



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Studio, sviluppo e validazione sperimentale di un'elettronica front-end per la misura delle correnti di fase di un inverter con sensori a effetto Hall

**Study, development and experimental validation of an inverter phase
current measurement front-end electronics using Hall sensors**

Candidato:
Marco Ciampichetti

Relatore:
Prof.ssa Susanna Spinsante

Correlatori:
Prof.ssa Paola Russo

Ing. Simone Giampieri

Anno Accademico 2023-2024



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Studio, sviluppo e validazione sperimentale di un'elettronica front-end per la misura delle correnti di fase di un inverter con sensori a effetto Hall

**Study, development and experimental validation of an inverter phase
current measurement front-end electronics using Hall sensors**

Candidato:
Marco Ciampichetti

Relatore:
Prof.ssa Susanna Spinsante

Correlatori:
Prof.ssa Paola Russo

Ing. Simone Giampieri

Anno Accademico 2023-2024

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Ringraziamenti

Desidero ringraziare le Professoressa Susanna Spinsante e Paola Russo per avermi seguito in questo percorso di tirocinio e durante la stesura dell'elaborato, rendendosi sempre disponibili quando necessario.

Ringrazio l'Impresa Loccioni per avermi dato l'opportunità di svolgere questo tirocinio e tutti i collaboratori incontrati durante questo periodo. In particolare, un sentito ringraziamento va al mio tutor Simone Giampieri, per avermi seguito nello svolgimento del progetto e per avermi fornito importanti spunti e consigli.

Grazie a tutta la mia famiglia per il sostegno ricevuto durante questo percorso universitario e un ringraziamento speciale a Giulia, per essere stata sempre presente in questi anni. Infine, desidero esprimere la mia gratitudine a tutti gli amici con cui ho condiviso esperienze durante questi anni.

Ancona, Gennaio 2025

Marco Ciampichetti

Sommario

La seguente tesi ha lo scopo di illustrare il progetto di tirocinio svolto presso l'Impresa Loccioni. Esso consiste nello studio, nello sviluppo e nella validazione sperimentale di una scheda elettronica front-end, destinata alla misurazione delle correnti di fase di un inverter trifase tramite l'utilizzo di sensori a effetto Hall. In particolare, sono stati utilizzati dei sensori con tecnologia IMC-Hall.

Nella prima parte, il lavoro è stato contestualizzato rispetto all'ambito in cui si inserisce; successivamente, è stato descritto il funzionamento della tecnologia in questione, illustrando i principali modelli di sensori disponibili sul mercato con questa particolare tecnologia e confrontandoli anche con i sensori attualmente utilizzati, ossia i trasformatori amperometrici.

In un secondo momento, sono state eseguite delle prove su diversi sensori IMC-Hall al fine di osservare il comportamento generale e le principali caratteristiche. In questa fase, sono state effettuate anche delle simulazioni software sullo schermo ferromagnetico utilizzato con questo tipo di sensori. Dalle misure e dalle simulazioni effettuate è stato possibile osservare come questo componente assuma un ruolo di fondamentale importanza nella corretta acquisizione da parte del sensore in esame. Dopo aver scelto il modello del sensore da utilizzare, è stata presentata la parte di progettazione elettronica della scheda, partendo dallo schematico fino alla disposizione del layout e alla verifica del funzionamento una volta prodotta.

Infine, nell'ultima parte, vengono riportati i diversi test effettuati sulla scheda elettronica progettata per valutarne le prestazioni.

Abstract

The following thesis aims to illustrate the internship project carried out at Loccioni company. This project consists in study, development and experimental validation of a front-end electronic board designed for phase current measurement of a three-phase inverter using Hall effect sensors. In particular, sensors with IMC-Hall technology were used.

In the first part, the work was contextualized concerning the field in which it fits; subsequently, the functioning of the technology of interest was described, illustrating the main sensor models available in the market with this particular technology and comparing them with the sensors currently in use, namely the current transformers. At a later time, tests were conducted on different IMC-Hall sensors in order to observe their general behaviour and main characteristics. During this phase, software simulations were also carried out on the ferromagnetic shield used with this type of sensor. From the measurements and simulations performed, it was possible to observe how this component plays a crucial role in the correct acquisition by the sensor under examination.

After choosing the sensor model to use, the electronic design phase of the board was presented, starting from the schematic up to the layout arrangement and functionality check, once produced.

Finally, in the last part, the various tests carried out on the designed electronic board to evaluate its performance are reported.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Obiettivi e finalità	1
1.2	L'impresa Loccioni	2
2	Inverter	5
2.1	PWM-Pulse Width Modulation	6
2.2	Inverter Loccioni	11
2.3	LOC315	12
3	Sensori a effetto Hall	14
3.1	Effetto Hall	15
3.2	Sensore di riferimento: LEM LF 510-S	16
3.3	Sensori IMC-Hall Melexis	17
3.3.1	Tecnologia e funzionamento IMC-Hall	17
3.3.2	Schermo ferromagnetico	18
3.3.3	Famiglie di sensori IMC-Hall	20
3.4	Sensore scelto: Melexis MLX91218	21
3.5	Confronto caratteristiche	24
4	Misure e confronti tra i diversi sensori	26
4.1	Strumentazione utilizzata	26
4.2	MLX91208	27
4.3	MLX91216	30
4.4	MLX91218	35
5	Simulazioni schermo	40
5.1	Dimensioni schermo	40
5.2	Posizione sensore	44
6	Progettazione elettronica	48
6.1	Obiettivi di progetto	48
6.2	Simulazioni	48
6.3	Schematico	50
6.4	Layout del PCB	54
6.5	Collaudo della scheda	55

Indice

7	Test e confronti delle schede elettroniche	59
7.1	Strumentazione utilizzata	59
7.2	MLX91218LDC-ARV-500	61
7.3	MLX91218LDC-ARV-501	72
8	Conclusioni e sviluppi futuri	85

Elenco delle figure

1.1	Polaris [1]	2
1.2	Logo Loccioni	4
2.1	Schema circuitale di un inverter monofase a ponte [2]	6
2.2	Schema circuitale di un inverter monofase a un ramo [2]	7
2.3	Modulazione a larghezza d'impulso [2]	8
2.4	Andamento curva della tensione di uscita in funzione di m_a [2]	9
2.5	Inverter trifase [2]	10
2.6	Inverter Loccioni	11
2.7	Scheda LOC315.0.A	13
2.8	Scheda LOC315.0.B	13
3.1	Effetto Hall [3]	14
3.2	Tensione di Hall [3]	15
3.3	Sensore di corrente LEM LF 510-S [4]	16
3.4	Sensore IMC-Hall [5]	17
3.5	Funzionamento IMC [6]	18
3.6	Applicazione tipica di rilevamento corrente con IMC-Hall [5]	18
3.7	Schermo ferromagnetico [6]	19
3.8	Diagramma a blocchi sensore MLX91218 [5]	22
4.1	Kit di sviluppo IMC-Hall	27
4.2	Set-up misure MLX91208	28
4.3	MLX91208 - Andamento tensione in corrente continua	28
4.4	MLX91208 - Confronto con LEM LF 510-S	29
4.5	MLX91216 - Sensore decentrato	30
4.6	MLX91216 - Set-up misure confronto con LEM	31
4.7	MLX91216 decentrato - Confronto con LEM LF 510-S	32
4.8	MLX91216 centrato - Confronto con LEM LF 510-S	32
4.9	MLX91216 - Confronto sensore centrato - decentrato	33
4.10	MLX91216 centrato - Valutazione disturbi elettromagnetici	34
4.11	MLX91216 centrato - Andamento tensione-distanza	34
4.12	MLX91218 centrato - Confronto con LEM LF 510-S	36
4.13	MLX91218 - Set-up misura tensione di riferimento	37
4.14	MLX91218 - Andamento tensione di riferimento	38
4.15	MLX91218 - Variazione tensione di uscita con la frequenza	38

Elenco delle figure

5.1	Simulazione schermo	41
5.2	Posizione monitor al centro schermo	41
5.3	Andamento B_x lungo l'asse x	45
5.4	Andamento B_z lungo l'asse x	45
5.5	Andamento B_y lungo l'asse x	46
5.6	Andamento B_x lungo l'asse y	46
5.7	Andamento B_x lungo l'asse z	47
6.1	Schematico LTSPICE - Circuito di condizionamento	49
6.2	Simulazione LTSPICE - Andamento segnale di uscita	50
6.3	Schematico KiCAD - Alimentazione	51
6.4	Schematico KiCAD - Acquisizione e condizionamento fase U	51
6.5	Schematico KiCAD - Acquisizione e condizionamento fase V	52
6.6	Schematico KiCAD - Acquisizione e condizionamento fase W	52
6.7	Schematico completo	53
6.8	Layers della scheda	54
6.9	Modello 3D della scheda	55
6.10	LOC453	55
6.11	Collaudo LOC453	56
6.12	Partitore di tensione	58
7.1	Supporto scheda	60
7.2	Set-up misure in corrente continua	62
7.3	Confronto tra LOC453 e LOC315 - Fase U	62
7.4	Confronto tra LOC453 e LOC315 - Fase V	63
7.5	Confronto tra LOC453 e LOC315 - Fase W	63
7.6	Andamento LOC453 - Fase U	64
7.7	Andamento LOC453 - Fase V	64
7.8	Andamento LOC453 - Fase W	65
7.9	Andamento accuratezza LOC453 - Fase U	66
7.10	Andamento accuratezza LOC453 - Fase V	67
7.11	Andamento accuratezza LOC453 - Fase W	68
7.12	Set-up misure in corrente alternata	69
7.13	Andamento LOC453 in frequenza - Fase U	70
7.14	Andamento LOC453 in frequenza - Fase V	70
7.15	Andamento LOC453 in frequenza - Fase W	71
7.16	Andamento LOC453 in frequenza	71
7.17	Andamento LOC453 - Fase U	73
7.18	Andamento LOC453 - Fase V	73
7.19	Andamento LOC453 - Fase W	74
7.20	Andamento accuratezza LOC453 - Fase U	75
7.21	Andamento accuratezza LOC453 - Fase V	76

Elenco delle figure

7.22	Andamento accuratezza LOC453 - Fase W	76
7.23	Andamento LOC453 in frequenza - Fase U	78
7.24	Andamento LOC453 in frequenza - Fase V	79
7.25	Andamento LOC453 in frequenza - Fase W	79
7.26	Banco di prova dell'inverter	80
7.27	Set-up prove con inverter	81
7.28	Andamento LOC453 su inverter - Fase U	82
7.29	Andamento LOC453 su inverter con filtro - Fase U	82
7.30	Andamento LOC453 su inverter - Fase V	82
7.31	Andamento LOC453 su inverter con filtro - Fase V	83
7.32	Andamento LOC453 su inverter - Fase W	83
7.33	Andamento LOC453 su inverter con filtro - Fase W	83
7.34	Disturbo frequenza di switching su inverter - Fase U	84
7.35	Disturbo frequenza di switching su inverter con filtro - Fase U	84

Elenco delle tabelle

3.1	Dimensioni standard schermi non laminati	20
3.2	Confronto principali caratteristiche sensori IMC-Hall	21
5.1	Valore campo magnetico al variare della larghezza dello schermo . .	42
5.2	Valore campo magnetico al variare della lunghezza dello schermo . .	43
5.3	Valore campo magnetico al variare dell'altezza dello schermo	43
5.4	Valore campo magnetico al variare dello spessore dello schermo . . .	44
7.1	Accuratezza LOC453 - Fase U	67
7.2	Accuratezza LOC453 - Fase V	67
7.3	Accuratezza LOC453 - Fase W	67
7.4	Offset LOC453	68
7.5	Accuratezza LOC453 - Fase U	75
7.6	Accuratezza LOC453 - Fase V	75
7.7	Accuratezza LOC453 - Fase W	76
7.8	Offset LOC453	77

Capitolo 1

Introduzione

Questo elaborato ha lo scopo di presentare il progetto di tirocinio svolto presso l'Impresa Loccioni. In particolare, nei seguenti capitoli verranno introdotte tutte le principali attività e i risultati ottenuti durante lo svolgimento del progetto. Il tirocinio prevedeva l'inserimento nel team di sviluppo e progettazione elettronica, al fine di sviluppare un' elettronica front-end per la misura delle correnti di fase di un inverter mediante sensori a effetto Hall. In questo capitolo verranno presentati gli obiettivi e le finalità del progetto; inoltre, una sezione verrà dedicata alla presentazione dell'impresa e delle sue principali caratteristiche. Nel Capitolo 2 verrà descritto l'inverter, con le sue caratteristiche e il suo funzionamento, al fine di inquadrare il contesto in cui si colloca questo progetto. Successivamente, nel Capitolo 3, verranno introdotti i sensori a effetto Hall, ossia i sensori utilizzati per questo tipo di acquisizioni. In particolare, oltre ad una presentazione ed alla spiegazione del principio di funzionamento, saranno effettuati dei confronti tra la soluzione attualmente utilizzata e quella implementata in questo elaborato. Nel Capitolo 4 verranno descritte le misurazioni eseguite sulla famiglia di sensori che sarà poi utilizzata nel prototipo finale. Nel Capitolo 5 verranno riportate le simulazioni software eseguite riguardanti le dimensioni dello schermo ferromagnetico utilizzato insieme al sensore e l'andamento delle linee di campo all'interno di esso. Nel Capitolo 6 saranno descritti tutti i passaggi eseguiti per la progettazione elettronica, al fine di arrivare al prototipo finale della scheda elettronica utilizzata per la misura delle correnti di fase. I test e le misurazioni effettuate sul prototipo della scheda elettronica sviluppata e i confronti effettuati con il sistema attualmente in uso verranno descritti nel Capitolo 7. Infine, nel Capitolo 8 verranno riportate le conclusioni del progetto, insieme ai possibili sviluppi futuri.

1.1 Obiettivi e finalità

L'obiettivo del presente elaborato è quello di descrivere il lavoro svolto durante il progetto di tirocinio. In particolare, verrà illustrato il processo di sviluppo della scheda elettronica per la misura della corrente di fase di un inverter. Lo scopo finale del progetto è produrre un prototipo su cui verranno eseguite delle prove sperimentali, al fine di valutarne le prestazioni. Inoltre, si intende valutare se le prestazioni del nuovo sistema di misura, basato su sensori a effetto Hall a loop aperto, siano paragonabili

a quelle del sistema attualmente in uso con i trasformatori amperometrici. Oltre alle misurazioni sperimentali, verranno presentate delle simulazioni software riguardanti lo schermo ferromagnetico utilizzato insieme al sensore in esame.

1.2 L'impresa Loccioni

Loccioni è un'impresa che nasce nel 1968 ad Angeli di Rosora (AN). Nel corso degli anni, si è sviluppata e oggi collabora con grandi clienti, leader mondiali, in tutto il mondo. Loccioni si dedica alla produzione e realizzazione di sistemi di misura e controllo per migliorare la qualità, la sicurezza e la sostenibilità dei processi e dei prodotti industriali. In particolare, si occupa di quattro bisogni principali: mobilità, benessere, energia e ambiente. Partendo da questi bisogni, l'impresa sviluppa progetti di mercato per grandi gruppi internazionali. Quanto detto viene riassunto in un'infografica denominata Polaris, che rappresenta graficamente la missione dell'Impresa: "misurare per migliorare, per il benessere della persona e del pianeta" [1]. Polaris, riportato in figura 1.1, illustra come, partendo dai bisogni principali, nascono i diversi progetti di mercato, i quali sono tutti coinvolti nei processi di elettrificazione, digitalizzazione e decarbonizzazione. Nel nucleo di questa

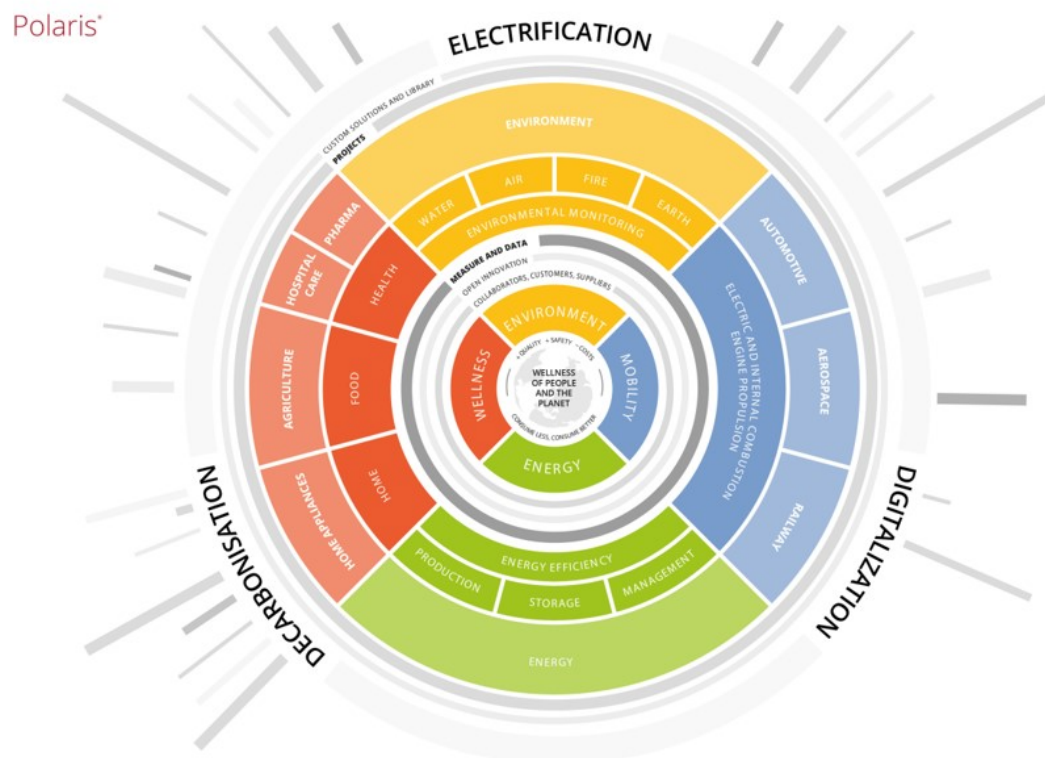


Figura 1.1: Polaris [1]

Capitolo 1 Introduzione

mappa si trova il benessere della persona e del pianeta, raggiunto attraverso tecnologie che migliorano la qualità, garantiscono la sicurezza e riducono i costi. Attorno a questo vengono riportati i bisogni principali, su cui si concentrano le energie dei collaboratori, dei clienti e dei fornitori, promuovendo l'innovazione e la misura per migliorare. Nella parte esterna, invece, vengono elencati i diversi progetti che evolvono in base all'andamento del mercato, partendo appunto dal nucleo.

Loccioni è un'impresa basata sulla conoscenza(IBC); questo tipo di impresa si distingue da una manifatturiera in quanto il capitale è rappresentato dalle competenze dei suoi collaboratori, dal loro sapere e dal loro saper fare. Inoltre, essa si distingue per la capacità di risolvere problemi complessi in cui è richiesta creatività. È organizzata come una struttura piatta di dimensioni limitate, in cui sono presenti molti collaboratori qualificati. Un'altra peculiarità è legata al fatto che si concentra su un servizio personalizzato verso i clienti e sulle competenze dei collaboratori. All'interno di questo contesto, i leader svolgono un ruolo chiave nella leadership e nella crescita dell'organizzazione. In questa visione, è presente una forte cultura d'impresa e una condivisione dei valori, in cui il "saper essere" è il punto di partenza, prima ancora delle competenze tecniche. Questi valori, su cui si basa l'impresa, sono riportati nella carta dei valori e includono: energia e volontà, iniziativa e intelligenza, flessibilità e adattabilità, innovarsi per innovare, trasparenza nella comunicazione e ascoltare per anticipare.

Il progetto di tirocinio si inserisce nell'ambito relativo alla mobilità. Negli ultimi anni, l'industria dell'auto ha subito un significativo cambiamento, iniziando un'evoluzione verso l'elettrificazione e la digitalizzazione. Questo cambiamento è stato una diretta conseguenza delle normative europee riguardanti le emissioni delle auto a combustione, insieme agli incentivi per i veicoli elettrici. In questo particolare contesto, diversi componenti hanno assunto una notevole importanza, tra cui le batterie, i motori e gli inverter. Questi componenti necessitano di essere opportunamente testati e collaudati al fine di migliorarne le prestazioni e la sicurezza. In questo ambito, Loccioni si occupa della vendita di banchi di test e offre servizi di test all'interno dei laboratori dell'impresa; inoltre, si dedica alla ricerca e sviluppo di nuovi componenti e prodotti. In aggiunta, all'interno dei propri laboratori, si impegna nella realizzazione di servizi End-of-Line per il collaudo del componente al termine della produzione, prima della messa in commercio. Infine, venduto il prodotto, è possibile eseguire servizi di manutenzione per garantirne il corretto funzionamento. In questo contesto si inseriscono i Nomadic Labs, ossia dei laboratori sviluppati all'interno di container che ospitano sale prova per i nuovi componenti auto dei maggiori produttori mondiali. In particolare, sono presenti un laboratorio per il test dell'asse elettrico, uno per il motore elettrico e uno per l'inverter; inoltre, c'è una sala prova per misurare le performance del pacco batteria e una per i moduli batteria ancora da assemblare. Questi laboratori fanno parte di una micro-grid in cui è presente una gestione intelligente dei flussi di energia e dei picchi di potenza, in modo che la quasi totalità dei consumi venga rigenerata, recuperata e ceduta alla micro-grid Loccioni. Quanto

detto si inserisce nell'ambito della transizione ecologica, con il principale obiettivo di migliorare il benessere delle persone e del pianeta, proseguendo nei processi di digitalizzazione, elettrificazione e decarbonizzazione in atto. In questi ultimi anni, il campus Loccioni ha conseguito la totale elettrificazione e ha raggiunto un bilancio energetico positivo, grazie a una produzione di energia superiore a quella consumata [1].

Nel corso degli anni, Loccioni ha sviluppato diversi prodotti utilizzati all'interno dei banchi test. Tra questi, è presente l'Inverter Loccioni, ossia un inverter in tecnologia SiC prodotto internamente, utilizzato per alimentare un motore Dyno, anch'esso di produzione interna, poiché in commercio era presente un unico produttore di inverter con tecnologia IGBT adatto a questo scopo. Il motore Dyno è un motore brushless che ha il compito di generare una coppia frenante al fine di testare altri motori connessi a questo. Il Battery Simulator è un altro dispositivo sviluppato internamente, che consente di simulare la batteria di un'auto elettrica e viene utilizzato interfacciandolo con altri banchi, come ad esempio l'Inverter Loccioni o l'emulatore di motore. Tutti questi dispositivi e i test che si effettuano su di essi sono comandati tramite un software sviluppato anch'esso internamente, denominato Aulos.



Figura 1.2: Logo Loccioni

Capitolo 2

Inverter

Gli Inverter sono dei dispositivi che permettono di trasformare una corrente continua in una corrente alternata. L'obiettivo di questi convertitori è quello di produrre in uscita una forma d'onda sinusoidale la cui ampiezza e frequenza possono essere regolate. Gli inverter si dividono in due principali categorie:

- inverter a tensione impressa(VSI);
- inverter a corrente impressa(CSI).

Gli inverter a tensione impressa sono la tipologia più diffusa rispetto a quelli a corrente impressa i quali vengono utilizzati solo per motori AC ad elevata potenza. A loro volta, gli inverter a tensione impressa si suddividono in tre diverse tipologie:

- modulazione a larghezza d'impulso(PWM);
- a onda quadra;
- monofase con cancellazione della tensione.

Negli inverter con modulazione a larghezza d'impulso, la tensione DC in ingresso è costante e l'uscita è una tensione sinusoidale, la quale viene controllata tramite questo tipo di modulazione effettuata sugli interruttori del circuito. Esistono diversi schemi di modulazione PWM; il più diffuso è quello chiamato PWM sinusoidale. A differenza di quelli appena descritti, negli inverter ad onda quadra, la tensione di ingresso DC è controllata per modificare l'ampiezza di quella di uscita, e quindi l'inverter è responsabile solo del controllo della frequenza. Il loro nome deriva dal fatto che la tensione di uscita corrisponde ad un'onda quadra. Infine, gli inverter monofase con cancellazione della tensione sono degli inverter che raggruppano le caratteristiche dei due precedentemente illustrati. In particolare, è possibile regolare l'ampiezza e la frequenza della tensione di uscita, anche quando la tensione in ingresso è costante e continua. Inoltre, gli interruttori non necessitano di essere pilotati con impulsi modulati. È importante sottolineare come questo tipo di tecnica possa essere utilizzata solo con inverter monofase e non con quelli trifase [2]. Gli inverter monofase si distinguono da quelli trifase poiché i primi sono progettati per gestire soltanto una fase di corrente e sono generalmente utilizzati in applicazioni residenziali, in

cui la richiesta di energia è bassa rispetto agli inverter trifase. Infatti, questi ultimi gestiscono tre fasi e vengono impiegati per impianti industriali o commerciali. Inoltre, questi inverter sono in grado di controllare potenze maggiori. In Figura 2.1 viene riportato il circuito di un inverter monofase a ponte. Nel corso di questo capitolo verrà illustrato il funzionamento del dispositivo con la modulazione a larghezza d'impulso.

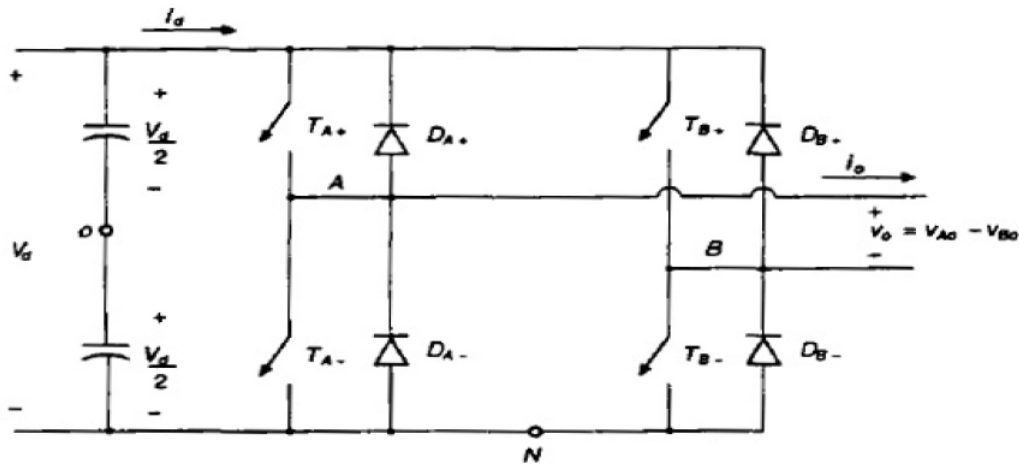


Figura 2.1: Schema circuitale di un inverter monofase a ponte [2]

2.1 PWM-Pulse Width Modulation

La modulazione a larghezza d'impulso(PWM) è una tecnica di modulazione digitale che consente di regolare il valore medio di una tensione di uscita partendo da una tensione in corrente continua. Il valore di tensione ottenuto in uscita dipende dal duty cycle, ossia il rapporto tra la durata dell'impulso positivo e la durata totale del periodo. L'obiettivo finale di questo tipo di modulazione è quello di controllare l'ampiezza e la frequenza della tensione di uscita dell'inverter. Il funzionamento della modulazione a larghezza d'impulso prevede un confronto tra un segnale di controllo sinusoidale e un'onda triangolare. L'ampiezza e la frequenza della forma d'onda triangolare solitamente vengono mantenute costanti; in particolare, la frequenza svolge un ruolo di fondamentale importanza poiché determina la frequenza di commutazione degli interruttori, nota anche come frequenza portante. Nella modulazione a larghezza d'impulso ci sono diversi fattori che devono essere presi in considerazione e che influenzano l'uscita finale. Il segnale di controllo viene utilizzato per stabilire il duty cycle dell'interruttore, con una frequenza che corrisponde alla prima armonica della tensione di uscita dell'inverter, denominata frequenza modulante. In questo tipo di modulazione, vengono definiti due rapporti di fondamentale importanza che influenzano l'uscita dell'inverter. Il primo è il rapporto di modulazione di ampiezza, ossia il rapporto tra il valore massimo del segnale di controllo e l'ampiezza della

forma d'onda triangolare:

$$m_a = \frac{V_{controllo}}{V_{tri}} \quad (2.1)$$

L'altro rapporto in questione è chiamato rapporto di modulazione di frequenza, definito come il rapporto tra la frequenza di commutazione (frequenza portante) e la frequenza desiderata, corrispondente alla prima armonica della tensione di uscita (frequenza modulante):

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.2)$$

Per semplicità, si potrebbe osservare il comportamento della PWM nel caso di un inverter monofase ad un ramo; successivamente, questo approccio potrebbe essere esteso al caso di un inverter monofase a ponte e, infine, agli inverter trifase. Nel caso

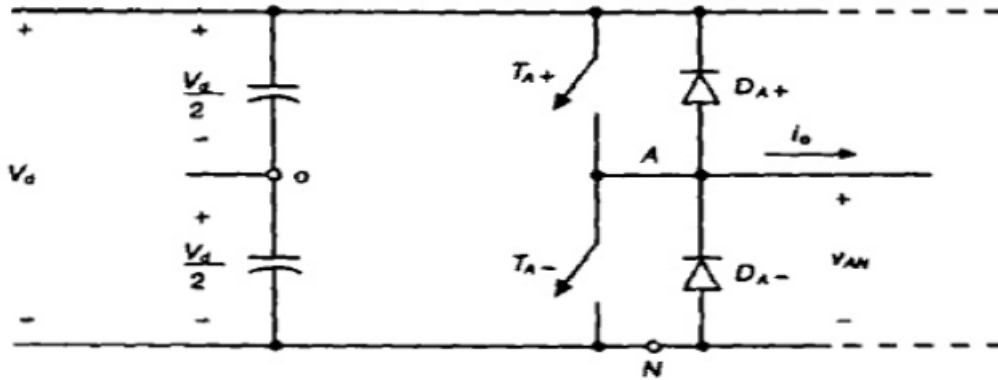


Figura 2.2: Schema circuitale di un inverter monofase a un ramo [2]

riportato in Figura 2.2, gli interruttori T_{A+} e T_{A-} sono regolati in base ai valori delle tensioni $v_{controllo}$ e v_{tri} . Infatti, quando la tensione di controllo è maggiore di quella dell'onda triangolare, l'interruttore T_{A+} sarà chiuso e la tensione di uscita tra A e O sarà pari a $\frac{1}{2}V_d$. Viceversa, quando la tensione di controllo è minore di quella dell'onda triangolare, l'interruttore T_{A-} sarà chiuso e la tensione di uscita tra A e O sarà pari a $-\frac{1}{2}V_d$. L'andamento di quanto descritto viene riportato in Figura 2.3. Da questa modulazione è possibile estrapolare alcune proprietà principali che non verranno dimostrate; per la loro dimostrazione si rimanda alla fonte [2]. La prima proprietà riguarda il fatto che il valore massimo della prima armonica della tensione di uscita è pari a m_a volte la tensione $\frac{1}{2}V_d$, in particolare:

$$(V_{AO})_1 = \frac{v_{controllo}}{V_{tri}} \frac{V_d}{2} \quad v_{controllo} \leq V_{tri} \quad (2.3)$$

Un'altra proprietà è quella legata al rapporto di modulazione di frequenza m_f , ossia il fatto che le armoniche della tensione di uscita dell'inverter sono rappresentate da linee verticali centrate proprio su m_f e sui suoi multipli. Inoltre, questo rapporto di modulazione dovrebbe essere sempre un valore intero e dispari per ragioni di

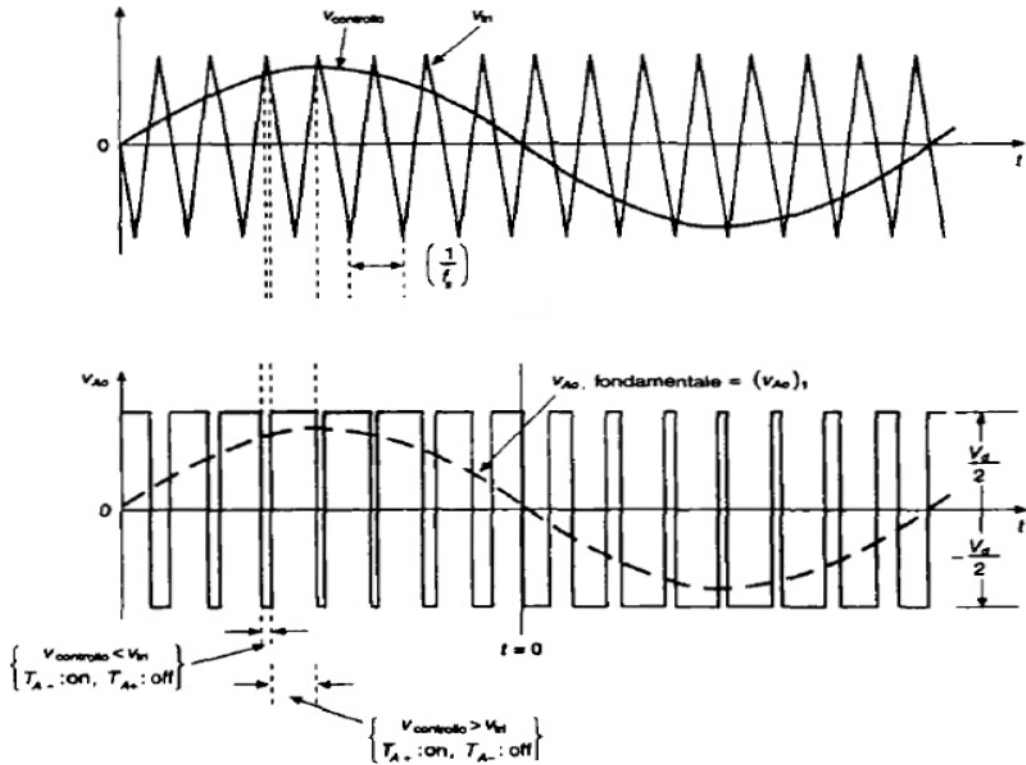


Figura 2.3: Modulazione a larghezza d'impulso [2]

simmetria.

In questo tipo di applicazione, la frequenza di portante f_s dovrebbe essere scelta il più alta possibile, tenendo comunque conto di un limite legato alle perdite di commutazione degli interruttori, che aumentano all'aumentare di questa frequenza. Un altro fattore da considerare è quello relativo alla possibilità di evitare le frequenze udibili, ossia quelle comprese tra 6 kHz e 20 kHz.

Un altro punto di fondamentale importanza è quello legato alla scelta dei valori di m_a e m_f . In particolare, il rapporto di modulazione di frequenza è quello che stabilisce il rapporto tra la frequenza dell'onda triangolare e quella della tensione di uscita della prima armonica che corrisponde appunto alla frequenza della tensione di controllo. Prendendo 21 come valore di riferimento, m_f viene considerato piccolo se minore di questo valore. In questo caso, la PWM viene considerata sincrona, poiché il segnale dell'onda triangolare e quello di controllo sono sincronizzati tra di loro. Ciò implica il fatto che queste due frequenze devono variare insieme. È importante notare che questo rapporto deve essere comunque un numero intero e dispari, come detto in precedenza, almeno nel caso della PWM bipolare. Questa configurazione è preferibile, poiché se la PWM non fosse sincrona si avrebbero delle subarmoniche indesiderate. Quando si considera un valore di $m_f > 21$, tale valore è giudicato grande, e la PWM in questo caso è definita asincrona. In questa situazione, il valore di m_f non è intero, e ciò si verifica quando la frequenza dell'onda

triangolare è mantenuta costante, mentre varia la frequenza di controllo. Per alti valori di m_f , le subarmoniche presentano un'ampiezza ridotta. Tuttavia, questa configurazione rimane comunque sconsigliata nei motori a corrente alternata, poiché le subarmoniche a bassa frequenza producono una corrente elevata indesiderata. D'altra parte, nelle analisi precedentemente eseguite, si è sempre considerato un valore di m_a inferiore o uguale a 1, corrispondente a un funzionamento in zona lineare. Aumentando questo rapporto, ponendolo maggiore di uno, si verifica la condizione di sovrarmodulazione. La sovrarmodulazione provoca una maggiore concentrazione di armoniche della tensione d'uscita rispetto al funzionamento in zona lineare. In questa condizione, l'ampiezza della prima armonica non dipende solo da m_a , ma anche dal rapporto di modulazione di frequenza m_f , anche se quest'ultimo è elevato. Questa situazione non viene solitamente utilizzata per gli alimentatori dei gruppi di continuità, mentre è impiegata in applicazioni di azionamento di motori a induzione. Dalla Figura 2.4 è possibile osservare l'andamento dell'ampiezza della tensione di uscita in funzione del rapporto di modulazione di ampiezza. Si può notare come la modulazione ad onda quadra rappresenti un caso particolare di PWM, ottenuto scegliendo un valore di m_a che supera quelli considerati per la sovrarmodulazione. Tutto il discorso appena effettuato si riferisce al caso più semplice di un inverter

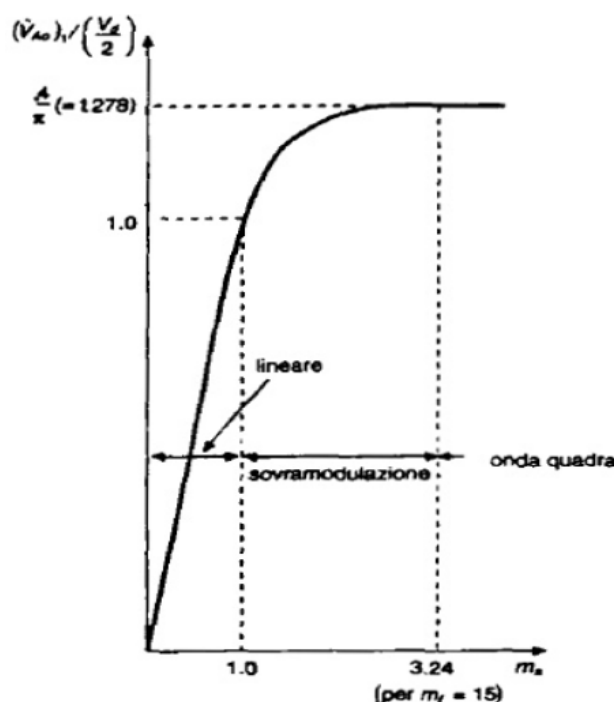


Figura 2.4: Andamento curva della tensione di uscita in funzione di m_a [2]

monofase ad un ramo. Quanto descritto può essere esteso all'inverter a ponte monofase (Figura 2.1). Questo tipo di inverter, rispetto al caso a un solo ramo, consente di ottenere, a parità di ingresso, una tensione di uscita doppia; ciò significa che, a parità di potenza in uscita, si ha un vantaggio poiché le tensioni e le correnti

che scorrono nel circuito saranno la metà. Questa configurazione aggiunge anche la possibilità di eseguire una PWM unipolare, ossia con i due interruptori che non sono comandati contemporaneamente ma separatamente. In questo modo, l'ampiezza della tensione di uscita oscillerà tra 0 e V_d oppure tra $-V_d$ e 0.

In molte applicazioni, come l'alimentazione di motori a corrente alternata, vengono utilizzati inverter trifase; un esempio del suo circuito è riportato in Figura 2.5. Da

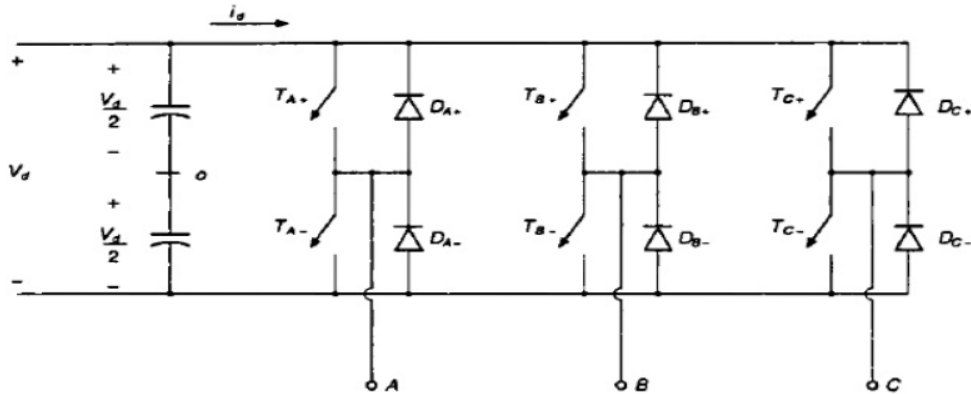


Figura 2.5: Inverter trifase [2]

questa, si può osservare come questo inverter sia formato da tre diverse gambe, ognuna delle quali rappresenta una fase. Anche in questo caso, viene utilizzata la modulazione a larghezza d'impulso. La principale differenza rispetto all'inverter monofase è legata al fatto che la forma d'onda triangolare viene confrontata con tre tensioni sinusoidali, una per ogni fase, sfasate ognuna rispetto all'altra di 120° . Come visto per l'inverter monofase, è possibile fare delle riflessioni sui valori di m_f e m_a . In particolare, con valori bassi di m_f , si sceglie un valore dispari per eliminare le armoniche pari utilizzando una PWM sincrona, e questo valore deve essere multiplo di tre al fine di eliminare molte armoniche dominanti dalla tensione concatenata. D'altra parte, se il valore del rapporto di modulazione di frequenza è elevato, si possono applicare le stesse considerazioni scritte per l'inverter monofase. Infine, quando si verifica la condizione di sovrarmodulazione, ossia quando $m_a > 1$, si possono effettuare le stesse riflessioni fatte per i piccoli valori di m_f . Per ulteriori approfondimenti riguardo al funzionamento degli inverter trifase e alle sue principali caratteristiche, si rimanda alla fonte [2]. In questa sezione è stata presentata la modulazione PWM sinusoidale, ma nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tecniche di modulazione a larghezza d'impulso al fine di migliorare le prestazioni ottenute. Alcune di queste tecniche sono attualmente utilizzate in applicazioni industriali e possono essere approfondite nella fonte [7].

Nelle sezioni successive verranno analizzati nello specifico l'inverter Luccioni, di particolare interesse per lo sviluppo del progetto di tirocinio, e la scheda elettronica impiegata per il rilevamento delle correnti di fase, utilizzata come riferimento per lo sviluppo del prototipo realizzato, che sarà presentato nel Capitolo 6.

2.2 Inverter Loccioni

L'Inverter Loccioni è un convertitore DC-AC che consente di ottenere un'uscita in corrente alternata partendo da una sorgente in corrente continua. Il sistema è progettato per essere utilizzato nell'azionamento di motori sincroni a magneti permanenti. Inoltre, questo sistema è progettato per essere installato in un apparato di test alimentato da un Battery Simulator. Questo inverter è basato sulla tecnologia SiC(carburo di silicio), a differenza di quelli commerciali che utilizzano la tecnologia IGBT. Sulla base di questo inverter, riportato in Figura 2.6, è stata sviluppata la scheda elettronica. Nella figura è possibile anche osservare i trasformatori amperometrici che circondano le tre fasi, i quali sono utilizzati per misurare le correnti in uscita dall'inverter. Sulla base di questo dispositivo, sono state misurate le dimensioni delle barre di rame utilizzate, la distanza presente tra di esse e anche lo spazio di allocazione disponibile per la scheda.

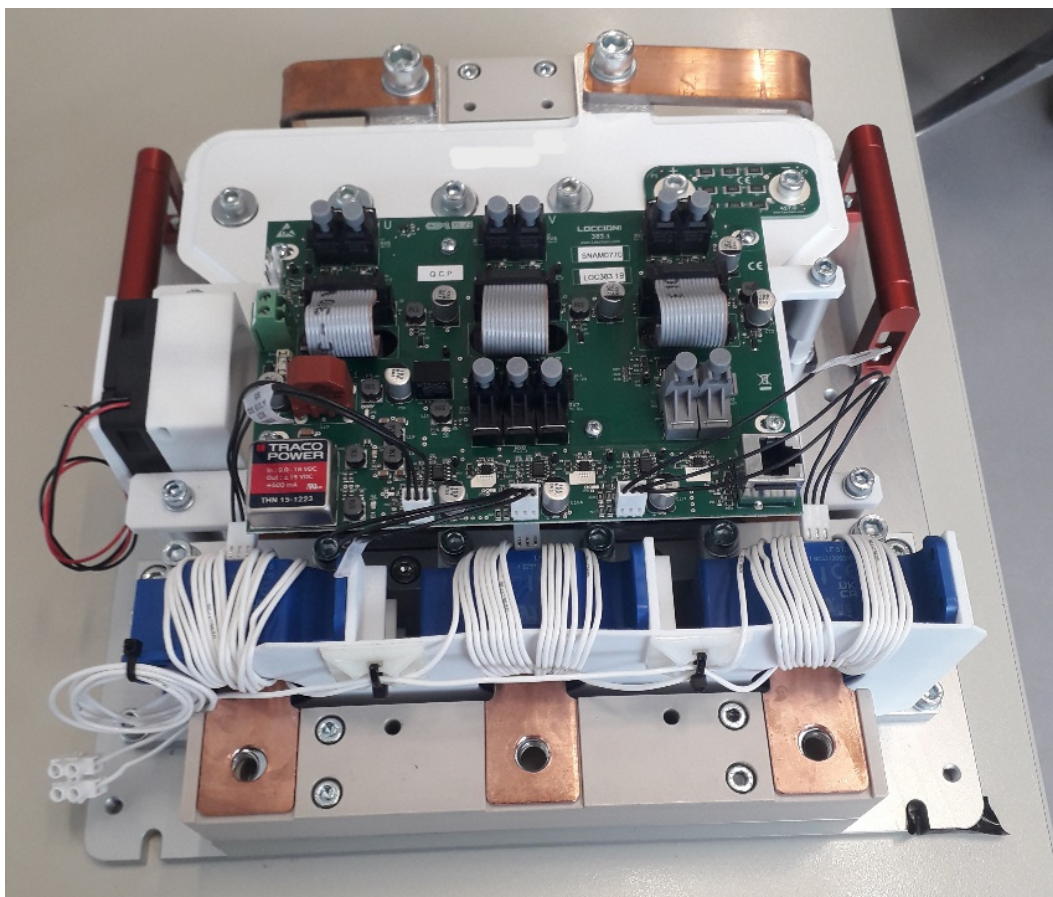


Figura 2.6: Inverter Loccioni

2.3 LOC315

La LOC315 è la scheda elettronica utilizzata per l'acquisizione e il condizionamento del segnale da parte dei trasformatori amperometrici LEM che verranno presentati nel Capitolo 3. Questa scheda è formata da due diverse parti, corrispondenti a due schede elettroniche separate. La prima è chiamata LOC315.0.A ed è utilizzata per fornire l'alimentazione ai trasformatori amperometrici e agli amplificatori operazionali, per effettuare il condizionamento del segnale che viene acquisito dai trasformatori amperometrici e per la comunicazione in fibra ottica. In particolare, riceve un'alimentazione a 24 V , la quale viene convertita in $\pm 15\text{ V}$ per l'alimentazione degli amplificatori operazionali e dei trasformatori amperometrici e in 5 V per la parte relativa alla comunicazione in fibra ottica. Questa ultima parte non verrà descritta in questo paragrafo, poiché è di secondaria importanza per lo svolgimento del progetto di tirocinio. D'altro canto, la sezione utilizzata come riferimento per lo sviluppo della nuova scheda elettronica è quella relativa all'alimentazione e al condizionamento del segnale acquisito dal sensore. Questa scheda viene riportata nella Figura 2.7. La parte di condizionamento del segnale prevede l'elaborazione del segnale di corrente in uscita dal trasformatore amperometrico acquisito dalla LOC315.0.B, fino a ottenere un segnale con un'ampiezza massima di $\pm 20\text{ V}_{pk}$. In una prima parte il valore di corrente ottenuto viene convertito in una tensione tramite uno shunt resistivo; successivamente, dopo un partitore di tensione viene applicato un filtro del terzo ordine con una frequenza di taglio di 50 kHz , al fine di eliminare eventuali disturbi ad alta frequenza, fino ad ottenere l'uscita richiesta.

La seconda scheda che forma la LOC315 è quella denominata LOC315.0.B, riportata in Figura 2.8. Questa scheda viene utilizzata per acquisire il segnale di corrente in uscita dal LEM, corrispondente al valore di corrente misurata, e per trasmetterlo alla LOC315.0.A. Inoltre, essa contiene una parte necessaria per trasmettere l'alimentazione di $\pm 15\text{ V}$ ai trasformatori amperometrici fornita dalla LOC315.0.A.

Capitolo 2 Inverter

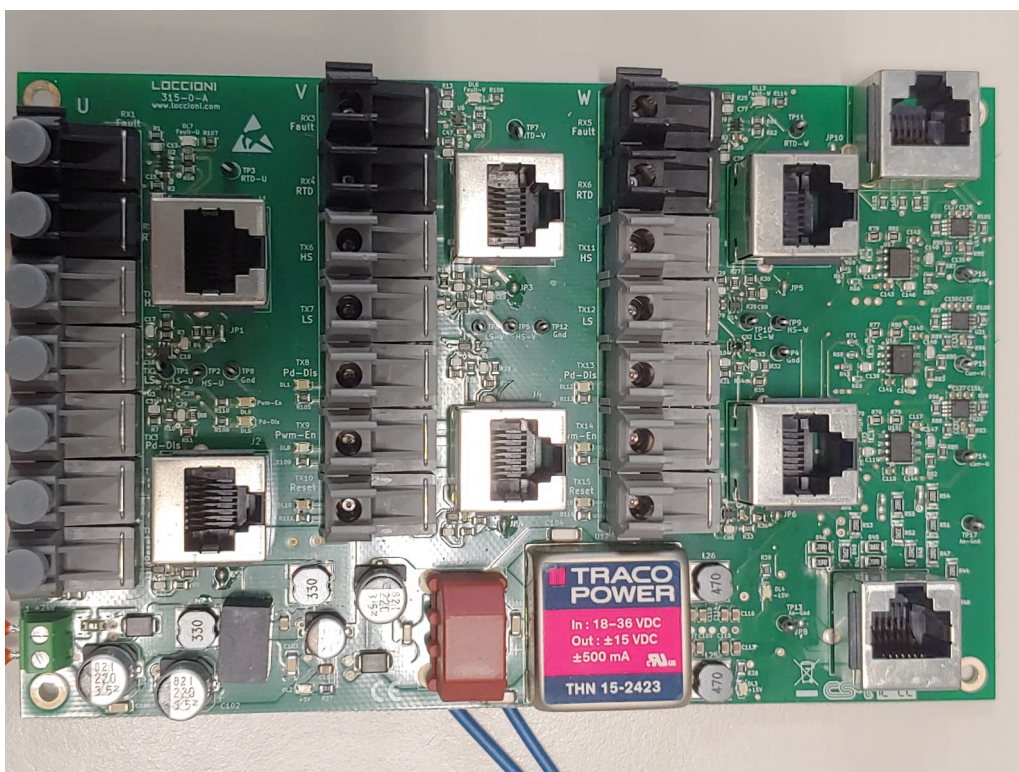


Figura 2.7: Scheda LOC315.0.A

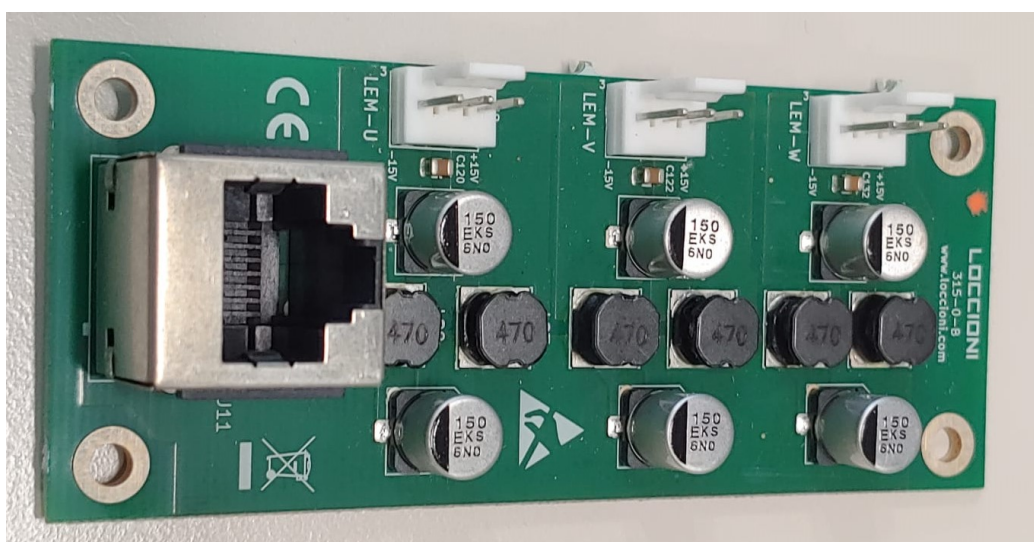


Figura 2.8: Scheda LOC315.0.B

Capitolo 3

Sensori a effetto Hall

I sensori a effetto Hall appartengono alla famiglia dei sensori elettromagnetici. Questo tipo di dispositivi permette che una grandezza fisica determini una variazione di campo magnetico o campo elettrico senza che si verifichi una variazione di capacità o induttanza. Nel caso in cui si applica una tensione continua V ai terminali di un conduttore, si genera un flusso uniforme di elettroni che si muovono dal punto A al punto B, senza alcuna differenza di potenziale tra i punti C e D. In questa situazione, se un magnete viene avvicinato al conduttore, il flusso di elettroni viene deviato dalla sua traiettoria rettilinea, causando una concentrazione di elettroni nel punto D e una riduzione della densità di elettroni nel punto C. Quanto descritto in precedenza è riportato in Figura 3.1. Tra i punti C e D si genera una differenza di potenziale e se

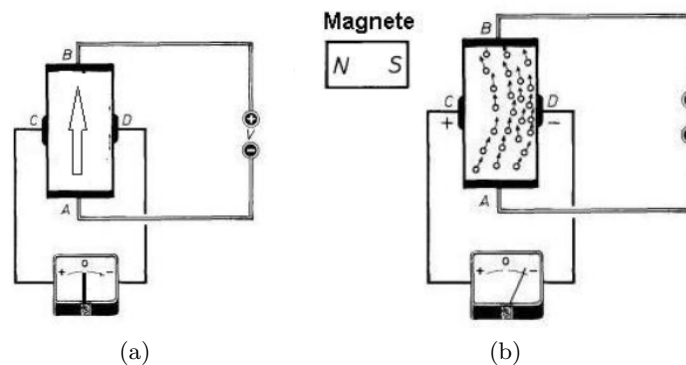


Figura 3.1: Effetto Hall [3]

si invertisse la polarità del magnete, anche la distribuzione degli elettroni nei punti C e D si invertirebbe. È possibile descrivere la tensione di Hall tramite la Figura 3.2, in cui V_a rappresenta la tensione di alimentazione del circuito e GND rappresenta la linea di terra. La tensione di Hall è definita come un fenomeno fisico che si verifica quando un conduttore o un semiconduttore attraversato da una corrente elettrica è immerso in un campo magnetico; questa tensione è rilevabile all'estremità delle sezioni perpendicolari al flusso di corrente. Per progettare un sensore a effetto Hall, è necessaria una struttura che sia in grado di rilevare in modo efficace il parametro fisico da misurare. Il sensore rileva il campo magnetico e genera un segnale in uscita

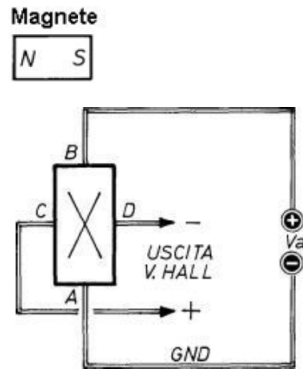


Figura 3.2: Tensione di Hall [3]

che può essere di tipo analogico o digitale. I sensori a effetto Hall presentano alcuni vantaggi rispetto ad altri sensori di campo magnetico; uno di questi è la capacità di produrre un'uscita di tensione anche in assenza di variazioni di campo magnetico. Inoltre, questi sensori sono insensibili a diverse condizioni ambientali, come l'umidità e le vibrazioni [3].

3.1 Effetto Hall

L'effetto Hall è un fenomeno fisico costituito dalla generazione di una differenza di potenziale elettrico su un conduttore o semiconduttore in cui circola corrente elettrica, quando questo è immerso in un campo magnetico di direzione perpendicolare alla corrente. Questo effetto è stato scoperto da Edwin Hall nel 1879. Nella situazione descritta in precedenza, le cariche elettriche che si muovono all'interno del materiale sono soggette all'azione di una forza di Lorentz, che è perpendicolare sia alla direzione del campo magnetico sia alla direzione della corrente. La forza di Lorentz è rappresentata dalla formula:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.1)$$

Nella formula precedente:

- q è la carica dell'elettrone;
- $\vec{E}$ è il campo elettrico, nullo in condizioni iniziali;
- $\vec{v}$ è la velocità di deriva dell'elettrone nell'elemento di Hall;
- $\vec{B}$ è il campo magnetico.

La forza che agisce sui portatori di carica causa un accumulo di cariche sulla superficie, generando così un campo elettrico trasversale. Questo campo elettrico esercita una forza sui portatori di carica che bilancia quella imposta dal campo magnetico; di conseguenza, si stabilisce un potenziale elettrico, noto come potenziale di Hall. In

particolare, nei semiconduttori, la direzione di tale forza è influenzata dalla carica predominante dei portatori; pertanto, la tensione di Hall avrà un segno diverso a seconda che si tratti di materiali di tipo p o n. La tensione di Hall, indicata con V_H , dipende da diversi fattori, tra i quali il campo magnetico B , la corrente I e lo spessore t del materiale, oltre alle proprietà elettriche del materiale stesso. Questi fattori sono riassunti nel coefficiente di Hall:

$$A_H = \frac{V_H t}{IB} \quad (3.2)$$

da cui si può osservare che la variazione della tensione di Hall dipende dallo spessore del materiale e, al crescere di questo, aumenta la tensione. Nell'equazione 3.2, viene considerata una situazione ideale; nella realtà, vanno considerati altri fattori, tra i quali la pressione meccanica e la temperatura [3].

3.2 Sensore di riferimento: LEM LF 510-S

Il sensore di corrente *LEM LF 510-S* è un dispositivo utilizzato per il monitoraggio delle correnti elettriche. Questo sensore si basa sull'utilizzo della tecnologia a effetto Hall a loop chiuso, che permette di misurare correnti continue e alternate.



Figura 3.3: Sensore di corrente LEM LF 510-S [4]

Le principali caratteristiche di questo dispositivo sono:

- Uscita in corrente;
- Elevata accuratezza(<0.6 % di I_{PN});
- Rapporto primario/secondario: 1:5000;
- Larghezza di banda: 200 kHz;
- Range di misura: $\pm 800 A$.

Per ulteriori caratteristiche è possibile consultare il datasheet del sensore [4]. Questo sensore viene attualmente utilizzato per rilevare le correnti negli inverter e in generale in altre applicazioni in cui è richiesta un'elevata accuratezza. Esso presenta 3 pin: due sono dedicati all'alimentazione, pari a $\pm 15\text{ V}$, mentre il terzo è dedicato all'uscita in corrente, la quale può essere convertita in un valore di tensione tramite un resistore shunt.

3.3 Sensori IMC-Hall Melexis

I sensori di corrente IMC-Hall della Melexis Technologies si basano sulla tecnologia proprietaria denominata *Integrated Magnetic Concentrator*. Questi sensori sono monolitici e si basano sull'effetto Hall. Il sensore restituisce un'uscita analogica in tensione, proporzionale alla densità di flusso magnetico applicato parallelamente alla superficie del circuito integrato. In Figura 3.4 viene riportato il sensore Melexis MLX91218. Nella sezione successiva verrà descritta in modo dettagliato la tecnologia utilizzata da questa famiglia di sensori.



Figura 3.4: Sensore IMC-Hall [5]

3.3.1 Tecnologia e funzionamento IMC-Hall

La tecnologia IMC-Hall consente di convertire il campo magnetico orizzontale in un campo magnetico verticale, il quale viene rilevato da piastre di Hall [8]. Nella Figura 3.5 è riportato quanto descritto in precedenza. I concentratori magnetici integrati permettono di piegare e concentrare le linee di campo, che verranno successivamente rilevate dalle piastre di Hall disposte in posizione orizzontale. Questo principio di funzionamento consente di effettuare un rilevamento differenziale, poiché qualsiasi campo non parallelo al piano del sensore non sarà preso in considerazione [6]. Nello specifico, un singolo elemento di Hall è sensibile sia alla componente verticale sia a quella parallela al piano, catturata dai concentratori magnetici. Utilizzando due elementi di Hall distinti, è possibile determinare sia la componente orizzontale sia quella verticale. In particolare, le tensioni di uscita di questi due elementi devono essere sottratte per trovare la componente orizzontale, mentre devono essere sommate per trovare la sola componente verticale [9], [10]. In questo modo, il sensore risulta insensibile alla componente verticale quando si desidera valutare l'intensità della componente parallela alla superficie del chip, cioè quella di nostro interesse [11]. I concentratori magnetici sono posizionati in un determinato punto (3.5) poiché il

campo magnetico è più intenso e consente una rilevazione più efficiente. Questa tecnologia può essere usata anche per una rivelazione su due o tre assi, aggiungendo ulteriori elementi di Hall, come mostrato in [11].

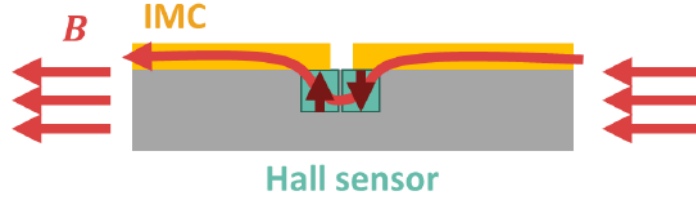


Figura 3.5: Funzionamento IMC [6]

3.3.2 Schermo ferromagnetico

Il sensore IMC-Hall viene solitamente utilizzato insieme a uno schermo ferromagnetico. Questo schermo consente di concentrare le linee di campo magnetico da rilevare e permette di schermare il sensore da eventuali campi esterni che potrebbero interferire con la misura della grandezza fisica in questione. Dalla Figura 3.6 è possibile osservare un'applicazione tipica per il rilevamento di corrente, in cui viene utilizzato il sensore Melexis IMC-Hall insieme allo schermo ferromagnetico. Questa configurazione è anche quella impiegata nell'implementazione di questo progetto di tirocinio; infatti, nel caso in esame, il sensore è utilizzato per il rilevamento della corrente di fase che scorre in una barra di rame dell'inverter.

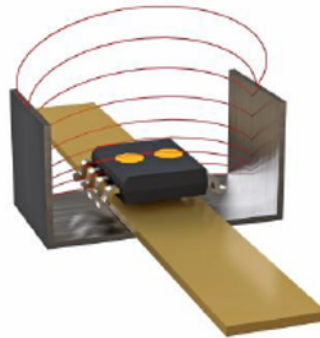


Figura 3.6: Applicazione tipica di rilevamento corrente con IMC-Hall [5]

Lo schermo ferromagnetico è fondamentale per stabilire il rapporto tra la corrente che scorre nella barra di rame e il campo magnetico che viene misurato. Questa relazione è espressa nella formula 3.3.

$$B[mT] = 1.25 \frac{I[A]}{W[mm]} \quad (3.3)$$

in cui:

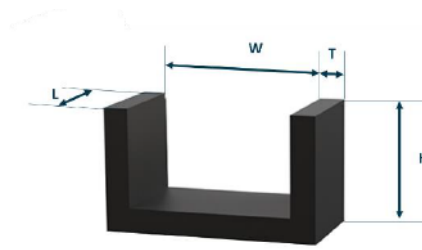


Figura 3.7: Schermo ferromagnetico [6]

- $B[mT]$ è il campo magnetico misurato;
- $I[A]$ è la corrente che scorre sulla barra di rame;
- $W[mm]$ è la larghezza dello schermo (vedi Figura 3.7).

La formula 3.3 è stata ottenuta partendo dalla legge di Biot-Savart, effettuando opportune considerazioni sull'intero sistema composto da una barra di rame, uno schermo ferromagnetico e un sensore [12]. Come si può osservare dalla formula 3.3, il rapporto tra il campo magnetico misurato e la corrente è determinato dalla larghezza dello schermo. A parità di corrente, maggiore è la larghezza dello schermo, più basso sarà il valore del campo magnetico. Questa formula è utile anche per ricavare la sensibilità del sensore. Infatti, nel datasheet del sensore, i valori di sensibilità sono riportati in $\frac{mV}{mT}$; tramite questa formula è possibile valutare la sensibilità del sensore in termini di $\frac{mV}{A}$, ottenendo così un rapporto tra la corrente che scorre e l'uscita in tensione del dispositivo. In generale, per una buona schermatura, anche le altre dimensioni assumono un ruolo importante. Gli schermi disponibili sul mercato provengono da due principali aziende:

- Permanent Magnets Ltd.;
- MagLab AG.

Questi si dividono in due principali tipi: gli schermi ad U non laminati (U-shield) e gli schermi ad U laminati (LU-shield). Questi due tipi di schermi sono classificati e divisi in base alle loro dimensioni. Inoltre, ci sono due principali tipi di materiale utilizzato per la produzione dello schermo:

- NiFe;
- SiFe.

Nella Tabella 3.1 vengono riportate le principali dimensioni standard che si possono trovare sui due siti dei produttori citati in precedenza; in particolare, questa si riferisce alle dimensioni degli schermi non laminati. Dopo aver effettuato alcune ricerche e svolto diverse simulazioni, presentate all'interno del Capitolo 5, per l'applicazione progettata è stato scelto lo schermo U25-15-15-1.5. Questa scelta è legata anche alle dimensioni della barra di rame utilizzata sull'inverter, su cui saranno eseguite le misurazioni.

Modello	W[mm]	L[mm]	H[mm]	T[mm]
U12-13-12.5-1.5	12	13	12.5	1.5
U20-13-15-1.5	20	13	15	1.5
U25-15-15-1.5	25	15	15	1.5
U30-15-15-1.5	30	15	15	1.5

Tabella 3.1: Dimensioni standard schermi non laminati

3.3.3 Famiglie di sensori IMC-Hall

In commercio sono disponibili diversi sensori IMC-Hall della MELEXIS, ognuno con diverse caratteristiche che li differenziano. In particolare, si possono distinguere tre famiglie di sensori appartenenti a generazioni successive. I tre tipi su cui saranno effettuati test e misurazioni sono:

- MLX91208;
- MLX91216;
- MLX91218.

I sensori elencati in precedenza si distinguono per intervallo di corrente misurata, larghezza di banda, sensibilità, linearità, rumore, funzionalità aggiuntive e altre caratteristiche riportate nel loro datasheet. Ognuno di essi è associato a un codice di acquisto specifico, in base alle proprie caratteristiche di sensibilità e range di corrente. Alcune delle impostazioni di default del sensore possono essere modificate in base alle esigenze dell'utente. Per effettuare tali modifiche, insieme alla calibrazione, è necessario un programmatore universale della Melexis, chiamato PTC04. In assenza di questo, è stato scelto il sensore più adatto in base alle sue caratteristiche originali di fabbricazione. I range di misura che si distinguono sono quattro:

- LF = Low Field ($\pm 10 mT$);
- HF = High Field ($\pm 25 mT$);
- VHF = Very High Field ($\pm 60 mT$);
- XHF = Extra High Field ($\pm 90 mT$).

Questi valori possono essere convertiti in corrente tramite la formula 3.3 per osservare il range in cui essi possono essere utilizzati. Un confronto delle principali caratteristiche di questi sensori è riportato nella Tabella 3.2. La tensione in uscita da questi sensori varia con la tensione di alimentazione. Infatti, in assenza di corrente, e quindi di campo magnetico, il sensore ha un'uscita pari al 50 % della tensione di alimentazione. In base alla corrente applicata, l'uscita varia linearmente tra il 10 % e il 90 % della tensione di alimentazione. Quanto appena riportato significa che, con

una tensione di alimentazione di 5 V , partendo da una tensione di uscita a corrente nulla di 2.5 V , si avrà un range di 2 V per le correnti positive e uno di 2 V per le correnti negative; con un range totale della tensione di uscita, in funzionamento lineare, da 0.5 V a 4.5 V . Per ulteriori caratteristiche di questi sensori è possibile consultare il datasheet del MLX91218 ([5]) e gli altri disponibili sul sito della Melexis.

	MLX91208	MLX91216	MLX91218
Larghezza di banda $[kHz]$	250	250	400
Tempo di risposta $[us]$	3 (max)	3 (max)	2 (max)
Sensibilità $[mV/mT]$	LF: 100-700 HF: 50-350 VHF: 30-200	HF: 50-350 VHF: 30-200 XHF: 20-125	VHF: 18-165 XHF: 12-115
Tensione di alimentazione $[V]$	5	5	3,3 5
Errore di linearità $[\%FS]$	± 0.7 (max)	± 0.5 (max)	± 0.5 (max)
Isteresi $[uT]$	LF: ± 15 HF: ± 25 VHF: ± 60	HF: ± 25 VHF: ± 60 XHF: ± 90	HF: ± 25 VHF: ± 60 XHF: ± 90
Intervallo di misura $[mT]$	LF: ± 10 HF: ± 25 VHF: ± 60	HF: ± 25 VHF: ± 60 XHF: ± 90	HF: ± 25 VHF: ± 60 XHF: ± 90
Rumore in uscita $[mV_{rms}]$	10 (max)	8 (max)	2 (max)

Tabella 3.2: Confronto principali caratteristiche sensori IMC-Hall

3.4 Sensore scelto: Melexis MLX91218

Il sensore scelto, tra quelli elencati in precedenza, per lo sviluppo della scheda elettronica è il Melexis MLX91218. Questo sensore, rispetto agli altri della famiglia IMC-Hall, presenta le migliori caratteristiche e funzionalità aggiuntive. Le principali caratteristiche e le differenze rispetto agli altri sensori sono riportate nella Tabella 3.2. A differenza degli altri IMC-Hall, questo sensore ha la possibilità di essere alimentato sia con un'alimentazione classica a 5 V sia con un'alimentazione a 3.3 V . Un'altra caratteristica che distingue questo sensore dalle generazioni precedenti è la diversa modalità di uscita; infatti, il sensore può essere acquistato in due diverse modalità di funzionamento:

- Raziometrica;
- Differenziale (Fissa).

Queste due diverse modalità possono essere scelte in base al codice di acquisto del sensore, in cui sarà indicato "R" o "F". La principale differenza tra queste due modalità è che, nella modalità raziometrica, la tensione di uscita è quella di

riferimento scalano proporzionalmente con la tensione di alimentazione; inoltre, l'offset del sensore, ossia il segnale a campo magnetico nullo, è pari al 50 % della tensione di alimentazione. Nella modalità differenziale, la tensione di riferimento assume un valore fisso, riportato sul datasheet, in base ad alcune caratteristiche del modello del sensore; inoltre, il valore di uscita è ottenuto sottraendo la tensione di riferimento fissa da quella del pin di uscita. Per ulteriori chiarimenti, è possibile consultare il datasheet del sensore in questione ([5]). In Figura 3.8 viene riportato suo il diagramma a blocchi. Questo tipo di sensore è racchiuso in un package di

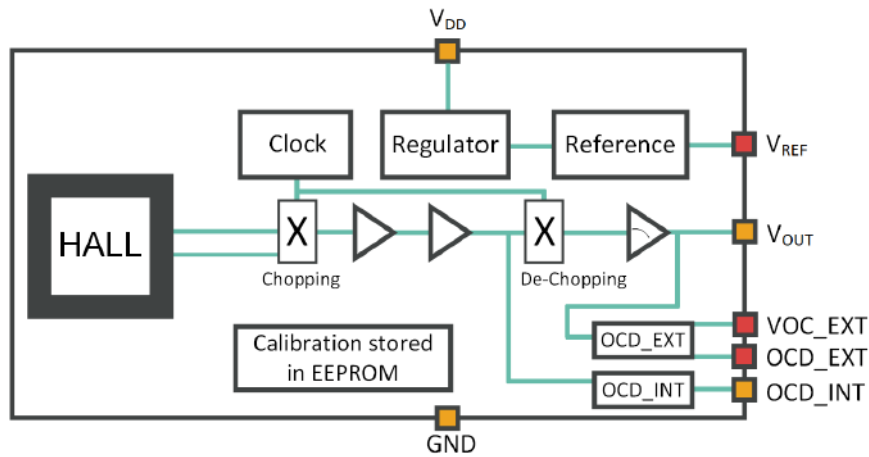


Figura 3.8: Diagramma a blocchi sensore MLX91218 [5]

tipo SOIC-8. Come riportato in Figura 3.8, vengono utilizzati sette pin per diverse funzionalità, mentre uno è di tipo NC, ossia non connesso. I pin del sensore numerati sono:

1. V_{REF} = Tensione di riferimento;
2. OUT = Tensione di uscita;
3. GND = Massa;
4. V_{DD} = Tensione di alimentazione;
5. NC = Non connesso;
6. OCD_{EXT} = Rilevamento sovracorrente basato su soglia esterna;
7. OCD_{INT} = Rilevamento sovracorrente basato su soglia interna;
8. VOC_{EXT} = Soglia esterna per OCD.

Nelle generazioni precedenti del sensore, erano presenti solo 4 pin di uscita, mentre gli altri non erano utilizzati. Inoltre, questo sensore ha funzionalità aggiuntive rappresentate dai pin 6, 7 e 8. In particolare, il pin 7 è dedicato al rilevamento di sovracorrenti, basato su una soglia interna. Questo valore dipende dal modello del

seniore ed è memorizzato all'interno della EEPROM. Questa funzionalità consente di rilevare la sovracorrente quando supera l'intervallo di misura del sensore; è quindi una configurazione adatta a picchi elevati di corrente, come nel caso di un cortocircuito. D'altra parte, i pin 6 e 8 sono utilizzati per il rilevamento delle sovracorrenti basato su una soglia esterna. Questa funzionalità utilizza il valore sul pin VOC_{EXT} come tensione di soglia, ottenuto tramite un partitore di tensione a partire dalla tensione di riferimento V_{REF} . Tramite i valori di due resistenze del partitore, è possibile ottenere un valore desiderato che si trova all'interno del range di misura del sensore. A seconda di come vengono collegate le resistenze, può essere utilizzata una configurazione unidirezionale o bidirezionale [5]. Per l'applicazione pratica che si andrà a sviluppare in questo elaborato sono stati scelti due diversi sensori:

1. MLX91218LDC-ARV500;
2. MLX91218LDC-ARV501.

Questi due particolari sensori si differenziano soltanto per la loro sensibilità. Come si può osservare dal loro codice, appartengono entrambi alla famiglia dei '18, presentano un range di misura VHF corrispondente a un intervallo di $\pm 60\text{ mT}$ e funzionano con un principio raziometrico. La sensibilità, nel primo caso, è pari a $40 \frac{\text{mV}}{\text{mT}}$, mentre nel secondo è pari a $60 \frac{\text{mV}}{\text{mT}}$. Utilizzando la formula 3.3 e tenendo conto della dimensione dello schermo utilizzato, si può ottenere il valore della sensibilità in funzione della corrente misurata. Questa corrisponde ad un valore di $2 \frac{\text{mV}}{\text{A}}$ per il primo mentre per il secondo, con lo stesso procedimento, si ottiene un valore di $3 \frac{\text{mV}}{\text{A}}$. Questa variazione di sensibilità, influenza anche il massimo range di corrente che può essere misurato. In particolare, poiché l'uscita varia tra il 10 % e il 90 % della V_{DD} , il sensore, in base alla sua sensibilità, potrà raggiungere un valore di corrente misurata più o meno alto, a parità di dimensioni dello schermo. Di seguito, verrà fornito un esempio pratico di quanto spiegato, con i due sensori utilizzati nella scheda elettronica progettata. Tenendo conto, come detto in precedenza, che il sensore ha un'uscita per correnti positive con un range massimo di 2 V , partendo dall'offset a corrente nulla e considerando la larghezza dello schermo scelto, pari a 25 mm , e selezionando il sensore con sensibilità $40 \frac{\text{mV}}{\text{mT}}$, si può ottenere il range di corrente che può essere misurato. Per prima cosa, si calcola il range massimo di campo magnetico che può essere rilevato, prima che il sensore entri in saturazione, dividendo il range di uscita per la sensibilità:

$$\frac{2\text{ [V]}}{40[\frac{\text{mV}}{\text{mT}}]} = 50\text{ [mT]} \quad (3.4)$$

Il risultato ottenuto nell'equazione precedente (3.4) può essere inserito nell'equazione 3.3, ottenendo così il valore massimo di corrente che può essere misurata:

$$50\text{ [mT]} = 1.25 \frac{I\text{ [A]}}{25\text{ [mm]}} \quad (3.5)$$

Invertendo questa formula, si ottiene:

$$I[A] = \frac{25[mm] 50[mT]}{1.25} = 1000 [A] \quad (3.6)$$

Quanto appena descritto può essere esteso anche al caso dell'altro sensore utilizzato con sensibilità diversa; infatti, basterà soltanto sostituire il valore di sensibilità diverso nella 3.4, ottenendo un nuovo valore da inserire nella 3.3. Effettuando quanto appena scritto, con una sensibilità di $60 \frac{mV}{mT}$ si ottiene un valore di corrente massima misurabile pari a 666.67 A.

3.5 Confronto caratteristiche

Per ottenere una panoramica generale riguardo alle differenze tra il sensore IMC-Hall scelto, ossia il MLX91218, e il LEM LF 510-S, è stato effettuato un primo confronto partendo da quanto osservato nelle caratteristiche riportate sul datasheet. In alcuni casi, le caratteristiche non sono direttamente confrontabili poiché alcune unità di misura sono diverse. I valori riportati nella Tabella 3.2 sono quelli in configurazioni standard; modificando alcune caratteristiche del sensore tramite il programmatore, questi valori potrebbero subire delle variazioni. Nei rispettivi datasheet([4], [5]), sono riportate tutte le caratteristiche e le configurazioni possibili. Entrambi i sensori sono utilizzati in applicazioni industriali e automotive. Una delle principali differenze è che il LEM ha un'uscita in corrente, a differenza del sensore IMC-Hall, che ha un'uscita in tensione. Questa differenza può essere facilmente rimossa, utilizzando un resistore shunt nell'uscita del LEM, così da ottenere un valore di tensione desiderato in base al valore della resistenza. Inoltre, il LEM LF 510-S ha un range di misura fisso a $\pm 800 A$; d'altra parte, il sensore MLX91218 ha un range di misura del campo magnetico che dipende dalla versione del sensore. Il corrispettivo valore in corrente, invece, dipende anche dalla larghezza dello schermo in millimetri, come mostrato dalla formula 3.3. Un'altra caratteristica che differenzia questi due sensori è la larghezza di banda: infatti, il LEM ha $200 kHz$, mentre il sensore IMC-Hall, in configurazione standard, ha una banda di $400 kHz$. All'interno del datasheet del LEM è riportato un valore di accuratezza complessiva in percentuale della corrente nominale sul primario. D'altra parte, con i sensori IMC-Hall della Melexis, non è presente un valore assoluto di accuratezza, che dipende da diversi fattori, tra cui la temperatura e le interferenze elettromagnetiche. Un'altra differenza importante è quella relativa alle dimensioni dei due sensori: il sensore LEM ha un notevole ingombro fisico, poiché, come mostrato in Figura 3.3, esso viene posizionato intorno al conduttore di corrente. Questo potrebbe essere un problema significativo nel caso in cui le dimensioni del sistema vadano limitate, rendendo necessario rimanere al di sotto di una certa grandezza. D'altra parte, il sensore Melexis è un sensore IC (Integrated Circuit), quindi ha un ingombro notevolmente inferiore rispetto al suo concorrente. Questo permette la sua implementazione direttamente sulla scheda

Capitolo 3 Sensori a effetto Hall

elettronica che esegue le acquisizioni ed il condizionamento del segnale, a differenza del sensore LEM LF 510-S, che necessita di una scheda elettronica esterna per poter effettuare queste operazioni.

Capitolo 4

Misure e confronti tra i diversi sensori

In questo capitolo sono riportate tutte le misurazioni e i confronti effettuati sui sensori IMC-Hall della Melexis. Queste misurazioni sono state eseguite prima della progettazione della scheda elettronica e hanno fornito indicazioni sul comportamento dei sensori.

4.1 Strumentazione utilizzata

Durante lo svolgimento delle diverse misure necessarie per ottenere una panoramica generale sul funzionamento e l'andamento del sensore in valutazione, sono stati utilizzati alcuni strumenti da banco per condurre le prove. In particolare, in questa sezione verranno illustrati i principali strumenti impiegati.

- **Alimentatore da banco RS PRO RPE2323:** è un alimentatore digitale a doppio canale che fornisce corrente continua con una tensione massima di 32 V. Questo strumento è stato utilizzato per alimentare il sensore durante l'esecuzione delle misure.
- **Multimetro Fluke 289:** è un multimetro digitale avanzato progettato per professionisti e tecnici che richiedono uno strumento versatile e altamente preciso per la misurazione di tensione, corrente, resistenza e molte altre grandezze elettriche. In questo caso, è stato utilizzato per la lettura dei valori di tensione in uscita dal sensore.
- **Calibratore Fluke 5522A:** è un calibratore multifunzionale che permette la calibrazione di strumenti di misura in ambito elettronico. È progettato per fornire correnti e tensioni estremamente precise, con tolleranze ridotte. Durante queste misurazioni, è stato utilizzato sia come riferimento affidabile per misure in corrente continua, sia per misurare l'andamento dell'uscita dei sensori al variare della frequenza in corrente alternata.
- **Generatore ITECH IT6015C-80-450:** è un alimentatore in corrente continua programmabile e bidirezionale che permette di raggiungere fino a 450 A di corrente e una tensione di 80 V. Grazie a questo strumento, è stato possibile raggiungere elevate correnti per osservare il comportamento dei sensori testati.

- **DVK Melexis IMC-Hall:** è un kit di sviluppo della Melexis che fornisce tutto il necessario per valutare le prestazioni e le funzionalità dei sensori. In particolare, contiene tutti e tre i diversi tipi di sensori con tecnologia IMC-Hall. Oltre a diverse schede di valutazione con sensori integrati, include anche schede con sensori aggiuntivi da saldare in base alle esigenze. All'interno di questo kit sono presenti tre diversi schermi ferromagnetici in SiFe, una barra di rame e un supporto in plastica per assemblare il tutto.

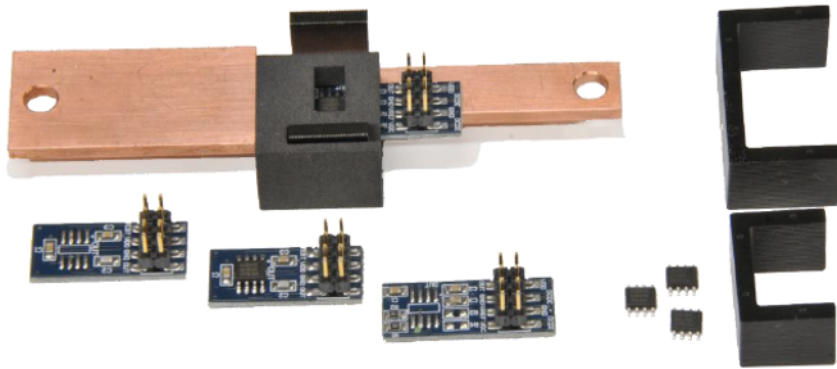


Figura 4.1: Kit di sviluppo IMC-Hall

4.2 MLX91208

Il primo sensore testato non faceva parte del kit di sviluppo presentato in precedenza; infatti, era contenuto in un kit di sviluppo meno recente, già utilizzato presso l'impresa. In questo modo, è stato possibile eseguire delle misurazioni su questo sensore prima dell'arrivo del nuovo kit. Poiché in quello utilizzato inizialmente non era contenuta nessuna barra di rame, è stata lavorata una barra al fine di renderla adatta alle attività da svolgere. In particolare, sono stati eseguiti due fori con l'obiettivo di fissare i cavi di corrente in uscita dal generatore ITECH, affinché la corrente potesse scorrere su di essa. Il set-up per le prime misurazioni sul sensore è presentato in Figura 4.2. In particolare, l'uscita del generatore ITECH è stata collegata alla barra di rame in modo da farvi scorrere corrente e chiudere il circuito. Tramite un connettore con cavo, sono stati connessi i pin di alimentazione e massa all'alimentatore da banco, e il pin di uscita, insieme a un altro cavo di massa sono stati utilizzati per osservare il segnale della tensione di uscita tramite un multimetro. Il sensore testato è il Melexis MLX91208LDC-CAH-001; dal codice è possibile osservare che ha un range di misura High Field e una sensibilità di $100 \frac{mV}{mT}$. Questo sensore è stato utilizzato insieme a uno schermo ferromagnetico U12, largo $12 mm$. Successivamente, è stata calcolata la corrispondente sensibilità espressa in funzione della corrente, ottenendo un valore di $10.42 \frac{mV}{A}$. Il massimo range di misura di questa tipologia di sensori, essendo un High

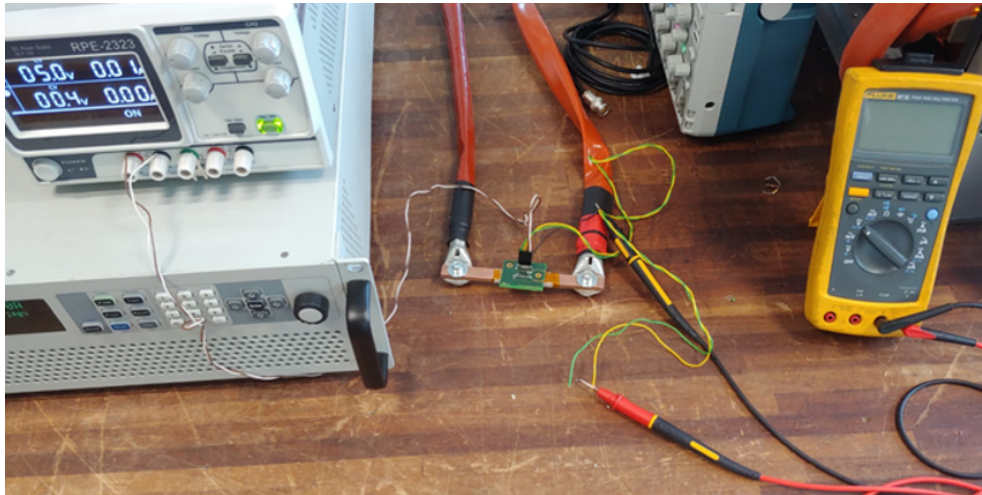


Figura 4.2: Set-up misure MLX91208

Field, è di $\pm 30 \text{ mT}$. Utilizzando la formula 3.3 e considerando la larghezza dello schermo impiegato, è stato possibile ottenere il corrispondente valore in corrente, pari a circa 192 A , in funzionamento lineare. Le prime misurazioni eseguite sono state effettuate con una corrente continua, fino a raggiungere i limiti superiori e inferiori di saturazione del sensore. Nella Figura 4.3 è riportato l'andamento della tensione di uscita ottenuto dai valori letti sul multimetro. Dal grafico si può osservare

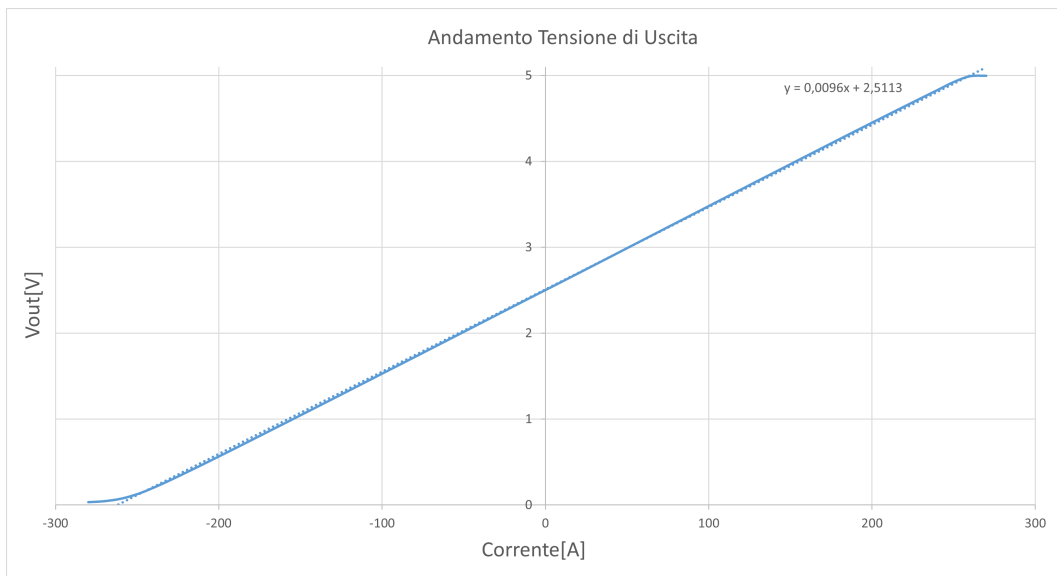


Figura 4.3: MLX91208 - Andamento tensione in corrente continua

che l'andamento del sensore è lineare; infatti, esso viene confrontato con una linea di tendenza. Attraverso questo confronto, è possibile notare come la curva della tensione di uscita mantenga un andamento lineare, ad eccezione degli estremi positivi e negativi, nei quali il sensore entra in saturazione. Questa condizione è causata

dal fatto che il sensore raggiunge un livello massimo di risposta e non è in grado di misurare ulteriori aumenti del campo magnetico.

Successivamente, dopo aver osservato il comportamento generale del sensore, è stato effettuato un confronto con il sensore di riferimento attualmente utilizzato, ossia il LEM LF 510-S. Il set-up utilizzato per queste misurazioni è rimasto lo stesso della Figura 4.2, con la differenza che è stato inserito il nuovo sensore nel cavo di corrente ed è stato collegato a un multimetro per osservare il suo valore di uscita in corrente. Per ottenere i rispettivi valori di correnti misurate, sono stati eseguiti due processi diversi. Nel caso del sensore LEM, poiché il rapporto tra primario e secondario è pari a 1:5000, è bastato moltiplicare il valore della corrente di uscita rilevata tramite multimetro per 5000, così da ottenere il valore misurato. D'altra parte, nel caso del sensore Melexis, il valore della corrente misurata è stato ottenuto dividendo il valore della tensione di uscita, sottratto l'offset (ossia il valore di tensione di uscita a corrente nulla), per la sensibilità del sensore espressa in $\frac{mV}{A}$. In formula, quanto scritto in precedenza corrisponde a:

$$I = \frac{V_{OUT} - V_{OUT}[0\text{ mT}]}{\text{Sensibilità}[\frac{mV}{A}]} \quad (4.1)$$

Le misurazioni sono state eseguite solo per valori positivi di corrente, ma le riflessioni possono essere estese anche ai valori di corrente negativa. Il grafico dei risultati ottenuti è riportato nella Figura 4.4. Dai valori ottenuti è stato possibile fare alcune

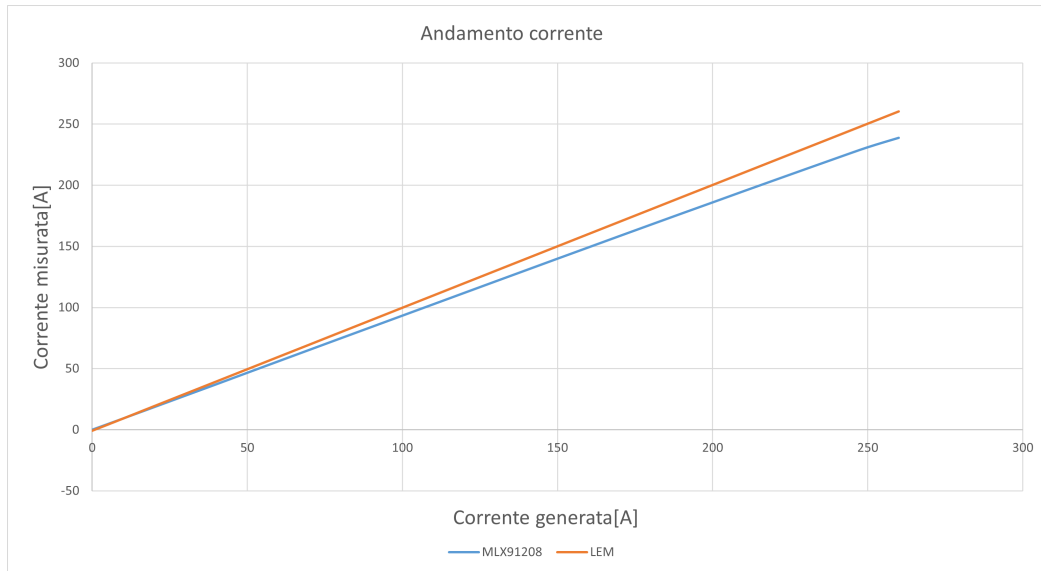


Figura 4.4: MLX91208 - Confronto con LEM LF 510-S

riflessioni sul confronto tra questi due sensori. In particolare, è stato osservato che il sensore Melexis introduce un'attenuazione rispetto alla corrente generata, impostata sul generatore di corrente, che scorre sulla barra di rame. Calcolando il rapporto tra il valore ottenuto dal LEM e quello ottenuto dal sensore Melexis, è stato ricavato un

fattore di attenuazione che oscilla tra 1.04 e 1.08 a seconda del valore di corrente misurata. Questo problema, in fase di progettazione della scheda, potrà essere risolto introducendo un guadagno adeguato nel circuito di condizionamento del segnale.

Oltre a queste misure, sono state effettuate alcune acquisizioni in corrente alternata per osservare l'andamento della forma d'onda della tensione di uscita del segnale. In questa fase non sono stati ottenuti risultati significativi, ma è stato notato che il sensore presentava un livello di rumore non trascurabile; infatti, per bassi livelli di corrente, come ad esempio 2 A, il rumore è all'incirca equivalente al segnale di uscita e quindi risulta indistinguibile. Questo valore di rumore, di circa $9 mV_{rms}$, è coerente con quello riportato sul datasheet del sensore in questione.

Una volta ricevuto il nuovo kit di sviluppo della Melexis, sono stati utilizzati i sensori più recenti, caratterizzati da migliori specifiche, insieme alla barra di rame e agli schermi ferromagnetici forniti con esso. Queste misurazioni verranno descritte nelle sezioni seguenti.

4.3 MLX91216

Questo sensore è stato il secondo testato. Questo modello è incluso nel kit di sviluppo acquistabile da alcuni distributori della Melexis. Su questo sensore sono state eseguite alcune prove in corrente continua per ottenere una panoramica del suo funzionamento e comportamento. In particolare, come verrà presentato in seguito, sono state effettuate prove anche per valutare il comportamento in presenza di disturbi elettromagnetici. Il set-up utilizzato è lo stesso delle precedenti misure (4.2). Le principali differenze sono legate al nuovo kit di sviluppo; infatti, sono

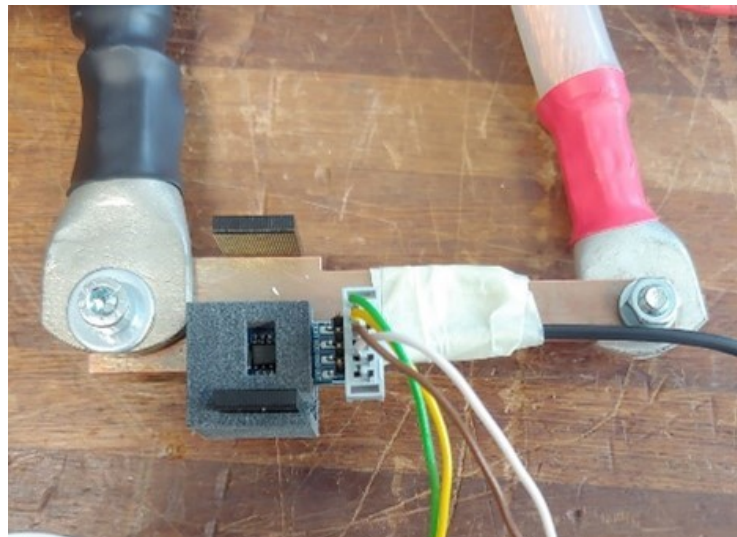


Figura 4.5: MLX91216 - Sensore decentrato

stati utilizzati gli strumenti forniti con esso. In particolare, sono stati impiegati una barra di rame e uno schermo, che, tramite un opportuno supporto in plastica,

erano mantenuti solidali a tutto il sistema, che comprende anche l'evaluation board del sensore. Quanto descritto è mostrato in Figura 4.5. Il sensore testato è il modello MLX91216LDC-ACV-501, appartenente al gruppo con un range Very High Field, che può raggiungere fino a $\pm 60 \text{ mT}$. Inoltre, ha una sensibilità di $60 \frac{\text{mV}}{\text{mT}}$; considerando uno schermo di 25 cm di larghezza e utilizzando la formula 3.3, è possibile ottenere il corrispondente valore espresso in funzione della corrente, pari a $3 \frac{\text{mV}}{\text{A}}$. Inizialmente, sono state eseguite delle misurazioni in corrente continua al fine di visualizzare l'andamento. Come è possibile osservare dalla Figura 4.5, il sensore si trova in posizione decentrata rispetto allo schermo ferromagnetico e alla barra di rame. Effettuando alcune acquisizioni e confrontando i risultati ottenuti con i valori del sensore di riferimento LEM LF 510-S, si è notato che il sensore sotto test presentava un'attenuazione molto più accentuata del valore della corrente, rispetto alle misure eseguite nella sezione precedente sul MLX91208. Il set-up delle misurazioni effettuate è riportato in Figura 4.6. Le misurazioni sono state eseguite

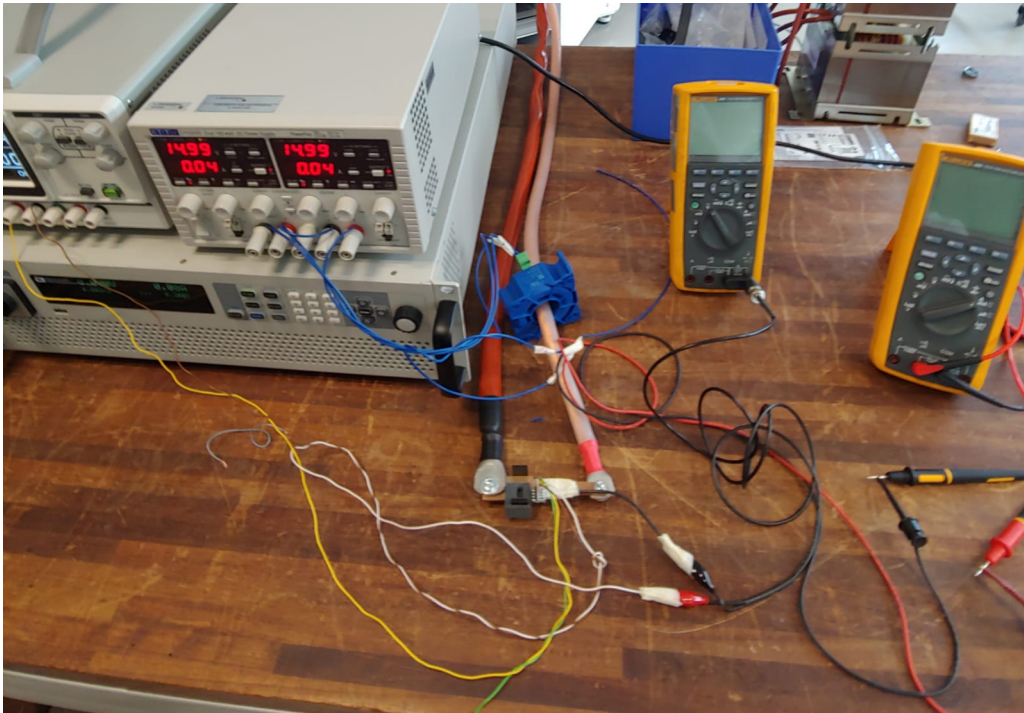


Figura 4.6: MLX91216 - Set-up misure confronto con LEM

su un range compreso tra $\pm 430 \text{ A}$. Il grafico che confronta la corrente misurata dal sensore Melexis decentrato e dal sensore LEM è riportato in Figura 4.7. Dopo aver osservato i risultati e aver notato un'attenuazione compresa tra 1.17 e 1.20 rispetto al LEM, si è constatato che questa era maggiore rispetto a quella registrata per il sensore MLX91208. Di conseguenza, la successiva mossa effettuata è stata quella di sostituire il supporto di plastica del kit di sviluppo e centrare il sensore rispetto allo schermo ferromagnetico e alla barra di rame. Successivamente, una volta centrato il sensore, sono state ripetute le misure, limitandosi alle correnti positive, e sono stati

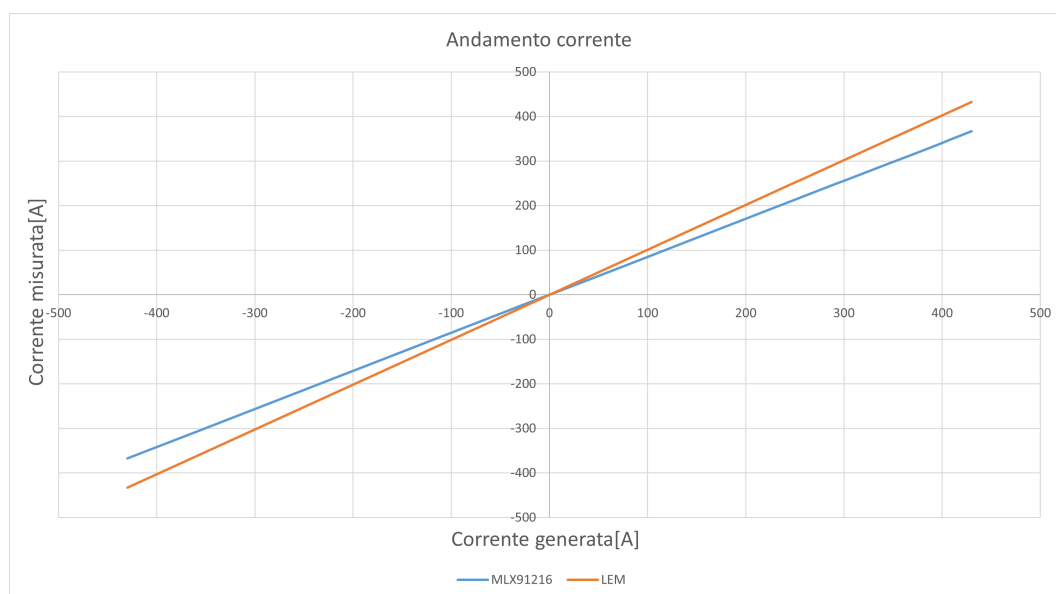


Figura 4.7: MLX91216 decentrato - Confronto con LEM LF 510-S

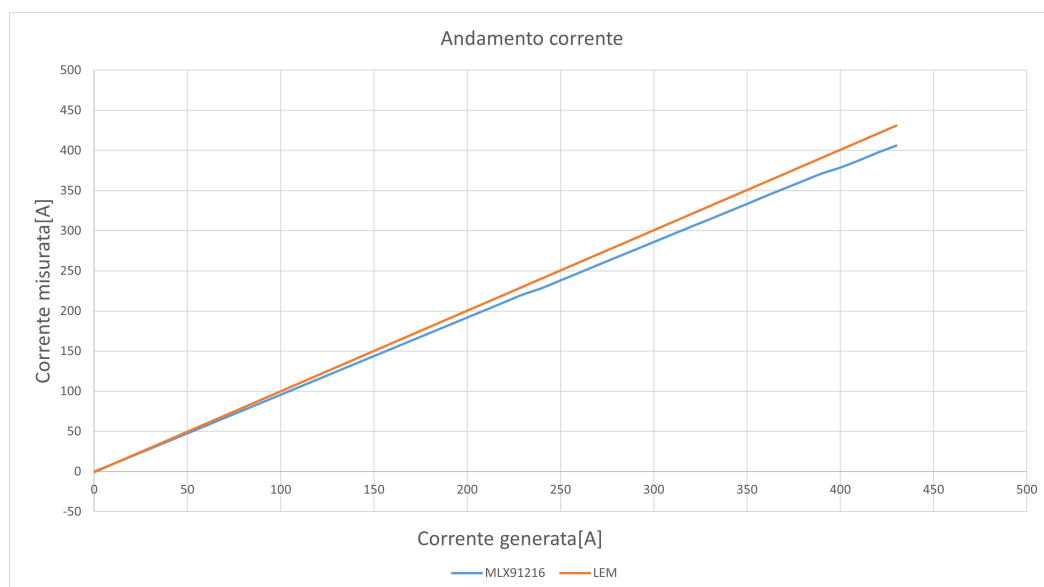


Figura 4.8: MLX91216 centrato - Confronto con LEM LF 510-S

osservati i risultati ottenuti. In Figura 4.8 è riportato il grafico derivante da queste ultime acquisizioni. Si può facilmente notare come i valori di corrente ottenuti nel caso del sensore centrato siano più prossimi a quelli del sensore LEM, rispetto a quelli ottenuti con il sensore decentrato. In questo caso, infatti, il rapporto ottenuto tra le due misure oscilla tra 1.04 e 1.06, quindi molto più basso rispetto a quello ottenuto con il sensore decentrato. Grazie a queste misurazioni, è stato possibile riflettere sul fatto che il sensore deve essere centrato rispetto allo schermo ferromagnetico e alla barra di rame, per evitare di aggiungere un'ulteriore attenuazione al valore di corrente misurato. Per rendere chiaro quanto osservato in precedenza, è possibile riportare in un unico grafico l'andamento della corrente sia nel caso del sensore decentrato sia nel caso del sensore centrato, rispetto alla corrente generata dal generatore utilizzato. Questo grafico è mostrato in Figura 4.9.

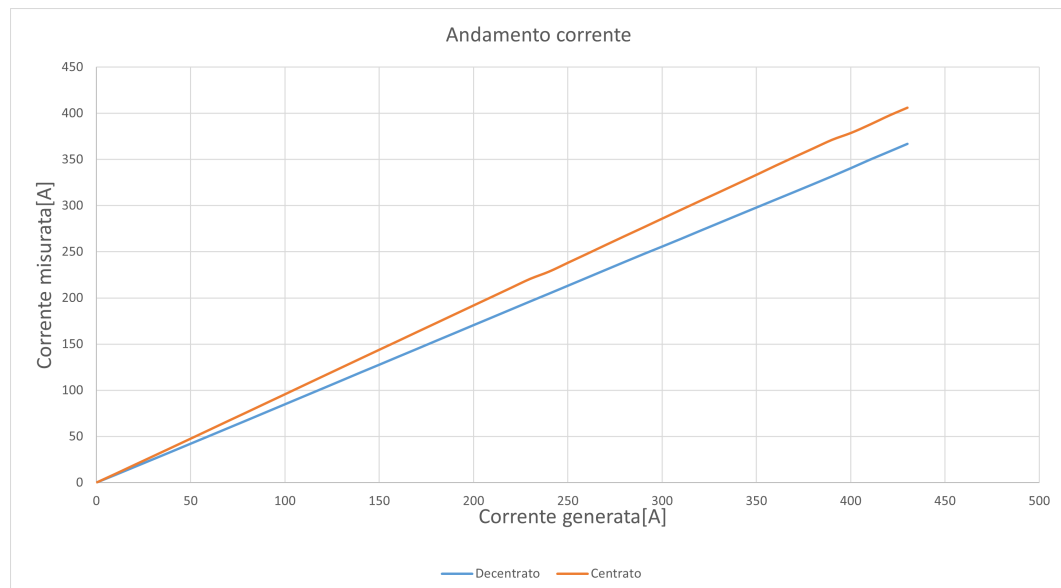


Figura 4.9: MLX91216 - Confronto sensore centrato - decentrato

Successivamente, sono state eseguite delle misurazioni per valutare l'influenza dei disturbi elettromagnetici sul sensore in fase di test. Per verificare ciò, è stata posizionata una barra di rame in prossimità della barra di rame su cui è posto il sensore. La disposizione delle due barre di rame viene riportata nella Figura 4.10. In questo modo, è stato possibile osservare come una barra di rame, sulla quale scorre corrente, nelle vicinanze di quella in cui si vuole rilevare la corrente, influenzi il campo magnetico misurato dal sensore e, di conseguenza, la sua tensione di uscita. Per valutare questa influenza, è stata misurata, tramite un multimetro, la variazione della tensione di uscita del sensore rispetto al suo valore a corrente nulla, ossia l'offset fissato a 2,5 V. Partendo dalla disposizione mostrata in Figura 4.10, sono state eseguite diverse acquisizioni a varie distanze tra le due barre di rame, utilizzando diversi valori di corrente. Il grafico riportato in Figura 4.11 mostra i risultati ottenuti da queste acquisizioni. Da esso è possibile osservare che, all'aumentare della corrente,

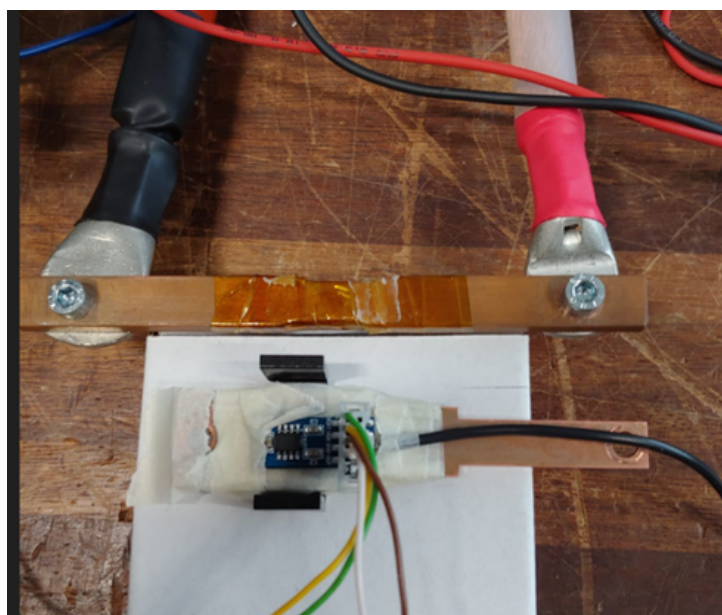


Figura 4.10: MLX91216 centrato - Valutazione disturbi elettromagnetici

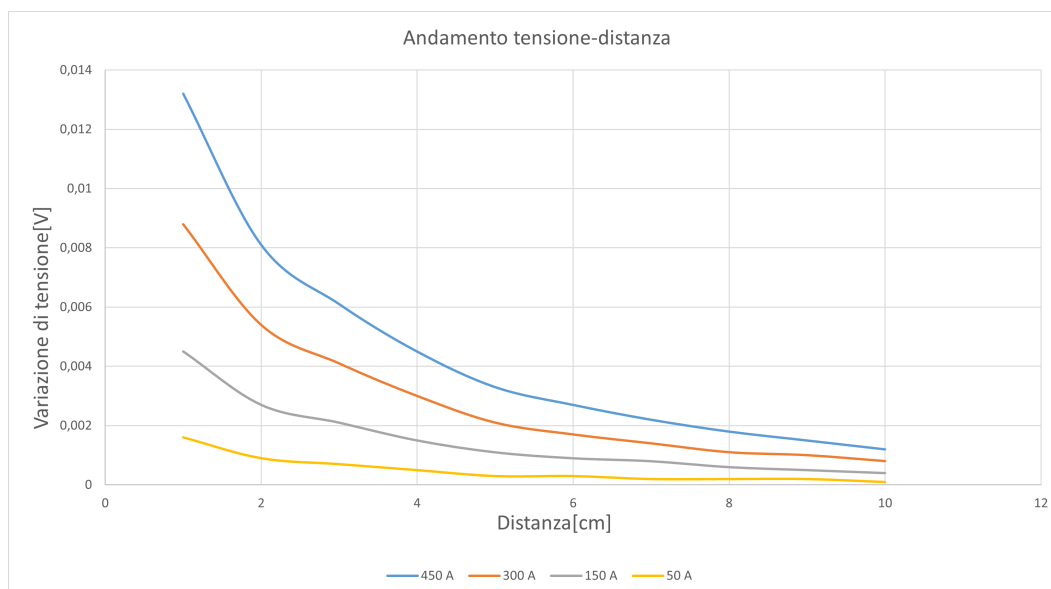


Figura 4.11: MLX91216 centrato - Andamento tensione-distanza

aumenta anche l'influenza di questa sul sensore sotto test. Incrementando la distanza tra le due barre di rame, il sensore percepisce sempre meno l'influenza del disturbo, mantenendo la corrente costante. Il massimo disturbo rilevato è pari a 13 mV ad una distanza di 1 cm , in presenza di una corrente nella barra di rame "disturbante" di 450 A . La stessa corrente a 6 cm , la distanza delle barre di rame relative alle tre fasi dell'inverter, comporta una variazione di $2,7\text{ mV}$. Considerando la sensibilità del sensore di $3\frac{\text{mV}}{\text{A}}$, l'influenza di questa corrente è inferiore a 1 A a una distanza di 6 cm . Nella sezione successiva verranno riportate le ultime misure effettuate con sensori del kit di sviluppo, prima della progettazione della scheda elettronica.

4.4 MLX91218

L'ultimo sensore testato è il MLX91218LDC-ARV-500, contenuto anch'esso all'interno del kit di sviluppo. Come presentato nel Capitolo 3, questo sensore presenta caratteristiche diverse rispetto a quelli testati in precedenza. In particolare, dispone di 8 diversi pin; alcuni di essi, legati a funzionalità aggiuntive, non saranno presi in considerazione in queste misurazioni. Il sensore esaminato ha una sensibilità di $20\frac{\text{mV}}{\text{mT}}$ e un range di misura fino a $\pm 90\text{ mT}$. Considerando lo schermo di larghezza 25 mm ; utilizzando la formula 3.3, si ottiene un valore di sensibilità di $2\frac{\text{mV}}{\text{A}}$. Inoltre, è possibile determinare il massimo valore di corrente che questo sensore può misurare prima di entrare in saturazione, che corrisponde a un valore pari a 1000 A , come visto nel Capitolo 3. Come evidenziato nel precedente capitolo, il sensore MLX91218 ha due diverse modalità di funzionamento, ossia raziometrica e differenziale. Il sensore testato è in modalità raziometrica, e non sono stati trovati in commercio sensori differenziali. Nella modalità differenziale, non vale la formula 4.1, per trovare la corrente, ma si utilizza la seguente formula:

$$I = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{\text{Sensibilità}[\frac{\text{mV}}{\text{A}}]} \quad (4.2)$$

Poiché anche i sensori raziometrici disponevano di un pin relativo alla tensione di riferimento, e questa aveva un valore teorico del 50% della tensione di alimentazione, sono state eseguite alcune prove per osservare il comportamento di tale tensione di riferimento e valutare la sua variazione. L'obiettivo di queste misurazioni era quello di utilizzare la tensione di riferimento anche nella modalità raziometrica, al fine di rimuovere l'offset; questo aspetto verrà illustrato nel Capitolo 6 in cui verrà progettata la scheda elettronica.

Come prima misurazione, l'andamento di questo sensore è stato confrontato con il sensore LEM LF 510-S, considerato il sensore di riferimento. Il set-up e il metodo con cui sono state effettuate le misure sono gli stessi adottati per il test dei sensori precedenti. In questo caso, tramite il generatore di corrente ITECH, sono state eseguite delle misure sul range $\pm 300\text{ A}$. Il grafico ottenuto è riportato nella Figura 4.12. Da queste misure è stato possibile osservare che è presente un'attenuazione tra

il valore misurato dal sensore Melexis e da quello misurato dal LEM. Agli estremi, il rapporto tra i valori misurati dai due sensori è di circa 1.10, causato anche dall'offset presente tra la tensione di riferimento e la tensione di uscita a campo magnetico nullo, pari a 25 mV . Partendo da queste misurazioni, si è osservato che il valore

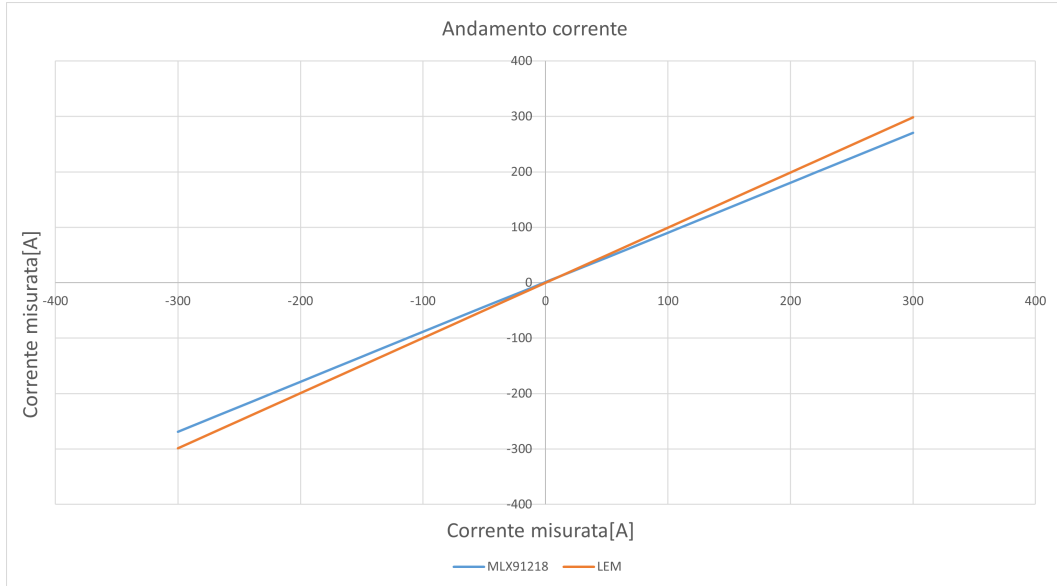


Figura 4.12: MLX91218 centrato - Confronto con LEM LF 510-S

della tensione di riferimento varia al variare della temperatura. Per analizzare questo comportamento, successivamente verranno illustrate delle misurazioni riguardanti la tensione di riferimento, per osservare il suo andamento rispetto alla temperatura della barra di rame su cui scorre corrente. In particolare, è stata fatta scorrere una corrente man mano crescente sulla barra di rame, in cui era posizionato il sensore. All'aumentare della corrente, anche la temperatura della barra di rame aumentava, e attraverso una termocamera è stata rilevata la temperatura di questa. Il set-up utilizzato per queste acquisizioni è riportato in Figura 4.13. Tramite i due multimetri presenti, venivano rilevati sia il valore della tensione di uscita sia il valore della tensione di riferimento. Inoltre, durante l'esecuzione delle misure, si è potuto notare che il valore della temperatura misurata, e quindi il livello raggiunto dalla barra di rame è strettamente legato al set-up di misura. Infatti, prima di utilizzare quello in Figura 4.13, erano stati utilizzati dei cavi di dimensioni inferiori, il che provocava un alto livello di riscaldamento di tutto il sistema, portando al raggiungimento di una temperatura maggiore, poiché i cavi erano troppo piccoli rispetto alla corrente circolante all'interno. Nelle misurazioni con cui sono stati ottenuti i valori riportati nel grafico in Figura 4.14, sono stati raggiunti valori di corrente fino a 300 A . Da questo è possibile osservare come una variazione di temperatura di 70 gradi , comporti una variazione della tensione di riferimento di circa $7,3\text{ mV}$. Questa variazione non è particolarmente elevata e, nel caso del sensore in esame, con una sensibilità di $2\frac{\text{mV}}{\text{A}}$ corrisponderebbe ad una variazione di $3,65\text{ A}$. Prendendo un sensore con sensibilità

maggiore, ad esempio il modello con $3\frac{mV}{A}$, questa corrisponderebbe ad una variazione di 2,43 A. Inoltre, l'andamento ottenuto da questa variazione è comunque al di sotto della specifica riportata per la tensione di riferimento al variare della temperatura del sensore in questione in modalità differenziale [5].

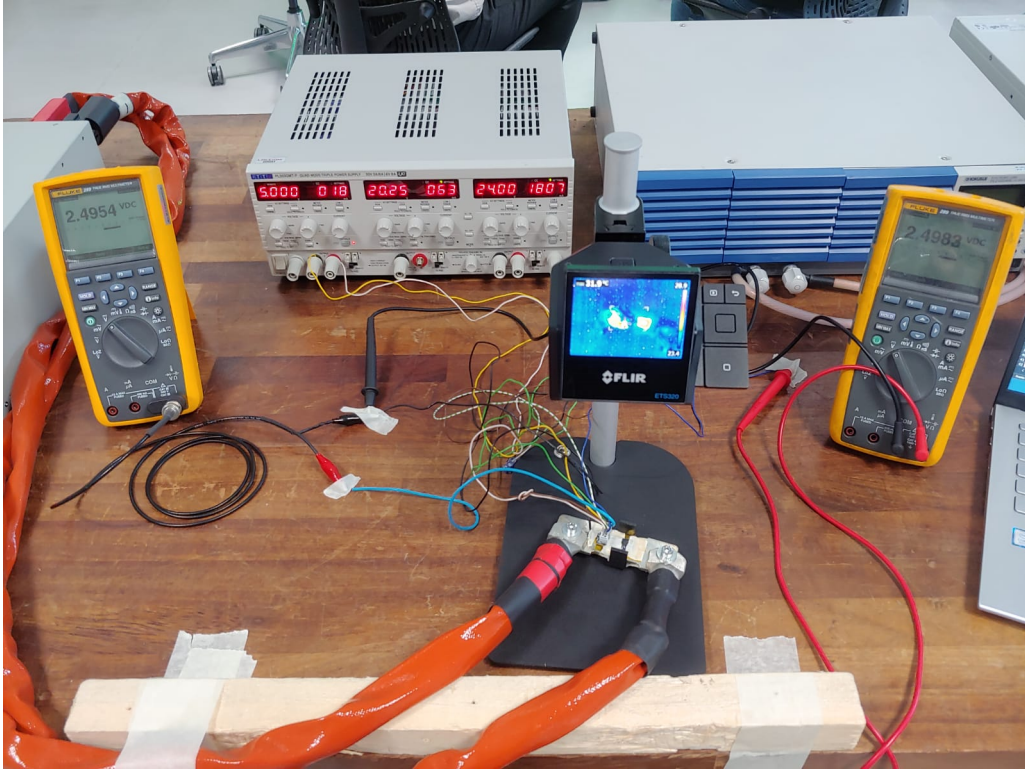


Figura 4.13: MLX91218 - Set-up misura tensione di riferimento

Le ultime misure eseguite con questo sensore sono acquisizioni tramite il calibratore per correnti fino a $20 A_{rms}$. Queste misurazioni sono state effettuate con l'obiettivo di ottenere una caratterizzazione del sensore sotto test al variare della frequenza elettrica. Per comodità, è stato utilizzato il supporto in plastica contenuto nel kit di sviluppo della Melexis; pertanto, la tensione di uscita e il corrispondente andamento in corrente non vengono considerati in relazione alla corrente che scorre sulla barra di rame, poiché lo scopo delle misure era quello di osservare la variazione della tensione di uscita rispetto alla frequenza. Le acquisizioni della tensione di uscita sono state effettuate con un multimetro impostato nella rilevazione di tensione continua. In questi test sono state eseguite delle misure a tre diversi valori di frequenza ossia $50 Hz$, $1000 Hz$ e $5000 Hz$. L'andamento per queste tre frequenze è riportato nel grafico in Figura 4.15. È possibile osservare come, a $50 Hz$, la tensione di uscita dal sensore abbia un valore più basso rispetto a quella degli altri due valori di frequenza. L'origine di questa attenuazione, notata durante le acquisizioni non è nota; infatti, all'interno del datasheet del sensore Melexis non è riportata alcuna informazione riguardante questo aspetto. Successivamente, queste misure verranno replicate sul

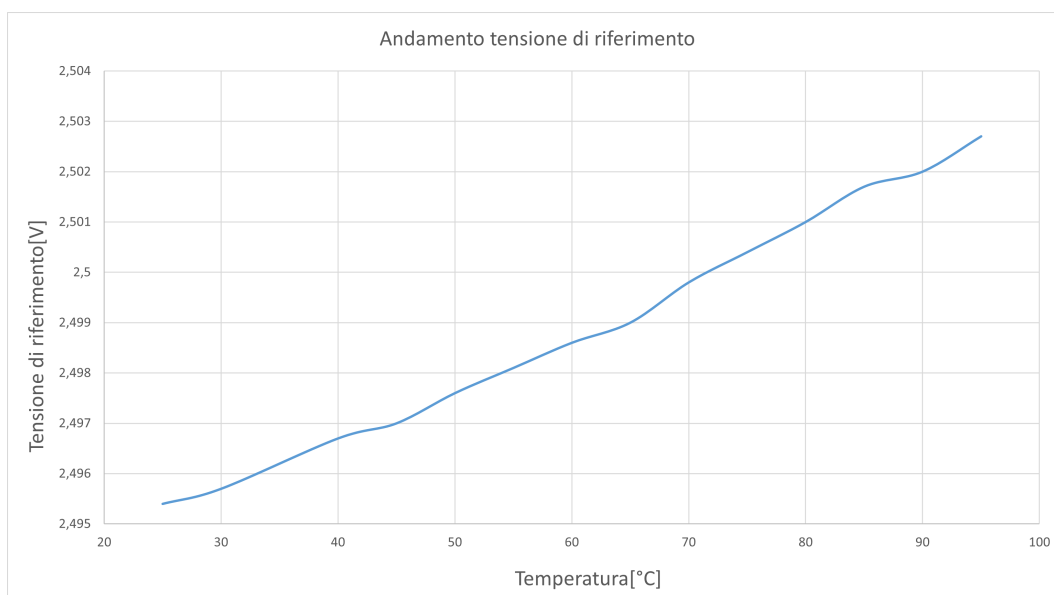


Figura 4.14: MLX91218 - Andamento tensione di riferimento

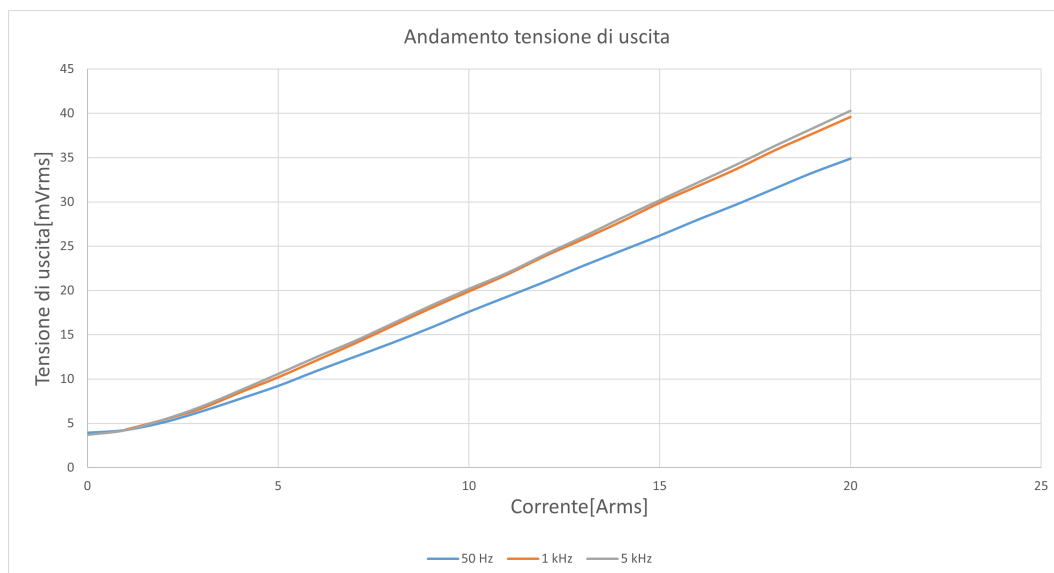


Figura 4.15: MLX91218 - Variazione tensione di uscita con la frequenza

prototipo finale della scheda per esaminare se questo comportamento sia originato dal set-up delle misurazioni oppure da altri fenomeni non ancora noti. A livello implementativo, questo non rappresenta un problema grave, poiché, tramite un regolatore di guadagno, sarà possibile regolare, in fase di calibrazione, il valore della tensione di uscita in funzione della frequenza a cui scorre la corrente elettrica.

Capitolo 5

Simulazioni schermo

Nella sezione 3.3.2 è stata evidenziata l'importanza dello schermo ferromagnetico per la corretta implementazione del sistema di misura. In questo capitolo verranno riportate tutte le simulazioni eseguite con il software CST Studio Suite per la verifica di alcune caratteristiche dello schermo ferromagnetico. Questo software consente di effettuare analisi elettromagnetiche 3D ad elevate prestazioni, riguardanti lo studio, la progettazione e l'ottimizzazione di componenti e sistemi elettromagnetici. Esso comprende diversi risolutori, in base al tipo di analisi che si desidera effettuare; inoltre, può essere utilizzato per studiare le prestazioni e l'efficienza di vari oggetti, come antenne, oppure per l'analisi di problemi di compatibilità elettromagnetica [13].

5.1 Dimensioni schermo

Un aspetto fondamentale nella scelta dello schermo è legato alle caratteristiche fisiche del componente. In particolare, al variare delle dimensioni dello schermo, il campo magnetico rilevato dal sensore subisce una modifica. Successivamente, verrà riportata la variazione del valore del campo per ogni dimensione dello schermo:

- W : larghezza;
- L : lunghezza;
- H : altezza;
- T : spessore.

Le lettere precedentemente elencate fanno riferimento alla Figura 3.7. Per verificare in che modo le dimensioni dello schermo ferromagnetico influenzano il campo rilevato dal sensore, sono state effettuate delle simulazioni, nelle quali veniva modificata una dimensione alla volta per osservare come il campo nello stesso punto subisse una variazione. Nelle simulazioni il materiale utilizzato per rappresentare lo schermo è il ferro(Fe), nonostante nella realtà sia il materiale NiFe 48 %. Il modello elaborato per l'esecuzione delle simulazioni è riportato in Figura 5.1. Dall'immagine è possibile osservare la barra di rame, rappresentata in giallo, avente le stesse dimensioni di quella utilizzata nell'inverter per quanto riguarda altezza e larghezza, mentre per

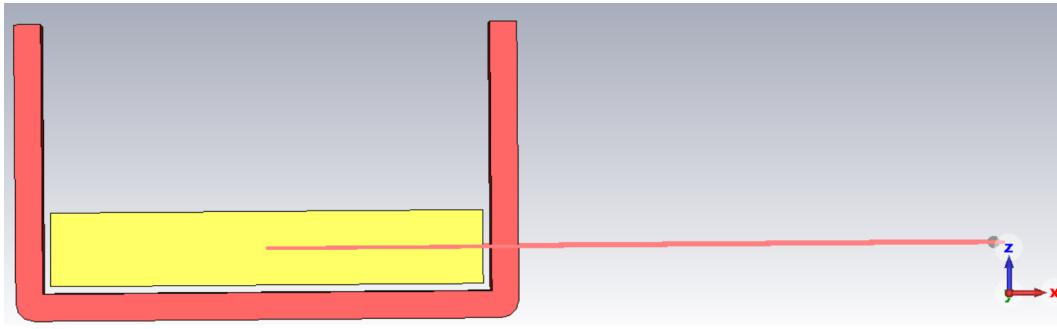


Figura 5.1: Simulazione schermo

la lunghezza è stato scelto un valore di 10 cm. In rosso è rappresentato lo schermo ferromagnetico di dimensioni standard. Le simulazioni sono state svolte con il risolutore "LF Time Domain Solver" e, tramite le impostazioni del software, è stata selezionata una corrente di 600 A, fatta scorrere nella barra di rame. Per visualizzare il valore del campo magnetico, è stato posizionato un monitor al centro dello schermo, nel punto in cui nell'applicazione reale viene posizionato il sensore, avente coordinate (0,0,4) mm rispetto all'origine degli assi (vedere Figura 5.2). Il monitor serve a rilevare il campo magnetico presente in quella specifica posizione. I valori delle

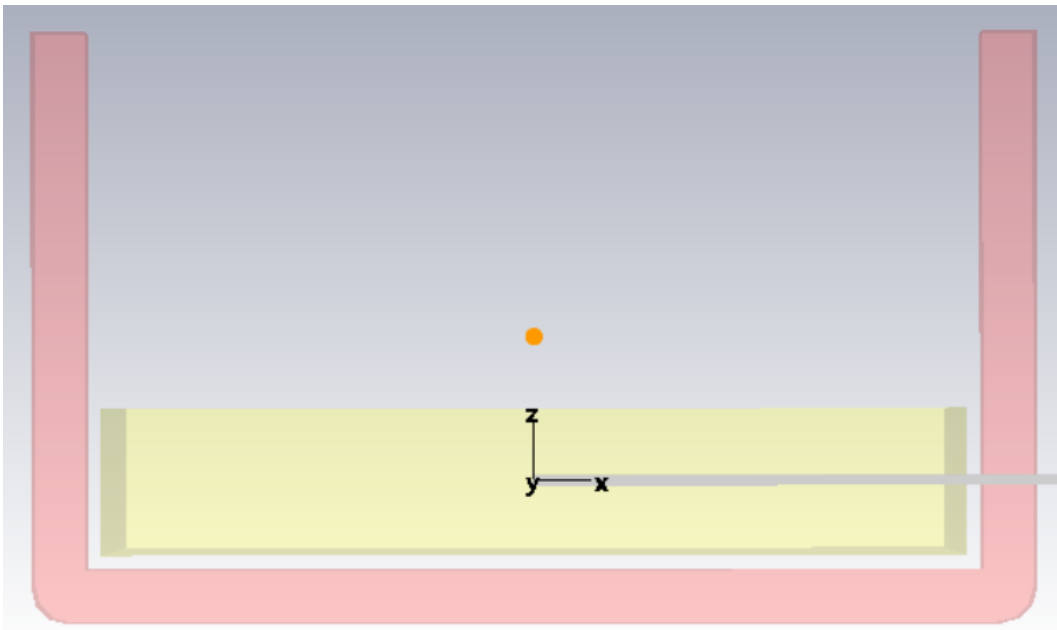


Figura 5.2: Posizione monitor al centro schermo

dimensioni fisiche standard dello schermo sono quelle utilizzate nel sistema reale e sono riportati nella terza riga della Tabella 3.1. In particolare, le dimensioni in questione sono:

- larghezza: 25 mm;

- lunghezza: 15 mm;
- altezza: 15 mm;
- spessore: 1.5 mm.

A partire da questi valori, verrà visualizzato il cambiamento del valore di campo magnetico al variare di una dimensione dello schermo alla volta, mantenendo gli altri valori pari a quelli elencati in precedenza. Considerando le caratteristiche di acquisizione del sensore, la componente fondamentale per il rilevamento del campo è quella lungo l'asse x. È importante notare che i risultati ottenuti in questa sezione sono coerenti con quanto riportato nell'articolo [14], in cui vengono eseguite ulteriori simulazioni sia con forme diverse dello schermo, sia con diverse posizioni del punto di acquisizione del campo magnetico lungo l'asse z.

Larghezza schermo

In questa sezione vengono riportate le simulazioni eseguite variando la larghezza dello schermo. È importante sottolineare che la larghezza minima dello schermo ferromagnetico dipende dalla barra di rame su cui scorre corrente. Nel nostro caso, la larghezza della barra è di circa 23.5 mm, quindi è stato utilizzato uno schermo di 25 mm. Le simulazioni sono state eseguite per tre diverse larghezze e sono stati acquisiti i valori del campo magnetico per ognuna delle sue componenti. I risultati

Larghezza[mm]	$B_x[mT]$	$B_y[mT]$	$B_z[mT]$
25	27.978	$6.999 \cdot 10^{-2}$	0.155
30	25.273	-0.293	$-8.529 \cdot 10^{-2}$
35	22.117	-0.202	$8.194 \cdot 10^{-2}$

Tabella 5.1: Valore campo magnetico al variare della larghezza dello schermo

ottenuti sono riportati in Tabella 5.1, da cui è possibile osservare come il valore del campo magnetico nella componente B_x diminuisca all'aumentare della larghezza dello schermo. Quanto evidenziato suggerisce di utilizzare uno schermo di larghezza più piccola possibile; questo, però, dipende anche dalle dimensioni della barra di rame che deve essere utilizzata per la specifica applicazione.

Lunghezza schermo

In questa sezione vengono presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate modificando la lunghezza dello schermo e mantenendo fisse le altre dimensioni. In particolare, vengono esaminate tre diverse lunghezze dello schermo e si andrà a valutare l'impatto di questo cambiamento sul campo magnetico rilevato dal monitor. Dalla Tabella 5.2 è possibile osservare che, partendo dalla dimensione standard di

Lunghezza[mm]	$B_x[mT]$	$B_y[mT]$	$B_z[mT]$
10	26.278	0.321	-0.289
15	27.978	$6.999 \cdot 10^{-2}$	0.155
20	28.484	-0.251	-0.394

Tabella 5.2: Valore campo magnetico al variare della lunghezza dello schermo

15 mm e diminuendo la lunghezza dello schermo, si ha una diminuzione del campo magnetico concentrato all'interno dello schermo, nel punto in cui il sensore è posizionato. D'altra parte, aumentando di 5 mm la lunghezza, il campo magnetico B_x non mostra un incremento significativo. La variazione di campo dipende, anche se in misura minore, dalla lunghezza della barra di rame che viene utilizzata nell'applicazione.

Altezza schermo

In questa sezione viene analizzata la variazione del campo magnetico al variare dell'altezza dello schermo ferromagnetico. Rispetto al valore standard, verranno considerati sia valori inferiori che superiori, al fine di avere un'idea del comportamento. In particolare, l'altezza dello schermo, in un'applicazione di questo tipo, è utile sia per concentrare il campo magnetico generato dalla barra di rame sia per proteggere il sensore da campi magnetici esterni. Dalle simulazioni, la situazione considerata è ideale, ossia non è presente un campo magnetico esterno; quindi, vengono valutate solo le prestazioni di concentrazione del campo. Dalla Tabella 5.3 è possibile notare

Altezza[mm]	$B_x[mT]$	$B_y[mT]$	$B_z[mT]$
10	26.251	$5.066 \cdot 10^{-2}$	0.118
15	27.978	$6.999 \cdot 10^{-2}$	0.155
20	28.743	$3.819 \cdot 10^{-2}$	0.196

Tabella 5.3: Valore campo magnetico al variare dell'altezza dello schermo

come la componente B_x assuma un valore più basso per un'altezza dello schermo inferiore; invece, aumentando l'altezza, il valore di campo magnetico B_x ha un incremento rispetto ai casi in cui l'altezza è minore.

Spessore schermo

Lo spessore dello schermo ha un ruolo importante nel corretto funzionamento del sensore e del sistema di misura. Per valutare ciò, è stata prima effettuata una valutazione del valore del campo magnetico nel punto in cui si trova il sensore; successivamente, si è osservato per quali valori di campo magnetico e quindi di corrente, lo schermo satura e non concentra più le linee di campo. Dalla Tabella 5.4 è possibile osservare come la componente B_x vari al variare dello spessore dello schermo.

Spessore[mm]	$B_x[mT]$	$B_y[mT]$	$B_z[mT]$
0.5	22.363	0.179	-0.108
1.5	27.978	$6.999 \cdot 10^{-2}$	0.155
3	27.901	0.146	0.212

Tabella 5.4: Valore campo magnetico al variare dello spessore dello schermo

In particolare, aumentando lo spessore, la componente B_x del campo magnetico aumenta; come notato per le altre dimensioni. Tuttavia, oltre un certo spessore, il campo non aumenta in modo significativo.

5.2 Posizione sensore

In questa sezione verranno analizzate le linee di campo magnetico generate tra le estremità dello schermo ferromagnetico. In particolare, nel Capitolo 4 si è osservato che, quando il sensore non è perfettamente centrato all'interno dello schermo, il valore di tensione in uscita e, di conseguenza, il campo magnetico rilevato risultano inferiori rispetto al caso di perfetta simmetria al centro dello schermo. Pertanto, in questa parte, verranno analizzati gli andamenti di ogni componente di campo per comprendere le cause di questo comportamento e determinare la posizione ottimale in cui il sensore si dovrebbe collocare rispetto allo schermo ferromagnetico. L'orientamento degli assi che viene utilizzato in questo capitolo è quello riportato in basso a destra nella Figura 5.1. Effettuando delle simulazioni in "Magnetostatic", è stato possibile osservare, tramite dei risultati "Post-processing", il singolo andamento delle linee di campo nel punto di interesse. Come prima componente viene analizzata quella relativa al campo magnetico B_x , ossia quella catturata dai concentratori magnetici del sensore, che viene poi trasformata in una componente verticale rilevata dagli elementi Hall. L'andamento viene calcolato su tutto l'asse x, scegliendo una posizione pari a 0 mm sull'asse y e pari a 4 mm sull'asse z, ovvero il punto in cui il monitor era posizionato nelle simulazioni precedenti, corrispondente alla posizione del sensore nell'applicazione reale. Dall'andamento riportato nella Figura 5.3 è possibile notare che al centro dello schermo, nella posizione in cui il sensore si trova, la componente B_x del campo magnetico è leggermente inferiore rispetto ai lati. Questo è causato principalmente dal fatto che, ai bordi dello schermo, il campo magnetico è più elevato poiché risente della presenza dello schermo ferromagnetico, il quale concentra le linee di campo. Posizionare il sensore al centro, nonostante il valore leggermente più basso del campo, consente di ottenere una simmetria rispetto al posizionamento vicino ai bordi. Quanto detto assume maggiore rilevanza anche in relazione all'andamento della componente del campo magnetico B_z lungo l'asse x. Questo viene riportato in Figura 5.4. Come si può osservare, il valore di questa componente è prossimo a zero al centro dello schermo, mentre assume dei valori

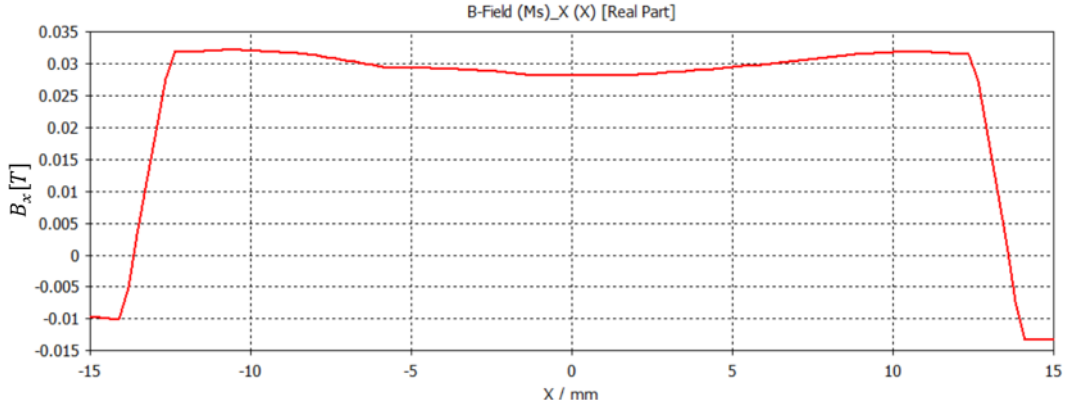


Figura 5.3: Andamento B_x lungo l'asse x

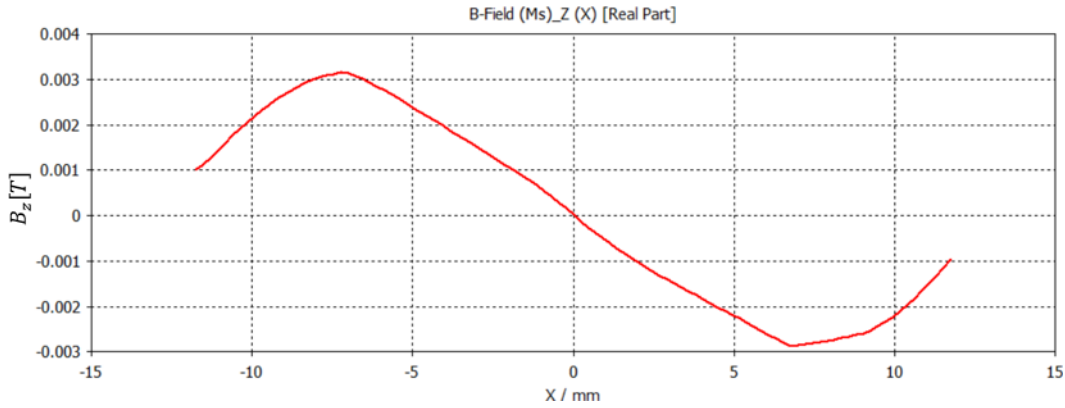


Figura 5.4: Andamento B_z lungo l'asse x

positivi e negativi rispettivamente vicino al lato destro e sinistro dello schermo. Quindi, a causa del funzionamento del sensore e della tecnologia IMC-Hall vista in 3.3.1 nel caso in cui il sensore è spostato rispetto al centro dello schermo, rileverà anche la componente B_z del campo magnetico, la quale non è trascurabile. Infine, la componente B_y lungo l'asse x non influenza l'acquisizione da parte del sensore per due principali motivi. Il primo è legato al fatto che il sensore in questione prende in considerazione solo la componente B_x del campo, che poi viene trasformata in componente verticale lungo l'asse z; quindi, c'è un rilevamento sull'asse z che in alcun modo può essere influenzato da B_y . Il secondo motivo è legato al fatto che il valore del campo di questa componente è notevolmente inferiore rispetto alle altre due. Infatti, è circa due ordini di grandezza inferiore rispetto alla B_x e di un ordine di grandezza inferiore rispetto a B_z .

Oltre a quanto illustrato finora, è possibile osservare la componente B_x nelle altre due direzioni, ossia lungo y e lungo z, per effettuare alcune riflessioni sulla posizione in cui il sensore dovrebbe essere localizzato. Dalla Figura 5.6 si può osservare l'andamento di B_x lungo l'asse y. Si può notare immediatamente che il campo nel punto situato a 0 mm è maggiore; allontanandosi da questo punto, diminuisce la

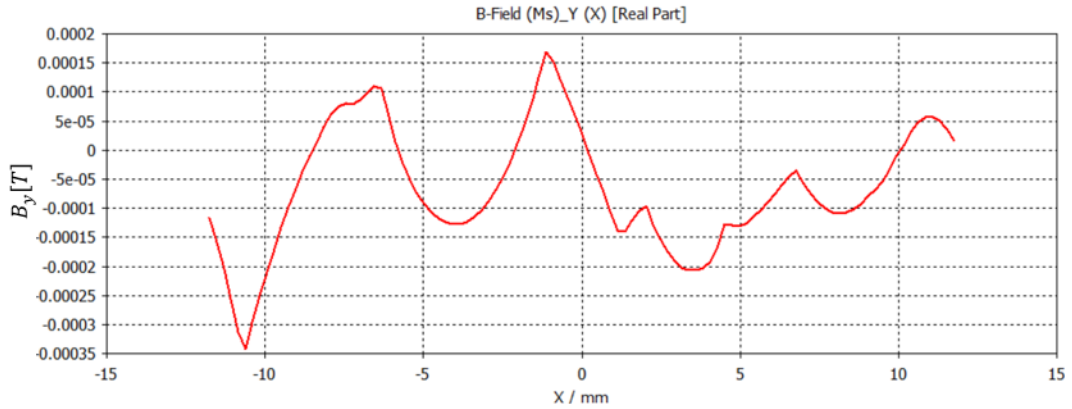


Figura 5.5: Andamento B_y lungo l'asse x

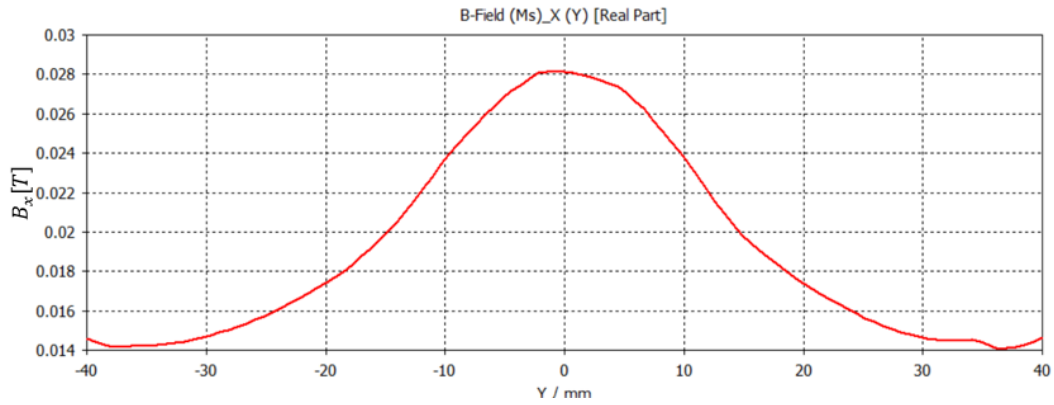


Figura 5.6: Andamento B_x lungo l'asse y

sua intensità. Quanto osservato permette di affermare che lungo l'asse y il sensore dovrebbe essere posizionato il più possibile al centro dello schermo ferromagnetico. L'ultimo andamento da analizzare è quello relativo alla componente B_x lungo l'asse z. In questo caso, si può osservare dal grafico riportato in 5.7 che il valore del campo magnetico è massimo nel punto immediatamente superiore rispetto al termine della barra di rame e successivamente subisce un'attenuazione. Da questo grafico si può dedurre che il sensore dovrebbe essere posizionato immediatamente sopra la barra di rame su cui si desidera misurare la corrente. Questo posizionamento può essere limitato dallo spessore del PCB, ma la regola generale rimane quella di posizionare il sensore il più vicino possibile alla barra di rame. Dopo aver esaminato tutti i grafici relativi agli andamenti del campo magnetico in presenza dello schermo ferromagnetico, è possibile dedurre la precisa posizione in cui il sensore deve essere collocato per effettuare delle misurazioni nel modo più accurato possibile, riducendo l'ammontare di campo magnetico che non si accoppia correttamente con l'elemento Hall. Questo punto corrisponde a quello impostato per le simulazioni effettuate nella sezione 5.1. In questo caso, lungo l'asse z, il sensore non è stato posizionato immediatamente sopra la barra di rame, ma è stato lasciato uno spazio di 2 mm , poiché nell'applicazione

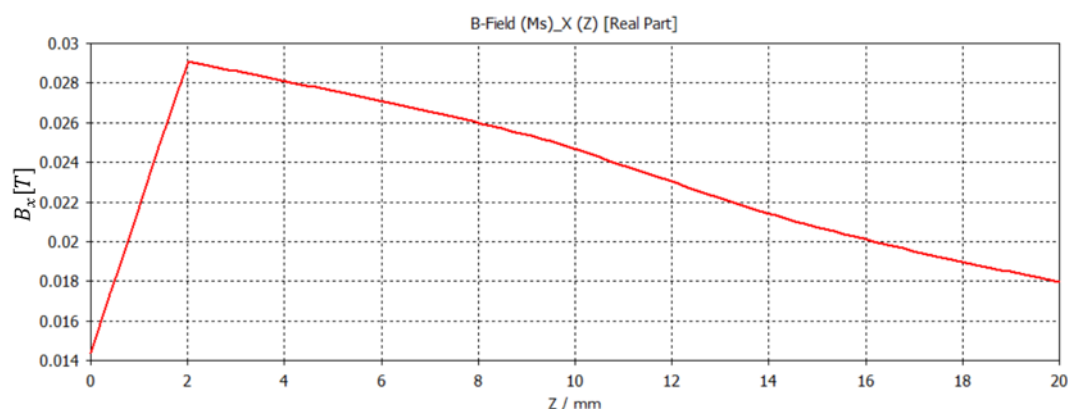


Figura 5.7: Andamento B_x lungo l'asse z

reale è presente la scheda elettronica necessaria all'acquisizione e al condizionamento del segnale.

Capitolo 6

Progettazione elettronica

All'interno di questo capitolo vengono riportati tutti i procedimenti effettuati per lo sviluppo della scheda elettronica utilizzata per l'acquisizione delle correnti di fase dell'inverter. Nella prima sezione verranno presentati gli obiettivi del progetto; successivamente, verrà descritta una parte dedicata alle simulazioni con il software LTspice eseguite sul circuito di condizionamento. In una sezione successiva, verrà descritto nel dettaglio il processo di progettazione elettronica, partendo dalla creazione dello schematico e fino alla realizzazione del layout del PCB. Infine, nell'ultima sezione verrà illustrata la procedura di collaudo e verifica di funzionamento eseguita sulla scheda prodotta.

6.1 Obiettivi di progetto

Lo sviluppo della scheda elettronica è stato eseguito partendo dalle specifiche di progetto richieste. In particolare, la scheda è destinata alla misurazione della corrente elettrica fino a $600 A_{pk}$. È alimentata a $24 V$ e produce un segnale di uscita di $20 V_{pk}$, utilizzabile per successive elaborazioni da parte di altre sezioni del sistema generale. Le specifiche richieste erano quindi relative ad una scheda in grado di misurare la corrente di fase dell'inverter, montando il sensore Melexis IMC-Hall più adatto a questo obiettivo. Sostanzialmente, la scheda doveva integrare l'elettronica necessaria per convertire il segnale di alimentazione nei valori di tensione richiesti internamente, supportare la configurazione del sensore Melexis utilizzato e, infine, implementare la modalità di uscita richiesta. Le specifiche tecniche sono:

- Corrente misurabile: $600 A_{pk}$;
- Tensione di alimentazione: $24 V$;
- Tensione di uscita: $20 V_{pk}$;

6.2 Simulazioni

Prima di iniziare la progettazione della scheda elettronica, sono state eseguite delle simulazioni del circuito di condizionamento del segnale utilizzando il software

LTSpice, al fine di verificare che l'uscita dal circuito fosse quella desiderata. Per raggiungere questo obiettivo, è stato in parte ripreso il circuito di condizionamento attualmente usato per misurare le correnti di fase nella scheda LOC315 con il LEM LF 510-S. In quel caso, l'uscita del sensore era in corrente e veniva utilizzato uno shunt resistivo per ottenere un determinato valore di tensione in ingresso al circuito di condizionamento. In questa nuova configurazione, per ottenere lo stesso valore, è stato impiegato un amplificatore operazionale in configurazione differenziale in ingresso alla parte di condizionamento che veniva utilizzata anche sulla LOC315. Il circuito utilizzato per fare ciò, è riportato in Figura 6.1.

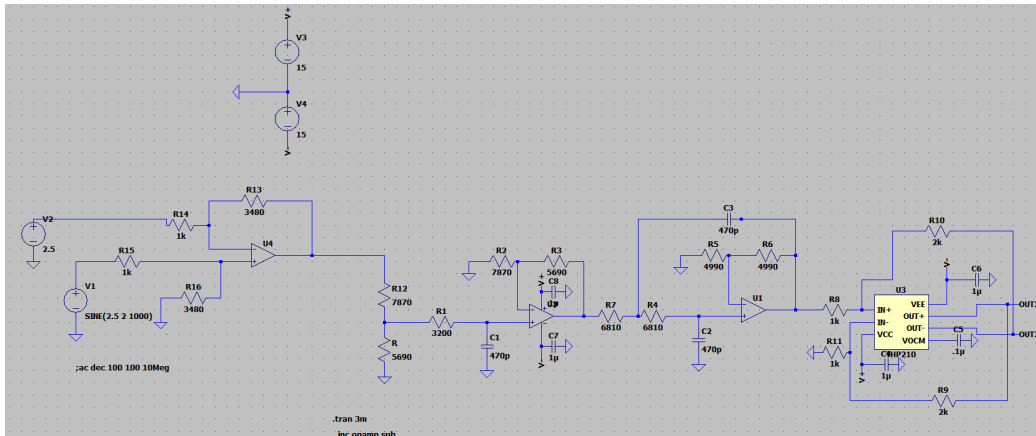


Figura 6.1: Schematico LTSPICE - Circuito di condizionamento

Il sensore viene rappresentato come un generatore di tensione con un offset di $2,5\text{ V}$ ed un'ampiezza del segnale di 2 V . Successivamente, come descritto in precedenza, viene utilizzato un amplificatore operazionale in configurazione differenziale per eliminare l'offset corrispondente al valore di tensione in uscita quando non è applicato alcun segnale d'ingresso. Di seguito, è presente un partitore di tensione e il segnale viene elaborato tramite una catena di filtri costituiti da amplificatori operazionali, ottenendo complessivamente un filtro di terzo ordine con una frequenza di taglio di 50 kHz , come visto per la LOC315, il quale genera un segnale sinusoidale di 20 V_{pk} . Eseguendo la simulazione di questo circuito e andando a misurare la tensione ai capi delle uscite OUT2+ e OUT2-, è possibile osservare che il segnale ha un valore di 20 V_{pk} . Quanto descritto è mostrato dall'andamento del segnale di uscita rappresentato in Figura 6.2.

L'intero circuito è stato condizionato sulla base di questi valori. Lo schematico, che verrà presentato nella sezione successiva, è stato progettato partendo da questo circuito, inserendo delle modifiche per l'applicazione reale. Infatti, la parte del generatore di corrente è stata sostituita con il sensore, insieme alle resistenze e ai condensatori necessari per il corretto funzionamento. Inoltre, come si vedrà nelle sezioni successive, sono stati inseriti dei trimmer resistivi per consentire la regolazione del partitore di tensione tra il primo ed il secondo stadio di amplificazione.

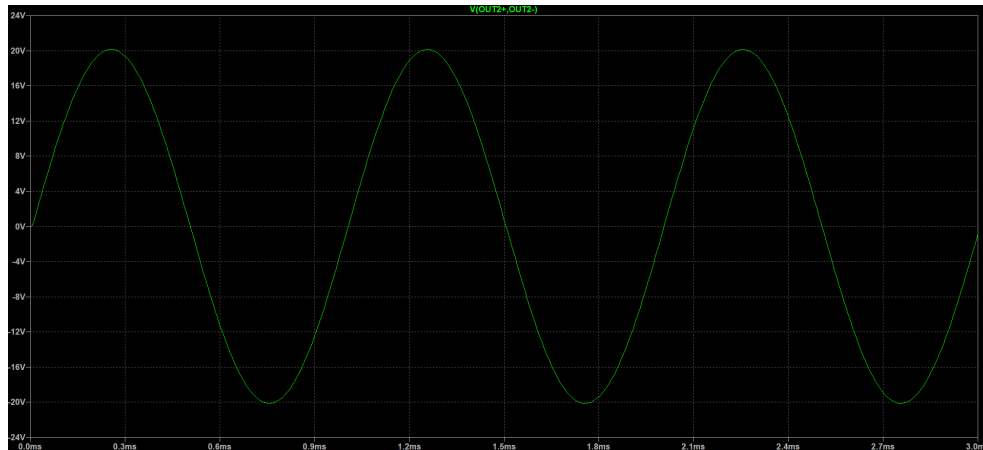


Figura 6.2: Simulazione LTSPICE - Andamento segnale di uscita

6.3 Schematico

La prima azione effettuata per la produzione della scheda elettronica è stata la creazione dello schema elettrico in KiCAD. Questa suite open source di software è stata utilizzata sia per la progettazione dello schema elettrico che per il circuito stampato. In base alle specifiche richieste, la scheda elettronica è divisa in due diverse parti:

- Sezione di alimentazione;
- Sezione di acquisizione e condizionamento del segnale;

Lo schematico progettato è stato realizzato prendendo in considerazione la scheda LOC315, attualmente utilizzata per l'acquisizione e il condizionamento del segnale delle tre fasi nell'inverter con i sensori LEM. Lo stadio di alimentazione è riportato in Figura 6.3. Nella parte iniziale del circuito è presente un fusibile, utilizzato come dispositivo di protezione in caso di correnti elevate. Inoltre, è stato inserito anche un diodo per eventuali inversioni di corrente. Di seguito, il circuito è suddiviso in due rami: uno per l'alimentazione destinata al sensore, ossia quella di 5 V , e uno per l'alimentazione degli amplificatori operazionali utilizzati nella parte di condizionamento del circuito, con un valore di $\pm 15\text{ V}$. Per quanto riguarda la parte di alimentazione necessaria per il sensore, è stato utilizzato un convertitore DC-DC, il quale converte la tensione iniziale di ingresso di 24 V in una tensione di 6 V . Successivamente, in cascata a questo componente, viene utilizzato un regolatore di tensione lineare per ottenere la tensione desiderata di 5 V . Nel ramo relativo all'alimentazione degli amplificatori operazionali, è stato utilizzato un convertitore DC-DC dual output da 24 V in ingresso e una tensione di uscita di $\pm 15\text{ V}$. Inoltre, tra questi componenti sono stati inseriti dei condensatori e induttori per formare i filtri necessari a mantenere il segnale di alimentazione stabile e limitare il rumore.

Lo stadio di acquisizione e condizionamento del segnale è riportato in Figura 6.4. Questo corrisponde a quanto presentato nella sezione 6.2, con alcune modifiche legate

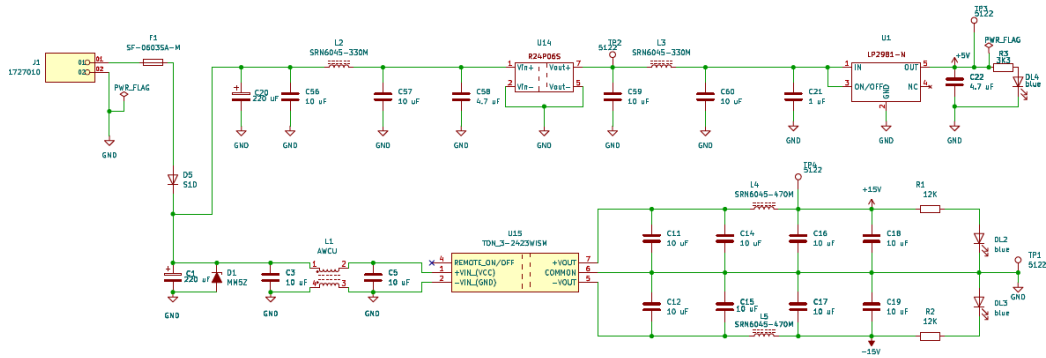


Figura 6.3: Schematico KiCAD - Alimentazione

a una situazione non ideale, a differenza della simulazione LTspice. Nella prima parte del circuito è presente il sensore Melexis MLX91218, con la configurazione richiesta per il corretto funzionamento, riportata in [5]. Successivamente, come detto in precedenza, il segnale di tensione in uscita dal sensore viene inviato ad un amplificatore operazionale in configurazione differenziale, dove viene sottratto l'offset della misura e il segnale viene amplificato. A differenza dello schema simulato su LTspice (6.1), in uscita dell'amplificatore operazionale in configurazione differenziale è presente un trimmer resistivo, necessario per effettuare la calibrazione in base al livello di attenuazione presente nel valore della tensione di uscita dal sensore. Nello stadio successivo il segnale viene amplificato e filtrato mediante un filtro del 3° ordine, con una frequenza di taglio di 50 kHz , per l'eliminazione dei disturbi ad alta frequenza; fino ad ottenere l'uscita richiesta di $20 V_{pk}$ tramite un amplificatore differenziale. Questa configurazione viene utilizzata per l'acquisizione e il condizionamento di tutte e tre le fasi dell'inverter. In Figura 6.5 e in Figura 6.6 sono riportati i circuiti di acquisizione e condizionamento anche delle altre due fasi. È possibile osservare da queste figure come i tre circuiti siano identici, a eccezione dell'utilizzo di masse diverse. Infatti, per ogni fase viene utilizzata una massa denominata rispettivamente GNDA, GNDB e GNDC, che viene poi collegata alla massa generale della scheda tramite dei jumper.

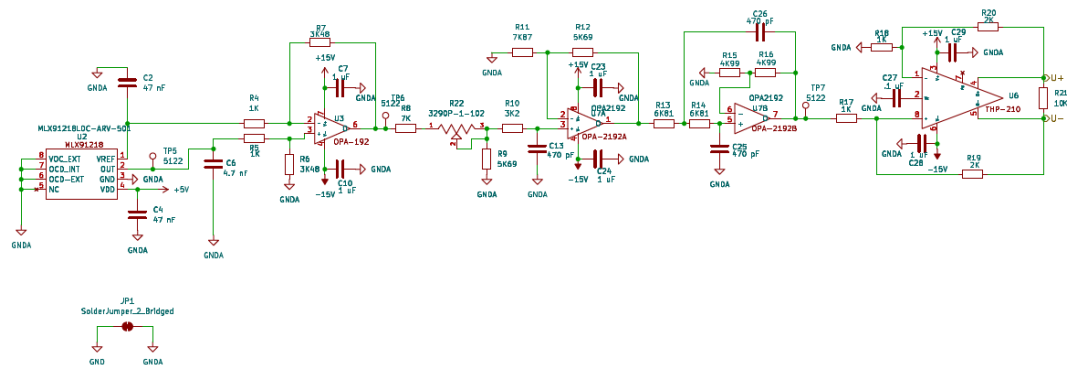


Figura 6.4: Schematico KiCAD - Acquisizione e condizionamento fase U

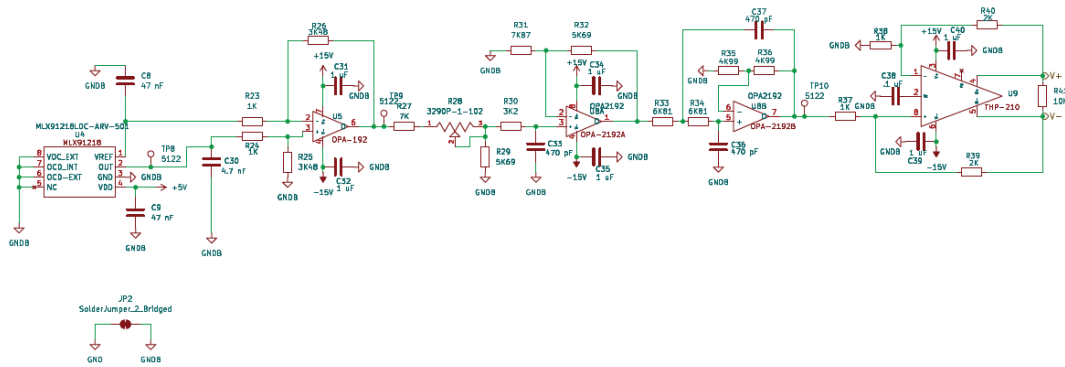


Figura 6.5: Schematico KiCAD - Acquisizione e condizionamento fase V

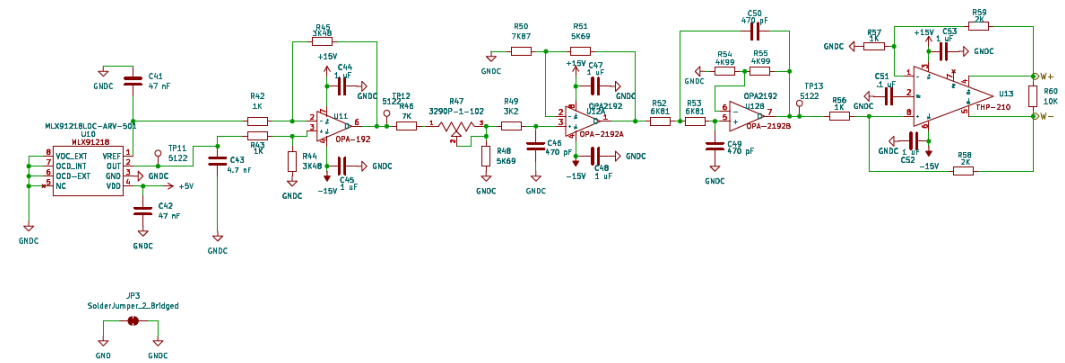


Figura 6.6: Schematico KiCAD - Acquisizione e condizionamento fase W

Una volta completata la parte riguardante lo schematico, è stata generata la documentazione completa di questa fase, visibile in Figura 6.7. Lo schematico completo presenta una prima pagina in cui è riportato il titolo del progetto e le principali sezioni in cui esso è suddiviso; nella seconda pagina è mostrato il contenuto del "Main", ossia la parte principale del progetto, in cui sono elencate le diverse sottoparti di cui è composto. Da questa pagina è possibile osservare la struttura della parte di alimentazione e della parte di acquisizione e condizionamento delle tre fasi, connesse poi a un connettore per l'uscita del segnale dalla scheda. Nelle quattro pagine successive sono riportati i circuiti per l'alimentazione e le tre fasi di condizionamento. Nella penultima pagina è presente lo storico delle revisioni del progetto, attualmente vuoto poiché questa è la prima versione della scheda. Infine, nell'ultima pagina sono riportati i simboli e le scritte che verranno stampate sul PCB, insieme ai fiducials utilizzati per le macchine di assemblaggio, al fine di garantire l'orientamento della scheda e il corretto fissaggio dei componenti. Come verrà illustrato nella parte di collaudo della scheda elettronica, partendo da questo schematico sono state apportate alcune modifiche necessarie per garantire un funzionamento ottimale del circuito.

Capitolo 6 Progettazione elettronica

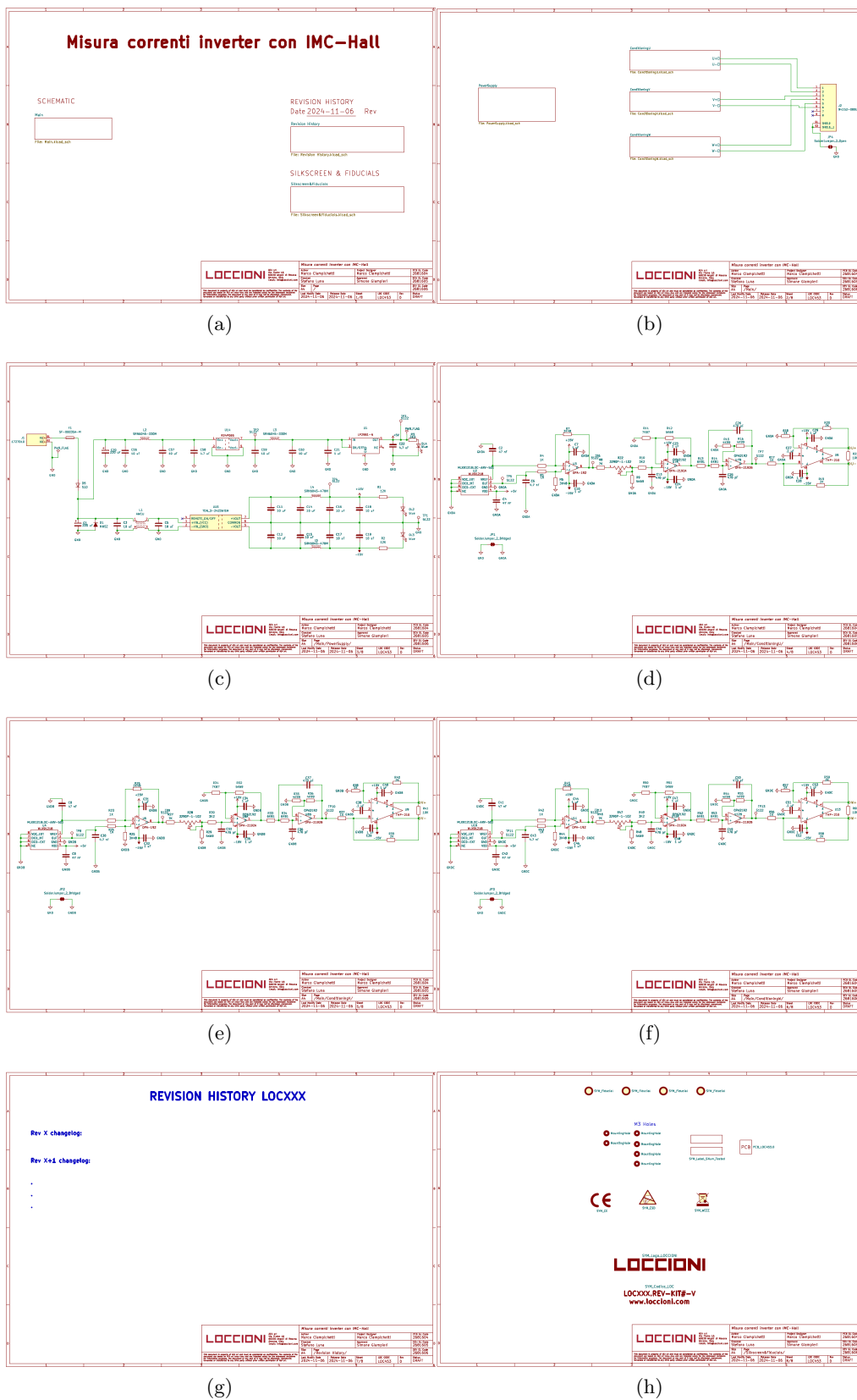
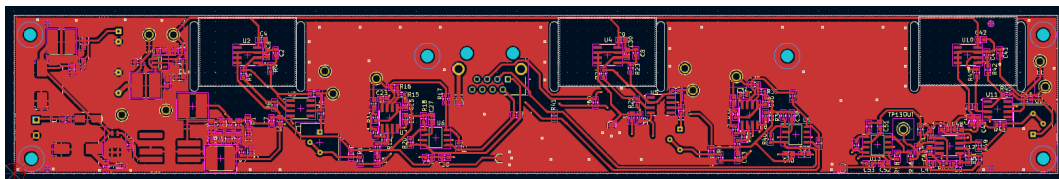


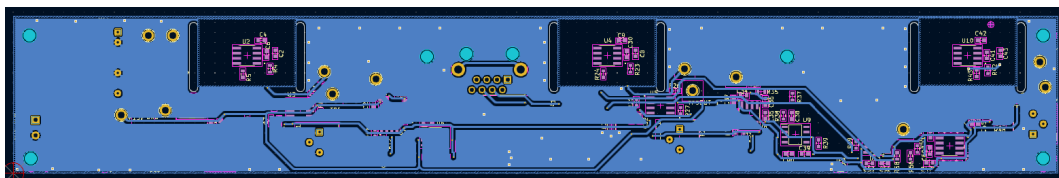
Figura 6.7: Schematico completo

6.4 Layout del PCB

Dopo aver sviluppato lo schematico del circuito, il passo successivo è stato quello di sviluppare il layout del PCB. In particolare, la prima operazione eseguita è stata quella di assegnare a ciascun simbolo utilizzato nello schematico la sua impronta, chiamata anche footprint. Oltre a questo, sono stati assegnati anche dei modelli 3D ad ogni componente, per poter visualizzare questo modello su KiCAD successivamente. Il PCB è stato sviluppato su due layers: quello superiore e quello inferiore. Dopo aver assegnato le impronte e i corrispondenti modelli 3D, è iniziata la disposizione dei diversi componenti sulla scheda. Inizialmente, sono stati disposti i componenti relativi allo stadio di alimentazione, vicini tra di loro, in modo che le connessioni tra i diversi elementi fossero facilitate e non aggrovigliate. Dopo aver completato questa fase, si è proseguito disponendo i componenti relativi all'acquisizione e al condizionamento del segnale per tutte e tre le fasi. Nella parte dell'editor del layout sono stati effettuati sei fori sulla PCB per l'inserimento degli schermi ferromagnetici, che concentrano il campo magnetico della barra di rame in cui scorre corrente, nel punto in cui è situato il sensore utilizzato. Oltre a questi, sono stati inseriti altri sei fori per le viti di montaggio: quattro ai quattro angoli della scheda e due al centro, per rendere favorevole il fissaggio ad un supporto che manterrà il tutto compatto. Dopo aver completato la disposizione, è stato effettuato l'instradamento delle piste, ossia il collegamento in rame dei vari componenti e delle diverse parti del circuito. In un primo momento, sono state tracciate le piste di segnale, mentre in un secondo momento quelle relative all'alimentazione e alle masse. Questo è stato fatto rispettando le regole generali di progettazione elettronica e sfruttando i due strati su cui è sviluppata la scheda. Infine, sono stati aggiunti i piani di massa sia sullo strato superiore sia su quello inferiore, per ridurre le interferenze elettromagnetiche e garantire una maggiore affidabilità. Nella Figura 6.8 sono riportati i due diversi strati che compongono la scheda elettronica.



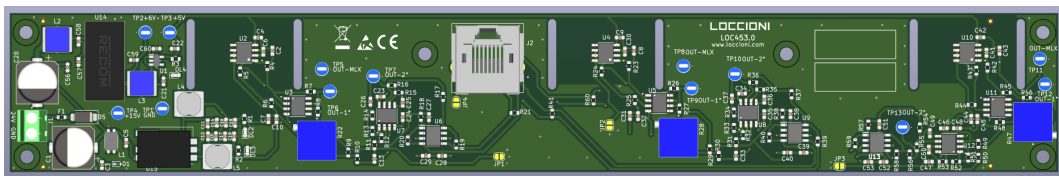
(a) Layer - Superiore



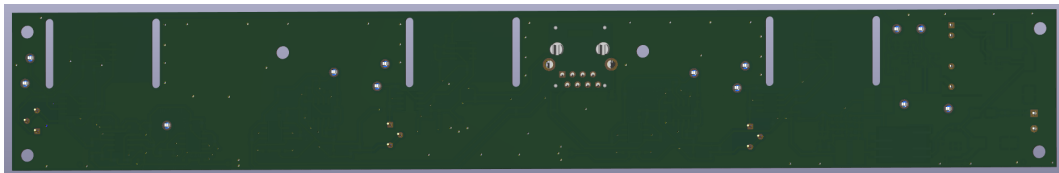
(b) Layer - Inferiore

Figura 6.8: Layers della scheda

Successivamente, è stato generato il modello 3D di tutta la scheda elettronica, come riportato in Figura 6.9. Le dimensioni finali della scheda ottenuta sono $25,95\text{ cm}$ di lunghezza e $3,9\text{ cm}$ di larghezza. Alla scheda elettronica è stato assegnato un nome identificativo: LOC453. Dopo aver generato la distinta dei componenti e altri file utili per il posizionamento e il montaggio, la scheda è stata inviata per la produzione. Rispetto al progetto originale (mostrato in Figura 6.7), sono state modificate le resistenze dei partitori di tensione delle tre fasi. Ciò è stato necessario poiché le resistenze da $7\text{ k}\Omega$ non erano disponibili nelle dimensioni delle impronte previste. A causa di questo, si è scelto un nuovo valore di resistenza da $6,2\text{ k}\Omega$, modificabile tramite un trimmer resistivo in serie, per garantire un livello di sicurezza maggiore in caso di attenuazione del segnale in uscita dal sensore.



(a) Modello 3D - Fronte



(b) Modello 3D - Retro

Figura 6.9: Modello 3D della scheda

6.5 Collaudo della scheda

Una volta che la PCB è stata prodotta e successivamente assemblata con tutti i suoi componenti, è stato effettuato il collaudo per verificare che funzionasse come previsto, prima di utilizzarla per eseguire test e misurazioni. La scheda è riportata in Figura 6.10.

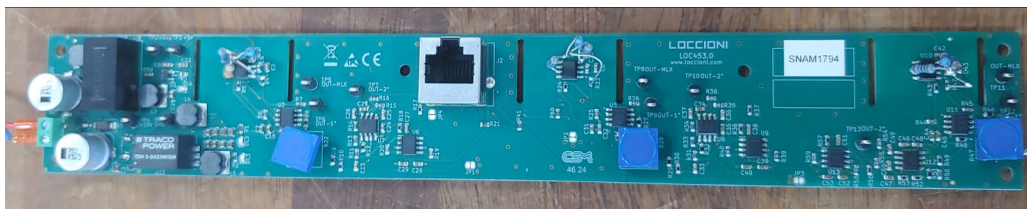


Figura 6.10: LOC453

Inizialmente, la scheda elettronica è stata connessa a un alimentatore da banco per verificare il suo corretto funzionamento. In particolare, una volta che la scheda è stata

collegata all'alimentatore impostato a 24 V, si sarebbero dovuti accendere i led relativi alla parte di alimentazione e la misura sui test point, inseriti in fase di progettazione, avrebbe dovuto rilevare da un lato 15 V e dall'altro i 5 V necessari all'alimentazione dei sensori. Tuttavia, in una prima fase, ciò non si è verificato e il problema è stato individuato nell'induttanza L1, relativa alla parte dell'alimentazione (6.3). Infatti, questa è stata collegata in maniera errata durante la fase di progettazione e, una volta rimossa e cortocircuitato i pin, il circuito di alimentazione ha funzionato correttamente. Successivamente, una volta verificato il funzionamento della parte di alimentazione, si

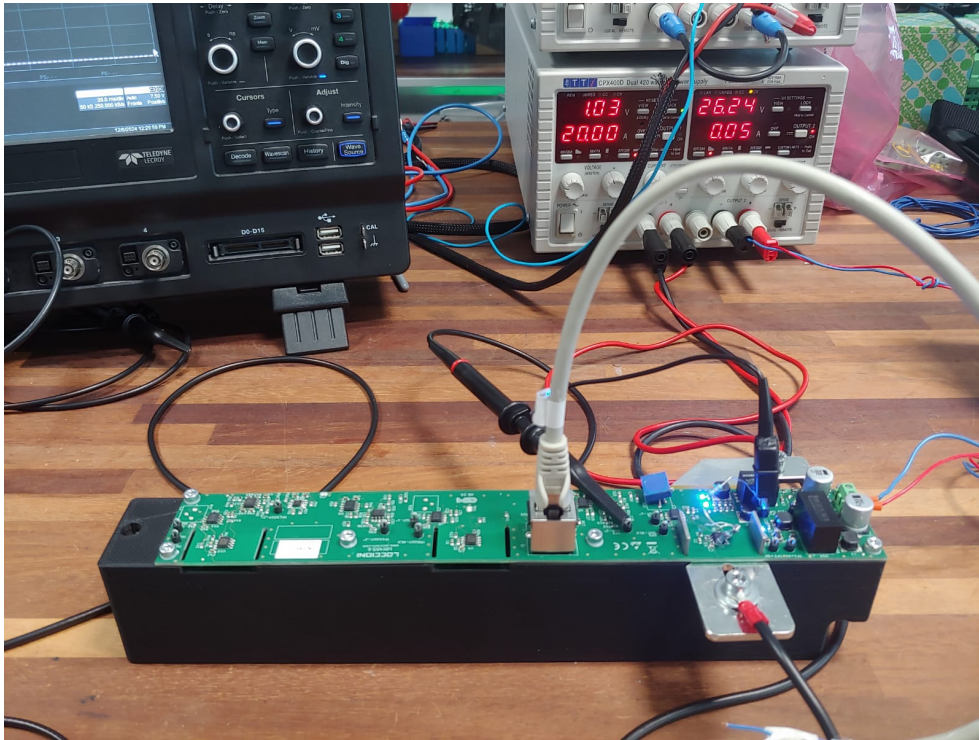


Figura 6.11: Collaudo LOC453

è proceduto a controllare che tutti i sensori e gli amplificatori operazionali ricevessero correttamente il segnale dell'alimentazione. Dopo questa verifica, si è accertato se il sensore funzionasse correttamente quando una corrente veniva fatta scorrere nella barra di rame. Utilizzando un multimetro, si è misurata la tensione dei pin relativi alla tensione di riferimento e alla tensione di uscita del sensore. Tramite questa operazione, si è potuto osservare che la tensione di riferimento e quella di uscita erano molto più basse del valore atteso, ossia pari al 50 % del valore della tensione di alimentazione. Inoltre, quando veniva fatta scorrere la corrente, la tensione di riferimento, anziché rimanere fissa, variava anch'essa con la tensione di uscita. Dopo una verifica, si è constatato che la resistenza presente in uscita dal pin della tensione di riferimento era inferiore al valore limite consigliato da utilizzare ($>200\text{ k}\Omega$) e questo provocava un malfunzionamento. Per risolvere questo problema sono state individuate due diverse soluzioni. La prima prevedeva l'innalzamento di tutte le resistenze dello

stadio relativo all'amplificatore operazionale in configurazione differenziale, portando ad un valore di $215\text{ k}\Omega$ le resistenze R4 e R5, e impostando un valore di $750\text{ k}\Omega$ le resistenze R6 e R7, mostrate in Figura 6.4. Questo procedimento veniva replicato per tutte e 3 le fasi. Il principale problema legato a questa soluzione era il rumore che poteva essere generato da queste resistenze di valore elevato; inoltre, un altro problema poteva essere quello relativo alla stabilità dell'intero circuito. La seconda soluzione, scelta per il proseguire il collaudo, prevedeva la rimozione della resistenza R4 e l'inserimento di un partitore di tensione posizionato tra il pin di alimentazione del sensore e massa. Utilizzando due resistenze da $2\text{ k}\Omega$, si otteneva una tensione pari al 50 % di quella di alimentazione, collegata in ingresso all'amplificatore operazionale al posto della tensione di riferimento. Inoltre, con due resistenze di quel valore, al posto della resistenza R4, l'amplificatore operazionale aveva in ingresso il parallelo tra le due resistenze inserite, ossia $1\text{ k}\Omega$, cioè il valore richiesto dal progetto dello schematico. In questo modo, la scheda elettronica funzionava correttamente, a meno di un offset residuo riscontrato in uscita dall'amplificatore operazionale in configurazione differenziale. A causa degli ulteriori stadi di amplificazione, questo offset aumentava, rendendo la misura imprecisa. Per la rimozione dell'offset, è stata inserita una resistenza tra il valore della tensione ottenuta dal partitore e massa, oppure tra il valore della tensione ottenuta dal partitore e il pin di alimentazione, a seconda se l'offset era maggiore o minore di zero. La resistenza da inserire era molto più grande rispetto a quelle utilizzate per il partitore di tensione. In particolare, l'esatto valore della resistenza dipendeva dal valore di offset riscontrato e sono state eseguite delle prove per identificare il valore di resistenza più adatto per la rimozione dell'offset. Ad esempio, nella prima sezione testata(fase U), la resistenza inserita era dell'ordine di $820\text{ k}\Omega$. Diversamente, nelle fasi V e W sono stati utilizzati diversi valori di resistenza; in particolare, per la fase V un valore di $470\text{ k}\Omega$ e per la fase W un valore di $3,9\text{ M}\Omega$. Infatti, l'offset che si presentava in uscita era causato dal sensore utilizzato e dallo stadio relativo all'amplificatore operazionale in configurazione differenziale. Una volta terminata questa fase, è stata eseguita una calibrazione al fine di regolare il guadagno del circuito, così da ottenere una misura il più accurata possibile. Per fare ciò, per ogni fase è stata sostituita la resistenza in serie al trimmer rivelatasi troppo elevata. In particolare, le tre resistenze rimosse corrispondono a R8 per la fase U, R27 per la fase V e R46 per la fase W. Dal valore di $6,2\text{ k}\Omega$, sono state modificate inserendo delle resistenze di valore di $5,62\text{ k}\Omega$. Inoltre, per una regolazione più fine del guadagno, per ogni fase è stato regolato il trimmer resistivo affinché il valore di uscita corrispondesse a quello desiderato. Quanto descritto è stato fatto inizialmente per la scheda LOC453, sulla quale sono stati saldati dei sensori MLX91218LDC-ARV-500, dotati di una sensibilità di $40\frac{\text{mV}}{\text{mT}}$. Successivamente, lo stesso procedimento, con una diversa regolazione, è stato effettuato anche per un'altra scheda, su cui sono stati montati i sensori MLX91218LDC-ARV-501, con una sensibilità di $60\frac{\text{mV}}{\text{mT}}$. In particolare, le uniche differenze riguardano i valori delle resistenze utilizzate per bilanciare l'offset nel partitore di tensione. Per la fase U è stata impiegata una

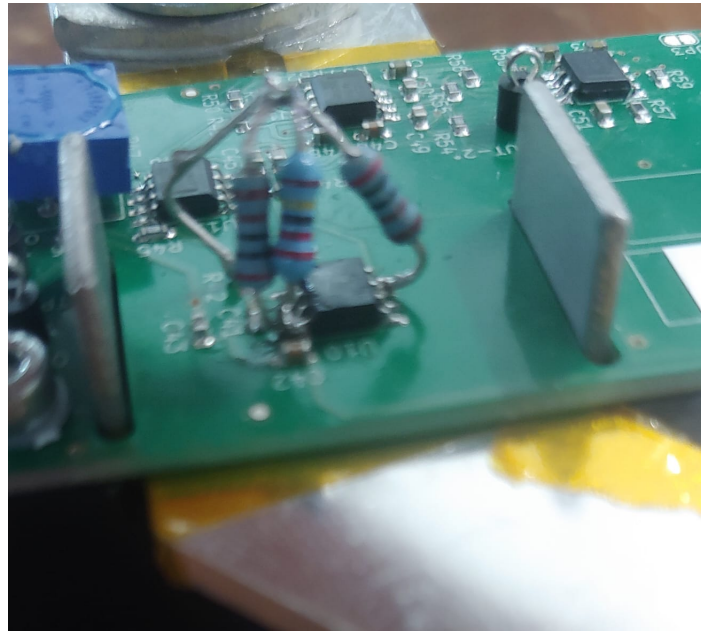


Figura 6.12: Partitore di tensione

resistenza da $390\text{ k}\Omega$, mentre per le fasi V e W è stata utilizzata una resistenza di $2\text{ M}\Omega$. Inoltre, per ogni fase, durante la calibrazione, si è potuto osservare che il valore delle resistenze in serie poste prima del trimmer (R8, R27 e R46) era anche in questo caso troppo elevato. Per questo motivo, sono state sostituite con altre resistenze dal valore più basso; in particolare, è stato scelto un valore di $5,62\text{ k}\Omega$ per R8 e R27; invece, per R46 è stata inserita una resistenza da $6,11\text{ k}\Omega$.

Con questo si conclude la parte relativa alla verifica di funzionamento della scheda e alla sua calibrazione. Successivamente, nel Capitolo 7, verranno riportate le principali misure eseguite con queste due schede elettroniche.

Capitolo 7

Test e confronti delle schede elettroniche

All'interno di questo capitolo verranno riportate tutte le misurazioni e i test eseguiti con la scheda elettronica LOC453. Nella prima sezione verrà descritta tutta la strumentazione utilizzata per eseguire le misurazioni; nelle successive saranno illustrate tutte le prove effettuate e i relativi risultati ottenuti, al fine di elaborare delle riflessioni sulle prestazioni della scheda.

7.1 Strumentazione utilizzata

In questa sezione verrà riportata la strumentazione utilizzata nell'esecuzione delle misurazioni effettuate con la scheda LOC453.

- **Alimentatore da banco AIM-TTI INSTRUMENTS CPX200D:** è un alimentatore digitale a doppio canale che fornisce corrente continua con una tensione massima di 60 V e fino a 10 A max per output. Questo strumento è stato utilizzato per alimentare la scheda elettronica LOC453 a 24 V durante l'esecuzione delle misure.
- **Multimetro Fluke 289:** è un multimetro digitale avanzato, progettato per professionisti e tecnici che necessitano di uno strumento versatile e altamente preciso per la misurazione di tensione, corrente, resistenza e molte altre grandezze elettriche. In questo caso, è stato utilizzato per la lettura dei valori di tensione in uscita dalla LOC453 nelle misure in continua e in alternata.
- **Calibratore Fluke 5522A:** è un calibratore multifunzionale che permette la calibrazione di strumenti di misura in ambito elettronico. È progettato per fornire correnti e tensioni estremamente precise, con tolleranze ridotte. Durante queste misurazioni, è stato utilizzato sia come riferimento affidabile per misure in corrente continua, sia per misurare il valore dell'uscita della LOC453 al variare della frequenza in corrente alternata.
- **Generatore ITECH IT6015C-80-450:** è un alimentatore in corrente continua programmabile e bidirezionale che permette di raggiungere fino a 450 A di corrente e una tensione di 80 V . Grazie a questo strumento, è stato possibile raggiungere elevate correnti per osservare il comportamento della scheda testata.

- **Oscilloscopio da banco Teledyne LeCroy HDO4104A-MS:** è un oscilloscopio progettato per fornire elevate prestazioni nel dominio del tempo e della frequenza. È dotato di 16 canali di ingresso digitale con risoluzione a 12 bit e sono disponibili in larghezze di banda da 200 MHz fino a 1 GHz . Questo oscilloscopio utilizza la tecnologia HD4096 che consente l'acquisizione e la visualizzazione di segnali fino a 1 GHz con un'elevata velocità di campionamento e una risoluzione 16 volte superiore rispetto agli altri oscilloscopi digitali. La forma d'onda viene visualizzata con elevata precisione.
- **Supporto in PLA:** è un supporto realizzato in materiale polilattato tramite stampa 3D. Lo scopo di questo supporto è quello di sostenere il sistema di misura, composto da uno schermo ferromagnetico, una barra di rame su cui scorre corrente e la scheda LOC453. Questo sistema deve rimanere fisso e non mobile in modo da garantire acquisizioni veritiere, evitando che il movimento dello schermo o della barra di rame influenzi la misura. La scheda elettronica viene fissata al supporto tramite appositi fori, in cui vengono inserite delle viti. Inoltre, il supporto è dotato di opportuni scassi per i componenti a foro passante, per gli schermi ferromagnetici e per la barra di rame. Questo componente è mostrato in Figura 7.1.



(a) Supporto scheda - vista superiore



(b) Supporto scheda - vista laterale

Figura 7.1: Supporto scheda

7.2 MLX91218LDC-ARV-500

In questa sezione verranno riportate le acquisizioni e i test effettuati con la LOC453, dotata del sensore MLX91218LDC-ARV-500 integrato. All'interno di questa sezione ci sarà una parte dedicata alle misure in corrente continua, fino a un range massimo misurato di 450 A e un'altra parte dedicata alle misure in corrente alternata, per osservare il comportamento della scheda per diverse frequenze. Come indicato nei capitoli precedenti, l'output della scheda, secondo le specifiche di progetto, è espresso in tensione. Per trovare il corrispondente valore in corrente, è necessario effettuare una proporzione. Dai calcoli sul range massimo di misura di corrente del sensore, riportati nel Capitolo 3, si ottiene il valore massimo di corrente misurabile con questa tipologia di sensore. Considerando che l'output massimo in corrente corrisponde a una tensione massima di 20 V , è possibile calcolare la proporzione e, per ogni valore della tensione letta tramite multimetro, trovare il corrispondente valore in corrente. Nel caso in esame, con questo sensore, ricordando che ha una sensibilità di $40 \frac{\text{mV}}{\text{mA}}$, equivalente a $2 \frac{\text{mV}}{\text{A}}$, e considerando una larghezza dello schermo utilizzato di 25 mm , è possibile determinare il rapporto per ricavare la corrente. Il range massimo di corrente misurabile è di 1000 A , che corrisponde a una tensione massima di uscita dalla scheda di 20 V ; tramite una proporzione si ottiene:

$$\text{corrente misurata} : 1000 = \text{tensione di uscita} : 20 \quad (7.1)$$

In questo modo, dalla tensione di uscita letta con un multimetro è possibile ricavare direttamente il valore di corrente misurata e confrontarlo con il valore di corrente generata dal generatore ITECH. Una volta ottenuti questi valori di corrente, è stato realizzato un grafico che mette in relazione l'andamento della corrente generata e quella misurata, sia per la LOC315 che per la LOC453. Il procedimento per ottenere la corrente misurata dalla scheda LOC315 è lo stesso; tuttavia, in questo caso, il massimo valore di corrente misurabile che corrisponde a 20 V , è di 350 A , da inserire al posto di 1000 nell'equazione 7.1.

Misure in corrente continua

Le prime prove eseguite con la LOC453 sono state relative a una corrente continua in un range di $\pm 300\text{ A}$, tramite un generatore ITECH. Per ogni singola fase sono state effettuate delle prove per visualizzare l'andamento della corrente rispetto a quella generata, al fine di confrontare i risultati ottenuti con quelli misurati dalla LOC315. Il set-up utilizzato per le misure in corrente continua è riportato nella Figura 7.2. Intorno alla barra di rame è stato avvolto del nastro Kapton al fine di proteggere la scheda elettronica dalle alte temperature della barra di rame. Successivamente, è stata calcolata l'accuratezza della misura per valutare se la LOC453 si avvicinasse alle prestazioni della LOC315. Riguardo a questa caratteristica, poiché non è stato possibile calcolarla sul massimo valore rilevabile dalla scheda, è stata calcolata sul

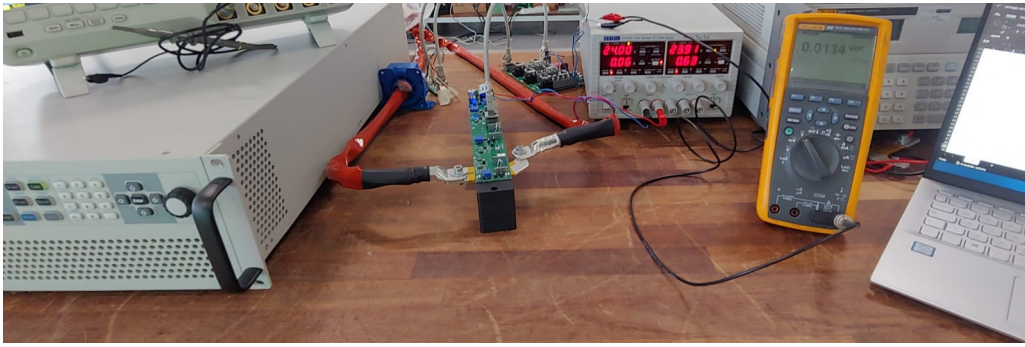


Figura 7.2: Set-up misure in corrente continua

valore misurato durante le prove effettuate. I grafici ottenuti per le tre fasi, che mostrano l'andamento della LOC453 e della LOC315 rispetto alla corrente generata dal generatore, sono riportati rispettivamente in Figura 7.3, 7.4 e 7.5. Da questi grafici

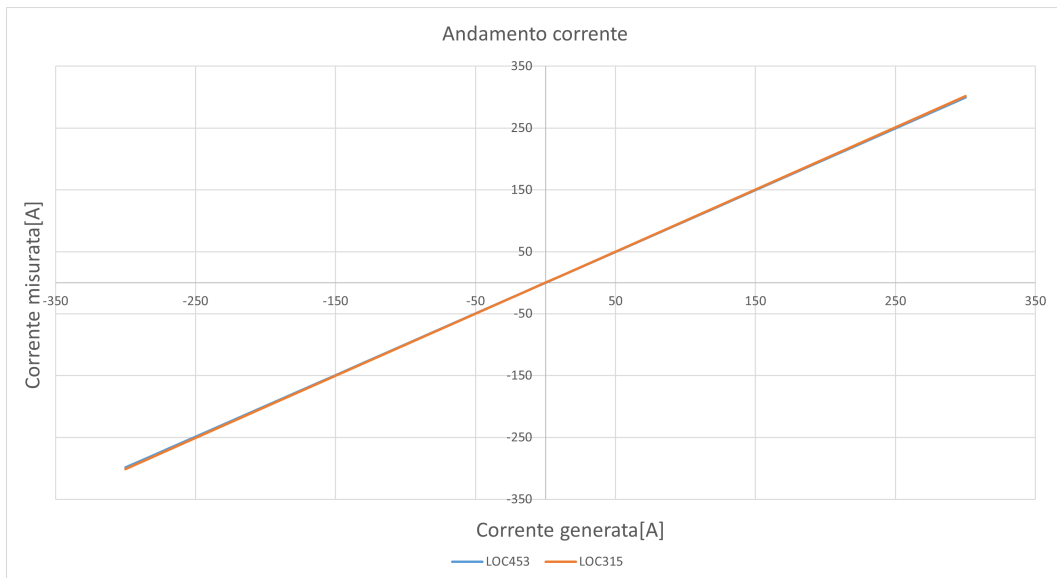


Figura 7.3: Confronto tra LOC453 e LOC315 - Fase U

è possibile osservare che l'andamento delle due schede è praticamente sovrapposto. In realtà, analizzando i valori misurati, si nota che questi differiscono per alcuni millivolt. Tuttavia, entrambe le schede presentano un'accuratezza sul massimo valore misurato inferiore allo 0.6 % riportato nel datasheet del trasformatore amperometrico LEM, sebbene questa fosse espressa in funzione della corrente nominale sul primario. Misure analoghe sono state eseguite con la stessa scheda, utilizzando un altro generatore ITECH in grado di raggiungere i 450 A di corrente. In questo caso, nei grafici riportati nelle successive pagine, verrà evidenziato solo l'andamento della LOC453. Il set-up adottato è rimasto invariato (7.2), è cambiato solamente il generatore di corrente utilizzato. I risultati ottenuti e le riflessioni che si possono fare sono analoghi a quelli delle precedenti misurazioni eseguite fino a 300 A.

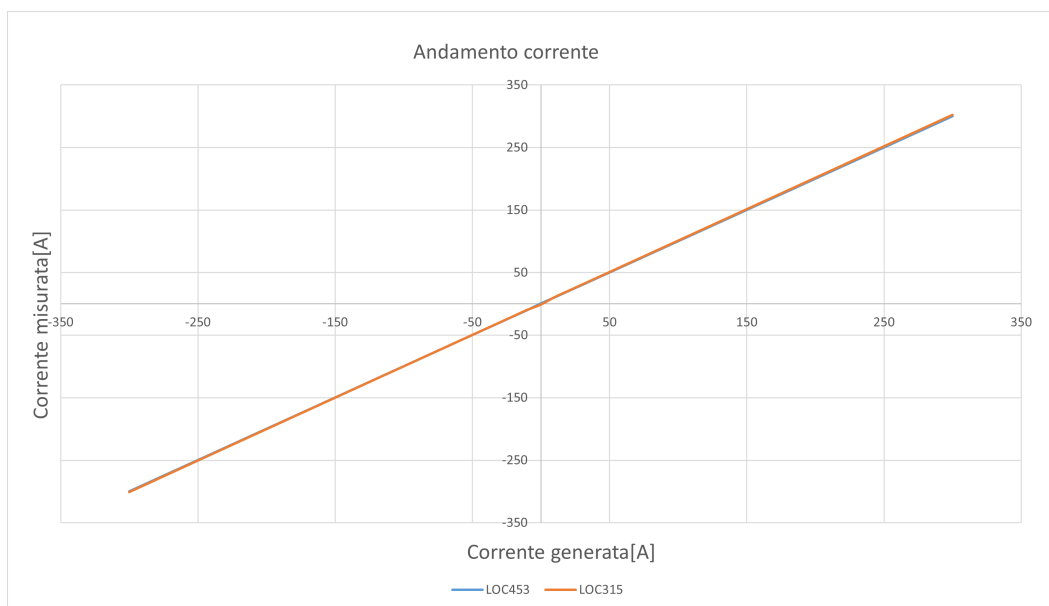


Figura 7.4: Confronto tra LOC453 e LOC315 - Fase V

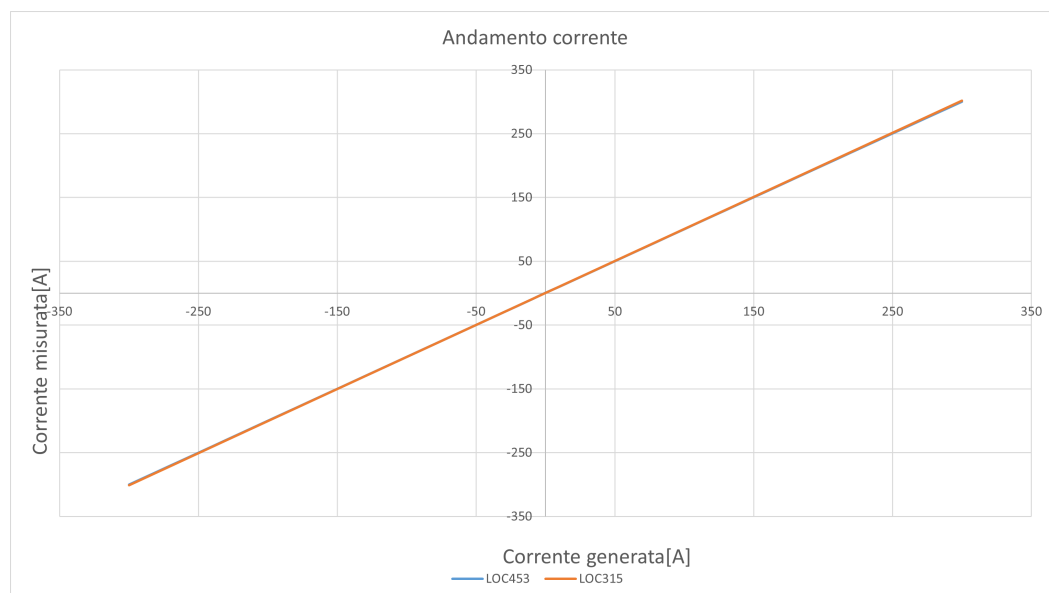


Figura 7.5: Confronto tra LOC453 e LOC315 - Fase W

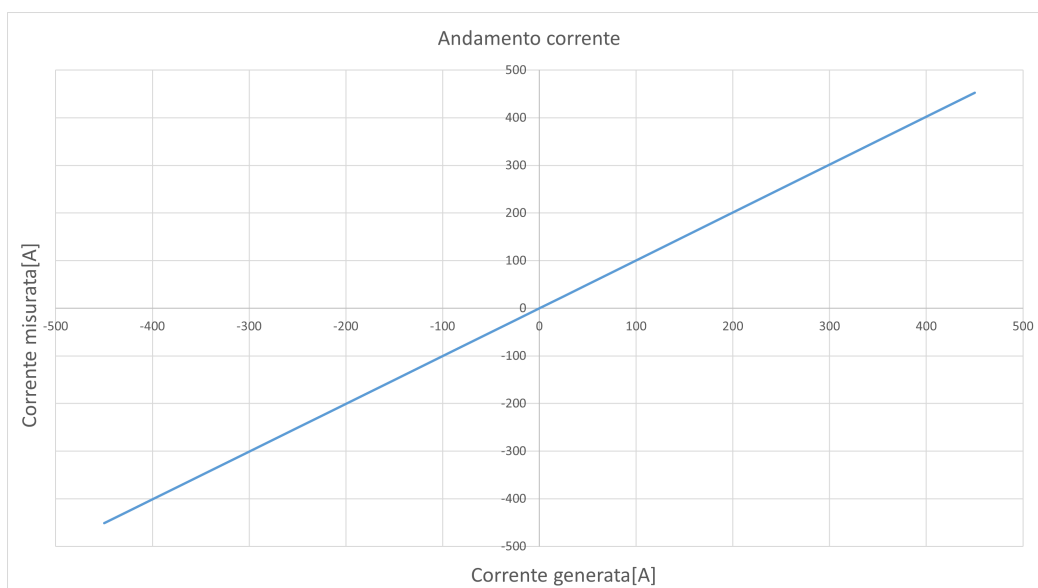


Figura 7.6: Andamento LOC453 - Fase U

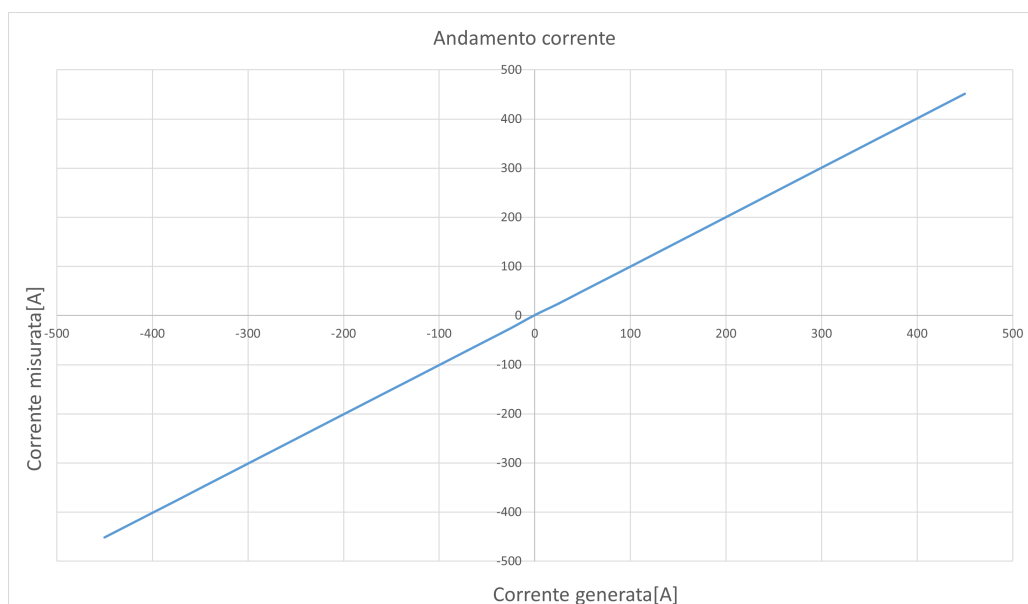


Figura 7.7: Andamento LOC453 - Fase V

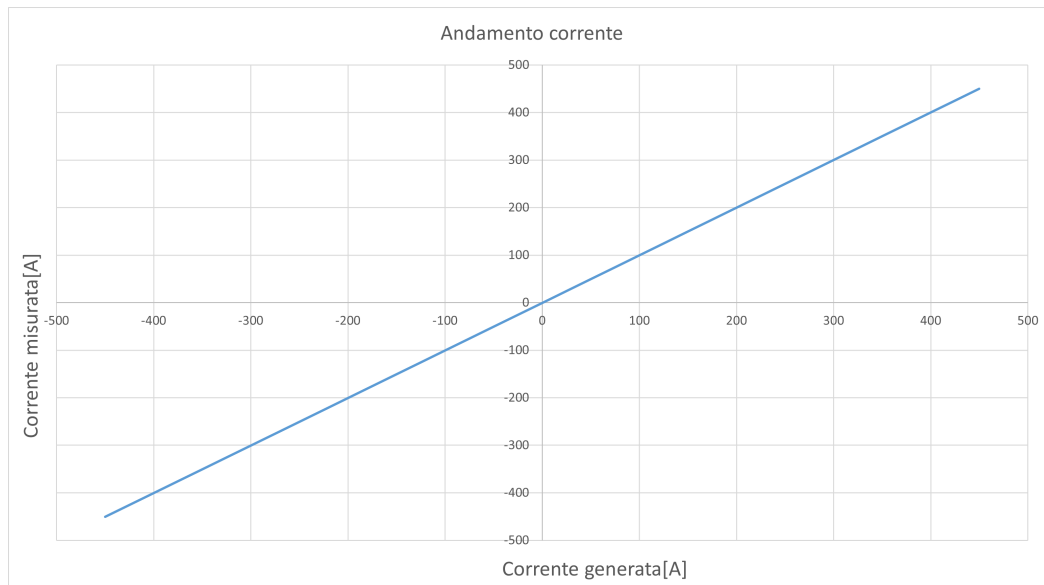


Figura 7.8: Andamento LOC453 - Fase W

Dalle prove eseguite in corrente continua è stato possibile fare alcune riflessioni sui risultati ottenuti e sui comportamenti della scheda LOC453. Nello specifico, come già menzionato, la scheda ha un'accuratezza inferiore allo 0.6 %, calcolata sul massimo valore misurato. Oltre a questa caratteristica, è stato osservato che l'andamento dell'uscita della scheda è lineare al crescere della corrente misurata. Riguardo a questo andamento, è stato notato un particolare fenomeno quando sulla barra di rame viene fatta scorrere un'elevata corrente. Nello specifico, applicando una corrente di 450 A, l'offset iniziale del sensore subisce una variazione, aumentando o diminuendo in base al verso della corrente che viene fatta scorrere, mostrando un "effetto memoria". Questa caratteristica si traduce in una variazione della tensione di uscita pari a circa 13 mV. A causa di questo fenomeno, la calibrazione della scheda dovrebbe essere effettuata sul massimo valore misurabile dal sensore. Questa caratteristica potrebbe rappresentare un problema in corrente continua; d'altra parte, facendo scorrere una corrente alternata, questo problema non dovrebbe sorgere poiché la corrente oscilla tra valori positivi e negativi.

Un'altra prova eseguita ha riguardato l'osservazione di come una corrente su una barra di rame, quando scorre su una fase adiacente a quella che si vuole misurare, influenzi la fase su cui si vuole effettuare la misura. Applicando una corrente di 300 A sulla barra adiacente, si è riscontrato che essa influenza la tensione di uscita della barra sotto test di circa 5 mV, corrispondente ad una corrente di 0.25 A. Il valore in corrente dipende dalla sensibilità del sensore; infatti, impiegando un sensore diverso con una sensibilità di $3 \frac{mV}{A}$, utilizzato in alcune prove all'interno di questo capitolo, la corrente viene influenzata per circa 0.17 A.

Successivamente, è stata valutata l'accuratezza della misura in funzione della corrente generata, in modo più approfondito. Per visualizzare l'andamento, è stato realizzato un grafico che mostra il rapporto diretto tra queste due misure per ciascuna fase della scheda elettronica. Di seguito, nelle Figure 7.9, 7.10 e 7.11 sono riportati questi grafici. L'accuratezza della singola misura, espressa in percentuale, viene calcolata come:

$$Accuratezza = 100 \cdot \frac{Valore_{misurato} - Valore_{vero}}{Valore_{vero}} \quad (7.2)$$

Questa caratteristica può essere espressa come percentuale del fondo scala oppure come percentuale del valore misurato. Nel nostro caso, non sono stati raggiunti i valori del fondo scala del sensore; pertanto, l'accuratezza verrà valutata in funzione del singolo valore misurato. Dai grafici è possibile osservare che l'andamento è lo stesso per tutte e tre le fasi. Per alti valori di corrente, l'accuratezza è inferiore allo 0.6 %, diminuendo progressivamente quando il valore di corrente aumenta, fino a raggiungere il picco per il minimo valore di corrente misurato in queste prove, ossia 25 A. Il valore di accuratezza dipende anche dall'offset iniziale della scheda; infatti, per alti valori di corrente, questo non influenza in maniera significativa l'accuratezza, mentre per valori più bassi anche qualche millivolt di offset può influire sull'accuratezza della singola misura. Successivamente, per ogni fase, verranno presentate delle tabelle che riassumono i valore massimi e minimi di corrente misurata con le rispettive accuratezze, al fine di descrivere in maniera più dettagliata questa caratteristica.

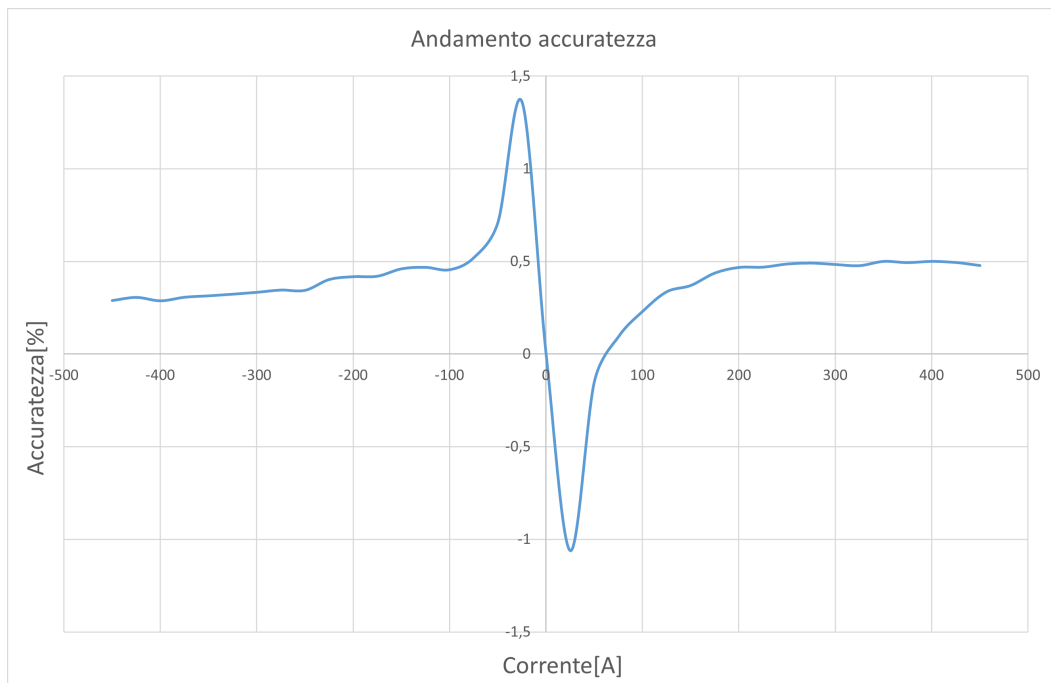


Figura 7.9: Andamento accuratezza LOC453 - Fase U

Corrente generata[A]	Corrente misurata[A]	Accuratezza[%]
25	24.735	-1.06
450	452.15	0.478
-25	-25.34	1.36
-450	-451.3	0.289

Tabella 7.1: Accuratezza LOC453 - Fase U

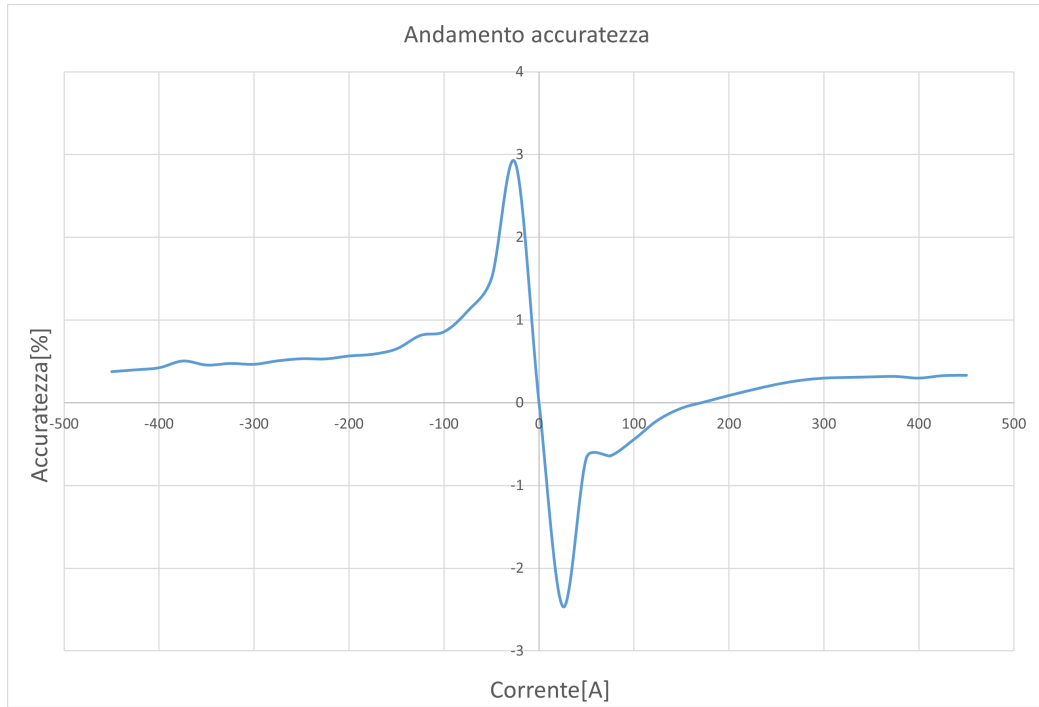


Figura 7.10: Andamento accuratezza LOC453 - Fase V

Corrente generata[A]	Corrente misurata[A]	Accuratezza[%]
25	24.385	-2.46
450	451.50	0.333
-25	-25.725	2.90
-450	-451.70	0.378

Tabella 7.2: Accuratezza LOC453 - Fase V

Corrente generata[A]	Corrente misurata[A]	Accuratezza[%]
25	24.340	-2.64
450	450.05	0.0111
-25	-25.710	2.84
-450	-450.75	0.167

Tabella 7.3: Accuratezza LOC453 - Fase W

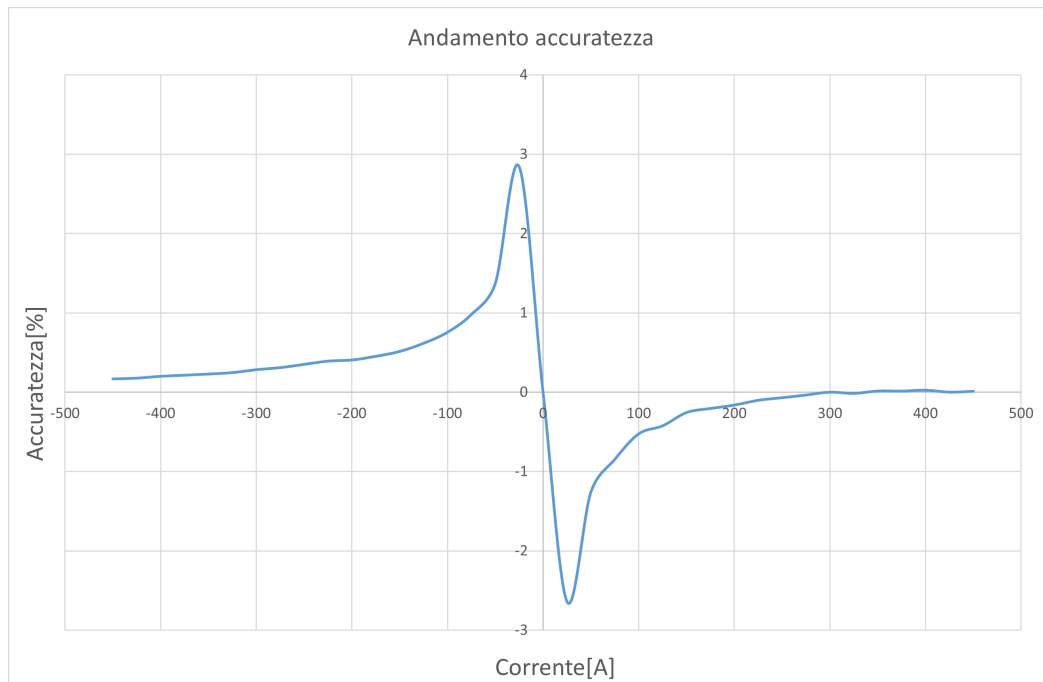


Figura 7.11: Andamento accuratezza LOC453 - Fase W

Le tre Tabelle(7.1, 7.2, 7.3) permettono di visualizzare immediatamente i valori delle accuratezze agli estremi di corrente misurata. È stato possibile notare come l'accuratezza, nei valori di correnti più bassi misurati, come a 25 A, sia influenzata in maniera non trascurabile dall'offset iniziale della singola fase. Come visto anche nel Capitolo 6, nella sezione relativa al collaudo della scheda, non è stato possibile eliminare completamente l'offset. In particolare, più l'offset è elevato, maggiore è l'influenza sull'accuratezza. D'altra parte, per i valori elevati di corrente, non sembra essere presente una correlazione stretta tra il valore di offset della singola fase e il livello di accuratezza mostrato dalla LOC453. Nella Tabella 7.4 vengono riportati i valori dell'offset per ogni singola fase riscontrati in fase di misurazione. Confrontando i valori in questa tabella con quelli di accuratezza riportati nelle tabelle relative alle singole fasi, si nota immediatamente quanto sottolineato in precedenza riguardo al legame tra bassi valori di corrente e offset. Nello specifico, è possibile osservare come la fase U, che ha un offset iniziale inferiore rispetto alle altre, per valori di corrente pari a 25 A mostri un'accuratezza maggiore rispetto alle altre due fasi, in cui l'offset iniziale è più elevato.

	Fase U	Fase V	Fase W
Offset[mV]	-3.8	16.7	16

Tabella 7.4: Offset LOC453

Misure in corrente alternata

In questa sezione verranno riportate le misure effettuate tramite il calibratore in corrente alternata, valutando il comportamento della LOC453 al variare della frequenza elettrica del segnale di corrente. Per l'esecuzione delle misurazioni è stato utilizzato un calibratore Fluke, presentato nella sezione precedente riguardante la strumentazione utilizzata nelle prove eseguite per il test della LOC453. Il set-up delle prove è riportato in Figura 7.12. Le misurazioni sono state eseguite con una corrente fino a $20 A_{rms}$, il massimo range di questo calibratore, e con diverse frequenze per visualizzare l'andamento del segnale. Le prove, di cui i grafici sono riportati in seguito, sono state eseguite per tutte e tre le fasi della scheda elettronica. Dai grafici è possibile osservare come il comportamento della scheda, e quindi dei sensori, vari in base alla frequenza elettrica del segnale. In particolare, dalla Figura 7.16, è possibile notare come intorno a $1 kHz$ il segnale subisca una maggiore attenuazione, rispetto alle altre frequenze testate, ossia $50 Hz$ e $5 kHz$. Questo comportamento è stato riscontrato sia nelle misurazioni eseguite nel Capitolo 4, ossia con singolo sensore, anche se ad una diversa frequenza, sia durante il test della scheda.

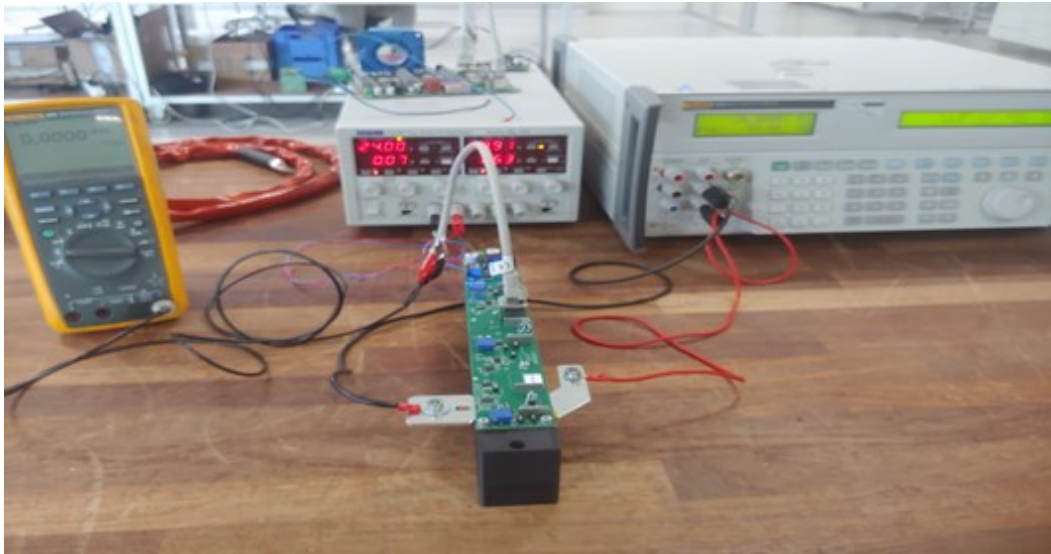


Figura 7.12: Set-up misure in corrente alternata

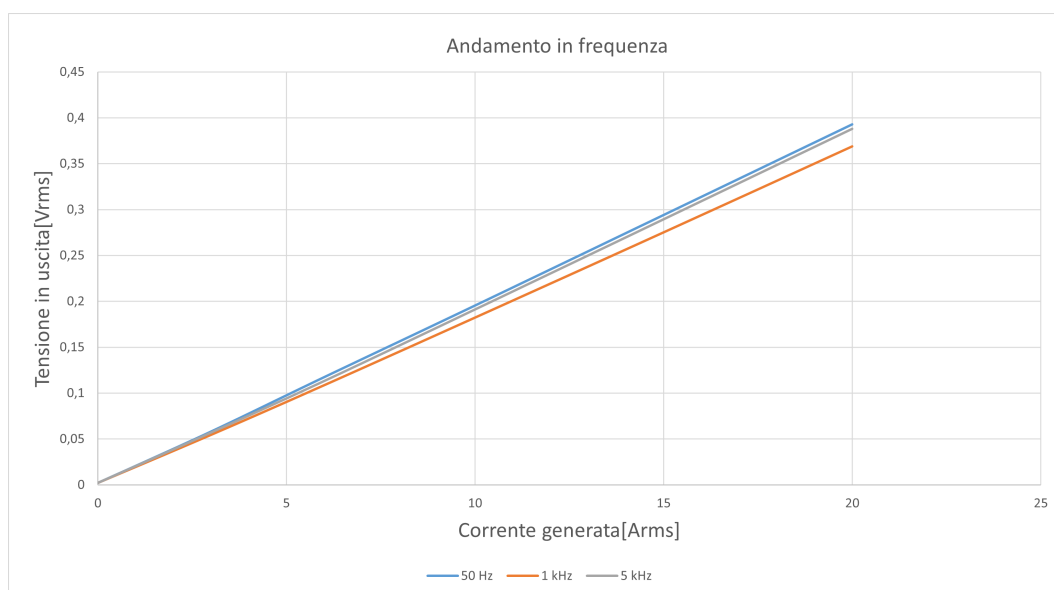


Figura 7.13: Andamento LOC453 in frequenza - Fase U

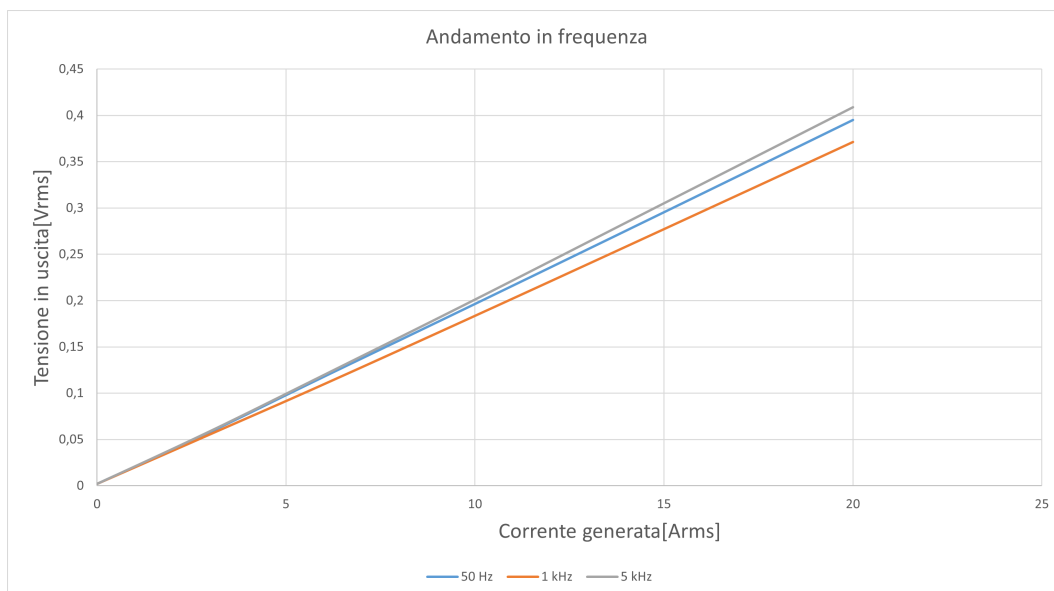


Figura 7.14: Andamento LOC453 in frequenza - Fase V

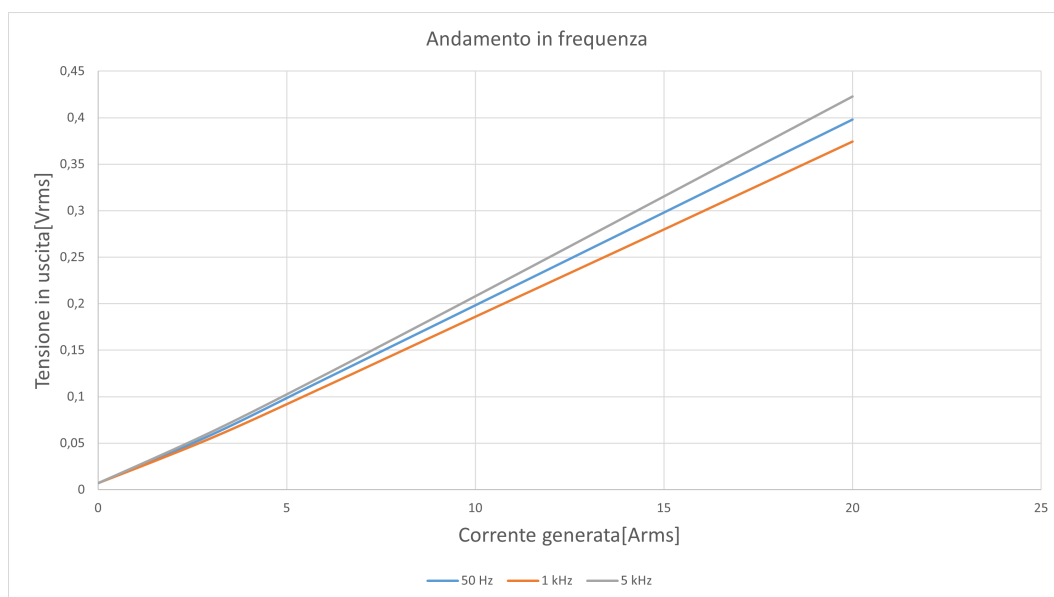


Figura 7.15: Andamento LOC453 in frequenza - Fase W

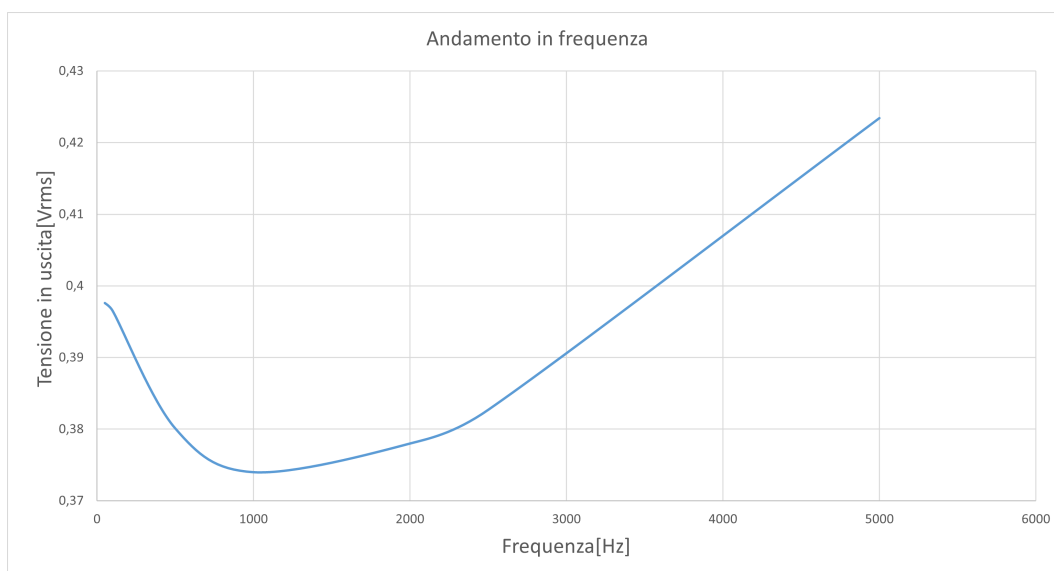


Figura 7.16: Andamento LOC453 in frequenza

7.3 MLX91218LDC-ARV-501

In questa sezione verranno riportate le misurazioni e i test effettuati con la scheda LOC453, integrata con i sensori MLX91218LDC-ARV-501. Anche per queste misurazioni verranno eseguite delle prove in corrente continua e altre in corrente alternata; infine, il prototipo verrà testato su un inverter. Le misure eseguite per la corrente continua e alternata sono le stesse della scheda precedente, pertanto verranno presentate delle misure in continua eseguite con un generatore di corrente fino a 450 A, oltre a misure in alternata, al fine di osservare il comportamento del sensore alle diverse frequenze. Il sensore impiegato in questa sezione ha una sensibilità di $60 \frac{mV}{mA}$; utilizzando la formula 3.3 e tenendo conto della dimensione dello schermo utilizzato, è possibile ottenere la corrispondente sensibilità pari a $3 \frac{mV}{A}$. Come presentato nell'ultima parte del Capitolo 3, questo sensore ha un range massimo misurabile di 666.67 A. Il valore massimo misurabile corrisponde a una tensione massima di uscita dalla scheda elettronica pari a 20 V; tramite una proporzione si ottiene:

$$\text{corrente misurata} : 666.67 = \text{tensione di uscita} : 20 \quad (7.3)$$

In questo modo, come eseguito per l'altra scheda con gli altri sensori, è possibile ricavare, dalla tensione di uscita, il valore di corrente rilevato dalla LOC453.

Misure in corrente continua

In questa parte vengono presentati i risultati ottenuti nelle misure eseguite in corrente continua. In particolare, sono state effettuate delle acquisizioni, tramite generatore di corrente, con valori di corrente nel range di ± 450 A. Le misurazioni sono state eseguite per tutte e tre le fasi della scheda elettronica. Di seguito, nelle Figure 7.23, 7.18 e 7.19, vengono riportati i grafici in corrente ottenuti, in cui sull'asse delle ordinate è presente il valore della corrente misurata, mentre sull'asse delle ascisse è riportato il valore della corrente generata dal generatore. Anche in questo caso, è possibile fare le stesse considerazioni effettuate per la scheda elettronica con sensori di diversa sensibilità. Un'altra caratteristica in comune è legata al fatto che anche questa scheda si è rivelata affidabile, con un'accuratezza rispetto al massimo valore misurato inferiore allo 0.6 %. Inoltre, anche in questo caso, quando si misura una corrente elevata, ad esempio 450 A, l'offset del sensore subisce una variazione che si traduce in una tensione di uscita modificata di alcuni millivolt in base all'intensità della corrente che scorre sulla barra di rame. Viste le prestazioni simili delle schede elettroniche con sensori di diversa sensibilità, per questa seconda scheda non sono state replicate alcune misurazioni per effettuare un confronto diretto con la scheda attualmente utilizzata nell'inverter con i trasformatori amperometrici. Il set-up impiegato in queste acquisizioni è lo stesso della sezione precedente, che è riportato in Figura 7.2.

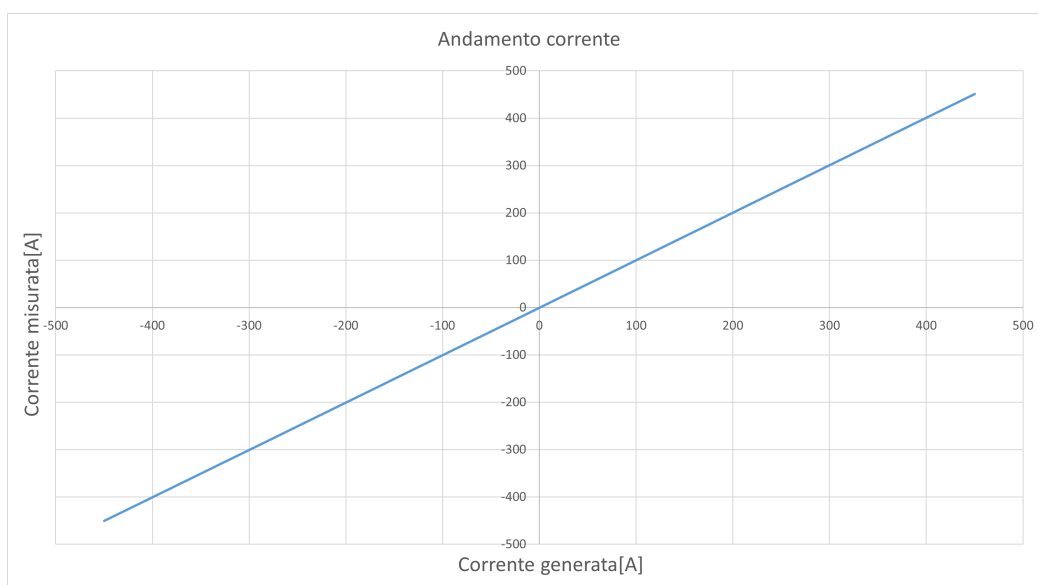


Figura 7.17: Andamento LOC453 - Fase U

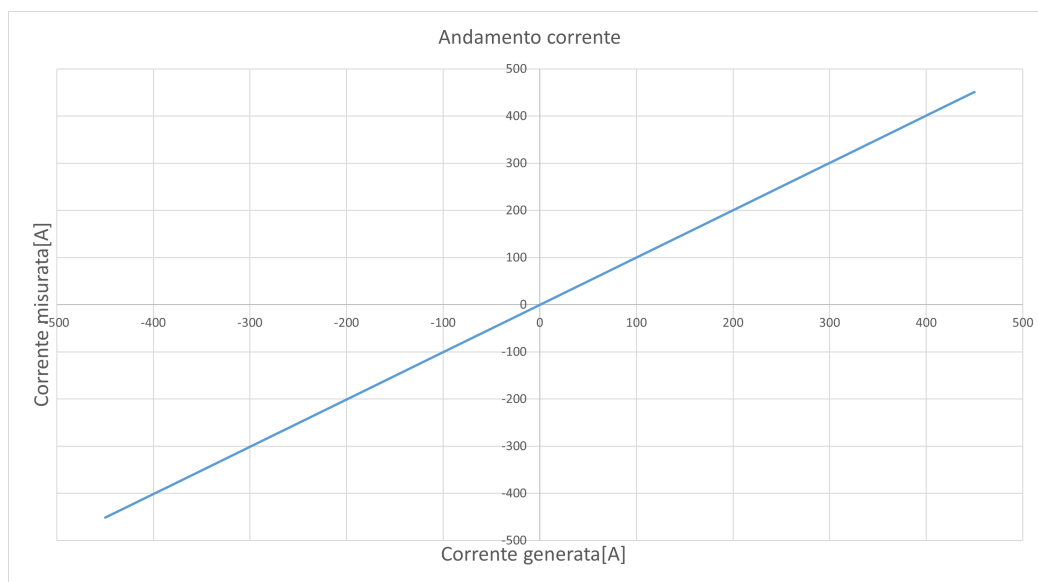


Figura 7.18: Andamento LOC453 - Fase V

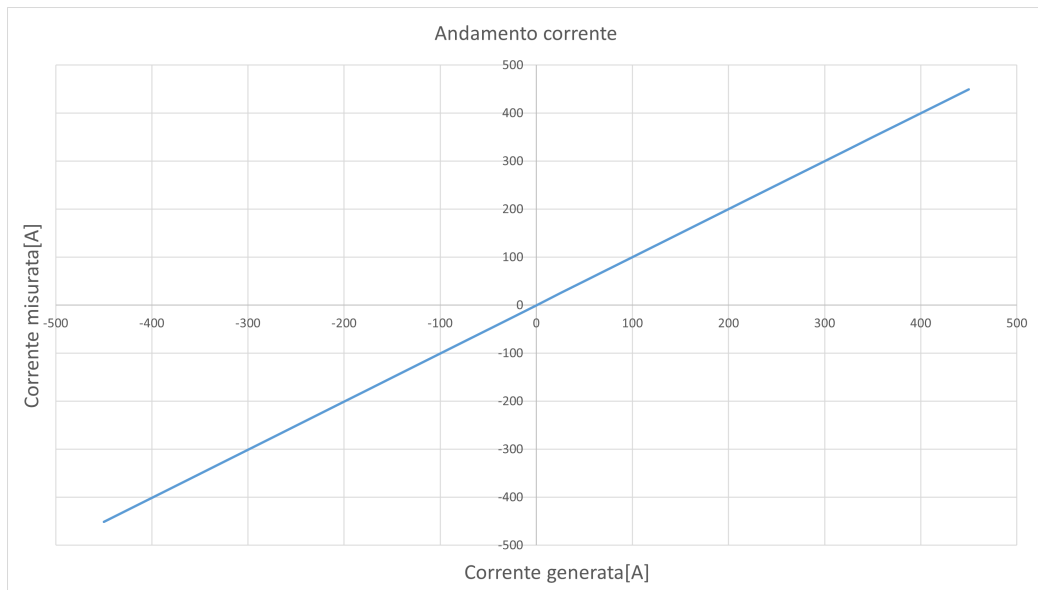


Figura 7.19: Andamento LOC453 - Fase W

Anche con questa scheda, è stata approfondita la caratteristica dell'accuratezza. In particolare nelle Figure 7.20, 7.21 e 7.22 sono riportati i grafici delle tre fasi relative agli andamenti dell'accuratezza in funzione della corrente generata. La formula utilizzata per calcolare l'accuratezza è la stessa riportata nella sezione precedente, ossia la 7.2. Anche in questo caso, poiché non si sono raggiunti i valori del fondo scala del sensore, è stata calcolata l'accuratezza sul singolo valore misurato. Dai grafici è possibile osservare che l'andamento è simile per tutte e tre le fasi. Per alti valori di corrente, l'accuratezza è inferiore allo 0.6 %, diminuendo progressivamente quando il valore di corrente generata aumenta, fino a raggiungere il picco per il minimo valore di corrente misurato, ossia 25 A. Il valore di accuratezza dipende anche dall'offset iniziale della scheda; infatti, per alti valori di corrente, questo non influenza in maniera significativa l'accuratezza, mentre per valori più bassi anche qualche millivolt di offset può influire sull'accuratezza della singola misura. Successivamente, per ogni fase, verranno presentate delle tabelle che riassumono i valori massimi e minimi di corrente misurata con le rispettive accurattezze, al fine di descrivere in maniera più dettagliata questa caratteristica.

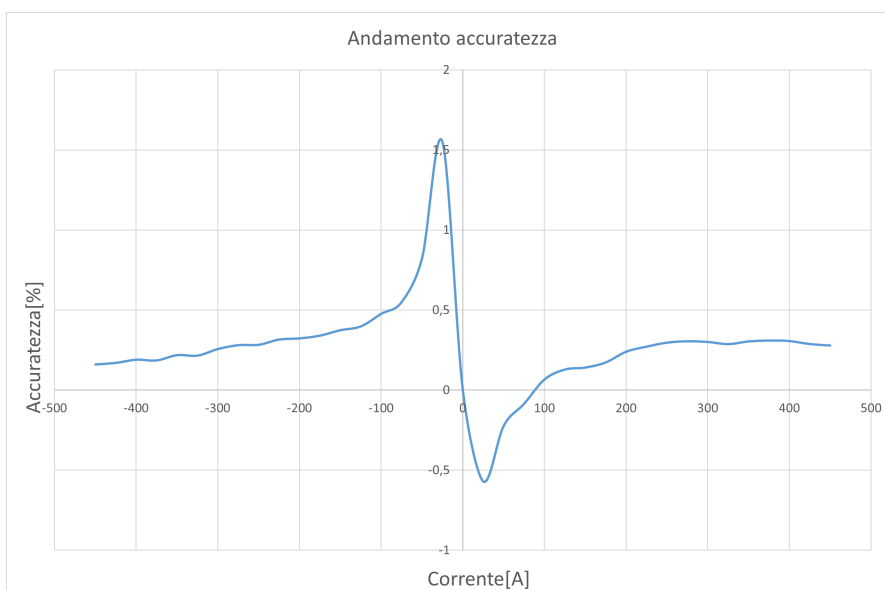


Figura 7.20: Andamento accuratezza LOC453 - Fase U

Corrente generata[A]	Corrente misurata[A]	Accuratezza[%]
25	24.858	-0.570
450	451.25	0.279
-25	-25.387	1.55
-450	-450.72	0.160

Tabella 7.5: Accuratezza LOC453 - Fase U

Corrente generata[A]	Corrente misurata[A]	Accuratezza[%]
25	25.121	0.483
450	451.32	0.294
-25	-25.141	0.563
-450	-450.92	0.205

Tabella 7.6: Accuratezza LOC453 - Fase V

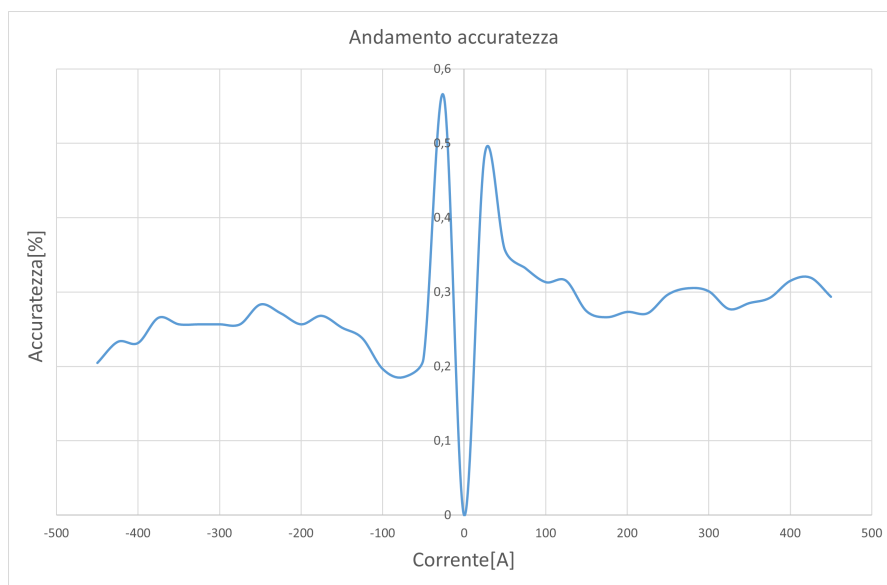


Figura 7.21: Andamento accuratezza LOC453 - Fase V

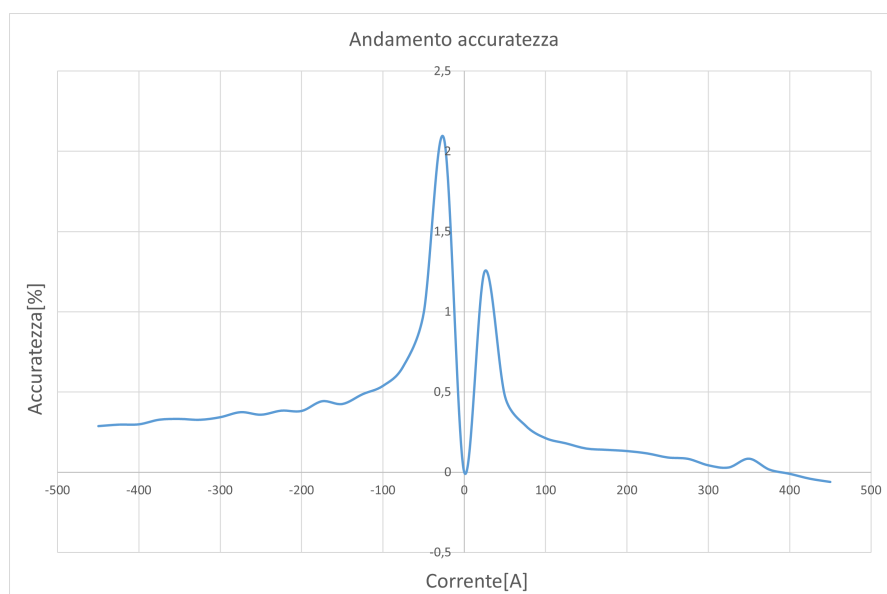


Figura 7.22: Andamento accuratezza LOC453 - Fase W

Corrente generata[A]	Corrente misurata[A]	Accuratezza[%]
25	25.313	1.25
450	449.73	-0.0603
-25	-25.520	2.08
-450	-451.30	0.288

Tabella 7.7: Accuratezza LOC453 - Fase W

Le tre Tabelle(7.5, 7.6, 7.7) permettono di visualizzare immediatamente i valori delle accuratezze agli estremi della corrente misurata. È stato possibile osservare come l'accuratezza, nei valori di corrente più bassi misurati, come a 25 A , venga influenzata in maniera non trascurabile dall'offset iniziale della singola fase. Come visto anche nel Capitolo 6, nella sezione relativa al collaudo della scheda, non è stato possibile eliminare totalmente l'offset. In particolare, più l'offset è elevato, maggiore è l'influenza sull'accuratezza. D'altra parte, per i valori elevati di corrente, non sembra essere presente una correlazione stretta tra il valore di offset della singola fase e il livello di accuratezza mostrato dalla LOC453. Nella Tabella 7.4 vengono riportati i valori dell'offset per ogni singola fase riscontrati in fase di misurazione. Confrontando i valori di questa tabella con quelli di accuratezza riportati nelle tabelle relative alle singole fasi, si nota immediatamente quanto sottolineato in precedenza riguardo al legame tra bassi valori di corrente e l'offset. Nello specifico, si può osservare che, in questo caso, la fase V, che ha un offset iniziale inferiore alle altre, per valori di corrente pari a 25 A mostra un'accuratezza maggiore, rispetto alle altre due fasi in cui l'offset iniziale è più elevato.

	Fase U	Fase V	Fase W
Offset[mV]	-11.9	1.5	-11

Tabella 7.8: Offset LOC453

Misure in corrente alternata

In questa sezione vengono riportate le misurazioni eseguite con il calibratore in corrente alternata. Il set-up utilizzato per queste prove è lo stesso impiegato per la scheda precedente e viene mostrato in Figura 7.12. Anche le acquisizioni eseguite sono le stesse della sezione precedente; in particolare, sono state eseguite delle misurazioni con il calibratore per osservare il diverso andamento della tensione di uscita della scheda elettronica al variare della frequenza. Anche in questa situazione, si verifica quanto osservato per la scheda testata in precedenza; infatti, la scheda elettronica, e quindi il sensore, presenta un comportamento diverso al variare della frequenza. In particolare, è possibile notare come, a una frequenza di 1 kHz , sia presente una maggiore attenuazione del segnale, rispetto alle altre frequenze testate, ossia 50 Hz e 5 kHz . Le prove eseguite per le tre diverse fasi sono riportate nelle Figure 7.23, 7.24 e 7.25. Come detto in precedenza, le misurazioni sono state effettuate per correnti fino a 20 A_{rms} , poiché questo valore era il massimo possibile generato dal calibratore utilizzato per queste acquisizioni.

Una volta completate tutte le prove presentate fino a questo punto, è stato deciso di testare la scheda elettronica su un inverter reale per osservare il suo comportamento e notare le caratteristiche principali. Nella sezione successiva verranno riportate le principali prove eseguite; queste sono state eseguite soltanto per questa seconda scheda, che integra i sensori da $60\frac{\text{mV}}{\text{mA}}$. Poiché il comportamento visto è simile, sarà possibile giungere a conclusioni analoghe anche per eventuali misurazioni che saranno eseguite con l'altra scheda.

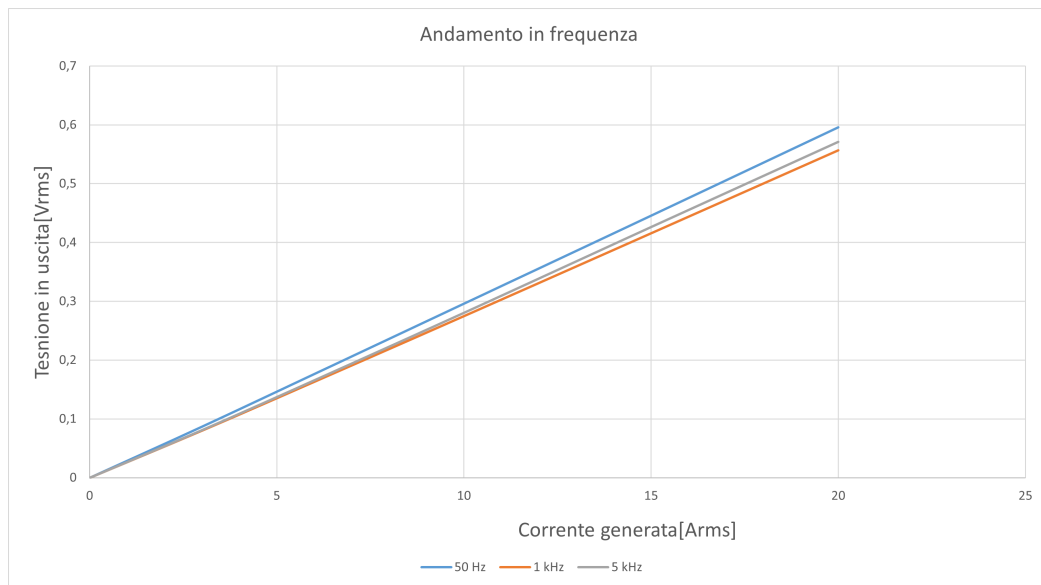


Figura 7.23: Andamento LOC453 in frequenza - Fase U

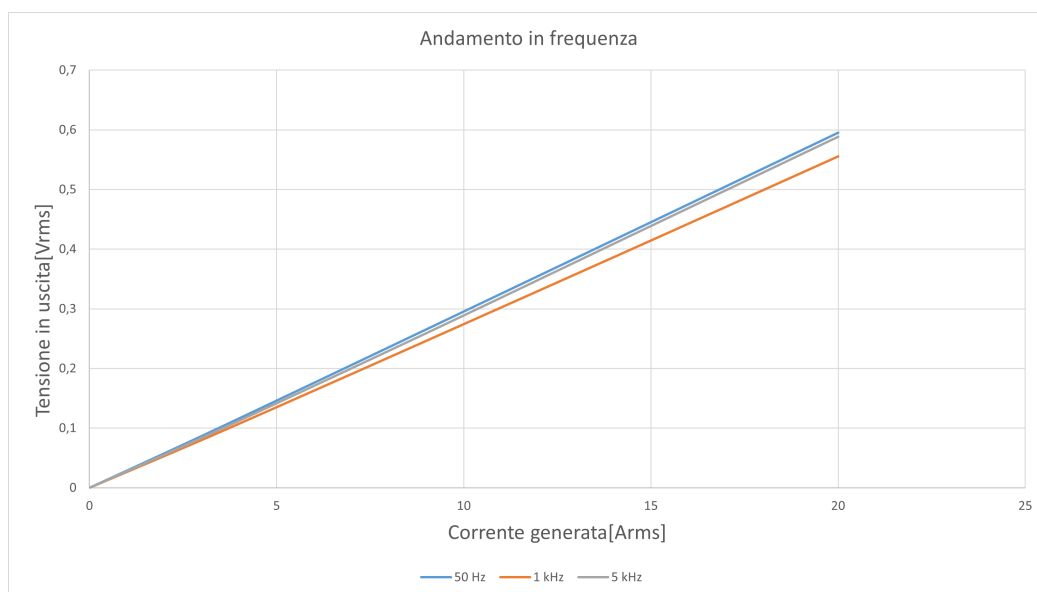


Figura 7.24: Andamento LOC453 in frequenza - Fase V

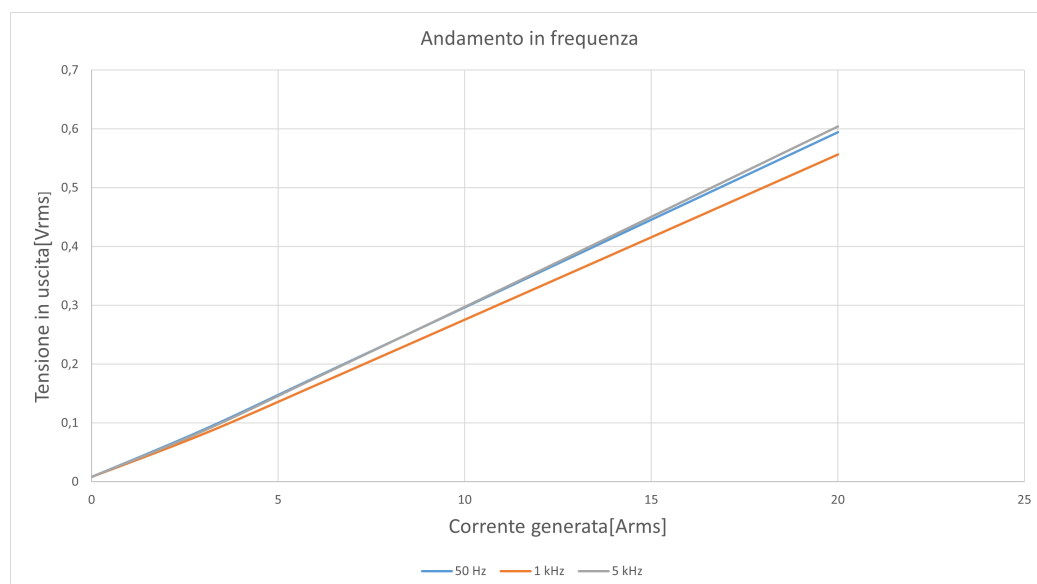


Figura 7.25: Andamento LOC453 in frequenza - Fase W

Misure sull'inverter

In questa sezione verranno riportati i test eseguiti sull'inverter. Nella prima parte verrà presentato il set-up e il tipo di banco utilizzato; successivamente, verranno riportate le immagini relative alle acquisizioni riguardanti l'andamento della tensione di uscita della scheda elettronica. Il banco di test dell'inverter è mostrato nella Figura 7.26. Come è possibile osservare dall'immagine, l'inverter è controllato da



Figura 7.26: Banco di prova dell'inverter

un computer che, tramite un software interno dell'impresa chiamato Aulos, consente di eseguire diversi tipi di test selezionando da un menù principale i vari parametri da impostare. Tra questi parametri sono inclusi il valore della corrente di picco, la frequenza di switching dell'inverter, il numero di cicli, la tensione continua e i tempi di salita, mantenimento e discesa della frequenza nel caso di rampe. Questo banco è dotato anche di un sistema di raffreddamento ad acqua che permette di mantenere la temperatura a un livello accettabile; inoltre, esso è stato realizzato in tecnologia Sic. Il set-up delle misurazioni eseguite è riportato in Figura 7.27. Da questa è possibile osservare come la scheda elettronica sia stata inserita in uscita dalle tre fasi dell'inverter, utilizzando tre opportune barre di rame su cui sono fissati il supporto e la scheda. Pertanto, il sistema originale non è stato modificato, ma è stata semplicemente aggiunta la LOC453 su cui si vogliono eseguire dei test. Per alimentare la scheda è stato utilizzato un alimentatore da banco a 24 V. Il segnale elaborato in uscita dalla scheda è stato acquisito tramite una sonda differenziale connessa a un oscilloscopio, al fine di visualizzare l'andamento della tensione in uscita dalle tre fasi. Le prove sono state eseguite per ciascuna delle tre le fasi, una alla volta, confrontandole con il sistema di controllo utilizzato nell'inverter, composto dai trasformatori amperometrici. Anche questo segnale di controllo, utilizzato

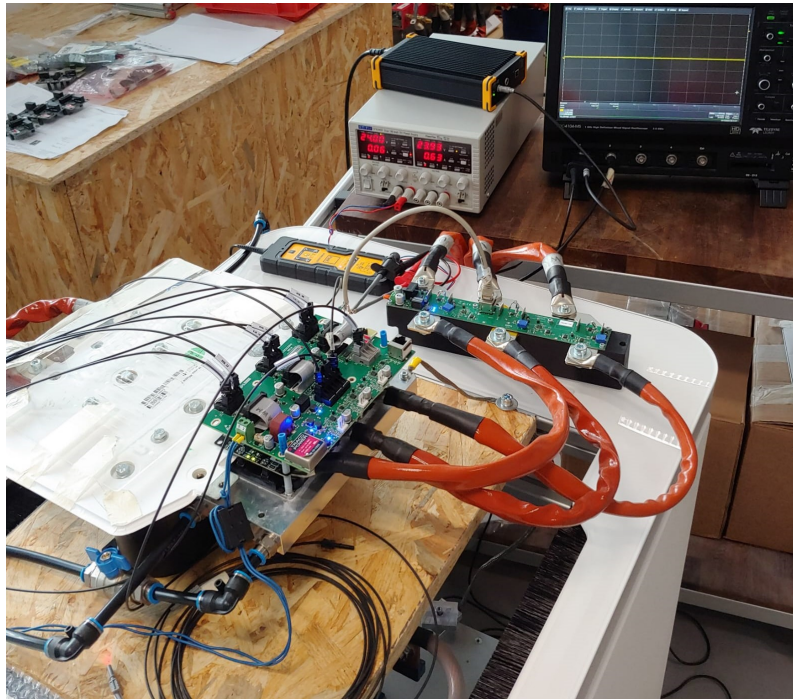


Figura 7.27: Set-up prove con inverter

nell'inverter, è stato collegato all'oscilloscopio per osservare il confronto diretto tra i due segnali e valutare l'andamento della tensione di entrambi. Dopo una prima fase di calibrazione, sono state eseguite delle acquisizioni e di seguito vengono riportate alcune immagini di queste, ottenute dall'oscilloscopio. Per le acquisizioni è stato impostato un segnale con un'ampiezza in corrente di $200 A_{rms}$, una frequenza elettrica di $100 Hz$ e una frequenza di switching pari a $20 kHz$. Nella Figura 7.28 è possibile osservare l'andamento dei due segnali: la curva gialla rappresenta la scheda sotto test, ossia lo LOC453, d'altra parte la curva magenta illustra l'andamento del sistema di controllo in uso con i trasformatori amperometrici. Si può notare come i due andamenti siano perfettamente sovrapposti. Tuttavia, la principale problematica riscontrata è legata al fatto che il segnale acquisito dalla LOC453 sia affetto da un maggiore rumore. Questo problema potrebbe essere causato da un'acquisizione non ottimale; infatti, la sonda differenziale è collegata a cavi Ethernet scoperti, il che potrebbe generare rumore indesiderato. D'altra parte, il segnale di controllo è acquisito direttamente dal sistema tramite un cavo coassiale, risultando in una presenza di rumore notevolmente inferiore. Questo problema è stato risolto mediante l'utilizzo di un filtro di rumore dell'oscilloscopio, con una frequenza di taglio impostata a $160 kHz$. Il risultato di quest'operazione di filtraggio è riportato nella Figura 7.29, dalla quale è possibile osservare come il rumore sia notevolmente ridotto. Le stesse operazioni sono state eseguite anche per le altre due fasi; nelle Figure 7.30 e 7.31 per la fase V e nelle Figure 7.32 e 7.33 per la fase W.

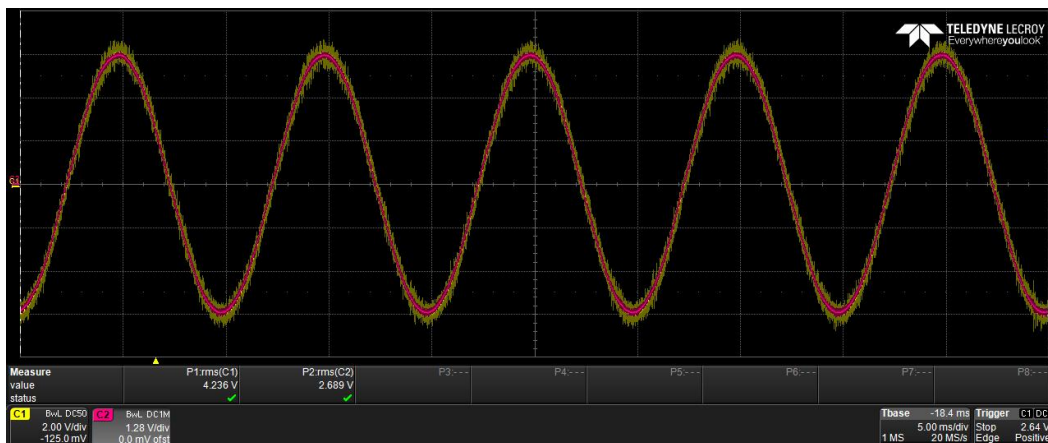


Figura 7.28: Andamento LOC453 su inverter - Fase U

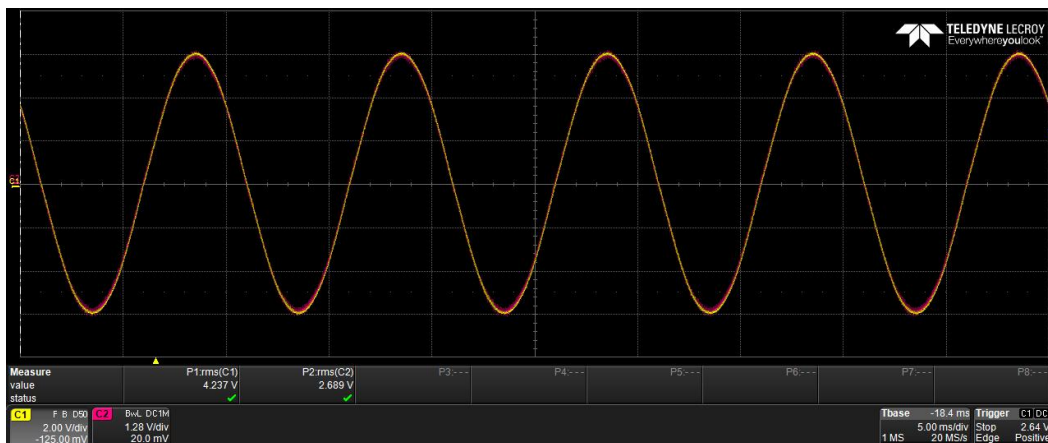


Figura 7.29: Andamento LOC453 su inverter con filtro - Fase U

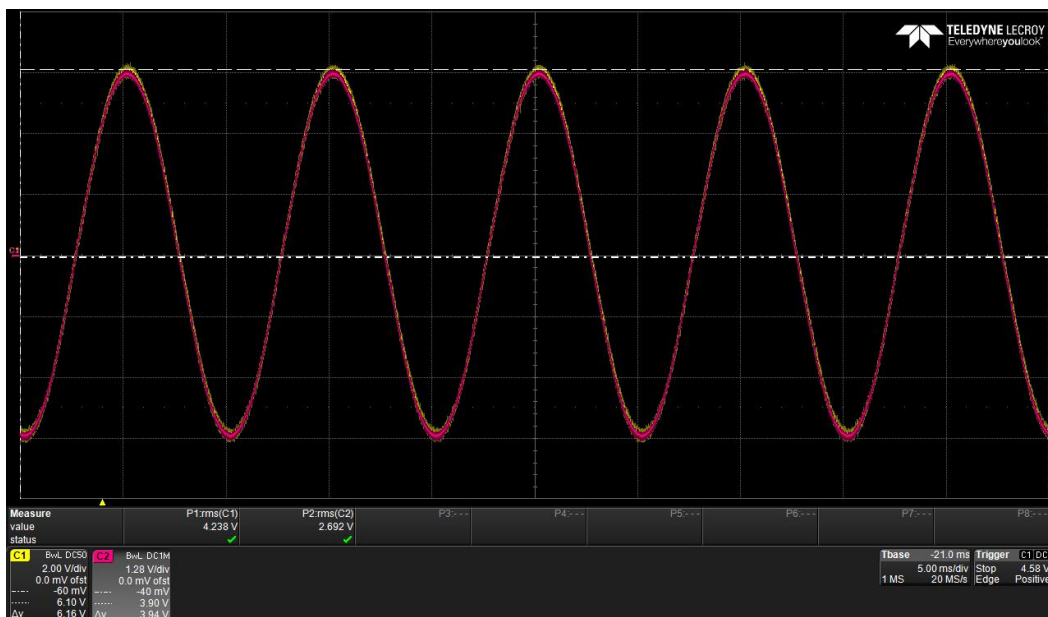


Figura 7.30: Andamento LOC453 su inverter - Fase V

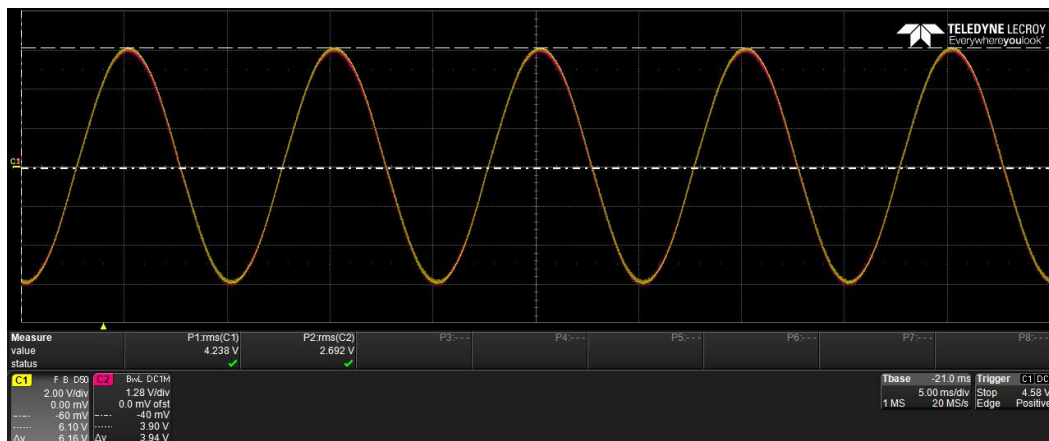


Figura 7.31: Andamento LOC453 su inverter con filtro - Fase V

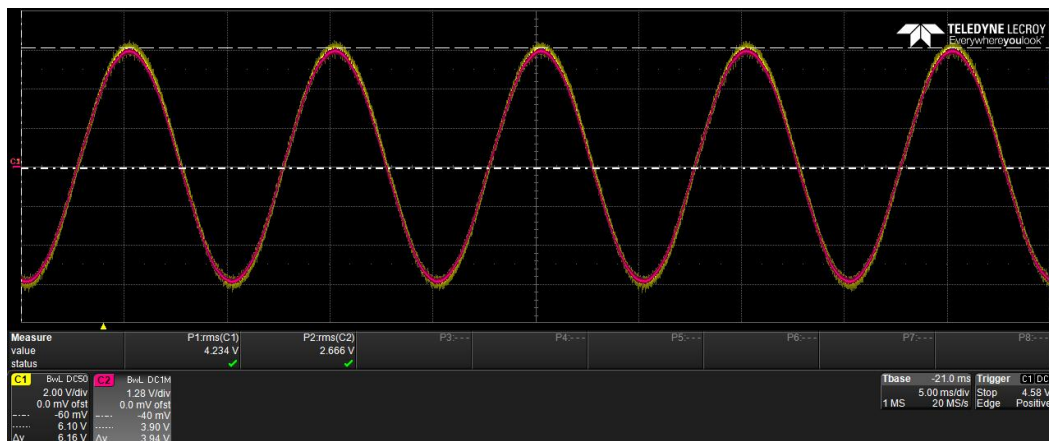


Figura 7.32: Andamento LOC453 su inverter - Fase W

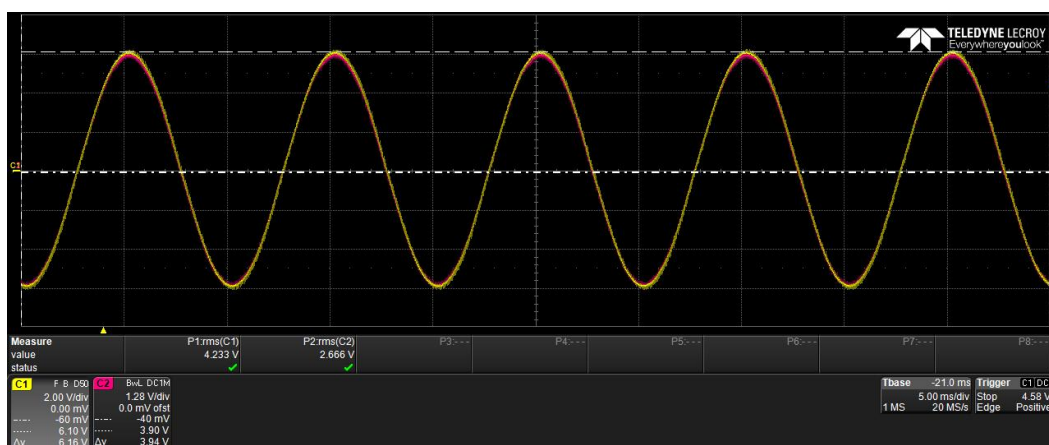


Figura 7.33: Andamento LOC453 su inverter con filtro - Fase W

Una caratteristica osservata è legata al disturbo causato dalla frequenza di switching dell'inverter di 20 kHz . Quando avviene lo switching, ingrandendo il segnale tramite le funzioni dell'oscilloscopio, è possibile notare che l'andamento del segnale acquisito dalla scheda LOC453 subisce un maggiore disturbo rispetto al segnale utilizzato come riferimento. Questo fenomeno, in assenza di un filtro di rumore, è meno esplicito, come riportato in Figura 7.34. D'altra parte, applicando il filtro di rumore dell'oscilloscopio a una frequenza di taglio di 160 kHz , è possibile osservare questo disturbo in maniera più evidente; ciò è riportato in Figura 7.35. Una possibile soluzione a questo problema potrebbe essere quella di implementare un ulteriore filtro di rumore con una frequenza di taglio leggermente più alta rispetto a quella di switching. Prima di procedere, occorrerebbe esaminare se questo fenomeno si verifichi anche con un set-up diverso, quindi con un collegamento migliore rispetto a quello impostato utilizzando un cavo ethernet scoperto, dove la sonda differenziale acquisisce il segnale.

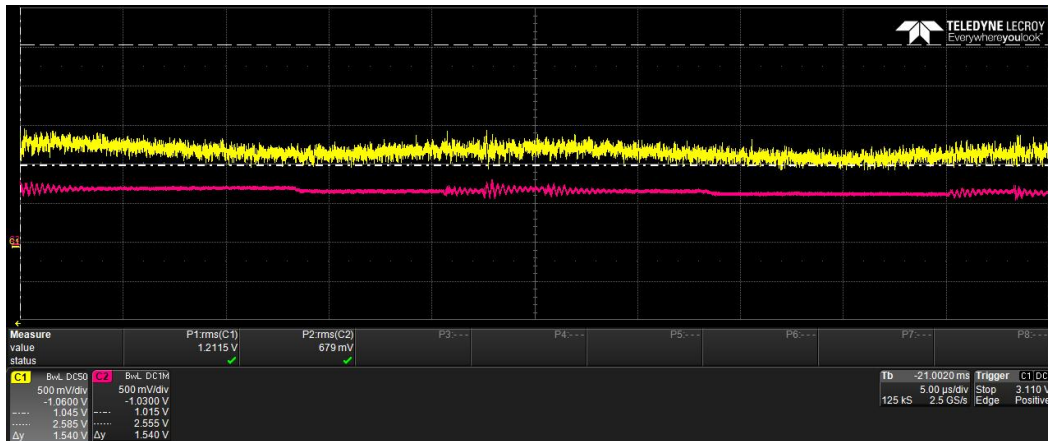


Figura 7.34: Disturbo frequenza di switching su inverter - Fase U

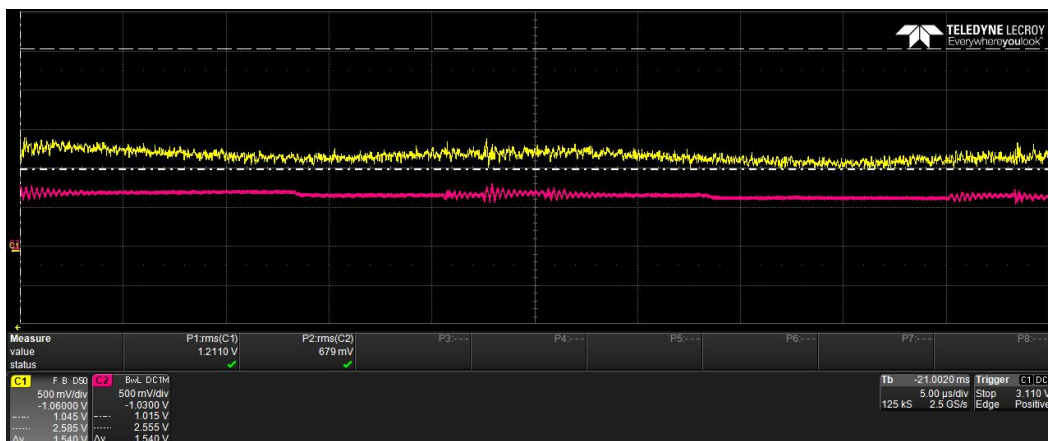


Figura 7.35: Disturbo frequenza di switching su inverter con filtro - Fase U

Capitolo 8

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo capitolo finale dell'elaborato viene fornito un riassunto del lavoro svolto e dei risultati ottenuti nel progetto di tirocinio. Nella prima parte, è stato presentato il lavoro svolto, con gli obiettivi e le principali finalità del progetto, oltre a una descrizione dell'impresa in cui si è svolto il tirocinio. L'obiettivo principale di questo progetto di tirocinio era quello di sviluppare un'elettronica front-end per la misura delle correnti di fase di un inverter. Successivamente, il lavoro è stato contestualizzato con una descrizione del progetto e una panoramica sull'inverter, il dispositivo sul quale viene utilizzato il prototipo creato. Di seguito, sono stati introdotti i sensori a effetto Hall, ossia la famiglia di sensori di cui fa parte il nuovo sensore utilizzato, oltre a quello attualmente in uso. Un focus particolare è stato dedicato alle caratteristiche e peculiarità del nuovo sensore e al suo utilizzo con uno schermo ferromagnetico. Inoltre, nello stesso capitolo è stato fatto un confronto diretto tra il sensore utilizzato per lo sviluppo del prototipo e quello attualmente utilizzato nei sistemi per la misura delle correnti di fase dell'inverter. Nel capitolo successivo, sono state eseguite delle misurazioni e dei confronti relativi ai diversi sensori IMC-Hall testati; in particolare, sono stati provati tre diversi modelli appartenenti a generazioni diverse al fine di osservarne il comportamento e le principali caratteristiche. Un altro capitolo riguarda le simulazioni software relative allo schermo ferromagnetico; in particolare, sono state condotte simulazioni per valutare l'efficacia dello schermo in funzione delle sue dimensioni. Inoltre, è stato osservato l'andamento del campo all'interno dello schermo per individuare la migliore posizione in cui deve essere collocato il sensore di interesse. In seguito, è stato dedicato un capitolo alla progettazione elettronica della scheda, partendo dalle simulazioni software, passando alla progettazione dello schematico, alla disposizione del layout e al collaudo per verificarne il corretto funzionamento una volta prodotta. Infine, nell'ultimo capitolo, prima della conclusione, sono state riportate tutte le acquisizioni effettuate con la scheda elettronica progettata. Dal lavoro svolto è possibile stilare delle conclusioni e delle riflessioni su quanto ottenuto, e anche descrivere eventuali sviluppi futuri riguardanti questo progetto.

La scheda elettronica testata funziona come previsto, rispettando gli obiettivi iniziali che erano stati posti. Tuttavia, sono state individuate alcune possibili modifiche al fine di rendere il funzionamento della scheda più accurato e meno suscettibile ai disturbi elettromagnetici esterni. L'accuratezza sul massimo valore misurato è

inferiore allo 0,6%; d'altra parte, per valori prossimi allo zero, questa aumenta e non rimane costante. Per le misurazioni in corrente alternata, è stata osservata una variazione del segnale in uscita che dipende dal valore della frequenza elettrica del segnale. Questo problema può essere risolto calibrando opportunamente la scheda in base alla frequenza elettrica alla quale verranno eseguite le acquisizioni. Il test finale eseguito sull'inverter ha prodotto risultati incoraggianti, e la curva ottenuta dalla scheda LOC453 si sovrappone perfettamente, salvo il rumore presente, a quella della soluzione attualmente utilizzata come riferimento, che impiega i trasformatori amperometrici.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri di questo progetto, ci sono vari aspetti che potrebbero essere migliorati e altre funzionalità che potrebbero essere integrate. Tra le diverse funzionalità aggiuntive implementabili vi è il rilevamento delle sovracorrenti da parte del sensore, come descritto nel Capitolo 3. Questo potrebbe essere facilmente implementato tramite il collocamento di opportune resistenze, come indicato nel datasheet del sensore. Un aspetto che merita un ulteriore studio e approfondimento è quello relativo alle simulazioni software dello schermo ferromagnetico, svolte tramite il software per simulazioni elettromagnetiche. Queste simulazioni sono state eseguite utilizzando il materiale ferro, poiché il materiale di cui sono composti gli schermi nella realtà, ossia il NiFe, non era disponibile tra i materiali simulabili. Un ulteriore miglioramento potrebbe riguardare la rimozione dell'offset iniziale del sensore; infatti, questo presenta un valore di alcuni millivolt nelle tre fasi che influenza l'accuratezza ottenuta, soprattutto per valori prossimi allo zero. Uno sviluppo futuro potrebbe quindi mirare a ridurre questo offset il più possibile, avvicinandolo a zero, in modo da non compromettere significativamente l'accuratezza. Infine, dalle misurazioni eseguite sull'inverter è emerso un rumore non trascurabile, generato in parte dal setup di misura, e una particolare suscettibilità alla frequenza di switching dell'inverter. Questo problema potrebbe essere affrontato introducendo un opportuno stadio di filtraggio al fine di ridurre le interferenze. Altre possibili soluzioni potrebbero consistere nel progettare il circuito stampato e disporre il layout in modo più accurato. Inoltre, si potrebbero implementare schermature elettromagnetiche attorno alla scheda per proteggerla da questi disturbi.

Bibliografia

- [1] Loccioni. Sito web: <https://www.loccioni.com/it/>, 2024.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley and Sons Inc, 2002.
- [3] Spinsante S. Sensori e trasduttori - Dispense del corso, Università Politecnica delle Marche, 2022-2023.
- [4] LEM. Current transducer LF 510-S. Datasheet:https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/lf_510-s.pdf, 2018.
- [5] Melexis Technologies. MLX91218, High speed current sensor IC with OCD. Datasheet:<https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/datasheet-mlx91218>, 2024.
- [6] Melexis Technologies. Current sensors reference design guide. Application Note: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/application-notes/application-note-current-sensor-design-guide>, 2023.
- [7] Sang-Hoon Kim. *Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors*. Elsevier Science, 2017.
- [8] R.S. Popovic, P.M. Drljaca, and C. Schott. Bridging the gap between AMR, GMR, and Hall magnetic sensors. In *2002 23rd International Conference on Microelectronics. Proceedings (Cat. No. 02TH8595)*, volume 1, pages 55–58. IEEE, 2002.
- [9] C. Schott, R. Racz, and S. Huber. Smart CMOS sensors with integrated magnetic concentrators. In *SENSORS, 2005 IEEE*, pages 4–pp. IEEE, 2005.
- [10] H. Fan, S. Li, V. Nabaei, Q. Feng, and H. Heidari. Modeling of three-axis Hall effect sensors based on integrated magnetic concentrator. *IEEE Sensors Journal*, 20(17):9919–9927, 2020.
- [11] R. S. Popovic, P. M. Drljaca, and P. Kejik. CMOS magnetic sensors with integrated ferromagnetic parts. *Sensors and Actuators A: Physical*, 129(1-2):94–99, 2006.

Bibliografia

- [12] M. Crescentini, S. F. Syeda, and G. P. Gibiino. Hall-effect current sensors: Principles of operation and implementation techniques. *IEEE Sensors Journal*, 22(11):10137–10151, 2021.
- [13] CST STUDIO SUITE. Software di simulazione dei campi elettromagnetici. <https://www.3ds.com/it/prodotti-e-servizi/simulia/prodotti/cst-studio-suiter/>, 2024.
- [14] H.-G. Kim, G.-B. Kang, and D.-J. Nam. Coreless Hall current sensor for automotive inverters decoupling cross-coupled field. *Journal of Power Electronics*, 9(1):68–73, 2009.