

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria dell’Energia

***Relazione per la prova finale:  
Analisi sperimentali delle emissioni condotte e radiate  
di raddrizzatori e convertitori DC/DC***

Tutor universitario: Prof. Torchio Riccardo

Laureando: *Nicolò Zennato*

*Matr. 1193286*

Padova, 11/2022

1.

1. Verifica delle emissioni condotte e radiate di raddrizzatori e convertitori DC/DC
2. Analisi sperimentale sul fenomeno CrossTalk

L'obiettivo della tesi è di verificare i disturbi, dovuti alle emissioni condotte e radiate, prodotti da alcuni convertitori DC/DC (convertitori Buck) e AC/DC (raddrizzatori a ponte), disponibili nel mercato, con l'integrazione di filtri per ridurre tali disturbi. Comparando i risultati con gli standard fissati dalla norma EN 55022.

## Chi ricopre il ruolo da garante della norma?

Tale legge viene diretta dall'EMC (Electromagnetic Compatibility) una disciplina facente parte del ramo dell'ingegneria elettrica, che si occupa di analizzare e ottimizzare gli effetti indesiderati prodotti dalla generazione e trasmissioni di energia elettromagnetica, con l'obiettivo di garantire il corretto funzionamento di diversi apparecchi nell'ambiente.

## Che cosa sono le emissioni condotte e radiate?

Un'emissione si dice condotta se, generata da un certo sistema, si propaga lungo conduttori metallici (es. cavi di alimentazione elettrica, cavi per il collegamento di apparecchiature elettrica), sottoforma di tensione e/o corrente, causando interferenza con altri sistemi fino a danneggiarli permanentemente, causando perdita di funzionalità e impossibilità di ripristino.

Le normative EMC impongono limiti specifici (valori max 79-73 dB $\mu$ V) alle emissioni condotte in funzione alla banda di frequenza:

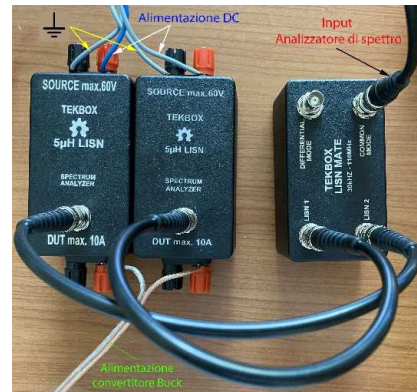
- Europa: 150 kHz ÷ 30 MHz;
- USA: 450 kHz ÷ 30 MHz.

Con il termine emissioni radiate, si intende il fenomeno della generazione di campi elettromagnetici prodotta dalla corrente che circola nei cavi e nei conduttori che compongono il sistema.

Le normative EMC impongono limiti specifici (37-30 dB $\mu$ V/m) alle emissioni radiate in funzione alla banda di frequenza, con un range da 30 MHz a 1 GHz.



Alimentatore DC

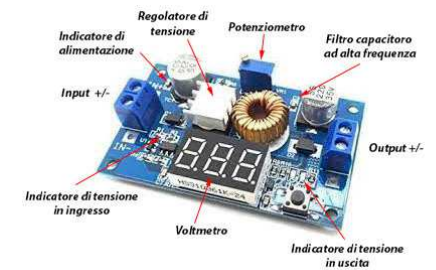


LISN

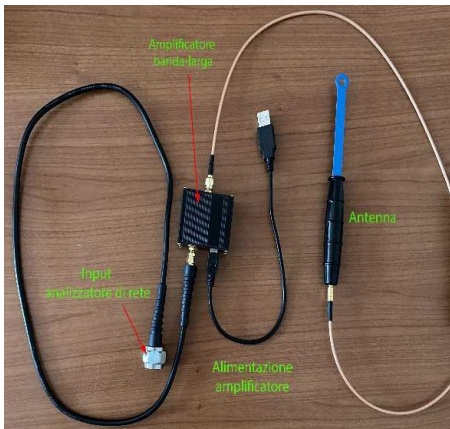
(rete di stabilizzazione dell'impedenza di linea)



Analizzatore di spettro



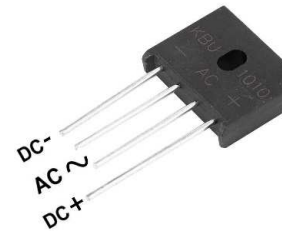
Convertitore Buck  
(convertitore DC/DC)



Strumentazione  
per le emissioni condotte



Carico resistivo



Raddrizzatore a ponte  
(convertitore AC/DC)



Filtro EMI



Generatore di funzione



Multimetro digitale

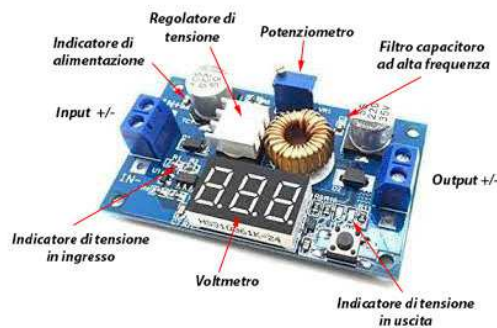
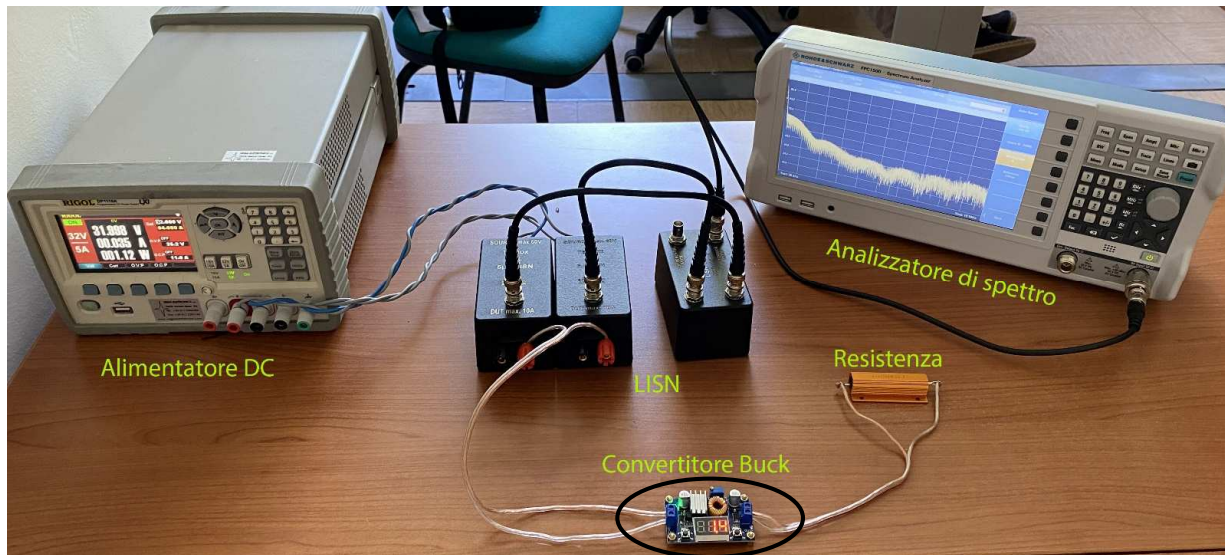


Conduttore elettrico



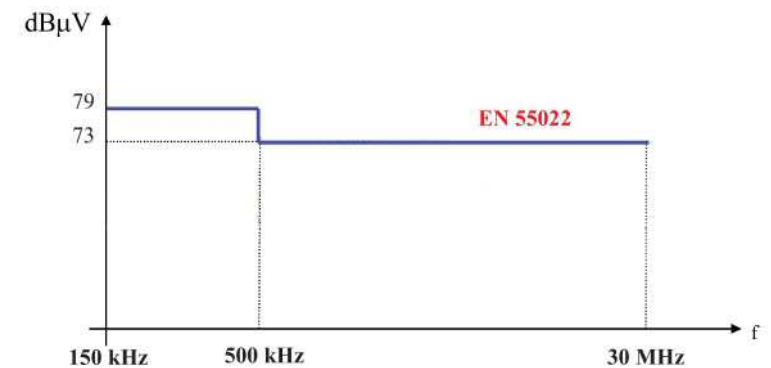
Filtri in ferrite

Circuito elettrico con convertitore Buck AptoFun XL4015



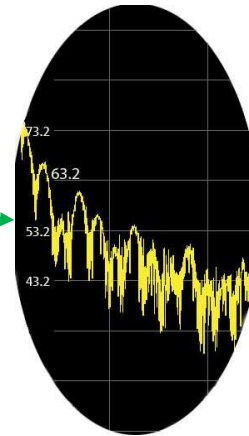
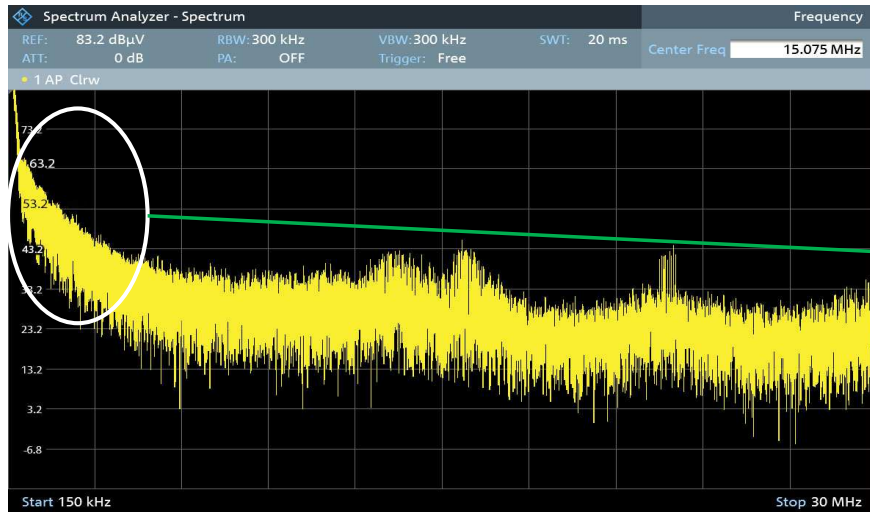
### Dati di taglia del convertitore:

- ❖ Range tensione ingresso 4-38V DC;
- ❖ Range tensione uscita regolabile 1,25V-36V DC;
- ❖ Capacità di corrente massima in uscita 5A, raccomandata per l'uso 4,5A;
- ❖ Capacità di potenza massima in uscita 75W;
- ❖ Frequenza di commutazione 150KHz;
- ❖ Efficienza di conversione fino al 96%.



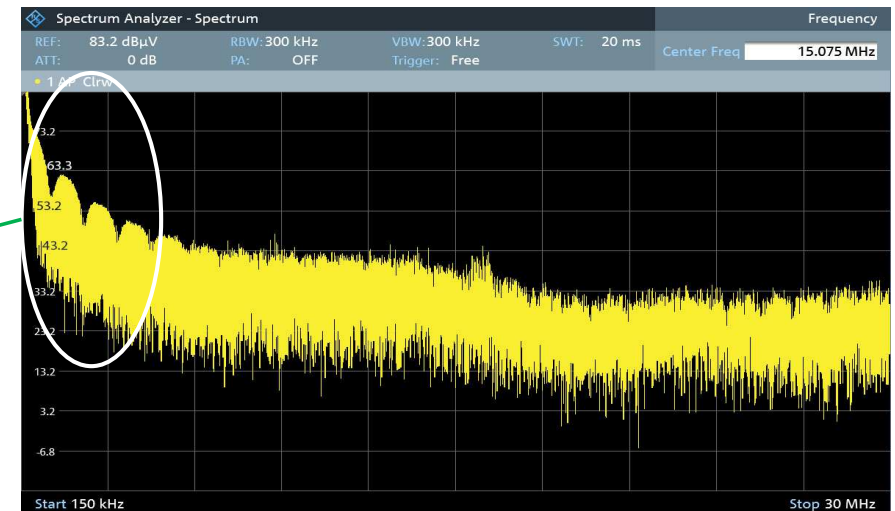
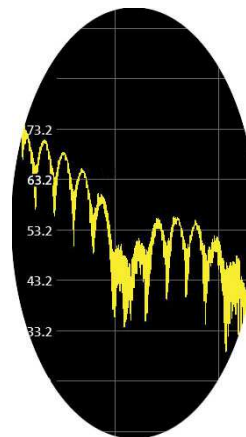
Spettro (ideale) delle emissioni condotte stabilito dalla normativa

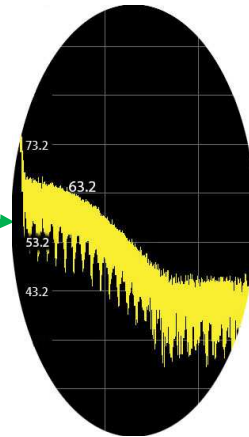
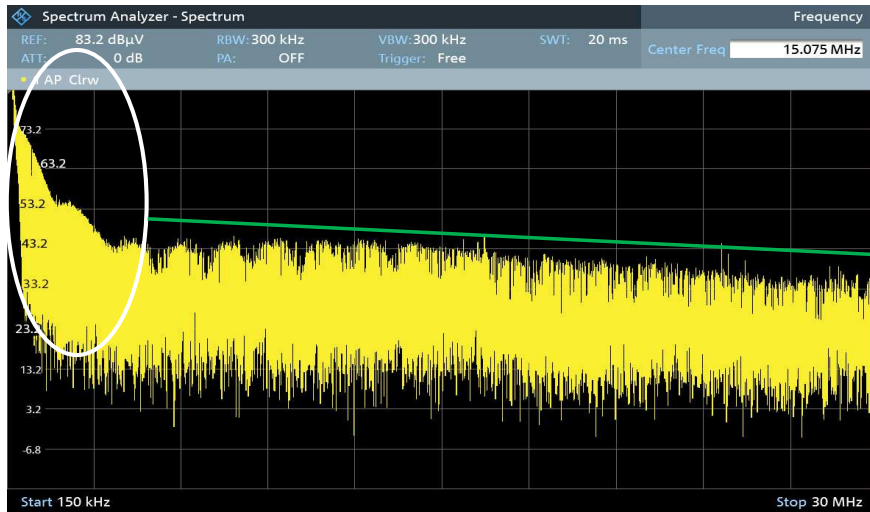
# 1° PROVA: $V_{IN-DC}=5V$ E $V_{OUT-DC}=1,5V/4V$



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V - V_{OUT}=1,5V$

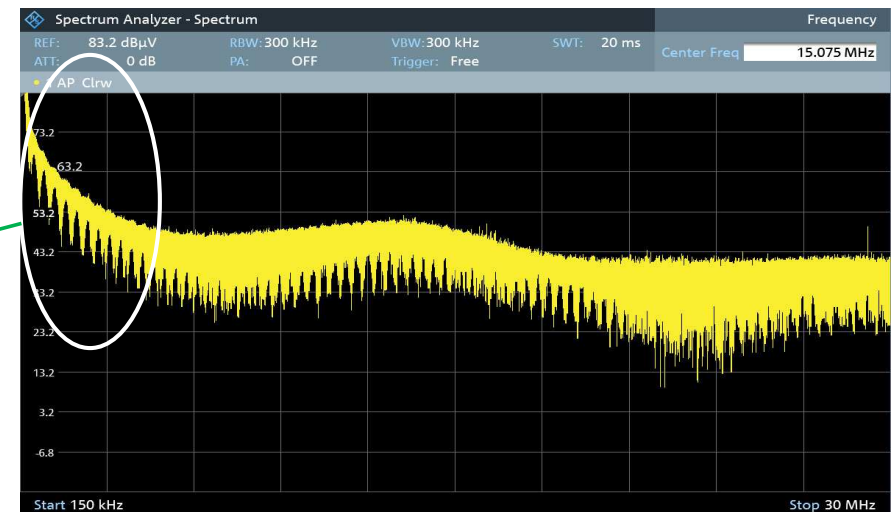
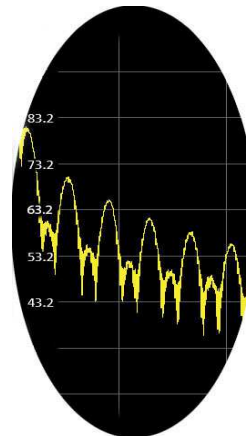
Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V - V_{OUT}=4V$



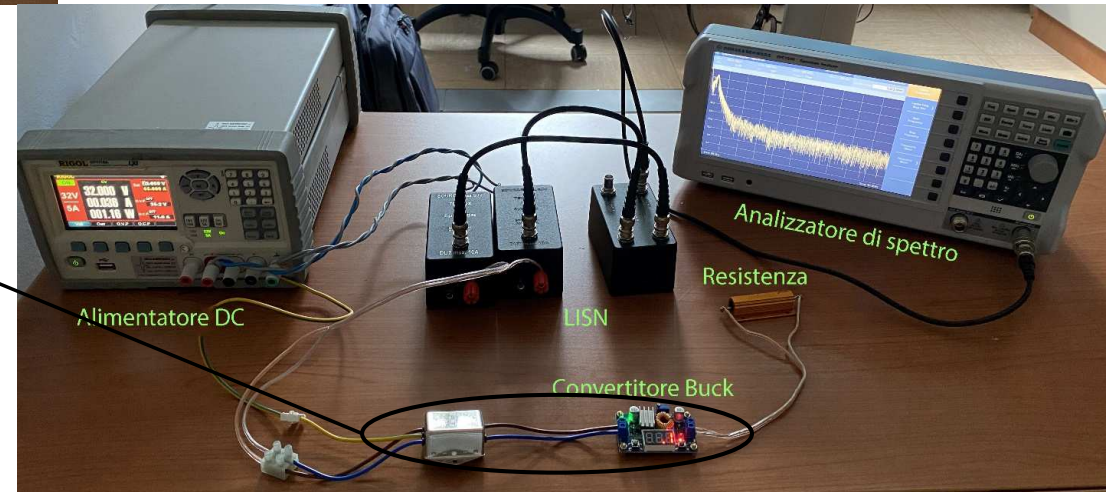
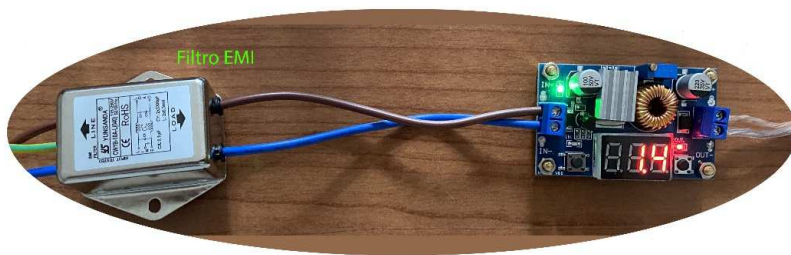
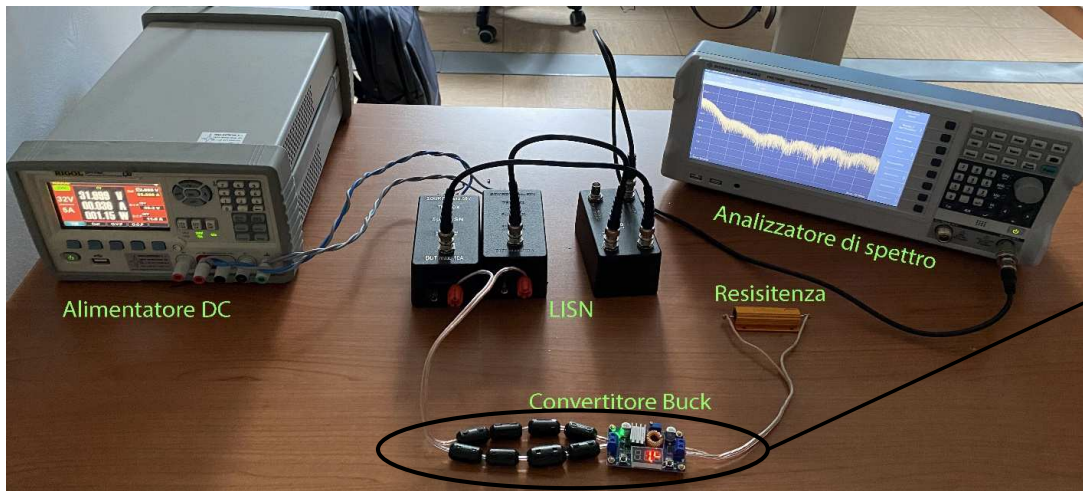


Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$

Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=15V$

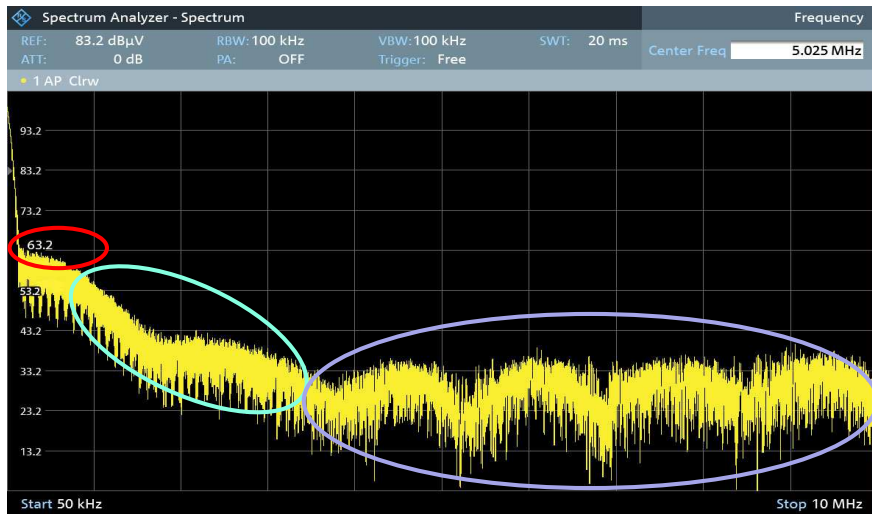


Circuito elettrico con convertitore Buck AptoFun XL4015 e filtri in ferrite



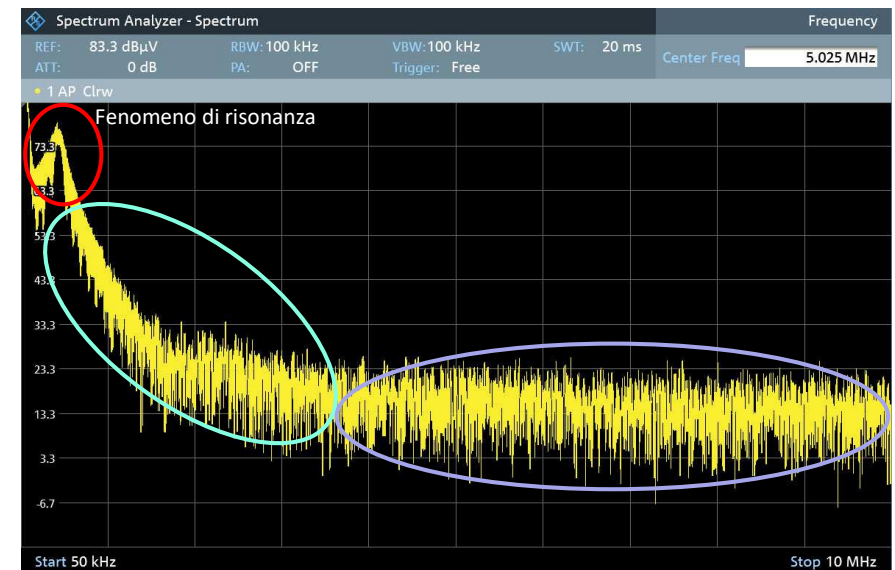
Circuito elettrico con convertitore Buck AptoFun XL4015 e filtro EMI (CW1B-10A-L) 8

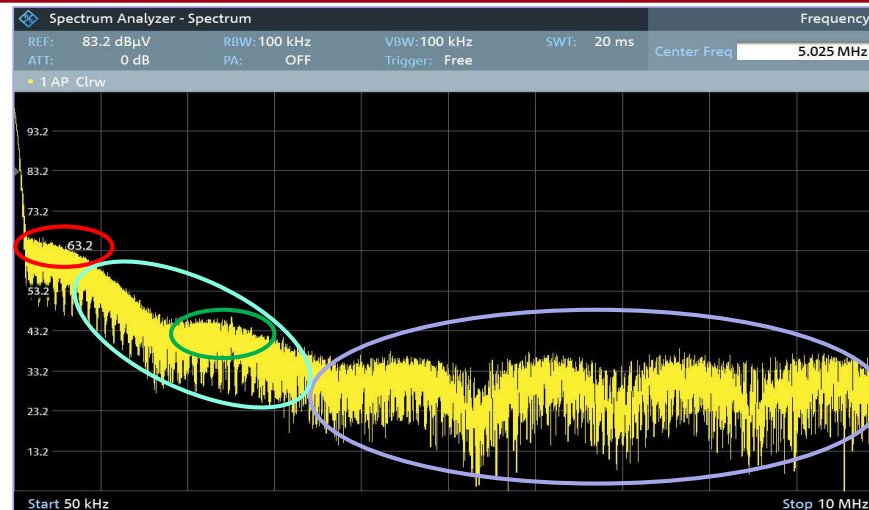




Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V$  -  $V_{OUT}=1,5V$  e filtri in ferrite

Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V$  -  $V_{OUT}=1,5V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)

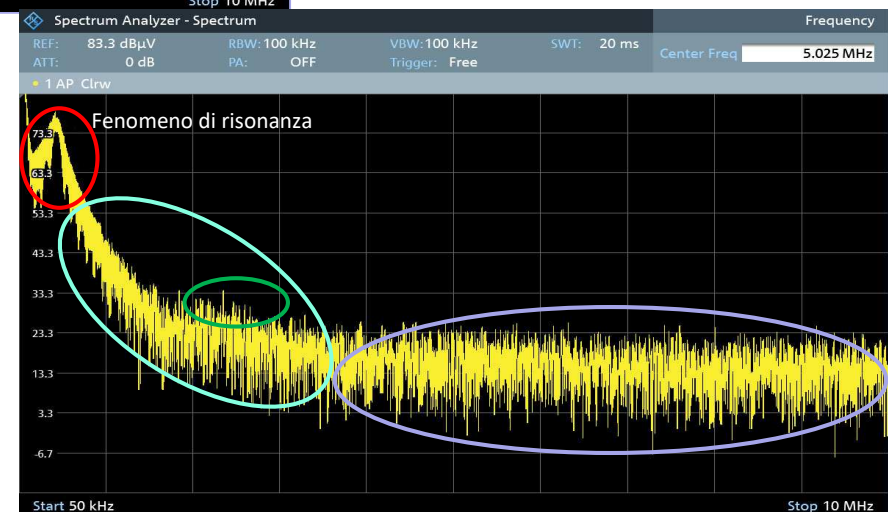




Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$ , senza filtri

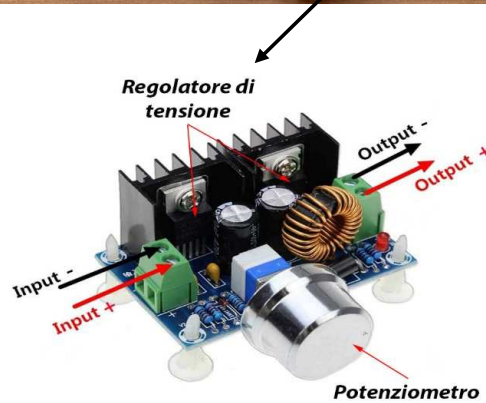
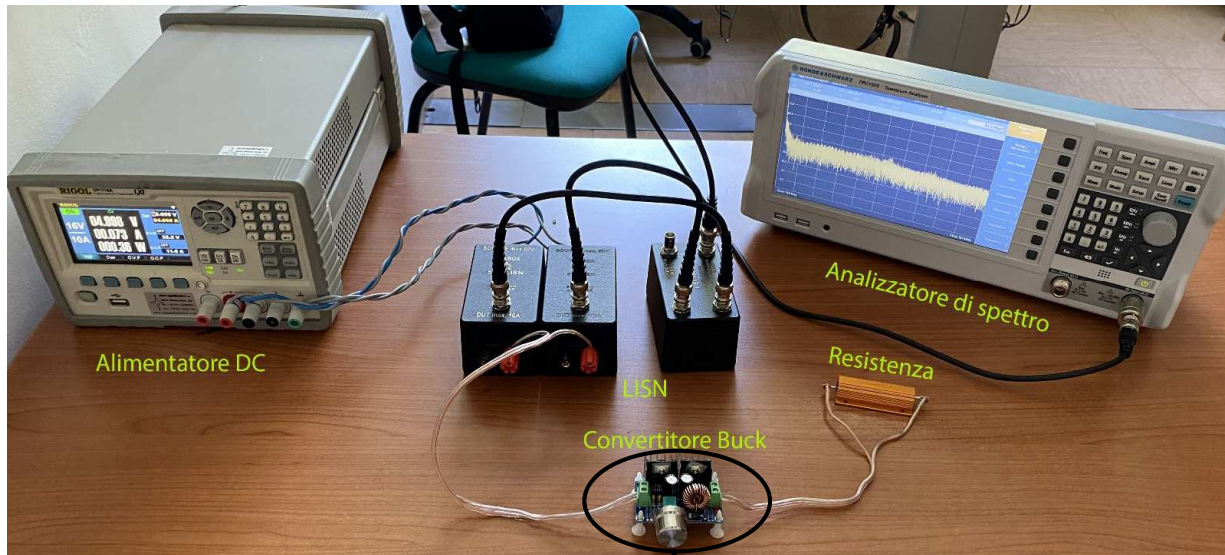


Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtri in ferrite



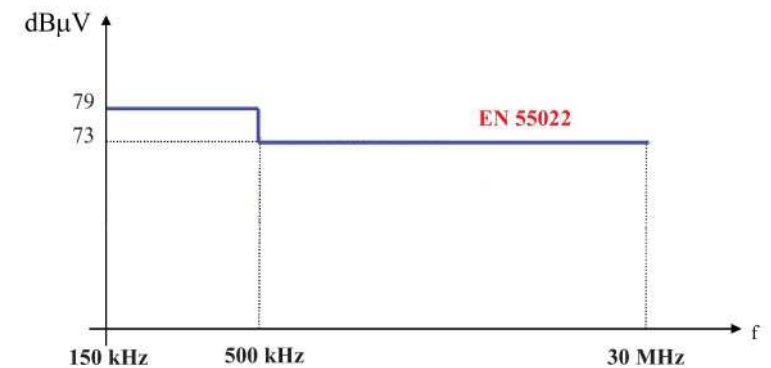
Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)

Circuito elettrico con convertitore Buck HiLetgo XL4016

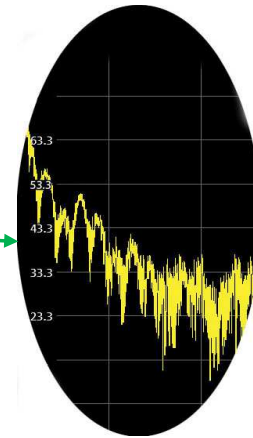
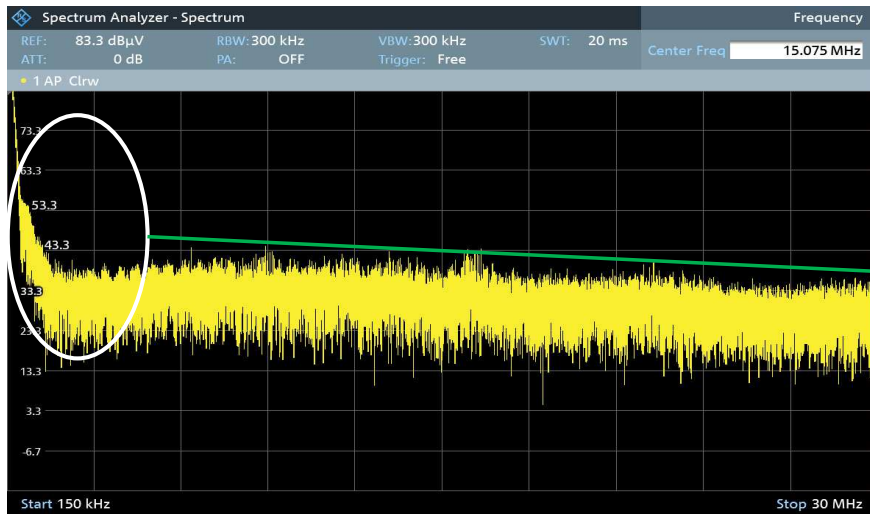


### Dati di taglia del convertitore:

- ❖ Range tensione ingresso 4-40V DC;
- ❖ Range tensione uscita regolabile 1,25V-36V DC;
- ❖ Capacità di corrente massima in uscita 8A, raccomandata per l'uso 5A;
- ❖ Capacità di potenza massima in uscita 200W;
- ❖ Frequenza di commutazione 180KHz;
- ❖ Efficienza di conversione fino al 94%.

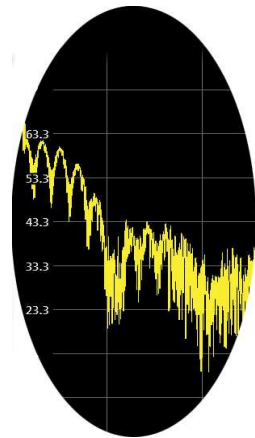


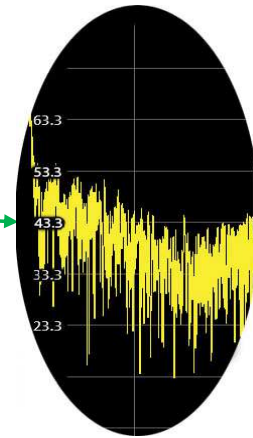
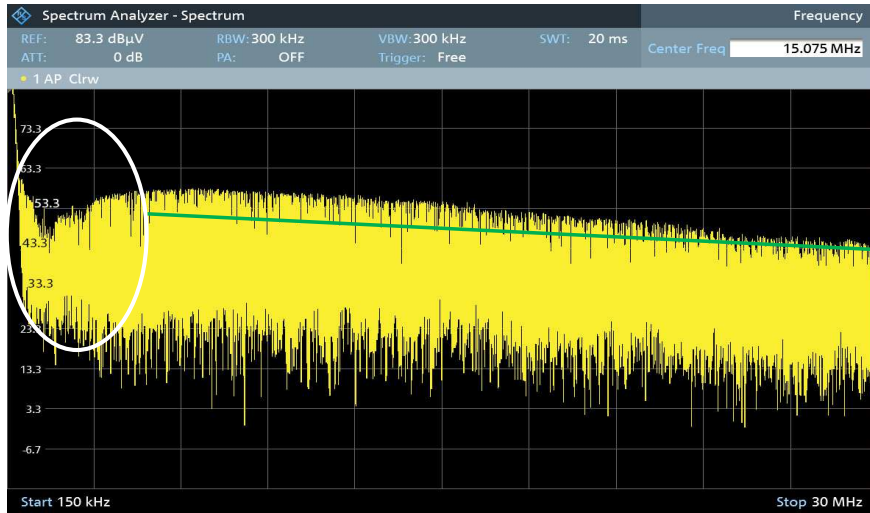
Spettro (ideale) delle emissioni condotte stabilito dalla normativa



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V - V_{OUT}=1,5V$

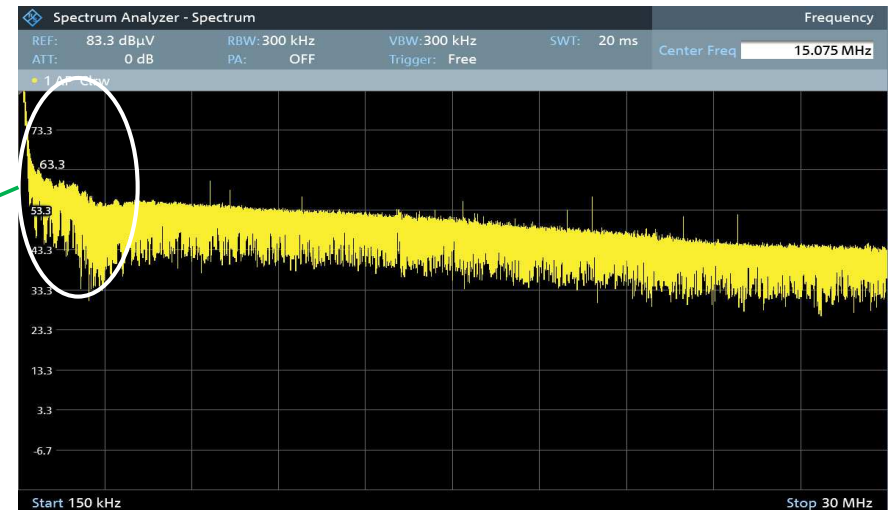
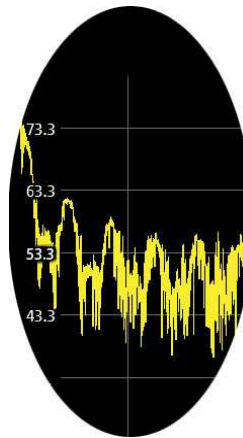
Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V - V_{OUT}=4V$



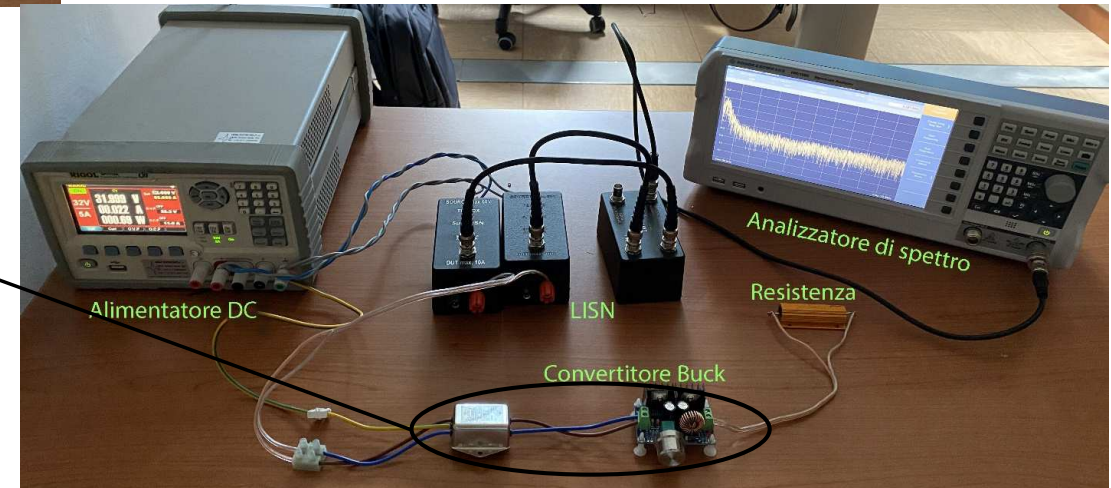
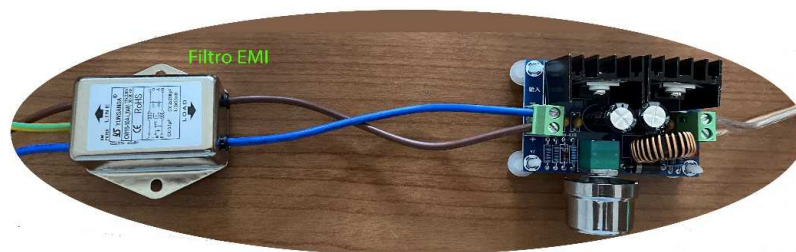
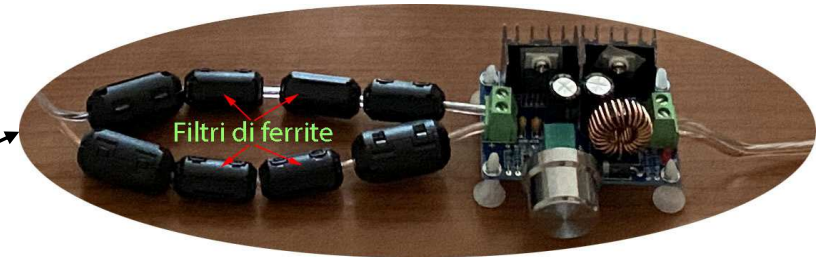
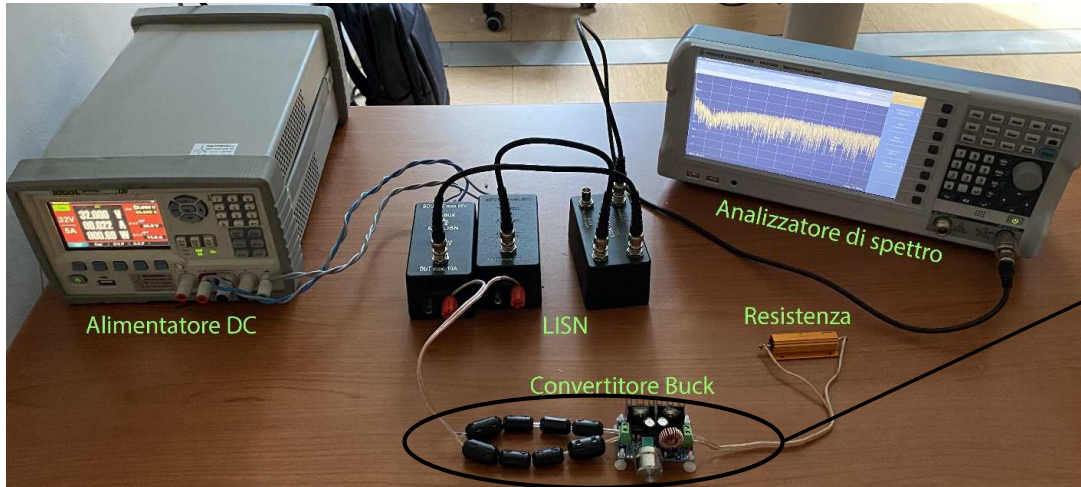


Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$

Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=15V$



Circuito elettrico con convertitore Buck HiLetgo XL4016 e filtri in ferrite

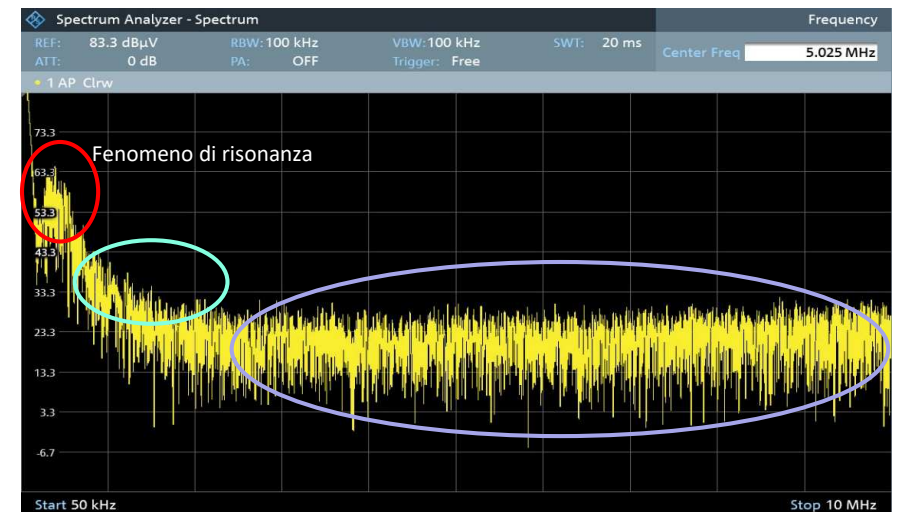


Circuito elettrico con convertitore Buck HiLetgo XL4016 e filtro EMI (CW1B-10A-L) 14



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtri in ferrite

Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)

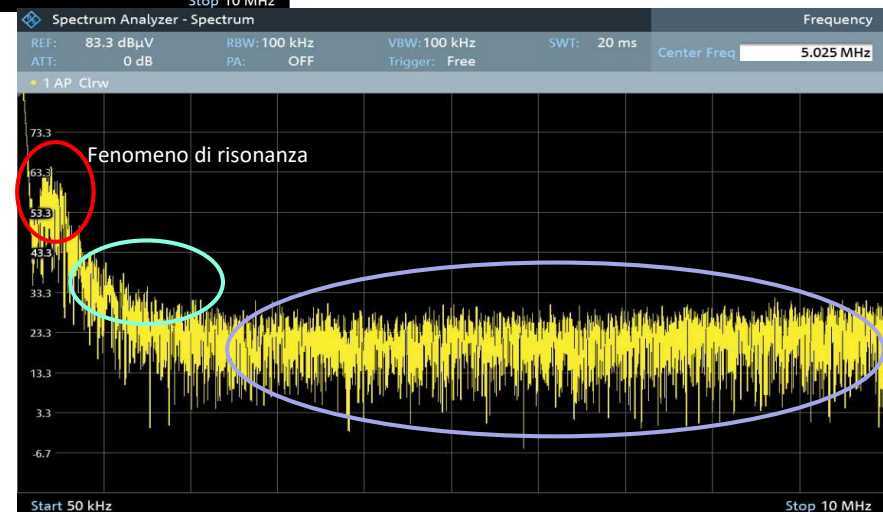




Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$ , senza filtri



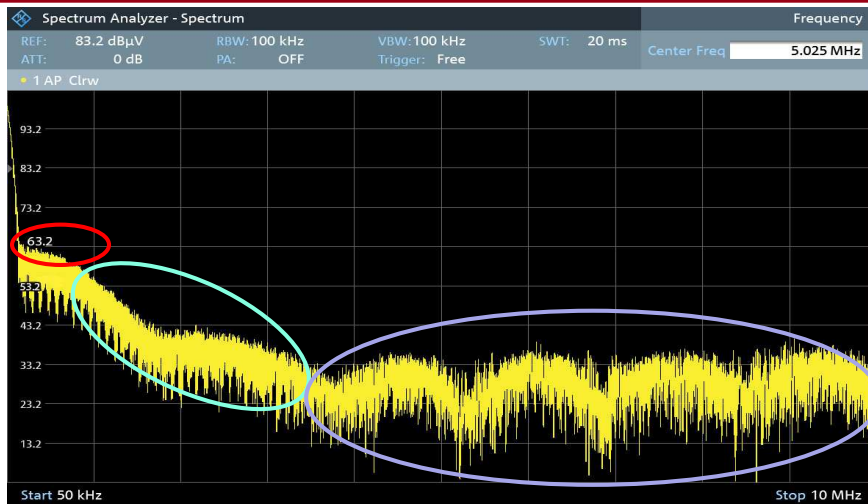
Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtri in ferrite



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)

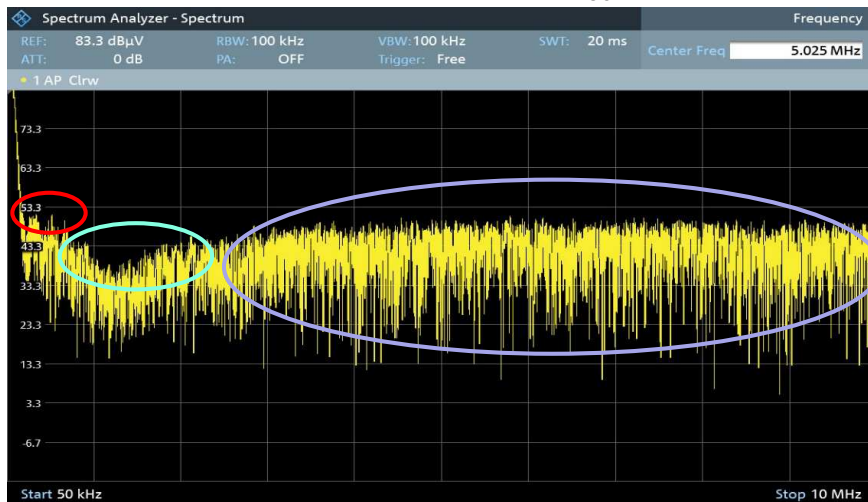


Convertitore  
Buck  
AptoFun  
XL4015

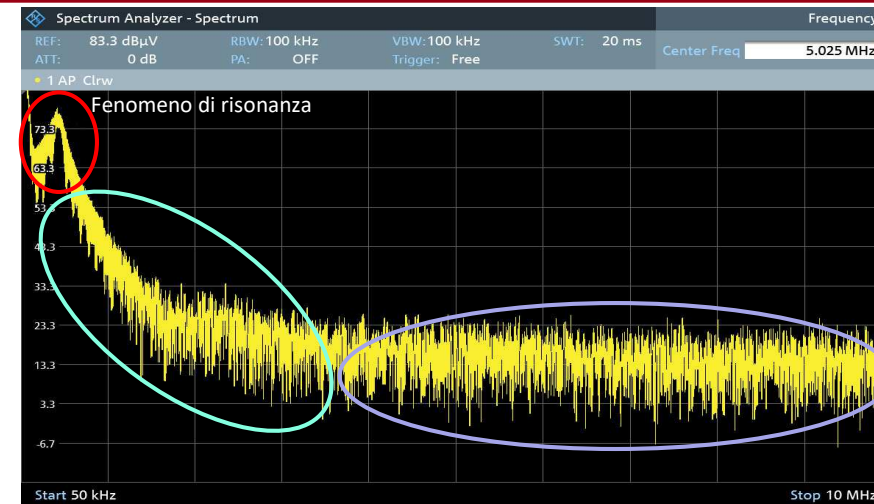


Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtri in ferrite

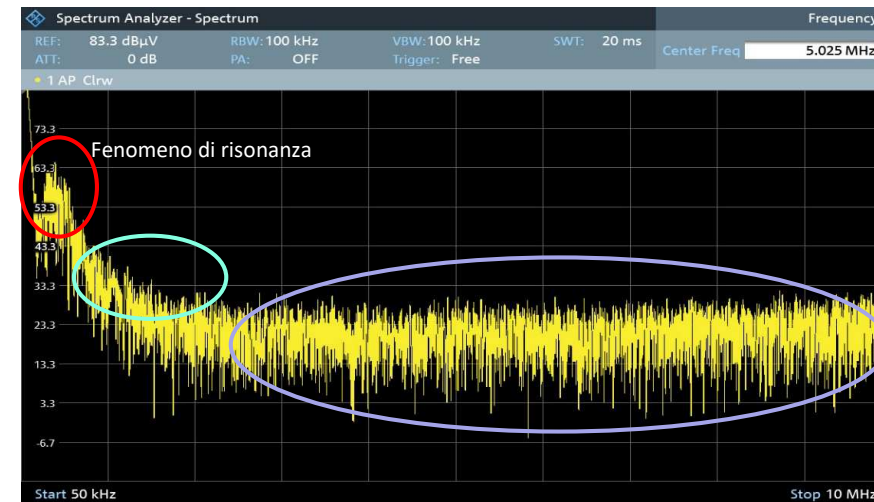
Convertitore  
Buck  
HiLetgo  
XL4016



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtri in ferrite

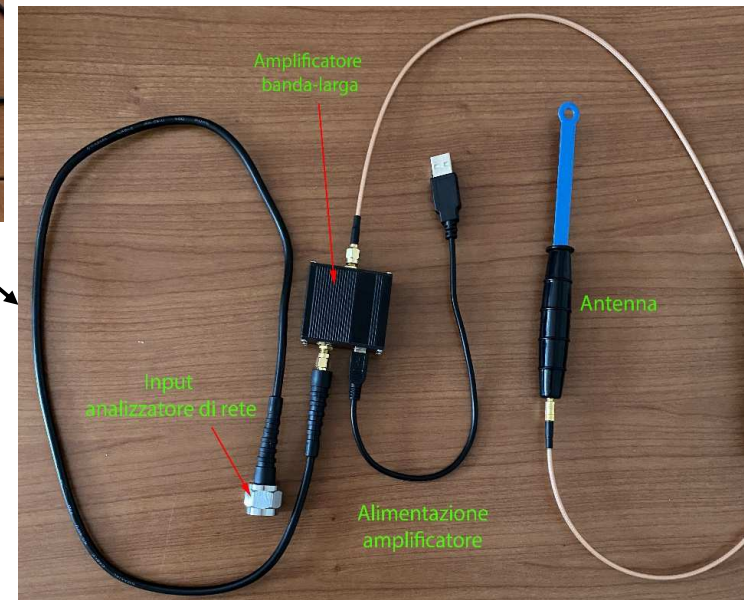
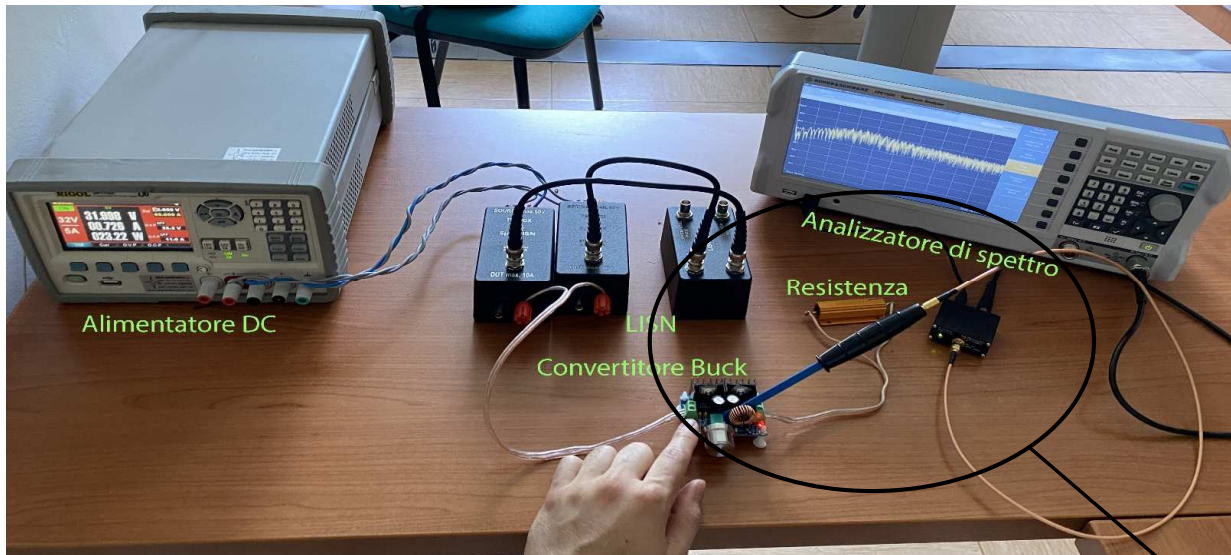


Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtro EMI



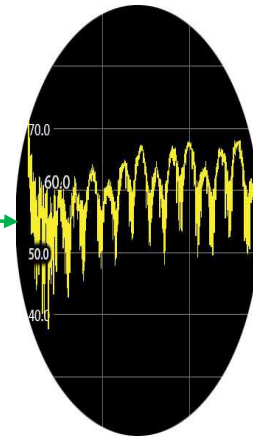
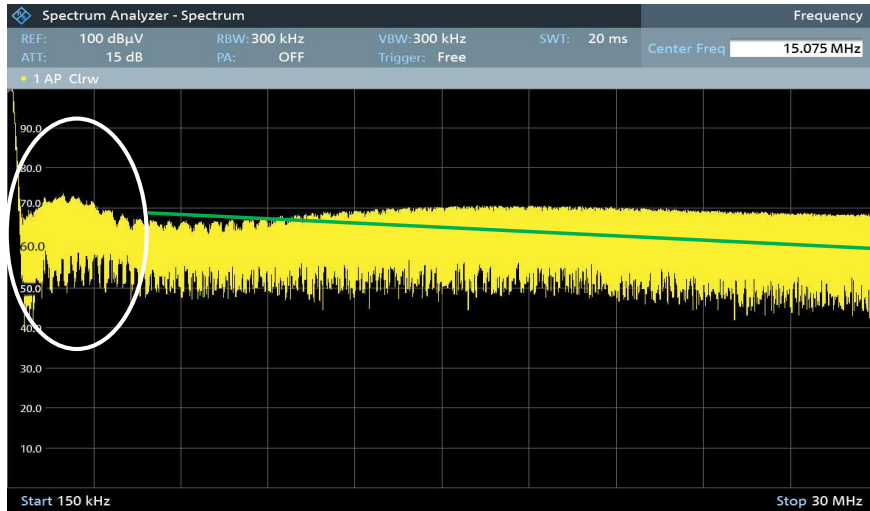
Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtro EMI

Circuito elettrico con convertitore Buck HiLetgo XL4016



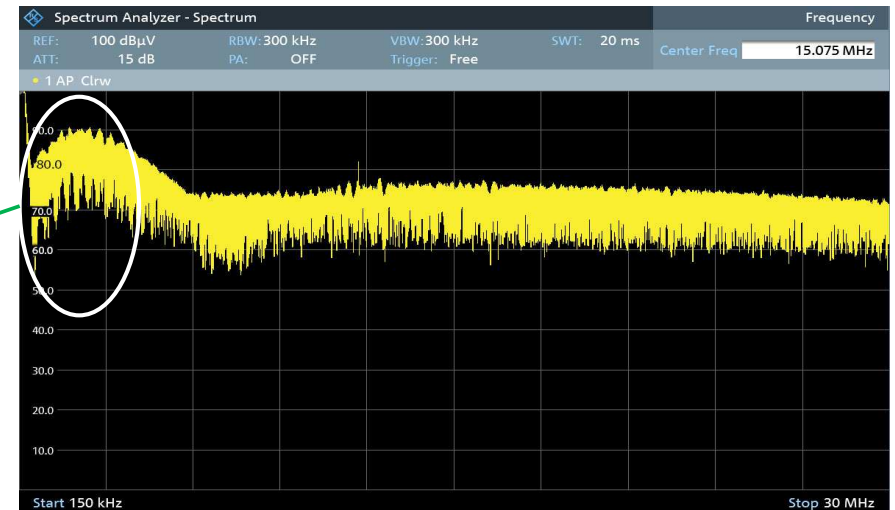
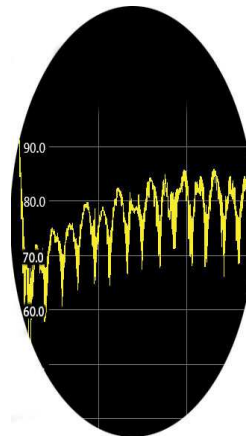
Strumentazione per le emissioni radiate

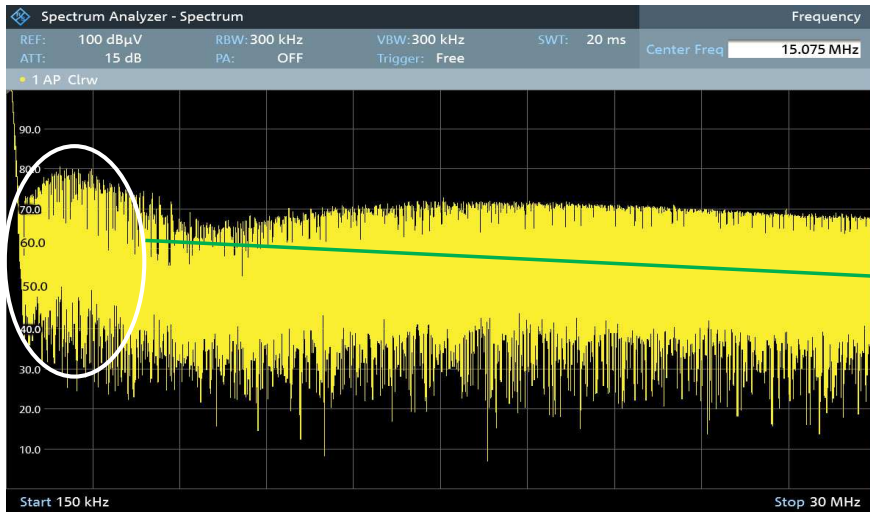
1° PROVA:  $V_{IN-DC}=5V$ ,  $V_{OUT-DC}=1,5V$  E  
2° PROVA:  $V_{IN-DC}=24V$ ,  $V_{OUT-DC}=12V$



Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=5V$  -  $V_{OUT}=1,5V$

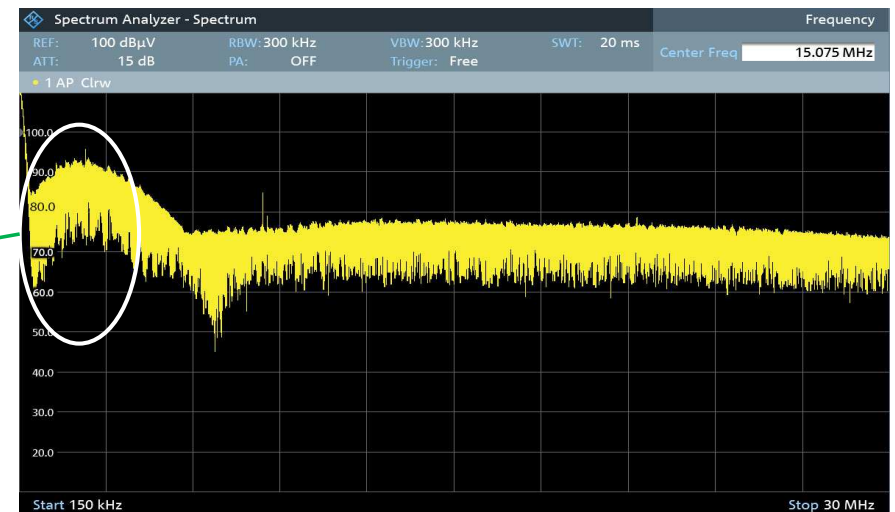
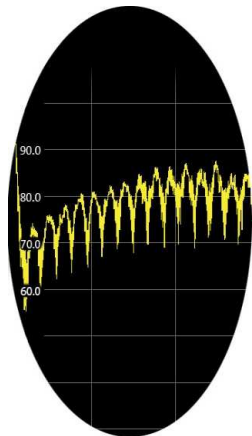
Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=24V$  -  $V_{OUT}=12V$

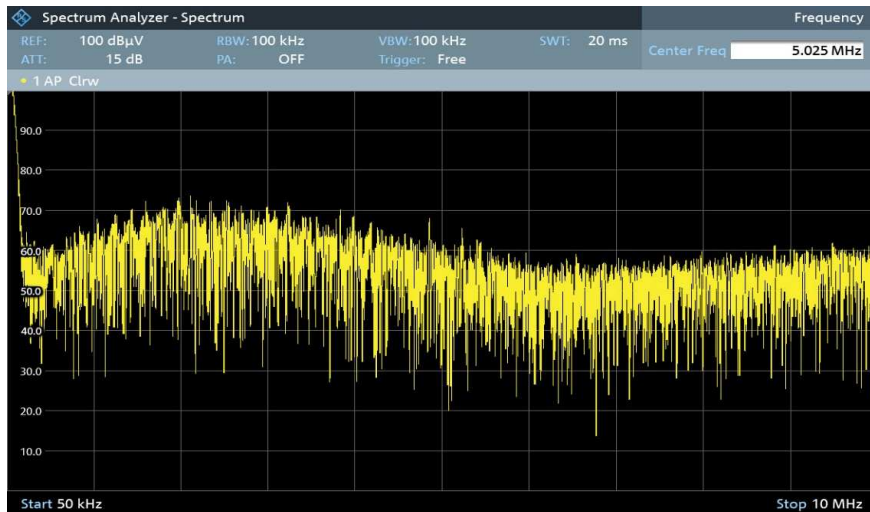




Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$

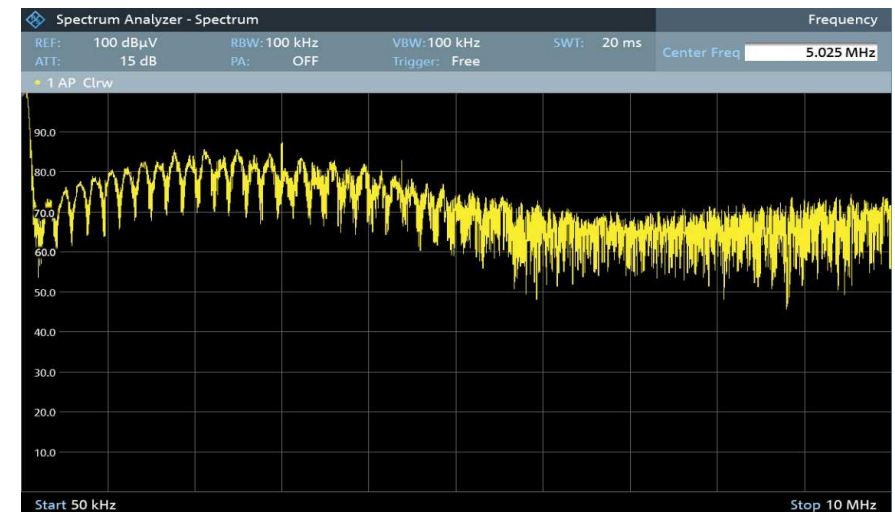
Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=15V$





Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=32V$  -  $V_{OUT}=1,5V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)

Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=32V$  -  $V_{OUT}=15V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)





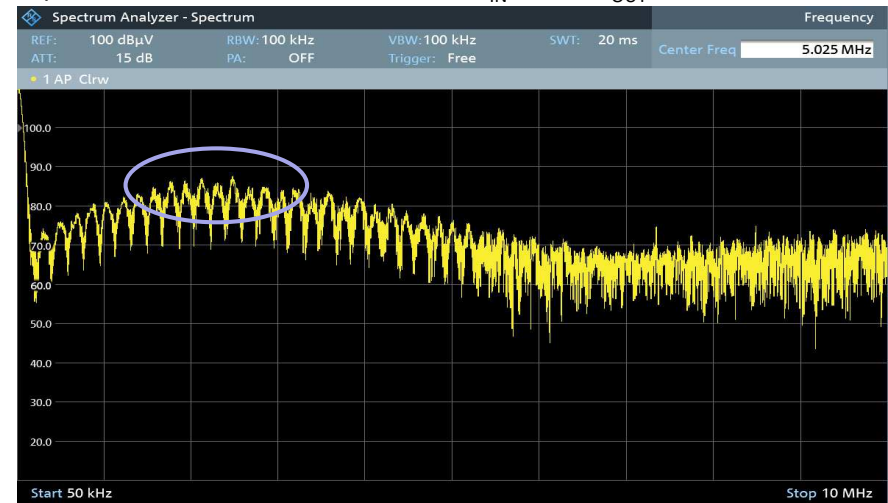
Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)



Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=1,5V$ , senza filtro

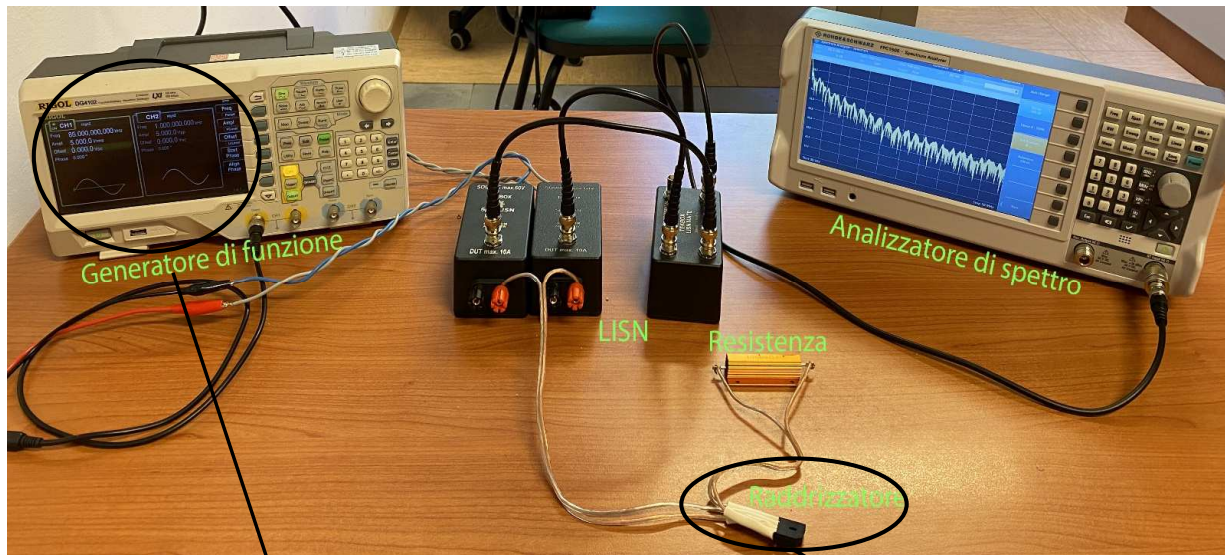


Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=15V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)



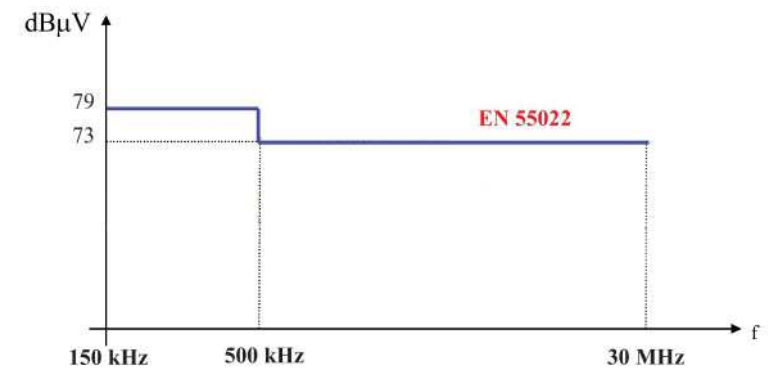
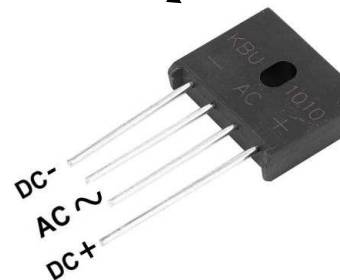
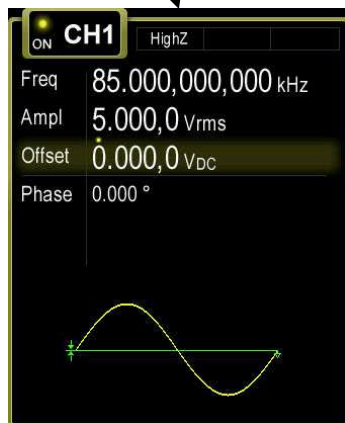
Spettro delle emissioni radiate, con  $V_{IN}=32V - V_{OUT}=15V$ , senza filtro

Circuito elettrico con raddrizzatore KBU1010

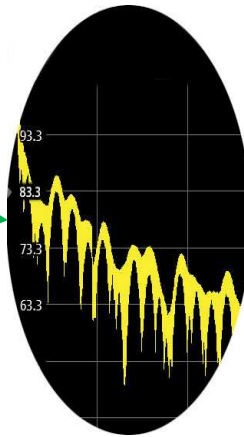
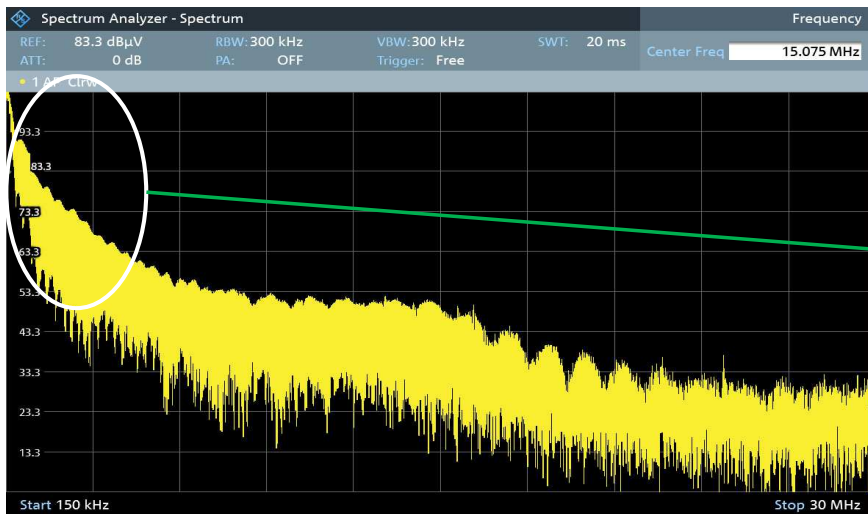


## Dati di taglia del raddrizzatore

- ❖ Tensione inversa di picco ripetitiva ( $V_{RRM}$ ) 1000V;
- ❖ Tensione di blocco ( $V_{DC}$ ) 1000V;
- ❖ Tensione di picco diretta 1V;
- ❖ Valore efficace di tensione ( $V_{RMS}$ ) 700V;
- ❖ Valore medio di corrente in uscita ( $I_0$ ) 10A;
- ❖ Corrente di picco 300A;
- ❖ Range temperatura operativa da  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ ;



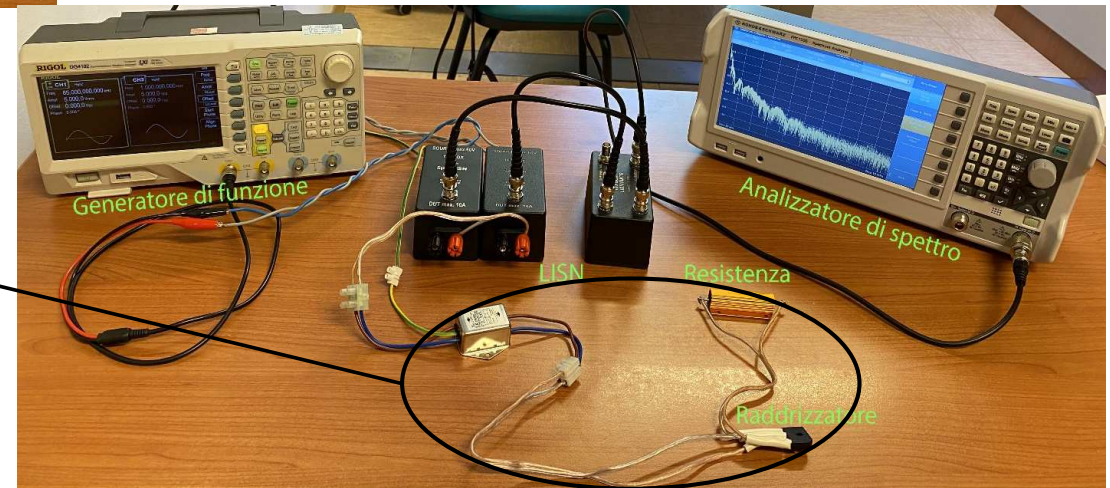
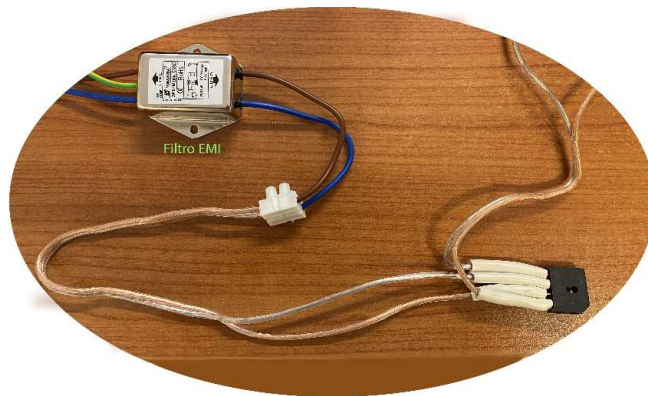
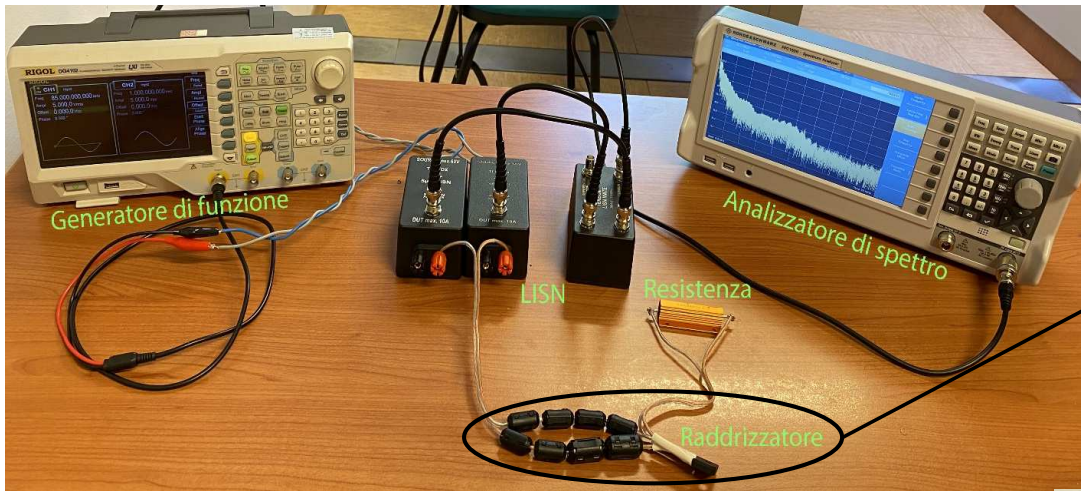
Spettro (ideale) delle emissioni condotte stabilito dalla normativa



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V$



Circuito elettrico con raddrizzatore KBU1010 e filtri in ferrite

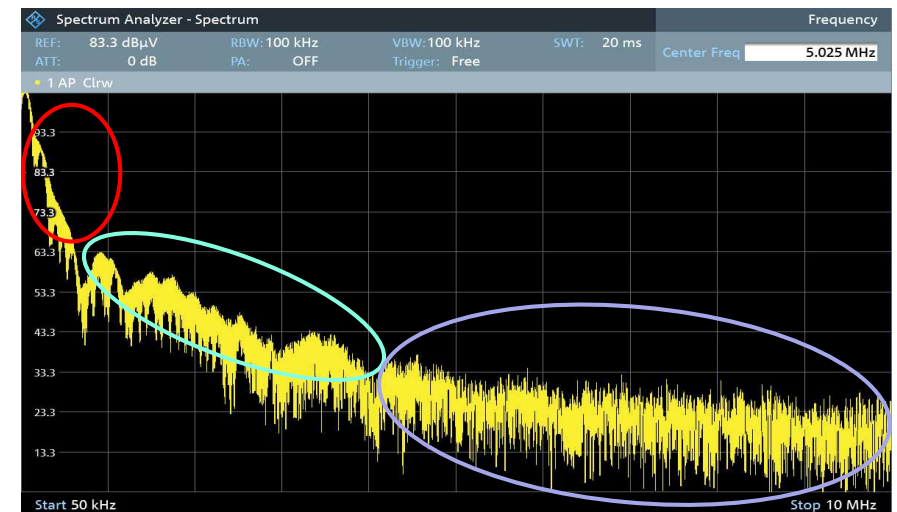


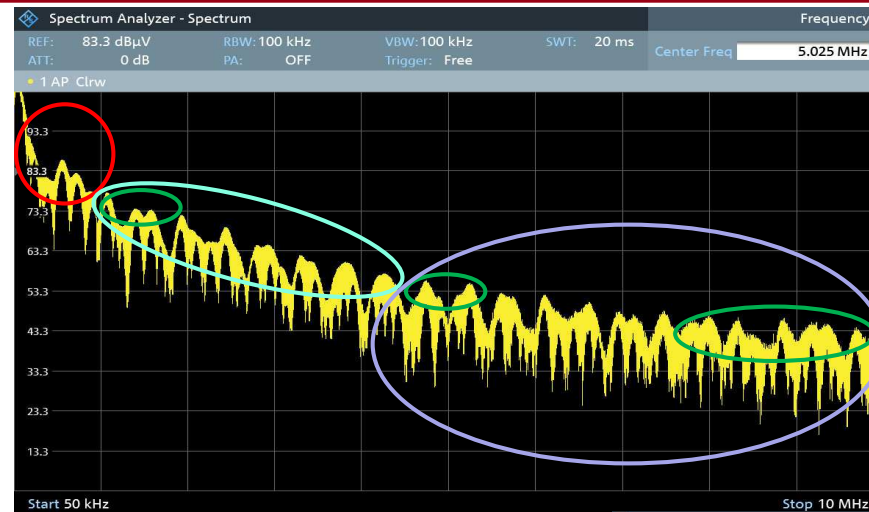
Circuito elettrico con raddrizzatore KBU1010 e filtro EMI (CW1B-10A-L)



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V$  e filtri in ferrite

Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)

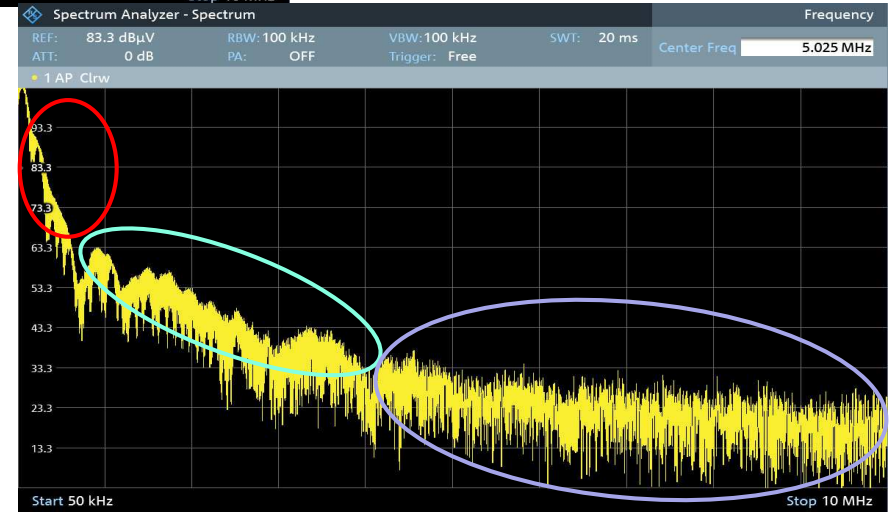




Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V$ , senza filtri



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V$  e filtri in ferrite



Spettro delle emissioni condotte, con  $V_{IN}=5V$  e filtro EMI (CW1B-10A-L)

L'analisi sperimentale delle emissioni condotte e radiate per i vari dispositivi ha portato i seguenti esiti:

### **Emissioni condotte:**

1. Valori sotto i limiti specifici dati dalla normativa per tutte le prove dei componenti;
2. Valori più bassi grazie all'inserimento nel circuito dei filtri.  
Efficienza filtri EMI > Efficienza filtri in ferrite

### **Emissioni radiate:**

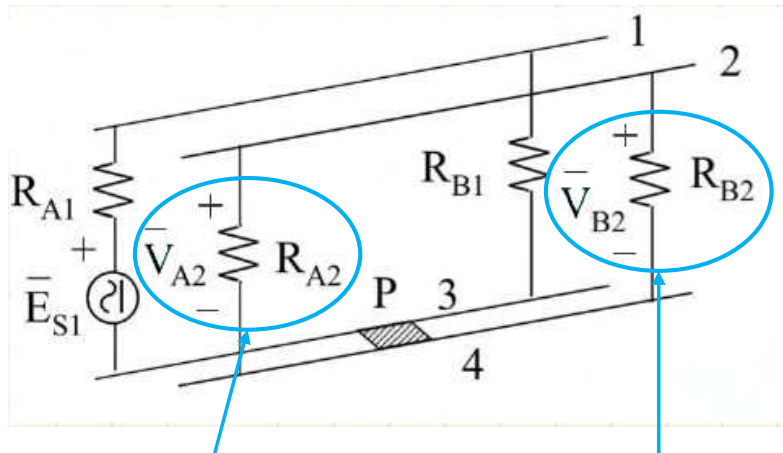
1. Valori sotto i limiti specifici dati dalla normativa per tutte le prove dei componenti, ma discutibili;
2. Valori variati di pochissimo e/o invariati con l'inserimento nel circuito dei filtri.

In conclusione, la verifica dei disturbi, dovuti alle emissioni condotte e radiate, ha riportato valori più che buoni per i singoli dispositivi, grazie anche alla strumentazione didattica che si aveva a disposizione.

Il *CrossTalk* è un accoppiamento elettromagnetico indesiderato tra conduttori e circuiti stampati che si trovano nelle immediate prossimità.

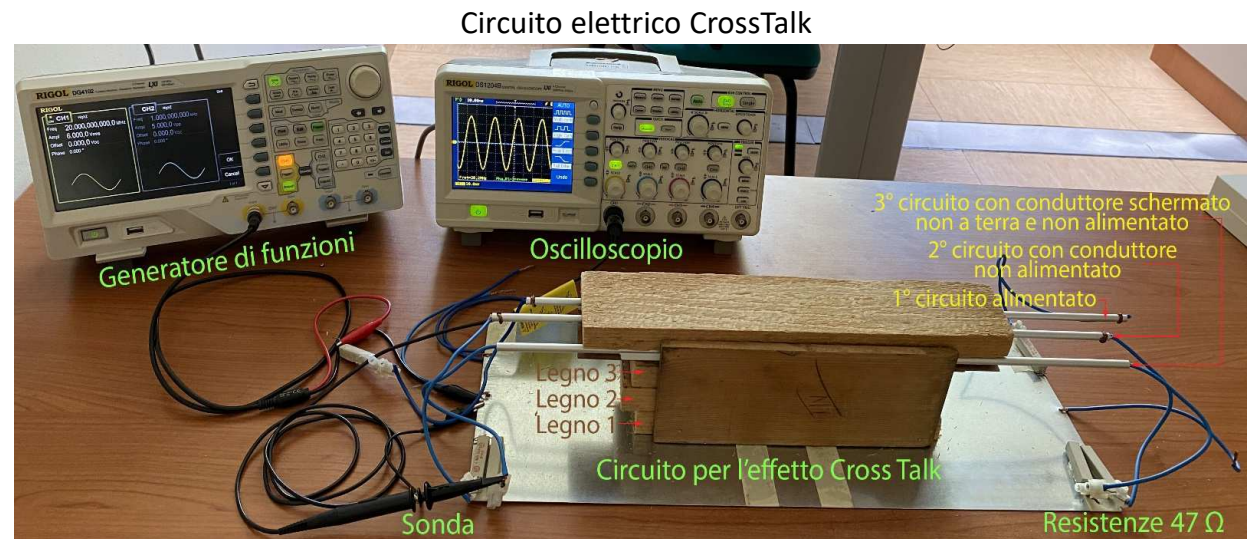
Per capire meglio questo fenomeno, consideriamo un caso semplice con due circuiti con una parte equipotenziale in comune.

Schema elettrico *CrossTalk*



Induced near-end voltages

Induced far-end voltages



**OBIETTIVO: determinare l'effetto che un circuito produce sull'altro circuito**

## PROVA 1

1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 800kHz,  $V_{RMS}=6V$  e Offset=1,516 V  
2° circuito con conduttore non alimentato

		CANALINA (raffigura la distanza dei conduttori)				
		1	2	3	4	5
Altezza	Legno 1	0,036 V <sub>p</sub>	0,026 V <sub>p</sub>	0,020 V <sub>p</sub>	0,016 V <sub>p</sub>	0,014 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,046 V <sub>p</sub>	0,033 V <sub>p</sub>	0,028 V <sub>p</sub>	0,024 V <sub>p</sub>	0,022 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,050 V <sub>p</sub>	0,040 V <sub>p</sub>	0,032 V <sub>p</sub>	0,028 V <sub>p</sub>	0,026 V <sub>p</sub>

## PROVA 1.1

1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 800kHz,  $V_{RMS}=6V$  e Offset=1,516 V  
3° circuito con conduttore schermato non a terra e non alimentato

		CANALINA (raffigura la distanza dei conduttori)				
		1	2	3	4	5
Altezza	Legno 1	0,034 V <sub>p</sub>	0,022 V <sub>p</sub>	0,018 V <sub>p</sub>	0,014 V <sub>p</sub>	0,012 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,042 V <sub>p</sub>	0,034 V <sub>p</sub>	0,028 V <sub>p</sub>	0,024 V <sub>p</sub>	0,022 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,048 V <sub>p</sub>	0,040 V <sub>p</sub>	0,032 V <sub>p</sub>	0,028 V <sub>p</sub>	0,026 V <sub>p</sub>

## PROVA 3

1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 20MHz,  $V_{RMS}=6V$   
2° circuito con conduttore non alimentato

		CANALINA (raffigura la distanza dei conduttori)				
		1	2	3	4	5
Altezza	Legno 1	1 V <sub>p</sub>	0,380 V <sub>p</sub>	0,250 V <sub>p</sub>	0,170 V <sub>p</sub>	0,120 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	1 V <sub>p</sub>	0,400 V <sub>p</sub>	0,260 V <sub>p</sub>	0,185 V <sub>p</sub>	0,140 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,940 V <sub>p</sub>	0,400 V <sub>p</sub>	0,280 V <sub>p</sub>	0,200 V <sub>p</sub>	0,160 V <sub>p</sub>

## PROVA 3.1

1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 20MHz,  $V_{RMS}=6V$   
3° circuito con conduttore schermato non a terra e non alimentato

		CANALINA (raffigura la distanza dei conduttori)				
		1	2	3	4	5
Altezza	Legno 1	0,728 V <sub>p</sub>	0,300 V <sub>p</sub>	0,200 V <sub>p</sub>	0,120 V <sub>p</sub>	0,090 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,720 V <sub>p</sub>	0,324 V <sub>p</sub>	0,190 V <sub>p</sub>	0,130 V <sub>p</sub>	0,090 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,720 V <sub>p</sub>	0,340 V <sub>p</sub>	0,240 V <sub>p</sub>	0,190 V <sub>p</sub>	0,160 V <sub>p</sub>

## PROVA 2

1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 2MHz,  $V_{RMS}=6V$   
2° circuito con conduttore non alimentato

		CANALINA (raffigura la distanza dei conduttori)				
		1	2	3	4	5
Altezza	Legno 1	0,068 V <sub>p</sub>	0,048 V <sub>p</sub>	0,035 V <sub>p</sub>	0,028 V <sub>p</sub>	0,024 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,090 V <sub>p</sub>	0,066 V <sub>p</sub>	0,054 V <sub>p</sub>	0,046 V <sub>p</sub>	0,040 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,100 V <sub>p</sub>	0,080 V <sub>p</sub>	0,068 V <sub>p</sub>	0,060 V <sub>p</sub>	0,052 V <sub>p</sub>

## PROVA 2.1

1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 2MHz,  $V_{RMS}=6V$   
3° circuito con conduttore schermato non a terra e non alimentato

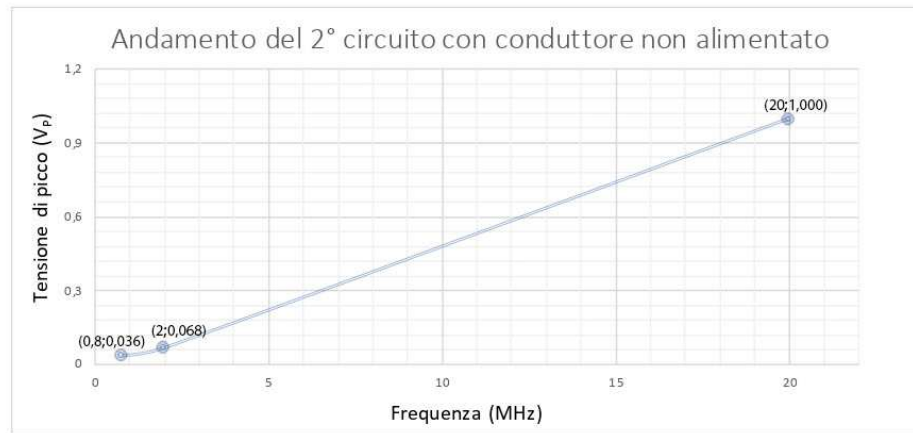
		CANALINA (raffigura la distanza dei conduttori)				
		1	2	3	4	5
Altezza	Legno 1	0,068 V <sub>p</sub>	0,048 V <sub>p</sub>	0,036 V <sub>p</sub>	0,026 V <sub>p</sub>	0,024 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,085 V <sub>p</sub>	0,064 V <sub>p</sub>	0,052 V <sub>p</sub>	0,044 V <sub>p</sub>	0,040 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,100 V <sub>p</sub>	0,080 V <sub>p</sub>	0,066 V <sub>p</sub>	0,056 V <sub>p</sub>	0,052 V <sub>p</sub>

Tutte le prove sono state fatte:

- Spessore legno 2,5 cm;
- larghezza canalina 1 cm;
- induced near-end voltages.

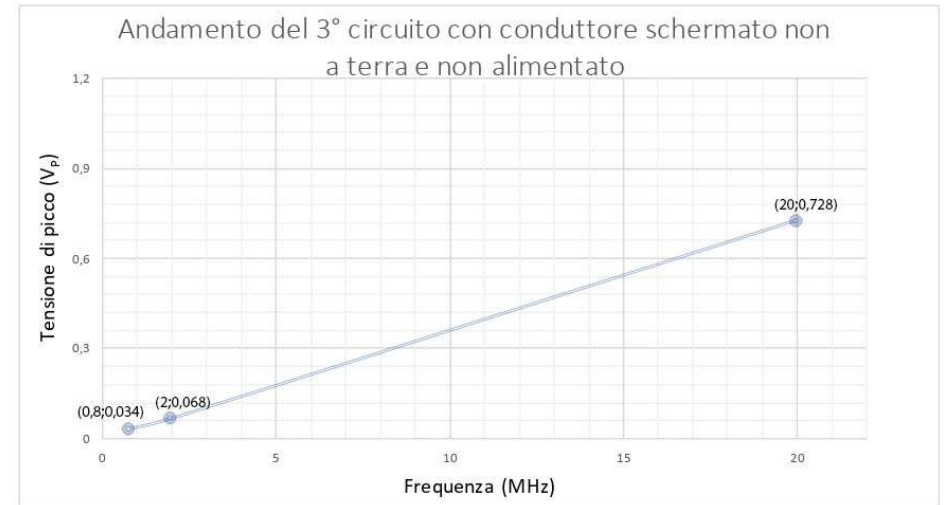
**GRAFICO 1**

Frequenza (MHz)	Tensione (V <sub>p</sub> )
0,8	0,036
2	0,068
20	1,000



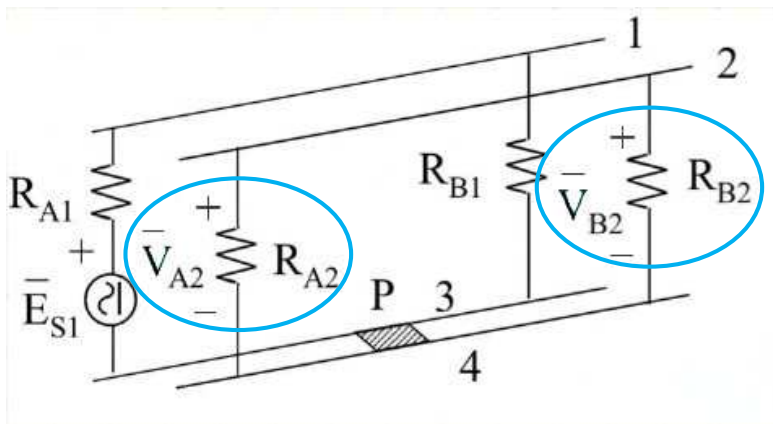
**GRAFICO 2**

Frequenza (MHz)	Tensione (V <sub>p</sub> )
0,8	0,034
2	0,068
20	0,728



## **OBIETTIVO: determinare l'effetto che un circuito produce sull'altro circuito**

Schema elettrico CrossTalk



I valori di tensione  $V_{A2}$  e  $V_{B2}$  sono dovuti alle interazioni tra circuito 1 e circuito 2.

Le interazioni tra i due circuiti sono dovute a:

- Campi elettrici (**accoppiamenti capacitivi** tra i conduttori del circuito);
- Campi campi magnetici (**accoppiamenti induttivi** tra i due circuiti)

**ATTENZIONE: gli accoppiamenti possono essere ridotti**



**Collego a terra lo schermo del conduttore schermato**



## PROVA 1.1

1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 800kHz,  $V_{RMS}=6V$  e Offset=1,516V  
3° circuito con conduttore schermato non a terra e non alimentato

		CANALINA
		1
Altezza	Legno 1	0,034 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,042 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,048 V <sub>p</sub>

		CANALINA	
		1	
		Riduzione accoppiamento capacitivo	Riduzione accoppiamento induttivo
Altezza	Legno 1	0,030 V <sub>p</sub>	0,020 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,038 V <sub>p</sub>	0,026 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,046 V <sub>p</sub>	0,030 V <sub>p</sub>

## PROVA 2.1

1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 2MHz,  $V_{RMS}=6V$   
3° circuito con conduttore schermato non a terra e non alimentato

		CANALINA
		1
Altezza	Legno 1	0,068 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,085 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,100 V <sub>p</sub>

		CANALINA	
		1	
		Riduzione accoppiamento capacitivo	Riduzione accoppiamento induttivo
Altezza	Legno 1	0,060 V <sub>p</sub>	0,034 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,078 V <sub>p</sub>	0,040 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,088 V <sub>p</sub>	0,060 V <sub>p</sub>

## PROVA 3.1

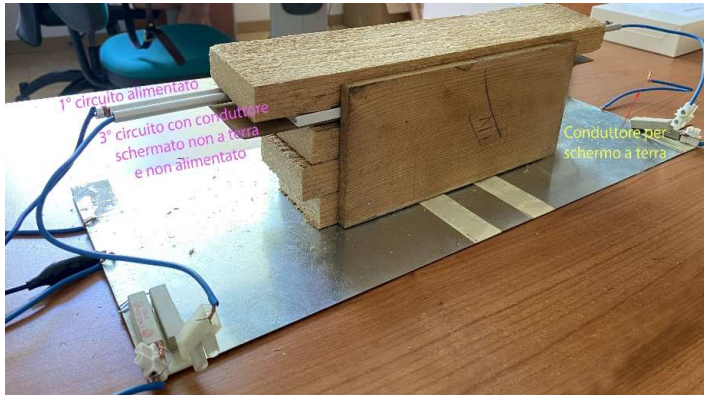
1° circuito (canalina 0) alimentato con frequenza 20MHz,  $V_{RMS}=6V$   
3° circuito con conduttore schermato non a terra e non alimentato

		CANALINA
		1
Altezza	Legno 1	0,728 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,720 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,720 V <sub>p</sub>

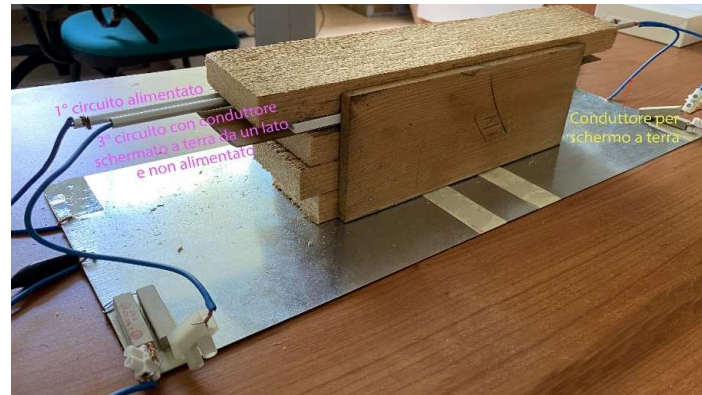
		CANALINA	
		1	
		Riduzione accoppiamento capacitivo	Riduzione accoppiamento induttivo
Altezza	Legno 1	0,144 V <sub>p</sub>	0,040 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2	0,130 V <sub>p</sub>	0,020 V <sub>p</sub>
	Legno 1+2+3	0,126 V <sub>p</sub>	0,019 V <sub>p</sub>

Tutte le prove sono state fatte con: spessore legno 2,5 cm, larghezza canalina 1 cm e induced near-end voltages

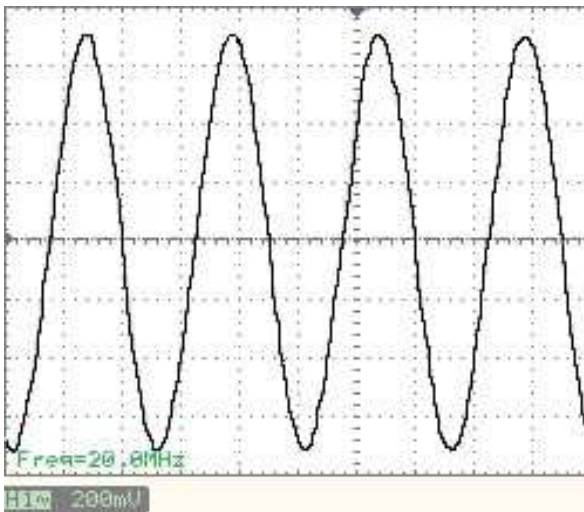
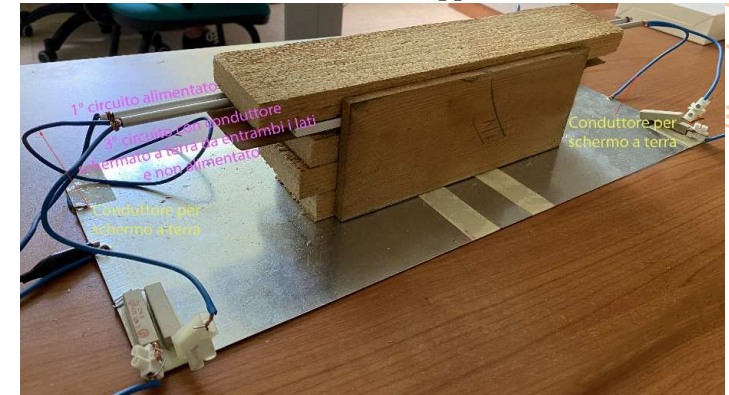
CrossTalk senza riduzione degli accoppiamenti



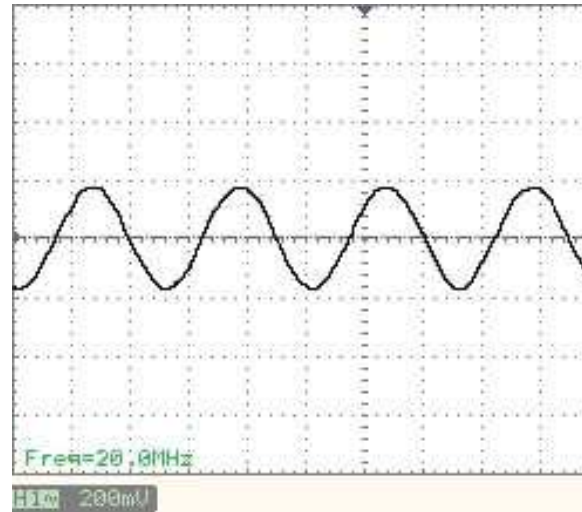
CrossTalk con riduzione dell'accoppiamento capacitivo



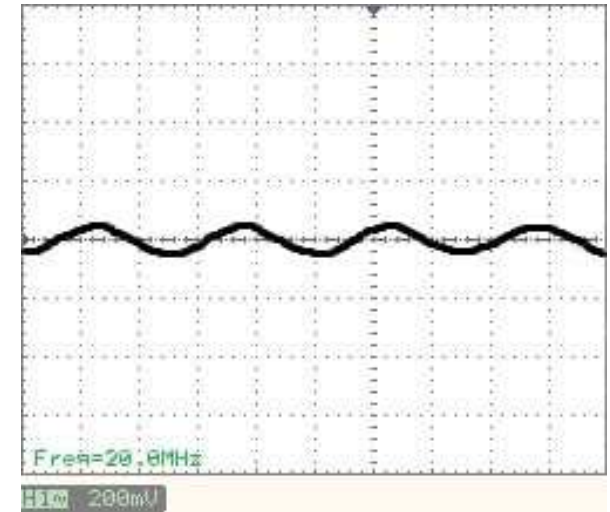
CrossTalk con riduzione dell'accoppiamento induttivo



Andamento  $V_{A2}$  con  $V_p=0,72V$  senza riduzione degli accoppiamenti



Andamento  $V_{A2}$  con  $V_p=0,126V$  con la riduzione dell'accoppiamento capacitivo



Andamento  $V_{A2}$  con  $V_p=0,019V$  con la riduzione dell'accoppiamento induttivo

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

***Grazie per l'attenzione***

Tutor universitario: Prof. Torchio Riccardo

Laureando: *Nicolò Zennato*

*Matr. 1193286*

Padova, 11/2022