Università degli Studi di Palermo

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria dei Sistemi Cyber-fisici per l'Industria

Rogowski Coil

Studenti:

Alessandro Adragna 0738270
Andrea Battello 0744716
Federico Crucillà 0744768
Lorenzo Vizzini 0737493

Docente:

Costantino Giaconia

Anno Accademico 2023-2024

INDICE

PREFAZIONE **3**

FINALITA' PROGETTO **4**

- *Vantaggi*
- *Svantaggi*
- *Differenze tra Rogowski Coil e Trasformatore Amperometrico*

FUNZIONAMENTO FISICO **6**

FASE DI BRAINSTORMING **7**

SCHEMA CIRCUITALE **8**

COMPONENTISTICA SCELTA **9**

- *Analisi componenti (datasheet)*
- *Codice microcontrollore*
- *Case realizzato con stampa 3D*

MODALITÀ DI PROVA **14**

RISULTATI OTTENUTI **16**

- *Analisi dei dati*
- *Analisi dei grafici*

CRITICITÀ E LIMITI RISCONTRATI **20**

PREFAZIONE

L' obiettivo di questo lavoro è quello di partire dalle conoscenze acquisite lungo il percorso universitario, per giungere alla realizzazione di un progetto, affrontando nel dettaglio gli argomenti trattati durante il corso che verrà illustrato in due parti.

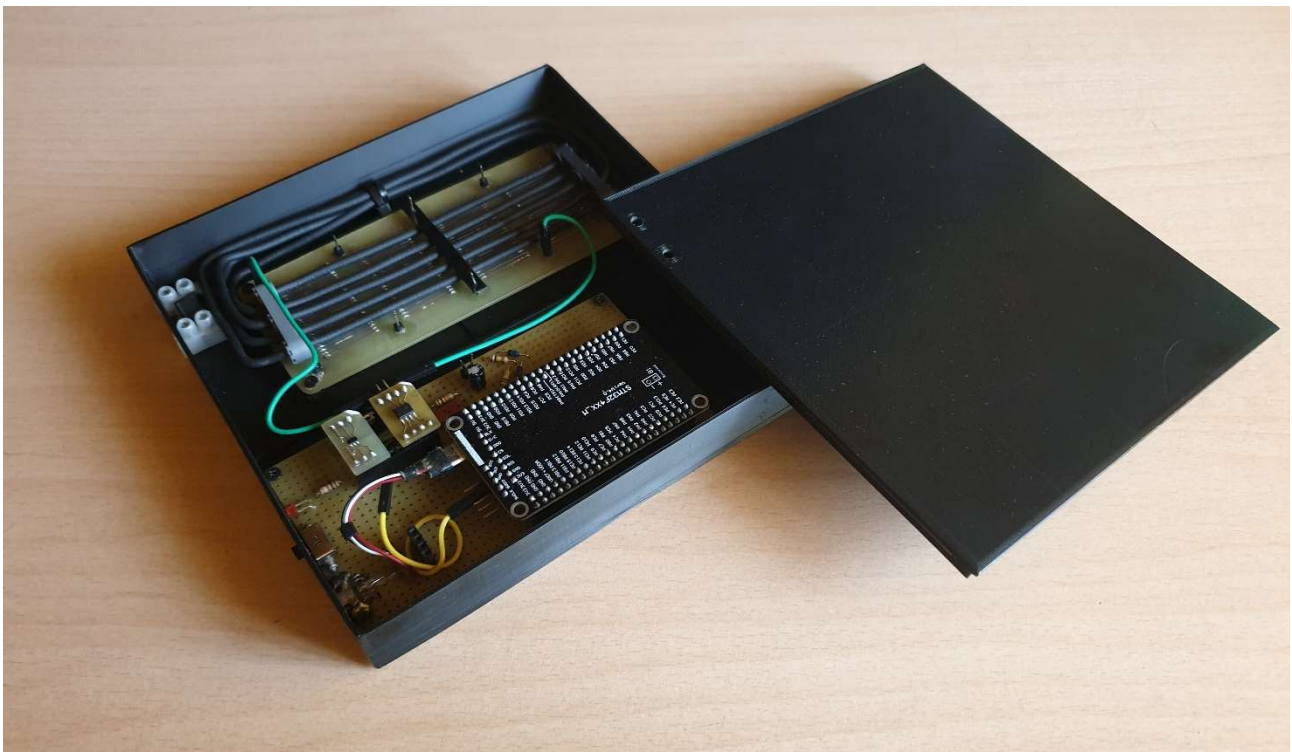
Nella prima sono esposte le finalità del progetto, con i rispettivi vantaggi e svantaggi, il funzionamento fisico che sta dietro ad esso, e la fase di brainstorming che ci ha permesso di determinare gli elementi necessari per il suo sviluppo.

Nella seconda parte è illustrato come, partendo dai criteri esposti nella prima si è riusciti nella realizzazione dello stesso mediante l'ausilio di schemi circuitali e software specifici, di componentistica elettronica e, programmazione del microcontrollore.

Infine, raggiunto l'obiettivo, ne sono stati evidenziati i limiti e le criticità.

Lo sviluppo del progetto è stato in gran parte eseguito nel laboratorio ESDLab di UNIPA con la supervisione del professore Costantino Giaconia e, grazie anche all'aiuto dei dottorandi, siamo riusciti a raggiungere l'obiettivo confrontandoci costantemente sulle problematiche riscontrate in corso di esecuzione e le migliori soluzioni da adottare.

Sotto un'immagine del progetto completo



FINALITA' PROGETTO

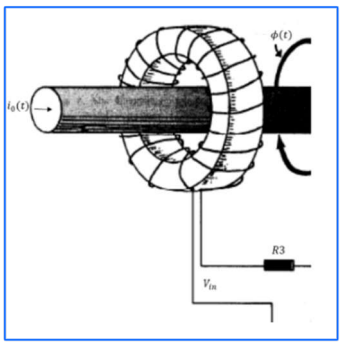
Il progetto assegnato e definito consiste nella realizzazione di un sensore che permette di misurare correnti alternate mediante fenomeno induttivo, in assenza di componenti ferromagnetiche, che prende il nome tecnico di "Rogowski Coil".

Le bobine di Rogowski sono state create nel 1912 per la misura di campi magnetici. Inizialmente non furono molto utilizzate per via del tenue segnale in uscita e tuttavia, ai giorni nostri, sono impiegate per la misura di correnti alternate.

Questo perché con i sistemi elettronici moderni è possibile amplificare e campionare il segnale per ottenere una lettura rappresentativa, senza utilizzare apparecchiature particolarmente ingombranti o costose.

Esso non è altro che una bobina, avvolta in aria, posta attorno ad un conduttore in modo toroidale il cui campo magnetico prodotto dalla corrente, che le attraversa longitudinalmente, induce una tensione ai capi della bobina stessa. Tale tensione di uscita è proporzionale alla variazione nel tempo della corrente.

Il dispositivo consiste di un cavo conduttore avvolto in forma elicoidale su un supporto flessibile (nel nostro caso abbiamo usato una PCB e realizzato delle piste di rame parallele), per ottenere una bobina di lunghezza adeguata. Un'estremità viene riportata all'origine della bobina passando il cavo di ritorno all'interno del solenoide stesso. Tale accorgimento costruttivo consente di mantenere libera un'estremità della bobina, ed essa risulta così facilmente avvolgibile intorno ad un filo conduttore, in cui scorre corrente alternata, che è quella che si vuole misurare, evitando di smontare il cavo elettrico.



Nell'immagine raffigurata la corrente $i_0(t)$ è quella che circola in un cavo mentre, l'uscita della bobina è collegata ad un circuito di elaborazione per ottenere una tensione $v_{coil}(t)$ in uscita proporzionale alla $I_{misurata}(t)$, tenendo conto anche della frequenza di quest'ultima.

L'assenza di elementi ferromagnetici assicura molti benefici quali:

- Assenza di saturazione magnetica e/o di fenomeni d'isteresi
- Una buona linearità
- Ingombro ridotto
- Costi trascurabili
- Garanzia di isolamento galvanico
- Circuito di condizionamento semplice.

Vi sono, tuttavia, due aspetti importanti da tenere presente sulla Rogowski in fase di progetto:

1. Non misura le componenti della corrente continua (DC)
2. Non è molto accurata alle basse frequenze

VANTAGGI

I vantaggi dell'uso della Rogowski Coil sono molteplici rispetto ad altri strumenti di sensing, alcuni di questi sono:

- Flessibilità e deformabilità della sonda, che ne permette l'avvolgimento intorno ad un conduttore in tensione senza disturbarlo
- Non invasività della misura
- Presenta un'induttanza bassa che gli conferisce una propensione spiccata alla misura di correnti che variano nel tempo anche con elevata velocità
- È immune all'interferenza magnetica
- È adatta alla misurazione di correnti fino a centinaia di kA
- Abbastanza utile con grandi conduttori di forma irregolare e/o in luoghi scarsamente accessibili
- Non intrusiva, cioè non assorbe potenza dal circuito sottomisura
- Ha un elevata linearità e banda infinita
- Facilità di accoppiamento al conduttore da misurare

SVANTAGGI

Gli svantaggi dell'uso della Rogowski Coil sono molto inferiori rispetto ai vantaggi, tra questi troviamo:

- Alle alte frequenze si comporta come un semplice induttore
- È molto sensibile, proprio per questo è necessario utilizzare dei filtri passabasso che permettono di tagliare i disturbi alle alte frequenze.

DIFFERENZE CON I TRASFORMATORI AMPEROMETRICI

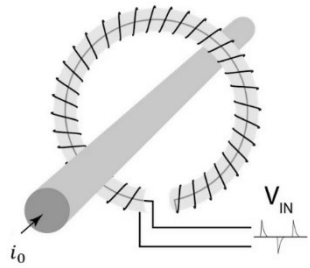
I trasduttori Rogowski Coil competono con i trasformatori amperometrici, dedicati anch'essi alla misura di corrente alternata. Un TA è un vero trasformatore, il primario genera un campo magnetico che viene cancellato dalla corrente che passa nel secondario, così nel nucleo il flusso rimane di valore limitato. Il TA funziona con il secondario in cortocircuito e dà una corrente di uscita proporzionale a quella di ingresso.

La Rogowski Coil invece è solo un sensore di campo magnetico, che non disturba quello generato dalla corrente che si vuole misurare. In uscita dalla bobina di Rogowski si genera una tensione proporzionale alla derivata della corrente da rilevare, ed è quindi necessario integrare tale tensione. Inoltre non passa corrente perché non si deve disturbare il campo che viene misurato.

Facendone una comparazione schematica si ha:

	Sensori Rogowski	Trasformatori Amperometrici
Misura di correnti elevate	x	
Applicazioni con accesso difficoltoso	x	
Spazi di cablaggio ridotti		x
Linearità della misura	x	
Non intrusività nel circuito di misura	x	
Minori barriere all'adozione		x
Prezzo più conveniente		x

FUNZIONAMENTO FISICO



Facendo scorrere una corrente alternata i_0 sul conduttore poggiato sulla Rogowski si genera un campo magnetico ϕ attorno al conduttore tale per cui:

$$\phi = \int d\phi = \mu_0 \, nA \int H \, dl \, cos\alpha = \mu_0 \, n \, A \, i$$

Il flusso di campo magnetico indotto sulla bobina di Rogowski genera una tensione alternata $v_{coil}(t)$ ai suoi capi, con frequenza uguale a quella di alimentazione del conduttore:

$$v_{coil}(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -\mu_0 nA \frac{di}{dt}$$

A questo punto il segnale di uscita $v_{coil}(t)$ della bobina viene elaborato in modo tale da ricavare il valore di corrente per integrazione:

$$i = -\frac{L}{\mu_0 SN} \int v_{coil}(t) \, dt$$

Dopodiché, conoscendo la lunghezza del solenoide, il numero delle spire e la loro sezione, è possibile ottenere immediatamente la corrente, come esplicitato nella sottostante formula:

$$I_{conduttore} = -\frac{L}{\mu_0 SN} \frac{V}{2\pi f}$$

In cui:

$I_{conduttore} = valore \; della \; corrente \; da \; misurare$

$V = valore \; della \; tensione \; misurata \; ai \; morsetti \; della \; bobina$

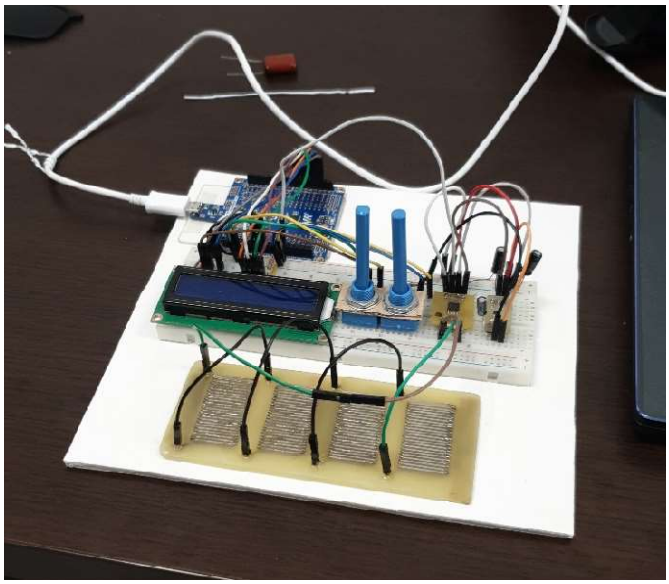
$f = frequenza \; della \; corrente \; da \; misurare$

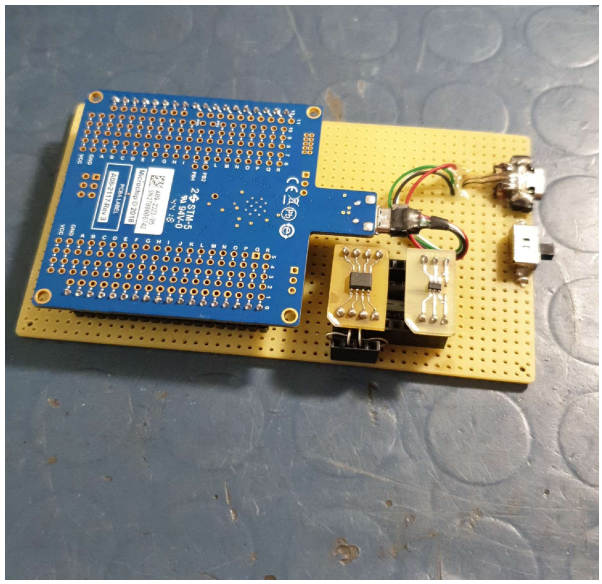
Come vedremo successivamente, durante l'analisi dei dati ottenuti dalle misure delle varie prove, apparirà chiara la proporzionalità diretta tra corrente sul carico e tensione sulla Rogowski, mentre sarà inversa quella tra la corrente e la frequenza della stessa.

FASE DI BRAINSTORMING

La nostra idea era quella di utilizzare una bobina con piccola sezione, avvolta a modo di solenoide, il cui segnale venisse acquisito direttamente dal microcontrollore Atmega328p.
Tuttavia, il professore Giaconia ha proposto un'idea più ambiziosa, cioè realizzare una Rogowski Coil su un PCB, rendendola di fatto un solenoide rettangolare.
Durante le prove sperimentali effettuate con l'oscilloscopio, a fronte di un segnale ad elevata frequenza (dell'ordine delle centinaia di kHz e decine di mA) generato su un filo conduttore poggiato sopra la Rogowski, ci si è accorti di come la tensione ai capi della stessa fosse molto piccola.
Questo problema ci ha spinto all'utilizzo di un amplificatore che ci permettesse di avere un guadagno sulla tensione di uscita dalla Rogowski.
L'amplificatore però necessitava di un riferimento inferiore negativo di $-5V$ e si è così pensato di inserire una pompa di carica con il compito di generarlo, permettendo all'amplificatore di porre il riferimento nullo a metà tra $+5V$ e $-5V$ ovvero $0V$.
Abbiamo inoltre notato che il segnale in uscita dalla Rogowski presentava del rumore ad alta frequenza, proprio per questo abbiamo riflettuto sul fatto di inserire un filtro RC passa-basso con frequenza di taglio pari a $20\ kHz$.
Durante le varie prove di acquisizione effettuate in laboratorio tramite un monitor seriale installato sul computer, ci si è accorti di come il microcontrollore Atmega328p fosse abbastanza limitato per l'invio su seriale delle misure acquisite dall'ADC, con frequenze inferiori ai $200\ Hz$.
Per superare questi vincoli, si è pensato di optare per un microcontrollore più performante come l'STM32F407, che ci ha permesso di eliminare il limite di cui sopra, di ottenere elevate prestazioni in termini di numero di dati acquisiti ed elaborati, e di effettuare una media mobile via firmware su numerosi campioni, realizzando quindi un filtraggio digitale.
Alla fine di tutto ciò, si è pensato di collocare le componenti su una millefori in modo tale da avere dei collegamenti fissi e stabili tra i vari componenti.

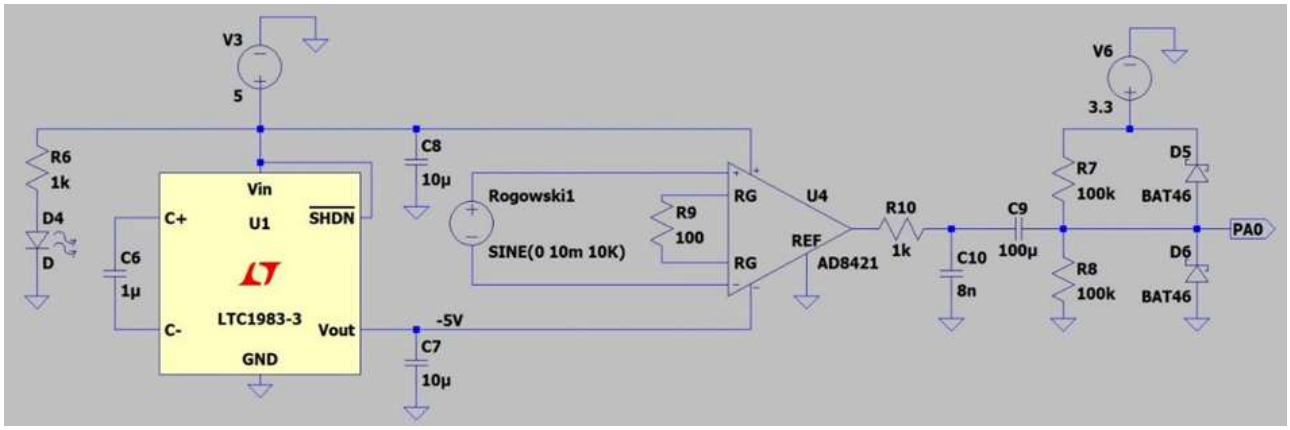
Sotto alcune immagini delle fasi iniziali del progetto

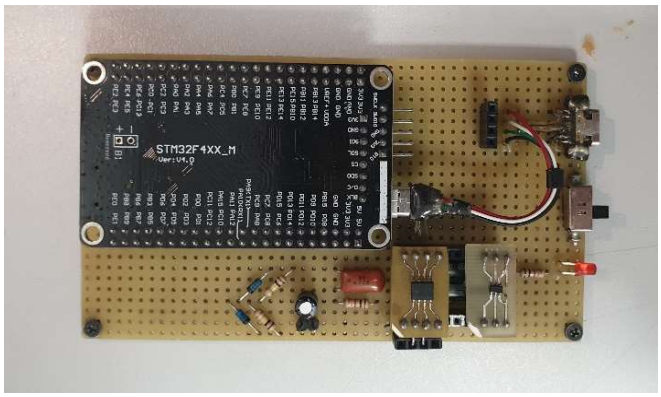




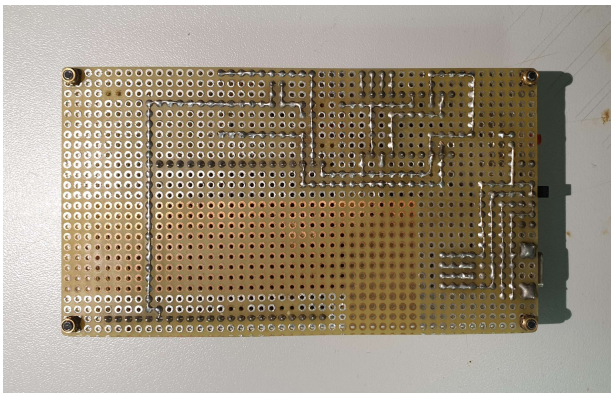
SCHEMA CIRCUITALE

L'immagine successiva riporta il circuito, simulato con il software LTspice, dove il segnale prodotto da un generatore sinusoidale (Rogowski Coil) viene prima amplificato e poi innalzato per essere dato in ingresso al microcontrollore tramite il pin PA0 dello stesso.





Top



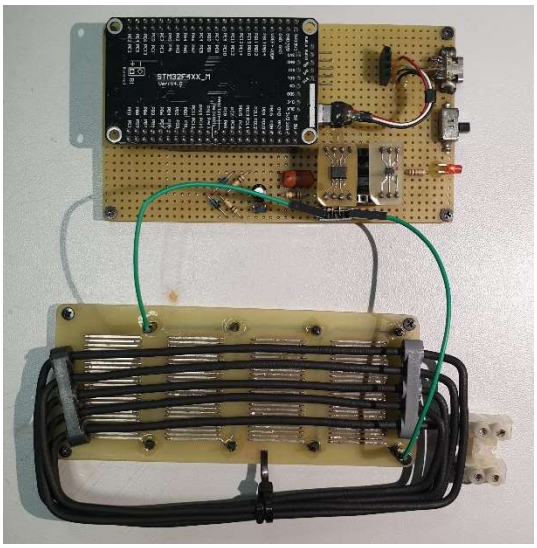
Bottom

Come si può vedere i componenti sono stati collocati su una scheda millefori. Inoltre sono stati inseriti un led di PWR ON ed un interruttore ON/OFF ed alcuni pin di test e debug da dove poter prelevare il segnale prodotto dalla Rogowski, sia appena dopo l'amplificatore, che a monte ed a valle del partitore di tensione.

L'alimentazione del sistema avviene tramite porta usb tipo-C, con la quale vengono anche inviati i dati per il monitor seriale.

Sia il microcontrollore che l'amplificatore e la pompa di carica sono facilmente removibili dalla millefori, perché installati tramite pettini maschio-femmina.

Nell'immagine a lato il sistema completo.



COMPONENTISTICA SCELTA

- Microcontrollore STM32F407
- Amplificatore da strumentazione AD8421 (Analog Device)
- Pompa di carico LTC1983 (LINEAR Technology)
- Filtro RC Analogico
- Partitore di tensione e diodi Schottky
- Bobina di Rogowski

MICROCONTROLLORE

Inizialmente lo sviluppo del progetto era partito con l'utilizzo del microcontrollore AVR Atmega328p ma, in corso d'opera, ci si è resi conto che lo stesso presentava dei limiti fisici dovuti alle prestazioni non ottimali del collegamento seriale per l'invio delle letture verso l'esterno. A tale problematica si è risposto con l'impiego di un nuovo microcontrollore più performante, ovvero l'STM32 della STMicroelectronics.

Per la programmazione del micro si è utilizzato il software STM32CubeIDE.exe e tramite la visualizzazione semplificata dell'IOC, sono state configurate le interfacce necessarie, ovvero: ADC1, DMA2, Timer10, USB_OTG_FS (Full Speed), GPIO.

Per l'acquisizione del segnale ADC1 si usa il canale IN0, poi collegato al pin fisico PA0 e configurato nella sezione GPIO dell'IDE, in modalità analogica.

Per la V_{REF} dell'ADC si fa uso del riferimento interno calibrato a $3.3V$.

Il clock dell'ADC $CLK_{ADC} = \frac{PCLK2}{2}$, nella sezione clock configuration, corrisponde a $\frac{72MHz}{2} = 36MHz$.

L'ADC ha risoluzione pari a $12\ bit$ (15 cicli di clock sono necessari per acquisire un campione).

Per migliorare le prestazioni di salvataggio in memoria dei dati acquisiti dall'ADC si fa uso del DMA, settato con direzione da periferica verso memoria.

È stata scelta una modalità di richiesta del DMA di tipo normale e non circolare perché, da firmware, abbiamo impostato l'avvio del DMA e dell'ADC in riferimento al Timer10 che ci permette di scandire i tempi di acquisizione, elaborazione ed invio dei dati.

Il Timer10 ha un singolo canale che è stato impostato come 'Output Compare No Output'.

La frequenza del Timer10 è settata a $f_{TIM} = \frac{72MHz}{71} + 1 = 1\ MHz$, dove 71 è il Prescaler, questo valore poi va diviso per 5 ottenendo così la frequenza operativa di $200\ kHz$, ovvero si arriva ad acquisire una campione ogni $5\ \mu s$.

Per la trasmissione dei dati verso l'esterno del microcontrollore si è optato per la connessione USB_OTG in modalità Full Speed ($12\ Mbit/s$) che opera a $48\ MHz$.

AMPLIFICATORE AD8421

Adoperato per avere un guadagno sul livello di tensione in uscita dalla bobina di Rogowski e aumentare l'accuratezza dell'acquisizione da parte dell'ADC e scelto in quanto questo tipo di amplificatore si presta per applicazioni in ambito di misurazioni di segnali.

È stata inserita una resistenza $R_9 = 100\ \Omega$ per avere un guadagno desiderato pari a 100.

Tale amplificatore è progettato da Analog Device con il corrispettivo datasheet.

POMPA DI CARICO LTC1983

Si è reso necessario inserire una pompa di carica per generare una tensione negativa di $-5V$ per l'amplificatore, spostando così il riferimento dello zero esattamente a $0V$ e non a $+2{,}5V$.
Tale pompa di carico è realizzata dalla Linear Technology con il corrispettivo datasheet.

FILTRO RC

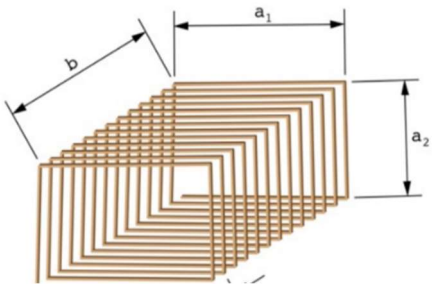
È stato inserito un filtro RC analogico per eliminare tutti i disturbi alle alte frequenze, scegliendo una frequenza di taglio pari a $f_{CUT} = 20kHz$. Per quanto riguarda il dimensionamento della resistenza e del condensatore, sono stati definiti i seguenti valori: $R_{10} = 1\ k\Omega$ e $C_{10} = 8\ nF$.

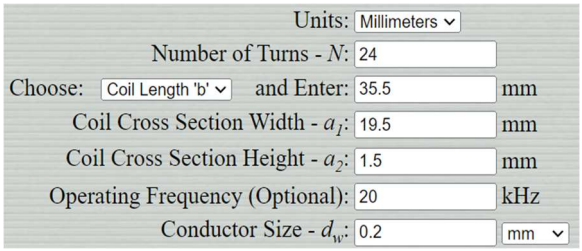
PARTITORE DI TENSIONE E DIODI SHOTTKY

Poiché sappiamo che il micro può leggere solo tensioni positive, l'inserimento di un partitore di tensione ha fatto sì che, alzando il riferimento da 0V a 1,65V (3,3V/2), utilizzando una tensione stabile di 3,3V che lo stesso micro produce, realizzi uno shift in alto del segnale in ingresso al micro che ha consentito di leggere le tensioni che prima non era possibile leggere in quanto negative e fuori dal campo di lettura. Da software poi è stata applicata la correzione, sottraendo il valore dello shift, e ottenendo così la misura corretta che contempla tutto l'andamento del segnale campionato. Sono presenti anche due diodi di tipo Schottky (modello STM BAT46) posti in antiparallelo a protezione del microcontrollore da sovracorrenti permettendo il loro ricircolo.

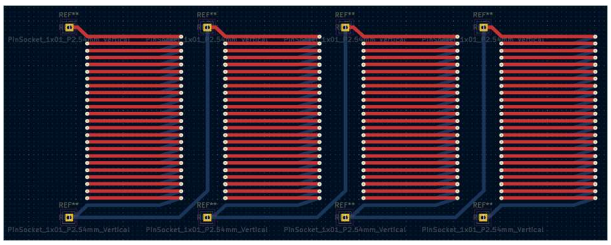
BOBINA DI ROGOWSKI

La bobina realizzata sulla PCB ha i seguenti dati costruttivi:

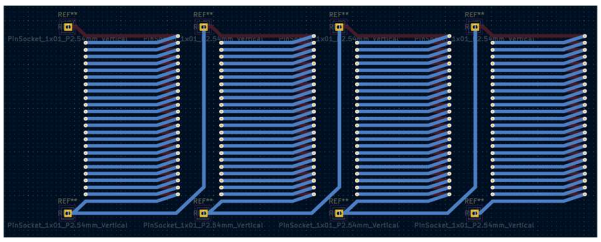




Va specificato che tali dati valgono per ognuna delle 4 bobine realizzate sulla PCB.
Il disegno della PCB è stato realizzato tramite il software KiCad di cui nelle immagini sottostanti:

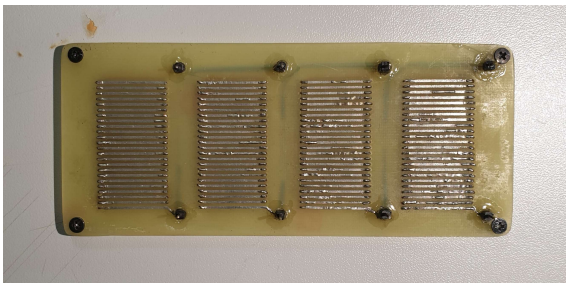


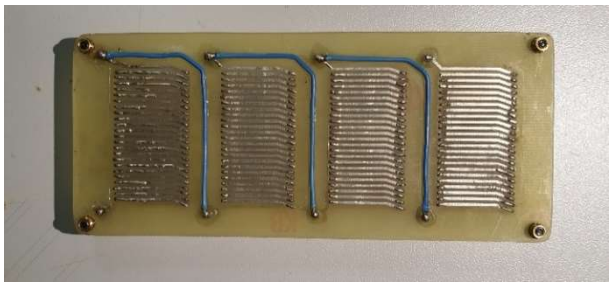
Top



Bottom

Successivamente è stato stampato il layout su una carta specifica che permette di trasferire col calore la traccia sulla PCB. Questa sottoposta poi ad un bagno acido permette di rimuove le superfici di rame non coperte dalla traccia. Successivamente sono stati realizzati i collegamenti tra il Top ed il Bottom realizzando così il circuito finale di cui in foto sotto:





Top ***Bottom***

CODICE MICROCONTROLLORE

Per la programmazione del microcontrollore si è usato il software STM32CubeIDE che, mediante una prima e semplice interfaccia grafica, ha permesso di settare i vari registri riferiti ai timer, all'ADC, al clock, ed alla trasmissione USB. Dopodiché, si è passati alla programmazione vera e propria mediante l'utilizzo del linguaggio C; viene riportato di seguito una parte del codice del *main.c*.

In questa prima sezione si definiscono una serie di parametri che sono: la dimensione del buffer dell'ADC (12 bit), il numero di cifre decimali della media mobile (4), il buffer dati impiegato successivamente per conservare i dati prodotti dall'ADC e su cui si effettua la media mobile, infine i due float corrispondenti al valore effettivo della tensione acquisita dall'ADC e della FFT da cui ricavare la frequenza.

```c
/* USER CODE BEGIN PV */
#define ADC_BUFF_SIZE       (1 << 12)
#define MAVG_SIZE           4
uint16_t BuffData[ADC_BUFF_SIZE + MAVG_SIZE - 1];
uint8_t adc_conv_complete_flag = 0;
float V_Data[ADC_BUFF_SIZE];
float FFT_Data[ADC_BUFF_SIZE];
/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes -----------------------------------------------*/
void SystemClock_Config(void);
/* USER CODE BEGIN PFP */
uint16_t avg_u16(volatile uint16_t *array, uint32_t nsamples) {
    uint32_t output = 0.0f;
    for (uint32_t i = 0; i < nsamples; i++) {
        output += array[i];
    }
    output /= nsamples;
    return output;
}

void mavg_u16(volatile uint16_t *array, uint32_t size, uint32_t nsamples) {
    for (uint32_t i = 0; i < size; i++) {
        array[i] = avg_u16(&array[i], nsamples);
    }
}

void usb_print(const char* CharBuffer)
{
    while (CDC_Transmit_FS((uint8_t*) CharBuffer, strlen(CharBuffer)) != USBD_OK){};
}
/* USER CODE END PFP */
```

Dopo di ciò si dichiarano le funzioni necessarie a realizzare la media dei campioni, la media mobile, ed i parametri della trasmissione su USB.

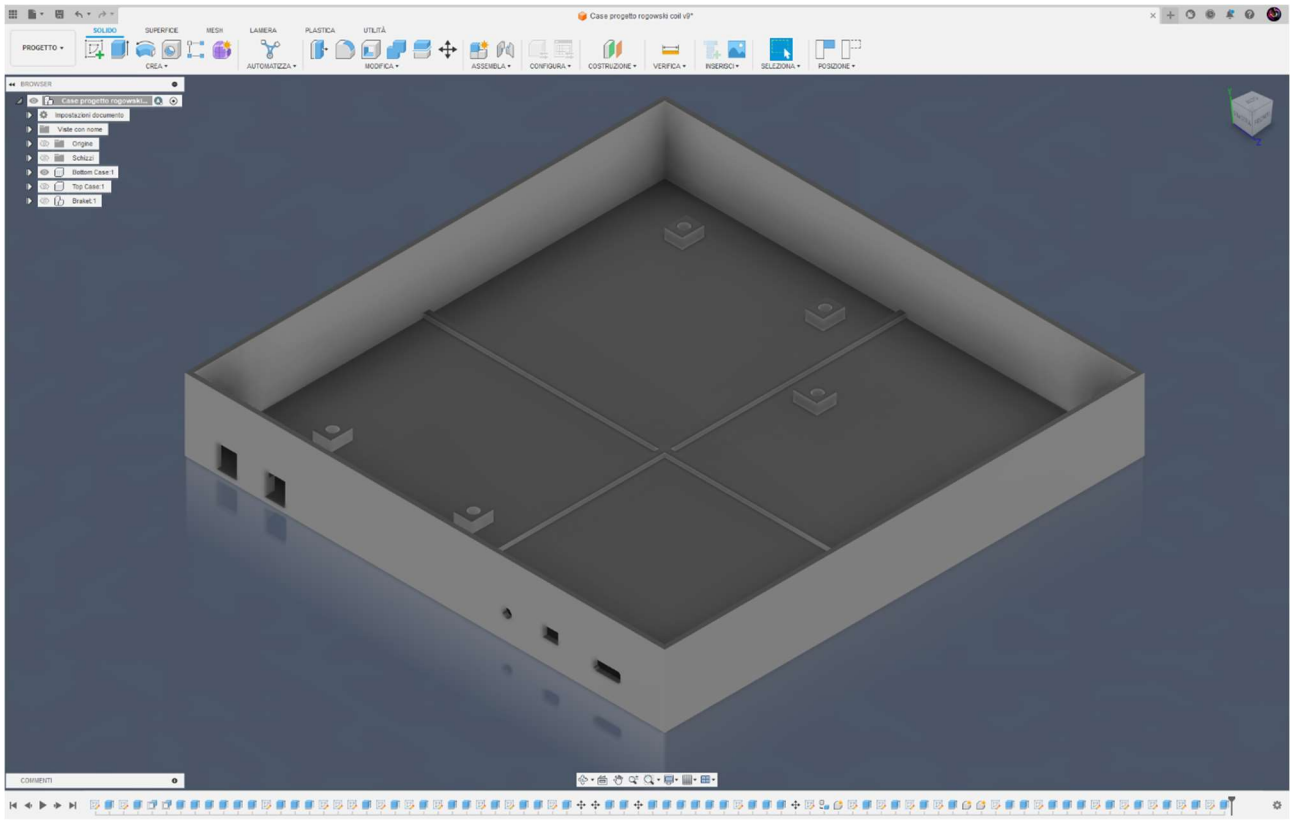
Successivamente all'interno di un while (1) viene eseguita tutta la procedura:

- Avvio del timer
- Avvio dell'ADC in modalità DMA
- Acquisizione e salvataggio dei campioni in memoria
- Stop del timer
- Filtraggio dei campioni con media mobile
- Calcolo dell'FFT da cui poi si andrà a ricavare il valore della frequenza in corrispondenza del picco
- Invio dei dati via USB su monitor seriale
- Reset del buffer dati e delay di 1 secondo per del restart del ciclo

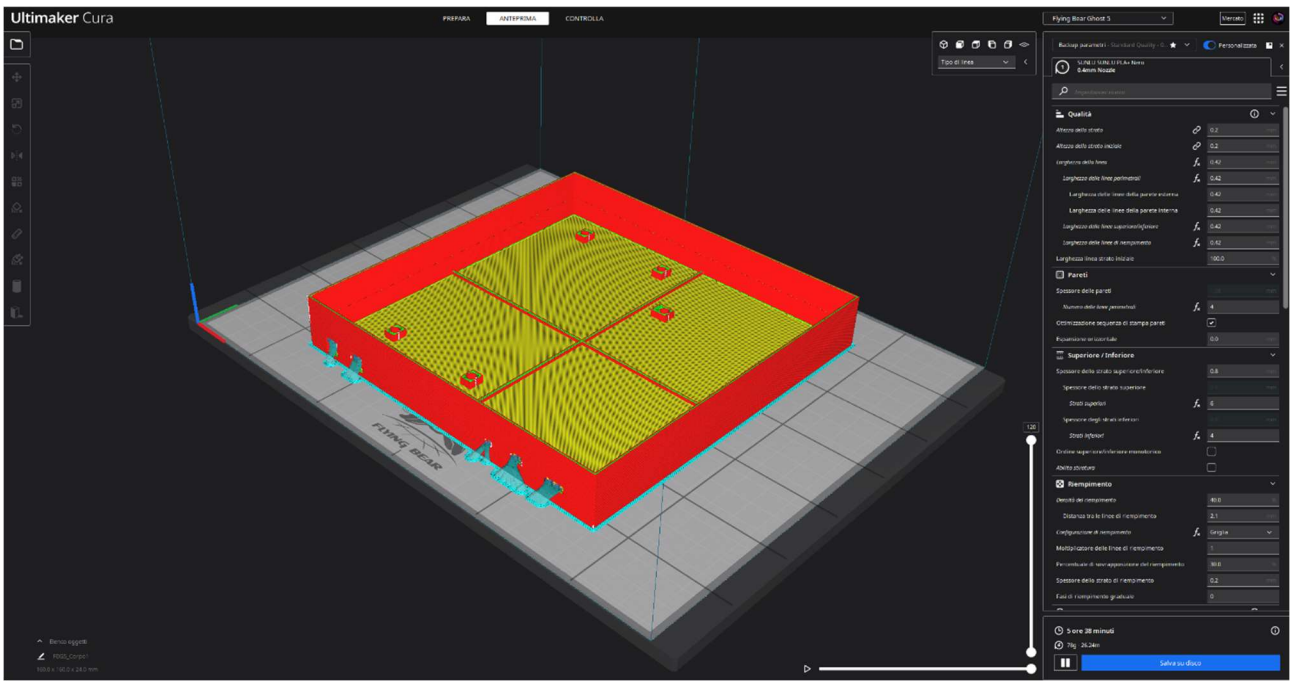
```c
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim10);
    HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*) BuffData, ADC_BUFF_SIZE + MAVG_SIZE - 1);
    while (!adc_conv_complete_flag) {};
    adc_conv_complete_flag = 0;
    HAL_TIM_Base_Stop_IT(&htim10);

    mavg_u16(BuffData, ADC_BUFF_SIZE, MAVG_SIZE);

    for (uint32_t i = 0; i < ADC_BUFF_SIZE; i++)
    {
        V_Data[i] = (BuffData[i] * 3.3f / 4096.0f) - 1.63f;
        FFT_Data[i] = V_Data[i];
    }

    FFT_start(FFT_Data, ADC_BUFF_SIZE, 1.0f);

    static char buffer[128];

    usb_print("\n\rPrinting signal and FFT buffer\n\r");
    for (uint32_t i = 0; i < ADC_BUFF_SIZE; i++)
    {
        sprintf(buffer, "%.3f,%.3f\r\n", V_Data[i], FFT_Data[i]);
        while (CDC_Transmit_FS((uint8_t*) buffer, strlen(buffer)) != USBD_OK) {};
    }


    uint32_t PeakSampleIndex = FFT_GetMaximum(FFT_Data, ADC_BUFF_SIZE);
    float PeakFreq = PeakSampleIndex * (160000.0f) / (ADC_BUFF_SIZE/2.0f);

    memset(BuffData, 0, sizeof(BuffData));
    HAL_Delay(1000);

    /* USER CODE END WHILE */
```

CASE REALIZZATO CON STAMPA 3D

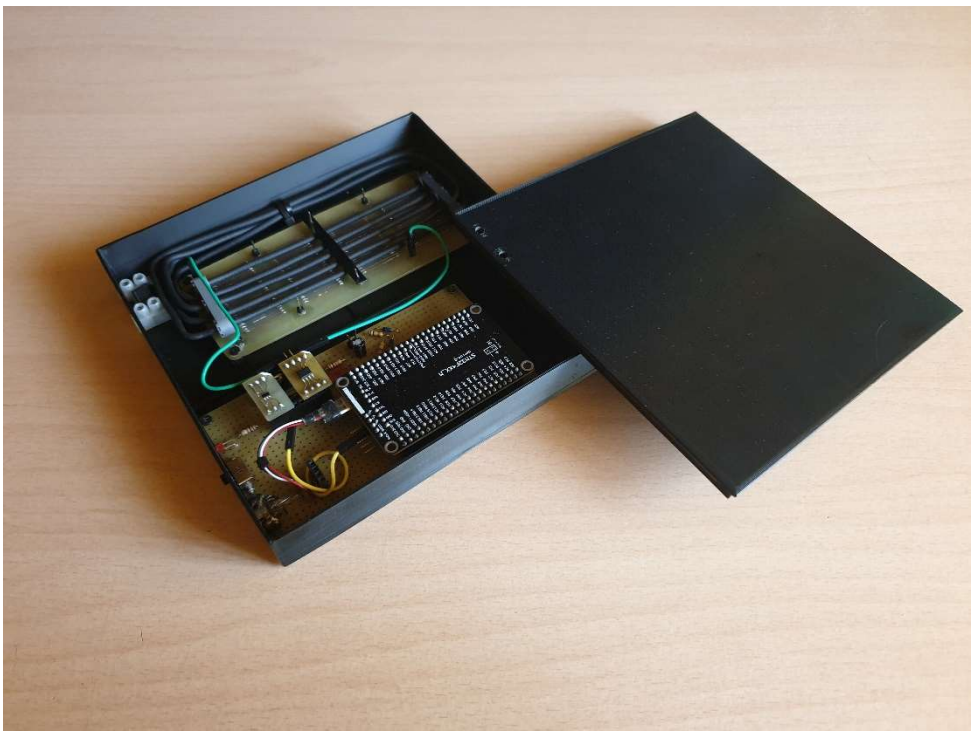
Per alloggiare l'intero sistema è stato creato un case tramite il software di modellazione 3D Fusion360, prevedendo gli ancoraggi e le fessure per i vari I/O quali usb, led, interruttore e collegamenti rapidi al conduttore, poggiato all'interno sulla Rogowski Coil.



Naturalmente è stato previsto anche un coperchio a chiusura del case ed un componente di bloccaggio in posizione del mammut impiegato per connettere il conduttore con l'esterno. Successivamente si è passati al pre-processing tramite il software Cura per potere stampare in 3D il set di 3 componenti (Bottor Case, Top Case e Braket).

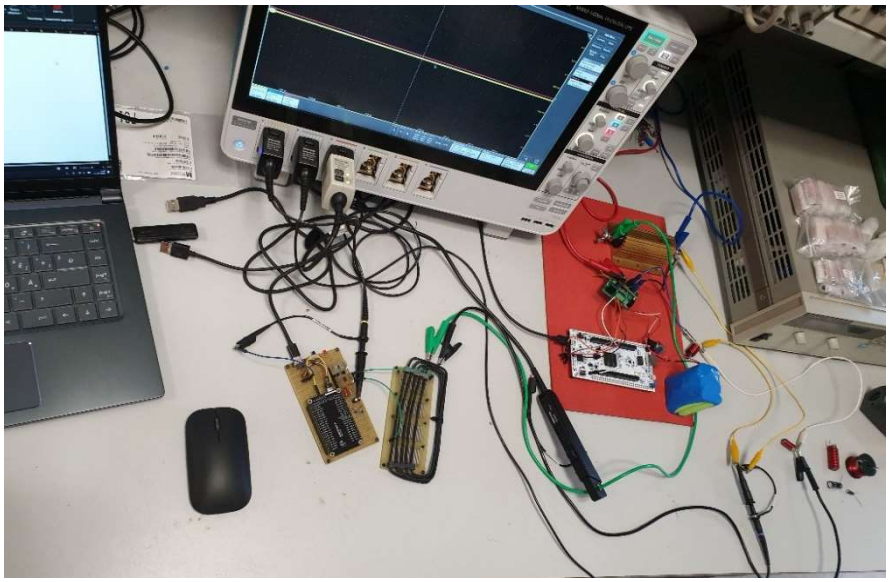


Stampati tutti i componenti il risultato finale dell'assemblato è il seguente:

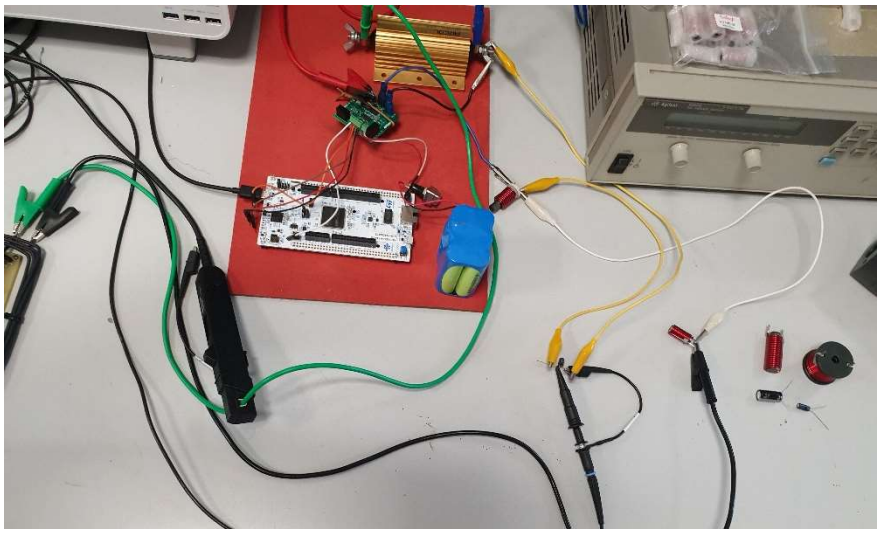


Sia la Rogowski che la millefori sono state avvitate al case utilizzando dei grani di ottone filettati inseriti a caldo nelle apposite sedi. Si è reso necessario anche un post-processing per rifinire le stampe realizzate ed eliminare i supporti indicati in celeste sul software Cura.

MODALITÀ DI PROVA



Per potere testare il funzionamento, in particolare per verificare la linearità tra la variazione della corrente AC che scorre sul conduttore e la tensione AC generata ai capi della Rogowski, si è fatto ricorso all'uso di un generatore DC da banco, di un "GaN Power Half-Bridge" coadiuvato da un microcontrollore STM32H7 e di un filtro LCL.



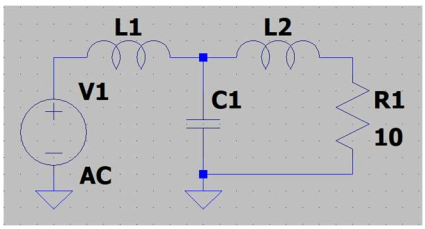
Nello specifico:

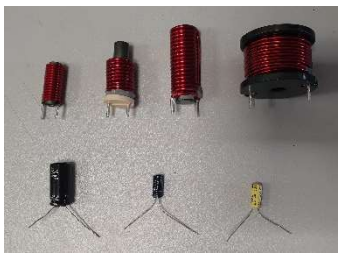
- l'alimentatore DC, in cui è possibile settare i limiti di tensione e corrente, è in grado di erogare un corrente massima $Apower_{max} = 9A$ ed una tensione massima $Vpower_{max} = 60V$;
- il GaN Power Half-Bridge è una scheda di potenza, dotata di un apposito driver che si occupa di pilotare il gate dei due mosfet, di tipo GaN, che realizzano un H-bridge ed è in grado di supportare una corrente massima di $30A$;
- l'STM32H7 si occupa di generare un segnale a onda quadra di cui è possibile gestire frequenza e duty cycle, che poi viene inviato al driver della scheda di potenza;
- poiché il segnale generato dal microcontrollore è un'onda quadra, lo sarà anche l'andamento della tensione e quindi della corrente sulla parte di potenza. Per questo motivo si è reso necessario l'inserimento di un filtro LCL che permette di rendere l'andamento prossimo ad una

sinusoide ed a cui la Rogowski Coil risponde meglio rispetto ad un'onda quadra, poiché la tensione sulla stessa dipende dall'integrale della corrente sul carico.

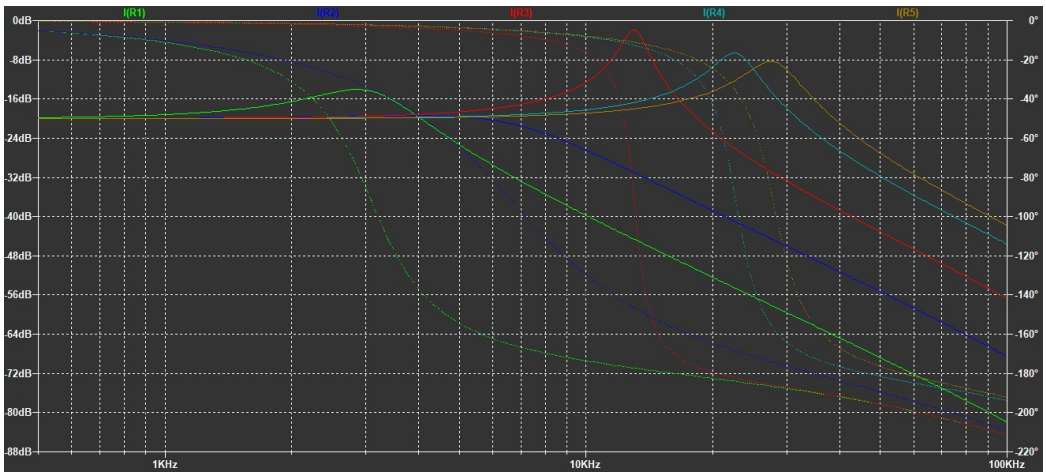
Poiché il filtro deve essere tarato per la frequenza desiderata, sarà necessario cambiare le componenti del filtro secondo le specifiche riportate nella sottostante tabella:

	Frequenze operative						
	Capacità (F)	Capacità usata	L1 Filtro (H)	L2 Filtro (H)	Freq. desiderata (Hz)	Freq. Filtro LCL (Hz)	Frequenza H-Bridge (Hz)
1	0,000 022 616	0,000 010 000	0,000 270 000	0,000 010 000	2.000	3.008	2.000
2	0,000 003 619	0,000 002 200	0,000 270 000	0,000 010 000	5.000	6.413	3.000
3	0,000 010 132	0,000 010 000	0,000 015 000	0,000 010 000	10.000	10.466	10.000
4	0,000 005 715	0,000 003 300	0,000 015 000	0,000 004 700	15.000	19.739	15.000
5	0,000 003 215	0,000 002 200	0,000 015 000	0,000 004 700	20.000	24.176	20.000





Per evitare di cadere nella risonanza ed abbattere le armoniche dispari successive alla prima, si è cercato di ottenere una frequenza del filtro superiore a quella a cui si voleva settare l'H-bridge.
Qui sotto si riporta il grafico dell'analisi in frequenza del filtro LCL per le 5 frequenze di prova:



Ogni prova prevede di alimentare un carico noto, composto da una resistenza $R = 10\ \Omega$ con potenza massima dissipabile $P = 200\ W$, mentre per variare la corrente si procede regolando la tensione a step di $10V$ $(10 \div 60V)$ a cui corrisponderà una variazione per step di $1A$ $(1 \div 6A)$.
Le 6 prove, ottenute dai vari step in tensione/corrente, sono poi ripetute per i 5 valori di frequenza scelti per l'H-Bridge indicati nell'ultima colonna della tabella sopra.
Con l'ausilio di un oscilloscopio si monitora poi l'andamento di tensione e corrente sul carico e la tensione in uscita dall'amplificatore che si occupa di applicare un guadagno pari a 100 sulla tensione ai capi della Rogowski Coil, mentre, tramite monitor seriale installato sul computer si analizza la corretta lettura sia della tensione misurata dalla Rogowski che della frequenza. Di fatto le misure riportate in seguito in una tabella riassuntiva dimostrano la qualità del lavoro svolto, ed in un'ottica futura, è di spunto per nuovi miglioramenti del sistema.

RISULTATI OTTENUTI

ANALISI DEI DATI

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva delle prove svolte con riportati i parametri fondamentali:

	Prove				
	Tensione del generatore (V)	Frequenza H-Bridge (Hz)	Corrente media sul carico (Apower) (A)	Tensione Rogowski picco-picco (Vrog) (V)	Tensione media sul carico (Vpower) (V)
1	60	2			
2	50	2			
3	40	2			
4	30	2	2,1955	0,4955	20,8812
5	20	2	1,4097	0,3415	12,9750
6	10	2	0,7879	0,1836	6,5739
7	60	3	3,1266	1,6212	30,6003
8	50	3	2,6357	1,3613	25,5410
9	40	3	2,1481	1,1026	20,4353
10	30	3	1,6478	0,8303	15,4295
11	20	3	1,1451	0,5657	9,9658
12	10	3	0,6582	0,2944	5,0070
13	60	10			
14	50	10			
15	40	10	3,5214	0,9785	34,5566
16	30	10	2,6205	0,6417	25,2874
17	20	10	1,7678	0,4931	16,5953
18	10	10	0,9406	0,3133	8,1402
19	60	15			
20	50	15			
21	40	15	3,0585	1,9431	29,5360
22	30	15	2,4636	1,3942	23,4663
23	20	15	1,6959	0,9391	15,5669
24	10	15	0,9025	0,4732	7,4943
25	60	20			
26	50	20			
27	40	20	2,8989	2,1625	27,9115
28	30	20	2,3346	1,7238	22,2351
29	20	20	1,5676	1,2342	14,3770
30	10	20	0,8296	0,6201	6,8428

Si notano delle caselle numerate sulla sinistra, evidenziate con colori diversi per indicare:

- in rosso le prove la cui simulazione LTspice portava ad una corrente elevata rispetto ai limiti preposti ed erogabili dal generatore, per tale motivo non sono state svolte;
- in verde le prove correttamente svolte e oggetto di analisi.

Guardando ai dati ottenuti dalle misure, si nota come sia presente una proporzionalità tra la corrente media sul carico e la tensione picco-picco sulla Rogowski per ogni set di prove per data frequenza. Di fatto al crescere della corrente, dovuta ad un aumento della tensione sul carico, ne corrisponde un aumento anche sul valore di tensione misurato dalla Rogowski Coil, ma ci si accorge anche che ad un aumento della frequenza vi è una riduzione della corrente media che però corrisponde ad un aumento della tensione sulla Rogowski.

Da ciò si evince il legame di proporzionalità della corrente diretta con la tensione ed inversa con la frequenza come dimostra anche il modello fisico della Rogowski Coil.

Doveroso precisare che tutti i dati riportati in tabella sono stati prima salvati dall'oscilloscopio come file *.csv* ed in seguito importati e manipolati sul software Matlab così da poter effettuare un filtraggio digitale applicando una media mobile, andando così a rimuovere il rumore ad alta frequenza sfuggito al filtro RC, realizzando i plot grafici ed il confronto di linearità degli andamenti di ogni set di prove. Si è reso inoltre necessario andare a rimuovere alcuni dei campioni ottenuti dall'applicazione della media mobile nella prova 15 in quanto valori di tipo *inf* che non permettevano un calcolo corretto della tensione picco-picco.

p15_Vrog_mov_avg	3125000x1 double
p15_Vrog_mov_avg_clean	3123378x1 double

ANALISI DEI GRAFICI

Passando ad uno studio dei plot ottenuti tramite Matlab possiamo apprezzare maggiormente il comportamento lineare. Prendendo in esame lo script di una prova, ma valido per tutte le altre, ed i plot ottenuti si può fare un confronto sui dati grezzi acquisiti e quelli filtrati, nonché sugli andamenti congiunti di tensione e corrente:

Editor - C:\Users\Andrea\Rogowski\Matlab\p27_mat.m

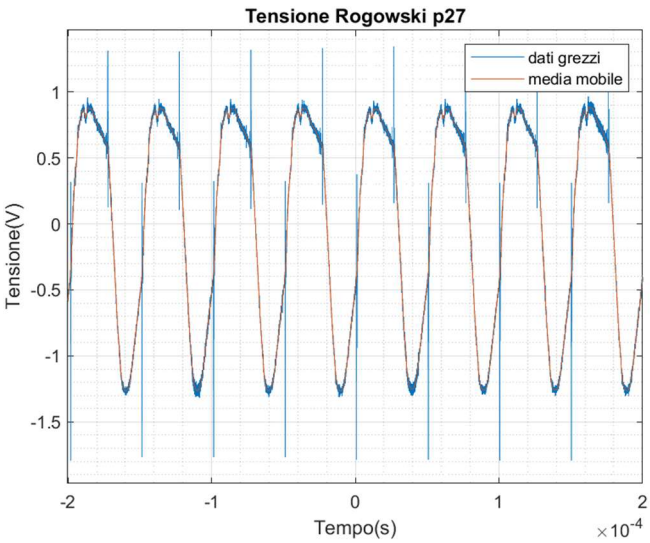
p27_mat.m

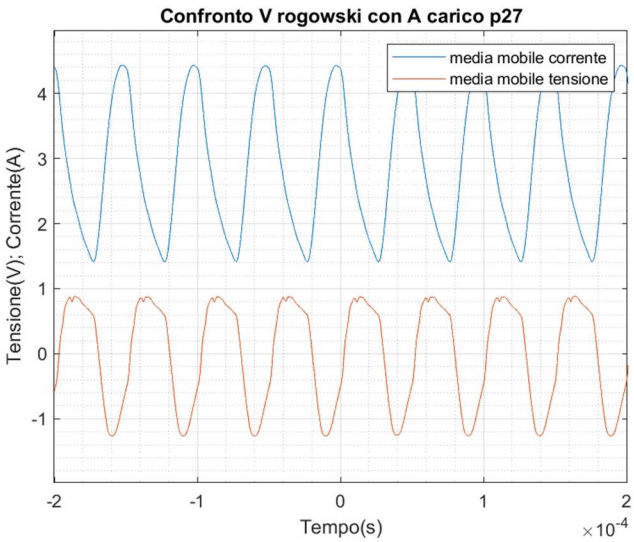
```
%% Prova 27 - 40V 20kHz

load('p27_ws.mat');

% Tensione sulla rogoswski con amplificatore (x100) - ch1
p27_Vrog_mov_avg = movmean(p27ch1(:,2),5000);
p27_Vrog_min = min(p27_Vrog_mov_avg);
p27_Vrog_max = max(p27_Vrog_mov_avg);
p27_Vrog_peak2peak = p27_Vrog_max - p27_Vrog_min;

% Tensione sul carico - ch2
p27_Vpower_mean = mean(p27ch2(:,2));
p27_Vpower_mov_avg = movmean(p27ch2(:,2),10000);
p27_Vpower_min = min(p27_Vpower_mov_avg);
p27_Vpower_max = max(p27_Vpower_mov_avg);
p27_Vpower_peak2peak = p27_Vpower_max - p27_Vpower_min;

% Corrente sul carico da 10 Ohm - ch3
p27_Apower_mean = mean(p27ch3(:,2));
p27_Apower_mov_avg = movmean(p27ch3(:,2),10000);
p27_Apower_min = min(p27_Apower_mov_avg);
p27_Apower_max = max(p27_Apower_mov_avg);
p27_Apower_peak2peak = p27_Apower_max - p27_Apower_min;
```

Workspace

Name	Value
p27_Apower_max	4.4354
p27_Apower_mean	2.8989
p27_Apower_min	1.4044
p27_Apower_mov_avg	6250000x1 double
p27_Apower_peak2peak	3.0310
p27_Vpower_max	43.2722
p27_Vpower_mean	27.9115
p27_Vpower_min	12.6856
p27_Vpower_mov_avg	6250000x1 double
p27_Vpower_peak2peak	30.5866
p27_Vrog_max	0.8933
p27_Vrog_min	-1.2691
p27_Vrog_mov_avg	6250000x1 double
p27_Vrog_peak2peak	2.1625
p27ch1	6250000x2 double
p27ch2	6250000x2 double
p27ch3	6250000x2 double

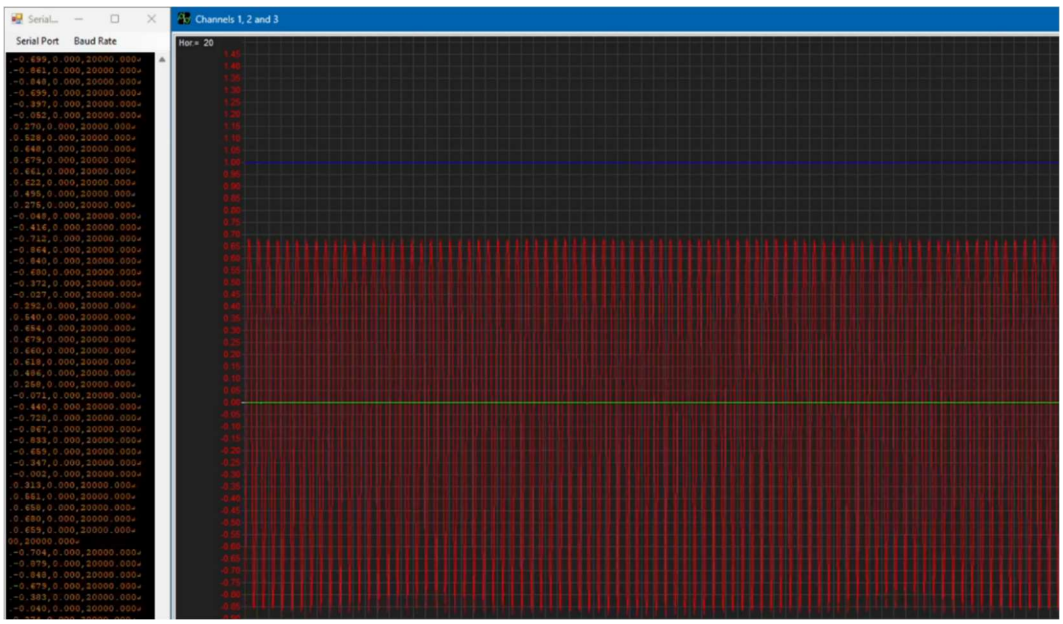
Non tutte le variabili ricavate sono state plottate in quanto non rilevanti ai fini del confronto.



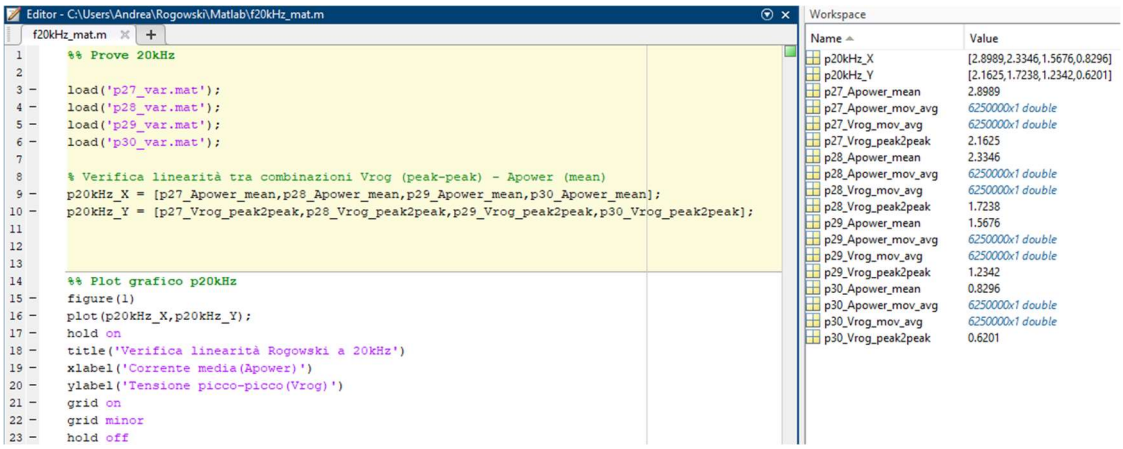


Salta all'occhio come la media mobile abbia permesso di rimuovere tutti quei picchi che avrebbero falsato il risultato finale sulle misure. Guardando al grafico a destra, si nota un leggero ritardo della corrente sul carico rispetto alla tensione sulla Rogowski, imputabile al comportamento del filtro LCL

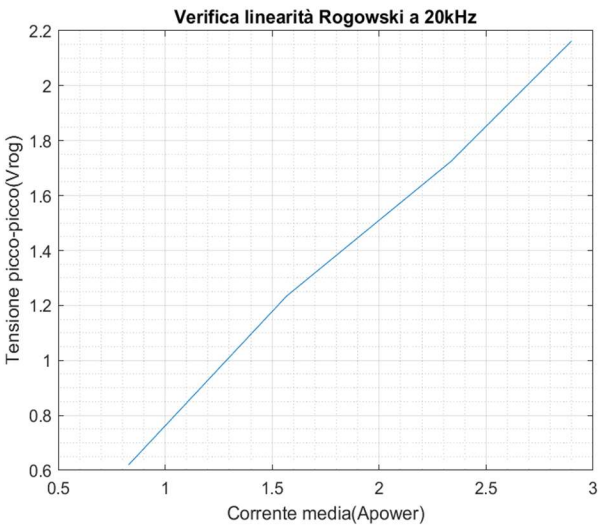
che per sua natura introduce una variazione di fase. Si riporta anche quanto registrato dal monitor



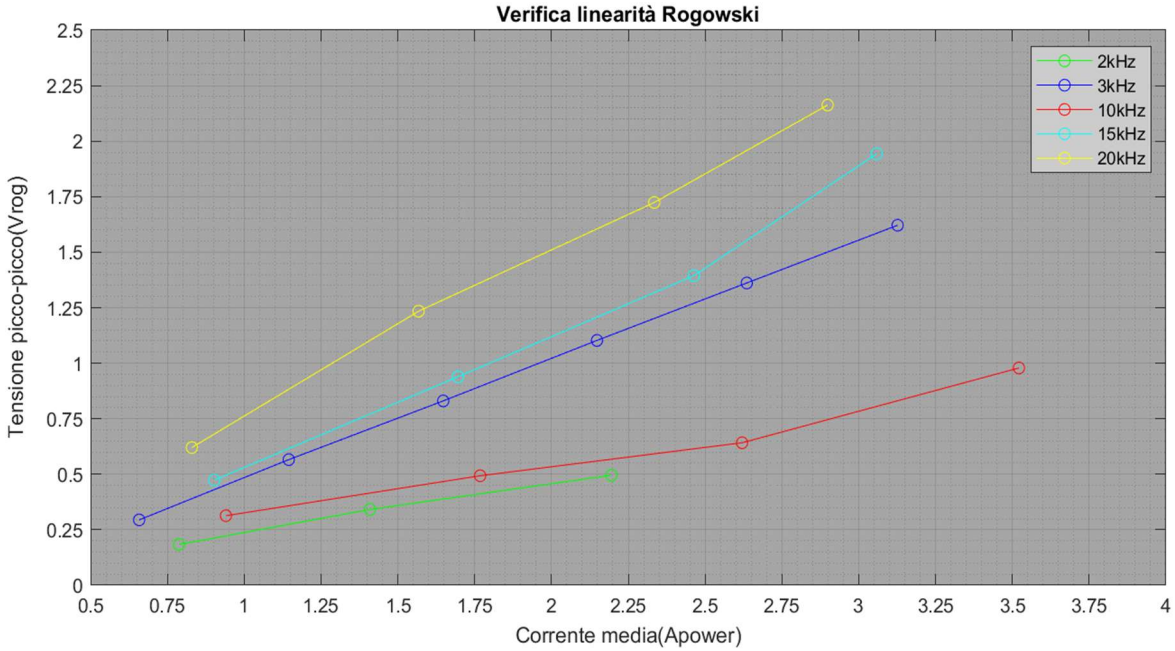
seriale del computer per un riscontro visivo su quanto elaborato tramite microcontrollore:
La frequenza viene perfettamente ricavata dal picco massimo dell'FFT mentre risulta un leggera differenza sul valore della tensione picco-picco rispetto a quanto misurato dall'oscilloscopio.
Si riporta sotto l'unione dei risultati di un singolo set di prove, in questo caso per la frequenza a 20kHz, mettendo a grafico i punti ricavati dalla combinazione corrente media e tensione picco-picco:



Il grafico è assimilabile ad una retta, segno che è presente una linearità che collega le variazione della corrente sul carico alla tensione generata ai capi della Rogowski Coil.



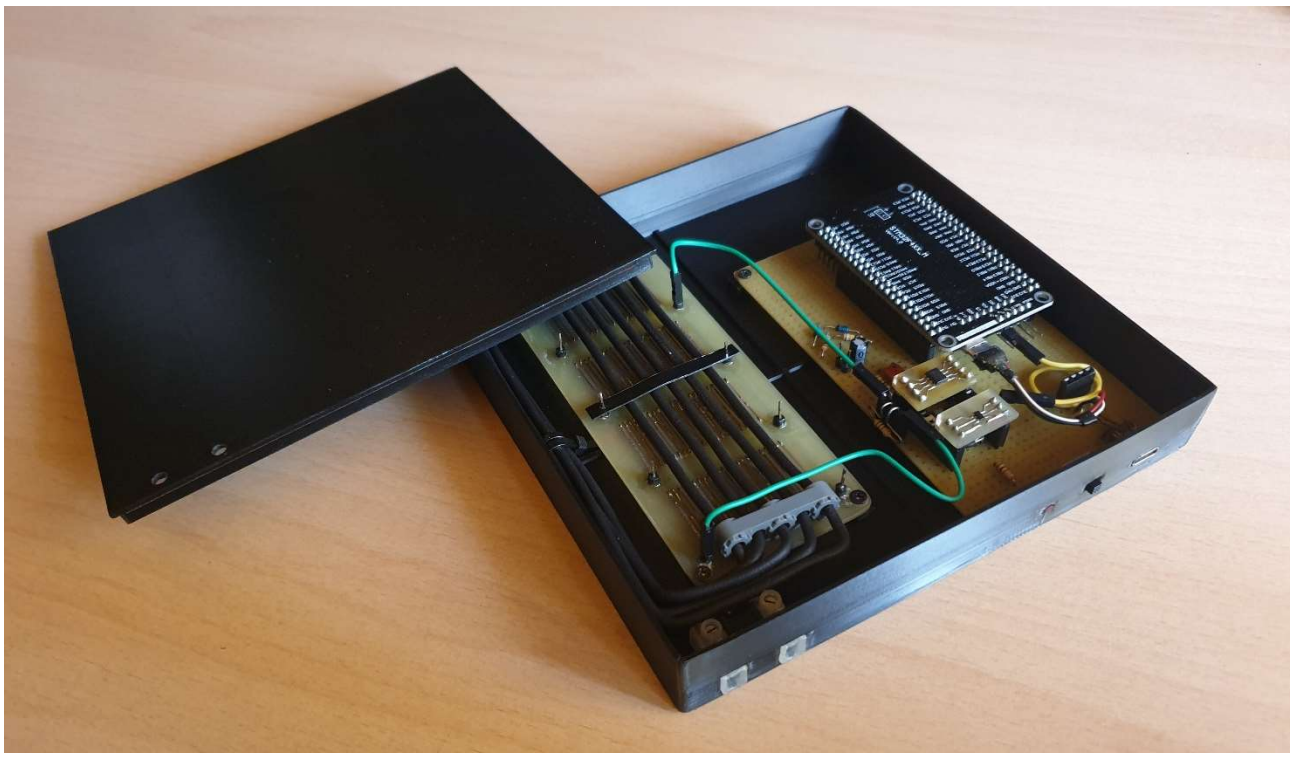
Sotto l'unione dei risultati di tutti e 5 i set per confrontare gli andamenti al variare della frequenza.



La pendenza di queste "rette" varia con la frequenza ma, come possiamo vedere, vi è un comportamento quasi inaspettato a $3kHz$ e $10kHz$. Ci si sarebbe aspettato uno scambio delle due rette, questa discrepanza la si pensa imputabile al comportamento del filtro LCL che applica una attenuazione ed un'inversione di fase che pesa di più a $10kHz$.

Ciò nonostante, benché il numero di punti sia basso, si può confermare il comportamento lineare assunto dalla Rogowski Coil.

CRITICITÀ E LIMITI RISCONTRATI

In generale ci si ritiene soddisfatti dei risultati ottenuti per i quali sono stati investiti mesi nello studio di questo sistema per giungere a questa conclusione che non era scontata.
Volendo fare un'analisi critica su quanto realizzato, si riportano alcune delle criticità riscontrate alla conclusione del progetto:

- La modalità di test della Rogowski Coil non è la più appropriata in quanto, introdurre un filtro LCL per rendere sinusoidale l'onda quadra generata dal microcontrollore che gestisce l'H-Bridge, ha generato una discontinuità nei vari set di prova perché la variazione delle componenti del filtro, per poter realizzare una determinata frequenza di switching, diversificava il comportamento del circuito di potenza stesso per ognuna delle frequenze scelte.
- Limite sulla scelta delle componenti disponibili in laboratorio per realizzare il filtro LCL, con particolare riferimento alle induttanze.
- Se si fosse disposto di un generatore AC sinusoidale con parametri quali tensione, corrente e frequenza settabili, e non esclusivamente DC, e rimovendo così dal circuito di prova sia il filtro LCL che l'H-bridge, si sarebbero potute ottenere delle forme d'onda più pulite e propedeutiche al corretto test della Rogowski Coil.
- L'assenza di confronto, non disponendo di un modello specifico per la Rogowski Coil realizzata, tra i dati ottenuti per via sperimentale e la relazione fisica tra corrente sul conduttore e tensione sulla Rogowski, non ha permetto di trovare una corrispondenza univoca che confermasse i dati ottenuti e ciò può proporsi quale spunto per successivi studi nell'approfondimento del funzionamento di questo sistema.