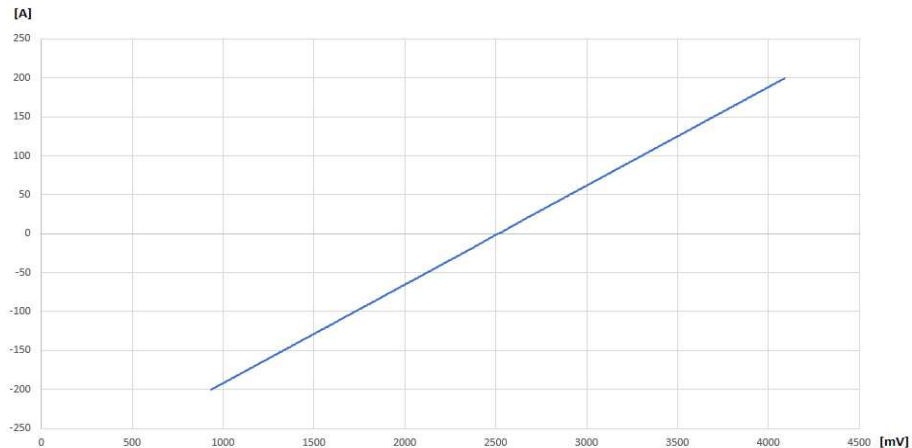
É indispensabile specificare che lo strumento a disposizione non è in grado di erogare una quantità di corrente così grande da coprire anche i casi limite a 200A, di conseguenza acquisendo i valori nell'intervallo $[+20 \div -20A]$ si dovrà procedere successivamente alla proiezione dei dati per le correnti più grandi in maniera analitica. Per fare ciò è sufficiente ricordarsi che secondo la formula [2.0] si può ricavare la quantità di [mT] che corrispondono ad un incremento di 0.5A. Avremo di conseguenza che:

$$B[mT] = 1.25 \cdot \frac{0.5A}{3} = 0.208[mT]$$

Sfruttando poi la sensibilità del sensore si può ricavare che, a fronte di una variazione di 0.208[mT], verranno restituiti:

$$\frac{19mV}{mT} \rightarrow 3.952[mV]$$

Sarà quindi sufficiente per ogni incremento positivo di 0.5A sommare il contributo teorico di 3.952[mV] all'ultimo valore di *output* del sensore, e sottrarlo nel caso di un incremento negativo di 0.5A. I risultati ottenuti mostrano che per una corrente di 200A l'andamento è pressochè lineare e uniforme lungo tutta la caratteristica di trasferimento molto simile alla (Fig.24) e che con correnti di 200A, si arriva a sfruttare lo strumento con percentuali di: 57.03% per correnti positive (corrispondenti ad un output di 0.936V) e 61.7% per correnti positive (corrispondenti ad un output di 4.092V). Si ricorda che la massima accuratezza del sensore si ottiene con percentuali non superiori all'80%.

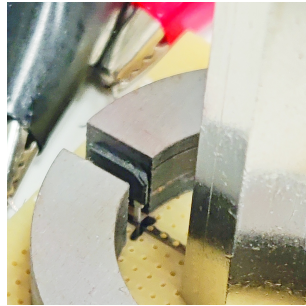


[Fig.25]

La caratteristica è da considerarsi sperimentale poiché nei risultati analitici non considerano aspetti relativi a fenomeni fisici rilevabili soltanto in sede di misura e quindi i comportamenti reali potrebbero essere leggermente diversi. É altresì importante aggiungere che per quanto riguarda il nucleo invece non c'è bisogno di preoccuparsi della corrente passante e del suo comportamento poiché nel paragrafo [6.1.2] è mostrato che per correnti intorno ai 200A si è molto lontani dalla saturazione del nucleo.

6.3.2 Test sul posizionamento del nucleo

Un secondo test viene effettuato per valutare, a fronte di una variazione di posizione del nucleo, la risposta dell'integrato. Vengono individuate due posizioni limite: la prima quando il nucleo è appoggiato ad una delle facce del sensore (di fatto quindi simulando un *air-gap* nullo (Fig.26)), la seconda quando il nucleo è *ruotato* al massimo dei gradi, (nel limite costruttivo, ovvero quando le due estremità opposte della testa del sensore toccano i due lati dell'*air-gap*) come in (Fig.27).



[Fig.26]



[Fig.27]

Per entrambi i casi limite verranno analizzate e commentate le misure acquisite e restituiti i corrispettivi grafici.

- Sensore affacciato al nucleo:

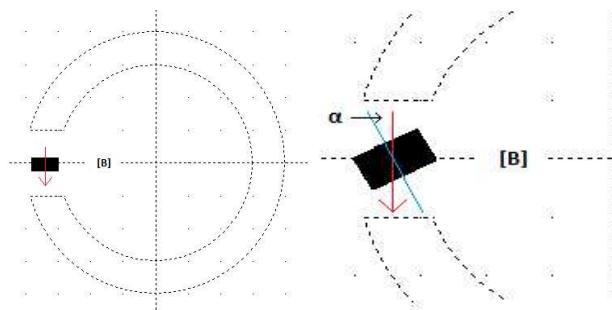
Le misure effettuate con il sensore affacciato al nucleo hanno riportato una variazione pressoché nulla dal punto di vista della risposta in uscita. Questo risultato è attendibile e rispecchia quanto detto nel paragrafo [6.1.2]. Non è quindi indispensabile ipotizzare ulteriori incrementi di corrente. La simulazione fatta con *air-gap* di 1mm riportava uno stress maggiore del nucleo a parità di corrente ma garantisce comunque il funzionamento dello stesso. Ora, se si considera una faccia del sensore come se avesse *air-gap* nullo, il fatto che la misura non cambi è da attribuirsi al fatto che la lamina metallica all'interno dell'integrato, che viene investita dal flusso magnetico, ha bisogno in realtà di un piccolo spazio che divide quest'ultima dal nucleo e quindi lo strato di isolante del componente è più che sufficiente per garantire alla piastra una distanza tale da poter leggere il flusso con una precisione accettabile. Le misure sono riportate in (Fig.30) mentre il grafico in (Fig.31).

- Sensore sfasato rispetto al nucleo:

Le misure effettuate con il sensore sfasato rispetto all'asse del banco di prova (come in (Fig.27)) hanno riportato una variazione non trascurabile dei valori di uscita. Infatti, all'aumentare della corrente erogata aumenta la divergenza tra le due misure che diventa considerevole intorno ai 15A.

Come nel paragrafo [6.1.2], per poter apprezzare ancor di più questa variazione è indispensabile ipotizzare questo fenomeno per correnti più alte ma, potendo sfruttare lo strumento soltanto fino a 20A, bisogna costruire una formula per poter simulare valori a correnti più alte. Per ottenere ciò, si possono intraprendere due differenti percorsi.

- Il primo consiste nel misurare l'angolo di sfasamento rispetto all'asse, infatti come descritto in precedenza, la misura esatta della variazione di flusso magnetico si ha quando il sensore viene investito perpendicolarmente (Fig.28)



[Fig.28]

[Fig.29]

mentre quando il sensore è ruotato, guadagna un angolo di sfasamento α . (Fig.29). Sappiamo infatti che l'attenuazione della misura da parte del sensore è proporzionale all'inclinazione dello stesso e in particolare è dipendente dal $\sin(\alpha)$. Quando il sensore si trova a $\frac{\pi}{2}$ rispetto al flusso avremo il guadagno massimo, quando invece si trova a 0 avremo un guadagno nullo.

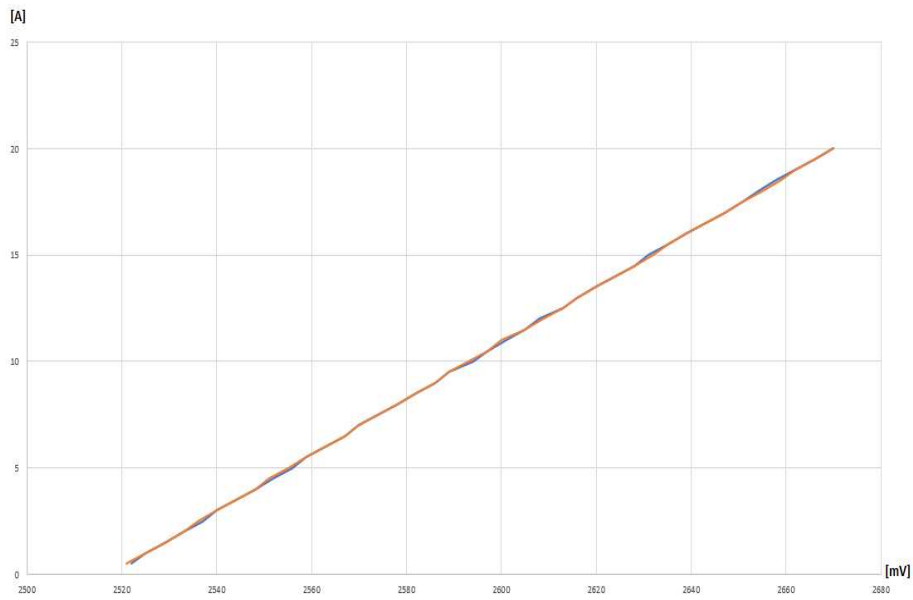
$$\text{Guadagno} = \text{misura} \cdot \sin(\alpha)$$

Questa opzione però è difficilmente percorribile poichè la misura dell'angolo è una operazione che necessita di particolare precisione in quanto le dimensioni sono molto ridotte e anche l'errore di un solo grado può portare a risultati inattendibili. Per di più il nucleo per poter essere posizionato nel caso limite di (Fig.27) non solo deve ruotare rispetto al suo asse ma anche diagonalmente.

- Il secondo metodo invece è più grezzo e consiste nel ricavare la funzione della retta passante per due punti (in questo caso i due punti delle estremità della transcaratteristica delle misurazioni di (Fig.33)) e proiettare di conseguenza i valori di tensione teorici sfruttando l'equazione della retta. È interessante notare che a 200A si ha una variazione ipotetica calcolata di circa 8.8%. Una divergenza di questa entità dovrebbe immediatamente allertare, tuttavia la posizione del nucleo in fase di montaggio avrà delle guide che non permetteranno allo stesso di posizionarsi in questa maniera. La misura con posizione estremizzata è però utile per comprendere l'importanza di un corretto montaggio.

[A]	[mV nom]	[mV att.]	[A]	[mV nom]	[mV att.]
0,5	2522	2521	10,5	2597	2597
1	2525	2525	11	2601	2600
1,5	2529	2529	11,5	2605	2605
2	2533	2533	12	2608	2609
2,5	2537	2536	12,5	2613	2613
3	2540	2540	13	2616	2616
3,5	2544	2544	13,5	2620	2620
4	2548	2548	14	2624	2624
4,5	2552	2551	14,5	2628	2628
5	2556	2555	15	2631	2632
5,5	2559	2559	15,5	2635	2635
6	2563	2563	16	2639	2639
6,5	2567	2567	16,5	2643	2643
7	2570	2570	17	2647	2647
7,5	2574	2574	17,5	2651	2651
8	2578	2578	18	2654	2655
8,5	2582	2582	18,5	2658	2659
9	2586	2586	19	2662	2662
9,5	2589	2589	19,5	2666	2666
10	2594	2593	20	2670	2670

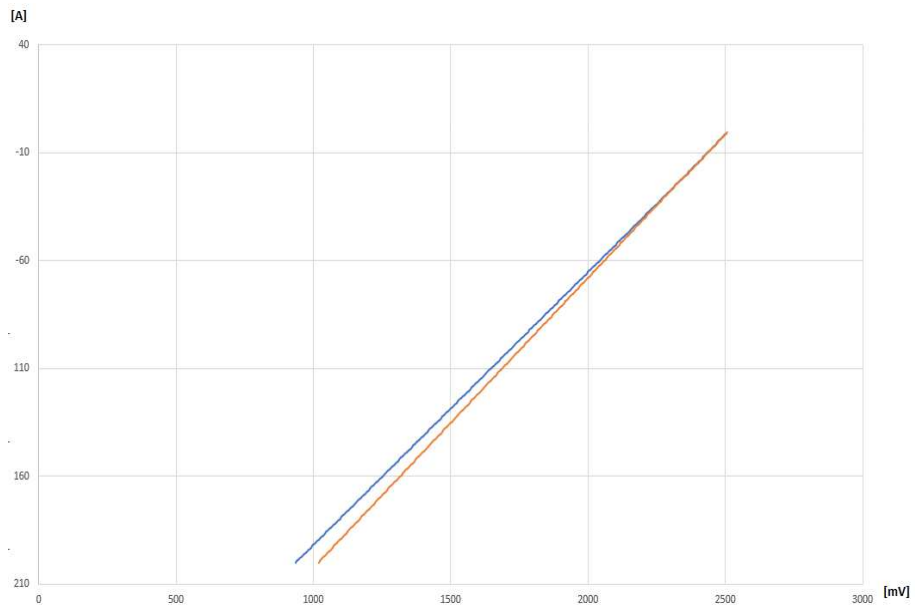
[Fig.30]



[Fig.31]

[A]	[mV nom]	[mV sfasato]			
-20	2359	2362	-9,5	2439	2440
-19,5	2363	2365	-9	2443	2444
-19	2367	2369	-8,5	2448	2448
-18,5	2371	2373	-8	2450	2452
-18	2374	2378	-7,5	2454	2455
-17,5	2378	2380	-7	2458	2459
-17	2382	2385	-6,5	2462	2463
-16,5	2385	2388	-6	2466	2467
-16	2389	2392	-5,5	2469	2471
-15,5	2393	2395	-5	2473	2474
-15	2397	2399	-4,5	2477	2478
-14,5	2401	2403	-4	2481	2482
-14	2405	2407	-3,5	2484	2485
-13,5	2409	2410	-3	2488	2489
-13	2412	2414	-2,5	2492	2493
-12,5	2416	2418	-2	2496	2496
-12	2420	2422	-1,5	2499	2500
-11,5	2424	2425	-1	2503	2504
-11	2428	2429	-0,5	2507	2507
-10,5	2431	2433	0	2514	2514
-10	2435	2436			

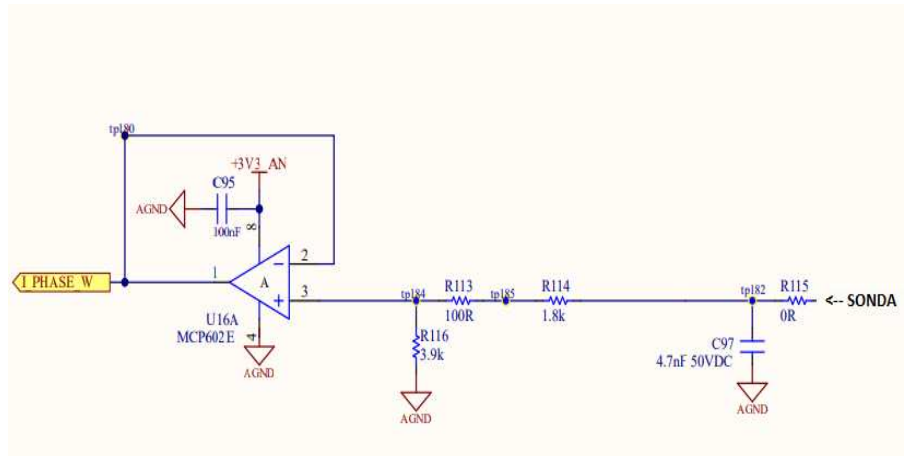
[Fig.32]



[Fig.33]

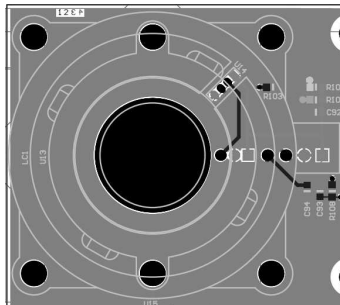
6.4 Analisi su scheda PCB

In questa sezione verranno analizzate le misure acquisite sui vari componenti citati in precedenza. È necessario, prima di iniziare le analisi, approfondire lo schematico del controllo della corrente che è stato scelto per la scheda in questione. Esso infatti si compone di tre parti: il primo è un banale filtro RC che è incaricato di filtrare le basse frequenze, il secondo è un partitore di tensione per scalare l'uscita di 5V a 3.3V, l'ultimo è un inseguitore di tensione che restituisce la tensione al sistema di controllo. (Fig.34).



[Fig.34]

Le schede di test costruite da Askoll[©] sono state progettate per ospitare tutti i componenti di controllo della scheda di potenza dell'inverter per controllo del motore. In particolare, osservando la (Fig.35), si nota che sono stati costruiti gli alloggiamenti per poter ospitare tutti i sensori citati nel paragrafo [4.1] Si procederà quindi al montaggio di un sensore alla volta e si misureranno le variazioni di tensione, la sensibilità, e l'accuratezza per avere sia un confronto tra i vari sensori sia per costruire un quadro complessivo del comportamento degli ultimi per poter trarre infine l'analisi delle fattibilità.



[Fig.35]

SONDA SOCAN SCK29 300A

La prima sonda testata è la sonda Socan del paragrafo [4.1]. La sonda viene stagnata nella scheda di controllo e poi viene alimentato il tutto. I dati vengono acquisiti mediante l'utilizzo dell'oscilloscopio.

Lo schema del banco prova è molto semplice: il generatore di corrente alimenta la scheda di potenza che genera una terna di fasi che arrivano al motore elettrico. Ad una di queste tre fasi è concatenato il sensore in prova montato nella scheda di controllo. Vengono poi stagnati dei cavi all'uscita dell'inseguitore di tensione per verificare l'output generato dalla sonda. Viene anche utilizzata una pinza amperometrica per misurare la corrente passante sulla fase. Le immagini acquisite sono le seguenti:



[Fig.36]

Si possono trarre immediatamente un paio di considerazioni. La prima è che il segnale di uscita viene fedelmente riprodotto dalla sonda: l'immagine della (Fig.36) mostra infatti la sinusoide verde (che è la corrente misurata nella fase con la pinza amperometrica) e la sinusoide gialla (che è l'output di tensione prelevato dal pin 3 dell'inseguitore di tensione). Non vi sono distorsioni di segnale e l'uscita è priva di rumore.



[Fig.37]

La seconda considerazione da fare è sul valore della tensione di uscita. Nelle due immagini (Fig.36) e (Fig.37) sono riportate le misure effettuate dall'oscilloscopio dei picchi di tensione positiva della sinusoide. Nel datasheet del componente è riportato che la tensione massima a 300A è di 4.5V e la *quiescent voltage* è di 2.5V. La transcaratteristica è lineare, dunque svolgendo qualche calcolo elementare si ha che, considerando la (Fig.36):

$$V_{out} = 2.5V + (1.25 \cdot \frac{28.52}{200}) = 2.6783V$$

Partitore di tensione tra $1.9K$ e $3.9K$ = fattore moltiplicativo 0.6724, quindi all'uscita dell'inseguitore di tensione si ha una tensione di:

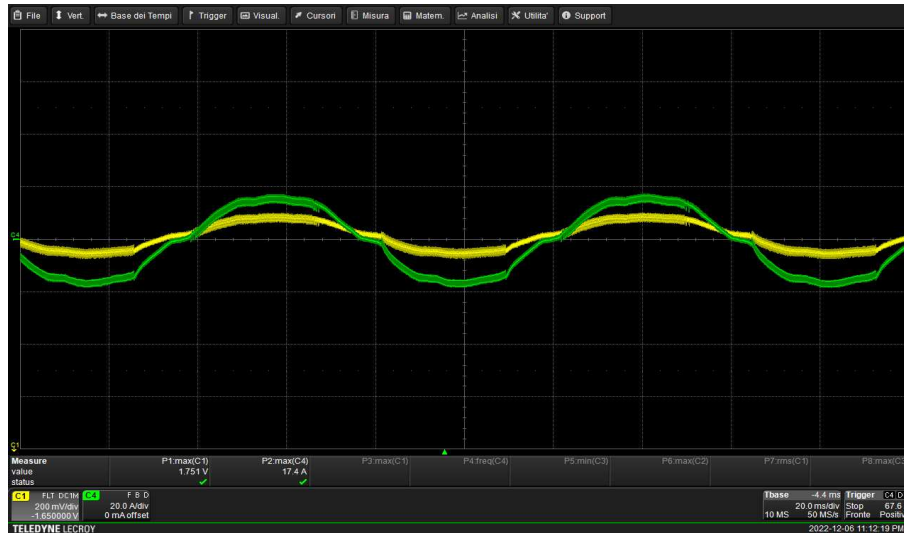
$$2.6783V \cdot 0.6724 = 1.800V \text{ (calcolati)}$$

Il valore invece misurato dall'oscilloscopio è 1.8056V. Un discostamento di 0.0056V dal valore calcolato è sufficientemente accettabile confermando che la misura reale coincide con quella attesa. Si può procedere allo stesso modo con l'analisi della (Fig.37), confermando che anche alla corrente di 73.7A la tensione di output sulla uscita dell'inseguitore di tensione è molto vicina a quella teorica calcolata. In conclusione quindi si può confermare che la sonda SOCAN risponde egregiamente all'input e che funziona correttamente.

È doveroso ricordare che misure di questo tipo non servono solamente a verificare che il sensore funzioni a dovere ma servono anche come ulteriore conferma che la scheda, a monte, non presenti problemi costruttivi.

SONDA LEM HTFS300P

La seconda sonda testata è la sonda LEM HTFS300P. La misura per questa sonda segue gli stessi passaggi di quella sopra. Si stagna la sonda nell'apposito alloggiamento e si collegano gli strumenti di misura. Verranno quindi confrontati i risultati ottenuti con quelli calcolati. Le immagini acquisite sono le seguenti:



[Fig.38]



[Fig.39]

Come per la sonda SOCAN passiamo alle considerazioni su quanto acquisito. Nella (Fig.38) si possono notare:

In giallo la tensione di output della sonda e in verde la corrente nella fase, misurata attraverso la pinza amperometrica. Nel datasheet del componente è riportato che la tensione massima a 300A è di 4.5V e la *quiescent voltage* è di 2.5V . La transcaratteristica è lineare sicché svolgendo qualche calcolo elementare si ha che, considerando la (Fig.38):

$$V_{out} = 2.5V + \left(1.25 \cdot \frac{17.4}{200}\right) = 2.608V$$

Partitore di tensione tra $1.9K$ e $3.9K$ = fattore moltiplicativo 0.6724, quindi all'uscita dell'inseguitore di tensione si ha una tensione di:

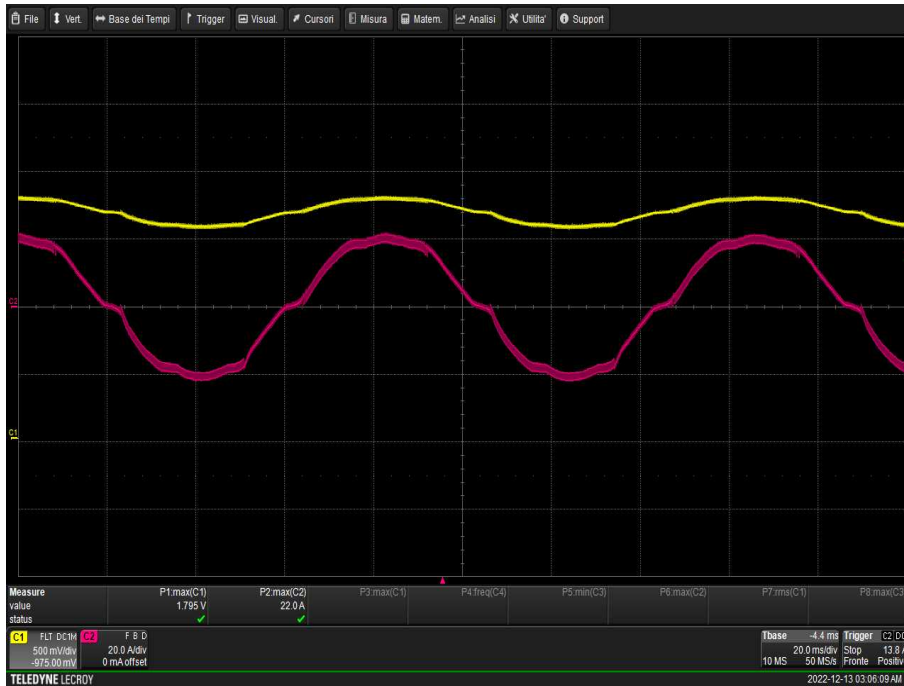
$$2.6083V \cdot 0.6724 = 1.754V \text{ (calcolati)}$$

Il valore invece misurato dall'oscilloscopio è 1.751V. Un discostamento di 0.003V dal valore calcolato è estremamente affidabile confermando che la misura reale coincide quasi perfettamente con quella attesa. Si può procedere allo stesso modo con l'analisi della (Fig.39), confermando che anche alla corrente di 65.1A la tensione di output sulla uscita dell'inseguitore di tensione è molto vicina a quella teorica calcolata. In conclusione, quindi, si può confermare che la sonda LEM come è stato per la sonda SOCAN, risponde egregiamente all'input e che funziona correttamente.

Allo stesso modo della sonda SOCAN, per completezza, si può osservare in (Fig.39) che la risposta della sonda è decisamente pulita. Il segnale di uscita viene infatti fedelmente riprodotto senza distorsioni di segnale e l'uscita è priva di rumore. A differenza della precedente, sembrerebbe anche rispondere meglio alla corrente passante in quanto non sono presenti nei picchi della sinusoide i disturbi visibili invece nella (Fig.36). (Si ricorda che i [V/div] sono gli stessi in entrambe le figure).

SONDA MLX91209-CAA-003

La sonda che utilizza il sensore MELEXIS è la sonda descritta nel paragrafo [5.1]. Essa viene utilizzata per la misura della corrente in abbinata al nucleo descritto nel paragrafo [6]. Viene quindi fustellato uno strato di biadesivo che verrà utilizzato per mantenere saldo il nucleo alla scheda e poi stagnato il sensore nello spazio dell'air-gap, avendo cura di rispettare la *piedinatura* e le distanze tra il sensore e le pareti del nucleo. L'alloggiamento del sensore è visibile nella (Fig.35) in alto a destra. Prima di alimentare il tutto si controlla con un microscopio di precisione che i contatti soggetti a stagnatura non contengano dei *cortocircuiti*. Appurato questo vengono quindi collegati gli strumenti di misura, alimentate le schede di controllo e di potenza e acquisite le seguenti immagini:



[Fig.40]



[Fig.41]

Esattamente come fatto con gli altri due sensori passiamo alle considerazioni su quanto acquisito. Nella (Fig.40) si possono notare

in giallo la tensione di output della sonda e in fucsia la corrente nella fase, misurata attraverso la pinza amperometrica. Nel datasheet del componente è riportato che la tensione massima del sensore a 300A è di 5V e la *quiescent voltage* è di 2.5V . La transcaratteristica è lineare, quindi, svolgendo qualche calcolo elementare si ha che, considerando la corrente misurata dalla pinza di 22A:

$$V_{out} = 2.5V + \left(2.5 \cdot \frac{22}{300}\right) = 2.683V$$

Partitore di tensione tra $1.9K$ e $3.9K$ = fattore moltiplicativo 0.6724, quindi all'uscita dell'inseguitore di tensione si ha una tensione di:

$$2.6083V \cdot 0.6724 = 1.805V \text{ (calcolati)}$$

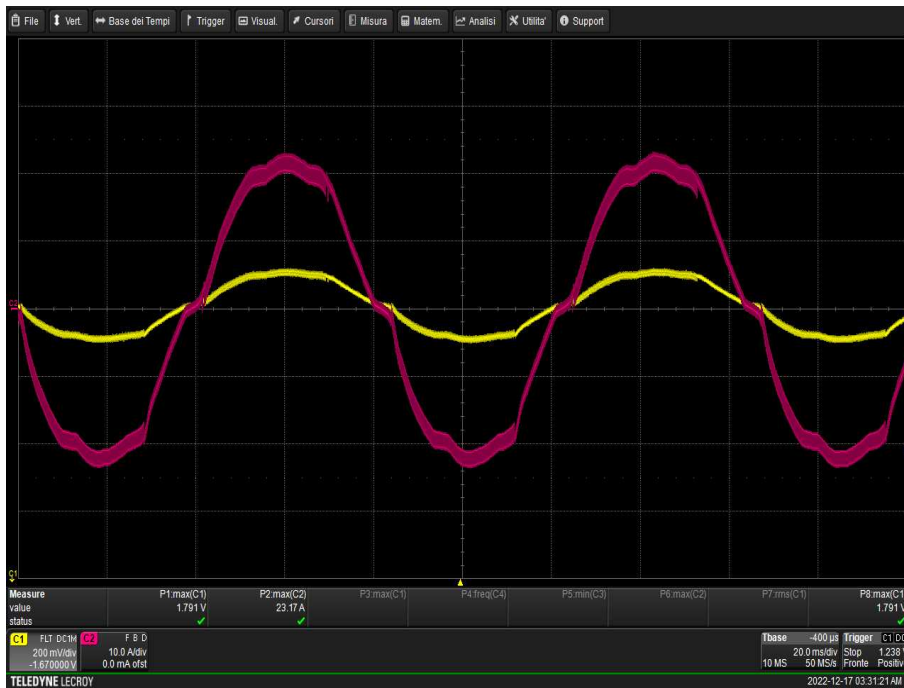
Il valore invece misurato dall'oscilloscopio è 1.795V. Un discostamento di 0.010V dal valore calcolato è sufficientemente affidabile confermando che la misura reale coincide in modo esaustivo con quella attesa. Infatti, riprendendo le informazioni sul sensore (Paragrafo [5.1], uno scarto di 10_{mV} considerando una sensibilità di $19 \frac{mV}{mA}$ si otterrebbe, usando la formula [2.0] uno scarto in corrente di 0.22A).

Si può procedere allo stesso modo con l'analisi della (Fig.41), confermando che anche alla corrente di 65.1A la tensione di output sulla uscita dell'inseguitore di tensione è molto vicina a quella teorica calcolata. In conclusione quindi si può confermare che la sonda autocostruita sfruttando il sensore MLX91209-CAA-003, risponde egregiamente all'input e che funziona correttamente.

Allo stesso modo delle altre due, per completezza, si può osservare in (Fig.41) che la risposta della sonda è decisamente pulita. Il segnale di uscita viene infatti fedelmente riprodotto senza distorsioni di segnale e l'uscita è priva di rumore. Allo stesso modo della sonda LEM sembrerebbe anche rispondere molto bene alla corrente passante in quanto non sono presenti nei picchi della sinusoide i disturbi visibili invece nella (Fig.36).

SONDA LUKSENS C02

La sonda LUKSENS C02 è una delle principali sonde reperibili in commercio. I procedimenti per l'acquisizione delle forme d'onda e quindi delle misure di uscita sono gli stessi delle altre sonde. LUCKSENS è l'ultima sonda testata. Si stagna la sonda nell'apposito alloggiamento e si collegano gli strumenti di misura. Infine verranno confrontati i risultati ottenuti con quelli calcolati con le immagini acquisite riportate qui sotto:



[Fig.42]



[Fig.43]

Allo stesso modo degli altri sensori, concludiamo con il confronto tra la tensione di uscita reale e misurata. Nella (Fig.42) si possono notare in giallo la tensione di output della sonda e in fucsia la corrente nella fase misurata attraverso la pinza amperometrica. Nel datasheet del componente è riportato che la tensione massima del sensore a 300A è di 5V e la quiescent voltage è di 2.5V . La transcaratteristica è lineare quindi svolgendo qualche calcolo elementare si ha che, considerando la corrente misurata dalla pinza di 22A:

$$V_{out} = 2.5V + \left(2.5 \cdot \frac{23.17}{300}\right) = 2.693V$$

Partitore di tensione tra 1.9K e 3.9K = fattore moltiplicativo 0.6724, quindi all'uscita dell'inseguitore di tensione si ha una tensione di:

$$2.693V \cdot 0.6724 = 1.811 \text{ (calcolati)}$$

Il valore invece misurato dall'oscilloscopio è 1.791V. Un discostamento di 0.020V dal valore calcolato è sufficientemente accettabile confermando che la misura reale coincide in modo esaustivo con quella attesa. Si può procedere allo stesso modo con l'analisi della (Fig.43), confermando che anche alla corrente di 65.1A la tensione di output sulla uscita dell'inseguitore di tensione è molto vicina a quella teorica calcolata. In conclusione quindi si può confermare che la sonda risponde egregiamente all'input e che funziona correttamente. Allo stesso modo delle altre tre, per completezza, si può osservare in (Fig.43) che la risposta della sonda è pulita. Il segnale di uscita viene infatti fedelmente riprodotto senza distorsioni di segnale e l'uscita è priva di rumore. Così come le altre sonde sembrerebbe anche rispondere molto bene alla corrente passante in quanto non sono presenti nei picchi di rumore nella sinusoide.

Per concludere la sezione sulle misure è necessario ricordare che, tutti i sensori presentano delle tolleranze che vengono dichiarate nei *datasheet* del componente. Un sensibile discostamento nella tensione di uscita è quindi normale e dettato dalle caratteristiche costruttive (generalmente sono intorno all'1% della tensione di output). I sensori sono poi condizionati anche da un offset dichiarato dal costruttore che quindi trasla la caratteristica di uscita di una quantità in *mV* ben precisa. Questi due fattori insieme contribuiscono al discostamento reale del valore di uscita che quindi, entro determinati valori, si può considerare normale e perfettamente accettabile.

7 Analisi fattibilità e aspetto economico

In questa sezione verranno approfonditi le prospettive riguardo alla fattibilità dei sensori sopracitati. Il verdetto finale è dettato da più aspetti che si possono riassumere in:

- Sensibilità dei sensori
- Reperibilità dei sensori
- Pro e contro delle due soluzioni

7.1 Sensibilità dei sensori

Per sensibilità del sensore si intende l'abilità dello stesso di fornire un dato più o meno preciso a fronte di un input letto in ingresso. Le sonde Hall hanno la sensibilità espressa in $\frac{mV}{mA}$ e ogni produttore produce varie gamme con addirittura, in alcuni casi, la possibilità di programmare una sensibilità specifica (con l'ausilio di un macchinario proprietario della azienda acquistabile a parte). Le sonde considerate sono state scelte in base alle caratteristiche tecniche del paragrafo [5.1].

7.2 Reperibilità dei sensori

Come descritto precedentemente, la sensibilità degli strumenti di misura è una caratteristica fondamentale da considerare nell'insieme delle valutazioni. Ogni casa produttrice fornisce bene o male sensori con diverse gamme di sensibilità che coprono all'incirca tutte le possibili richieste.

Verrebbe quindi da interrogarsi sul motivo di tale approfondimento se ogni produttore è in grado di fornire uno strumento capace di coprire una ricca gamma di sensibilità. Ebbene la risposta è molto semplice: i produttori non sono in grado di sopperire alle ingenti richieste delle aziende poiché per ogni prodotto vi sono diversi volumi di vendita. Così come potrebbe funzionare per una banale t-shirt, dove la taglia più venduta è sempre quella media mentre altre le taglie registrano molte meno vendite, allo stesso modo si può ragionare con le sonde Hall.

È molto più probabile infatti che ad un fornitore arrivino numerose richieste per un sensore di fascia media in grado di coprire misure di corrente con sensibilità sufficientemente precisa che non sensori con altissima sensibilità ma difficili da implementare o, ancora, sensori con minore sensibilità ma capaci di sopportare correnti estremamente alte. Le richieste quindi finiscono per saturare l'offerta dei produttori, che non sono capaci di fornire i componenti desiderati e, dunque, spesso l'azienda è obbligata a ripiegare su altri grossisti (sempre che questi non stiano affrontando lo stesso problema) o su altre tipologie dello stesso prodotto.

Per quanto riguarda Askoll© il problema è il medesimo. Il settore dei componenti elettronici sta affrontando un importante periodo di crisi che ha portato alla decisione di adottare, tra i vari fornitori, solamente le sonde citate nella sezione precedente. Riassumendo i concetti, abbiamo che dei quattro sensori considerati:

SOCAN è una azienda cinese che opera a livello globale. Non ha molti anni di esperienza nel settore e difficilmente si può trovare in magazzini italiani o europei pronti per la eventuale spedizione.

LEM è il principale leader del settore, ha una lunga storia come azienda e opera globalmente. Le sue sonde sono, come confermato nel paragrafo [6.3], le più precise a discapito, del prezzo. Hanno disponibilità in quasi tutti i magazzini italiani ed europei e le spedizioni, anche per grosse quantità, sono fattibili con tempi brevi. **LUKSENS**, azienda tedesca, produce sonde Hall con buona sensibilità (vedi paragrafo [6.3]) e dispone di una ottima quantità di sensori. Sono presenti in magazzini italiani in una discreta quantità e la vicinanza tra paesi rende ancora più vantaggioso l'eventuale acquisto.

MELEXIS produce invece solamente il sensore Hall. L'assenza di un processo di fabbricazione per la costruzione della sonda vera e propria (che determina quindi un prezzo decisamente ridotto per il singolo componente) e la molteplicità di utilizzi del sensore stesso, comporta una difficoltà non banale per quanto riguarda la reperibilità. I tempi sono più lunghi, e per poterlo avere con configurazioni particolari (come ad esempio in piedinatura SMD) bisogna prima ottenere una conferma da parte del fornitore che spesso è poco propenso a intraprendere operazioni di questo tipo.

7.3 Pro e contro delle due soluzioni

La sezione vendite di Askoll© ha previsto nel corso del prossimo anno di distribuire all'incirca 2000 scooter. Come già spiegato, ogni scooter presenta all'interno una scheda di controllo che monta a sua volta due sonde di corrente. Considerato quindi come volume di acquisto il tetto massimo di 4000 sonde e prendendo in esame i costi descritti nel paragrafo [4], si possono dividere le sonde in due categorie: sonde comprate e sonde costruite.

Per quanto riguarda le prime possiamo affermare che hanno le seguenti caratteristiche:

- Pro
 - La sonda è già pronta per essere montata. É testata e l'azienda garantisce controlli e assistenza.
 - É plug and play per qualsiasi applicazione.
- Contro
 - La sonda non è disponibile in formato SMD e quindi necessita di una saldatura selettiva in specifici macchinari. Tutti gli altri componenti nella scheda di controllo sono SMD con la conseguenza che, in fase di montaggio, la scheda deve attraversare un processo aggiuntivo per un solo componente.
 - La sonda comprata lega in termini di dipendenza l'azienda al fornitore.
 - Generalmente ha un costo complessivo maggiore.

Per quanto riguarda la sonda costruita invece possiamo fare la stessa considerazione e quindi avremo che:

- Pro
 - La sonda libera l'azienda dal vincolo con i fornitori e quindi garantisce il numero di sonde necessarie in qualsiasi situazione.
 - É disponibile con montaggio SMD evitando che avvenga un ulteriore processo di saldatura selettiva.
 - Può essere in termini complessivi più economica.
- Contro
 - Vi è un costo aggiuntivo oltre a quello del sensore dovuto alla necessità di un nucleo per il corretto funzionamento che deve essere acquistato da produttori esterni.
 - Vi è un costo importante da considerare che è quello delle risorse umane che servono per adattare il nucleo alla scheda e il costo risorse umane è generalmente maggiore di un costo macchina.
 - Il nucleo e la sonda devono essere piazzati con rigorosa precisione. Bisogna fare in modo che la sonda sia perfettamente allineata con l'air-gap per evitare problemi legati alla sfasatura della misura come approfondito nel paragrafo [6.2.2].

Considerate quindi queste premesse sulla differenza in termini di pro e contro delle due tipologie di implementazione possiamo ora costruire le tabelle riassuntive (Fig.44 e Fig.45).



[Fig.44]



[Fig.45]

7.4 Considerazioni finali

In quest'ultima sezione si proverà a riassumere il contenuto dell'elaborato e a rispondere quindi alla domanda iniziale. Che sensore dovrà essere utilizzato? La risposta non è banale ed è frutto di tutti i ragionamenti affrontati finora. Iniziamo col precisare che:

- Una azienda, quando delinea un progetto aziendale, deve necessariamente stabilire un budget per ogni fase del progetto. Il tetto di spesa massimo, a seconda del tipo di prodotto da realizzare, è quindi un aspetto chiave che condiziona tutte le scelte progettuali. Infatti esistono decine di sonde e sensori oltre a quelli citati che non sono stati menzionati e questo non perché non fossero adatti a tale scopo ma perché sono stati ritenuti non adeguati per via del loro costo. (Nel paragrafo [4] si è parlato effettivamente di sonde che poi però non sono stati acquistate e approfondite). I criteri finali di progetto prendono in considerazione le decisioni proposte a livello economico e pratico dai progettisti ma sono responsabilità specifica di un altro settore della azienda.
- Un secondo aspetto importante da considerare è il tempo limite. Ogni progetto aziendale dispone di tempistiche fissate dette *deadline*. Askoll© ha dettato per questo progetto, un tempo limite fissato a circa metà 2023. La scadenza così estesa è da attribuirsi al fatto che lo sviluppo e progettazione di una sonda Hall sono solamente due delle centinaia di progetti che lavorano in contemporanea. Una scheda di controllo per motore si compone di numerosissimi componenti da dover dimensionare. Esaminando quindi la porzione di progetto descritta in questa tesi non è difficile immaginare che, in termini di sviluppo, sia molto meno impegnativa di tante altre e quindi assuma priorità più bassa. Tutto questo fa sì che la scelta del tipo di sonda da utilizzare possa essere stabilita anche a distanza di poche settimane dalla consegna del progetto. Per di più i tempi estesi di consegna portano ad alcuni vantaggi come ad esempio le possibilità che, nel frattempo, escano aggiornamenti di prodotti già in commercio o nuovi prodotti dei fornitori; che possano scendere i prezzi di alcuni articoli permettendo quindi di risparmiare sul budget di spesa; che entrino nel mercato nuovi produttori con prodotti più specifici per l'applicazione o più economici.

Alla situazione attuale quindi, nel momento della stesura della tesi e considerato che sono state valutate tutte le condizioni sopracitate, il capitolo [7] e le analisi del paragrafo [5.1] e [6.3], la sonda più adatta:

É la sonda **autocostruita**.

Questa decisione rispecchierà con molta probabilità anche la scelta finale a progetto depositato e rappresenta il frutto di attente valutazioni sulla base degli argomenti affrontati in questa tesi, che l'autore spera di aver trasmesso con sufficiente entusiasmo.

8 Conclusioni

Nelle sezioni affrontate finora ci si è concentrati principalmente sull'aspetto teorico, tecnico ed economico. Si precisa però che, al di là del risultato ottenuto, l'intento della tesi è quello di mostrare come, attraverso le nozioni teoriche, l'approfondimento scientifico e le analisi, si possa arrivare ad avere una panoramica completa del funzionamento fisico della sonda, utilizzando come strumenti le nozioni apprese nel percorso formativo universitario.

L'aspetto più significativo di questa esperienza è stato di gran lunga quello di poter verificare personalmente che la teoria affrontata a lezione nei vari corsi ha un riscontro pratico nella realtà. Il fatto di poter constatare che un procedimento logico su carta replichi esattamente il risultato desiderato (potendolo tra l'altro verificare in laboratorio) è di fatto molto piacevole. Infatti, se prima di questo momento per me l'elettronica aveva un significato puramente analitico, aver accertato personalmente che lo studio universitario abbinato alla ricerca, allo sviluppo e all'evolversi della progettazione ha portato alla realizzazione del prodotto finito è una grande soddisfazione.

Ho avuto modo di approfondire gli argomenti, analizzarne il funzionamento fisico, esaminare mediante strumenti specifici e molto sofisticati l'effettivo andamento e infine ho avuto la possibilità di lavorare e scambiare idee con colleghi ingegneri che con infinita pazienza mi hanno affiancato durante tutto il percorso, mostrandosi accondiscendenti e sempre disponibili. Una esperienza quindi sicuramente positiva e stimolante che mi ha permesso di valorizzare le competenze acquisite durante il mio percorso di studio e che ancor di più, ha evidenziato l'importanza di quest'ultimo all'interno della sfera lavorativa.

9 Bibliografia

- <https://www.electricalvolt.com/2021/07/difference-between-copper-loss-and-iron-loss/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_core#Core_loss
- <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01649441/document>
- <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1729593>
- <https://www.edn.com/hall-effect-sensors-measure-fields-and-detect-position/>
- https://www.electroyou.it/vis_resource.php?section=Lezio&id=116
- <https://www.pmlindia.com/pages/flux-concentrator>
- <https://media.melexis.com/-/media/files/documents/application-notes/current-sensors-design-guide-application-note-melexis.pdf>
- <https://media.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx91209-datasheet-melexis.pdf>
- <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/a1366-datasheet.pdf>
- <https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/hall-effect-sensor-ic-publications/current-sensor-concentrator>
- <https://www.nist.gov/pml/nanoscale-device-characterization-division/popular-links/hall-effect/hall-effect>
- https://www.szsocan.com/english.php/article/productinfo/product_id/337/action/cpgg.html#weizhi

10 Ringraziamenti

Quest'ultima sezione è dedicata a a tutte le persone che mi hanno affiancato in questi anni. É stato un percorso lungo e faticoso. Un cammino importate che ha contribuito inevitabilmente alla mia crescita personale perchè mi ha permesso di maturare non solo professionalmente ma anche come persona. Non avrei righe sufficienti per nominare tutti quanti, tuttavia desidero comunque menzionare alcune persone che meritano un ringraziamento particolare. Ringrazio Matteo Meneghini, per la professionalità, la pazienza e la tranquillità che ha dimostrato durante tutto il percorso di accompagnamento alla tesi, ringrazio la mia famiglia e la mia fidanzata che mi hanno sopportato, assecondato, tranquillizzato e motivato a continuare sempre e comunque nonostante i numerosi momenti difficili, ringrazio Askoll e tutto il suo personale per l'immensa opportunità che mi hanno regalato, infine ringrazio e dedico questa tesi a voi.

A tutti voi, che avete sempre creduto in me, e che continuerete a farlo.