



Test a 10 kW dei coupler dell'RFQ di TRASCO ai LNL

Autori: F. Grespan, E. Fagotti, A. Palmieri, Loris Antoniazzi.

Abstract

Nei giorni 23-24-25, 28-29-30 marzo 2011 i primi 2 coupler dell'RFQ di TRASCO sono stati condizionati fino a 9.5 kW in regime impulsato e 8 kW in regime continuo nella 3° sala sperimentale dei LNL. Descriviamo in questo rapporto la procedura e i risultati del condizionamento, con un approfondimento sui fenomeni di multipacting osservati. L'amplificatore è stato messo a punto da Fabio Scarpa. La scheda di interlock è stata messa a punto da Giorgio Bassato.

1. Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale è composto da (Figura 1)

- Amplificatore a stato solido in grado di fornire nominalmente 10 kW di potenza continua, a 352 MHz, con interlock in sovracorrente, temperatura e acqua. L'Amplificatore ha uno schermo touch-screen su cui leggere la potenza FORWARD e REVERSE, e 2 connettori per portare i segnali all'oscilloscopio
- 2 couplers installati su una cavità "bridge" in alluminio
- 2 tratti di guida d'onda, per portare la potenza dall'amplificatore al Coupler1 e dal Coupler2 al carico coassiale raffreddato
- Sistema di raffreddamento per raffreddare couplers, cavità bridge, carico, amplificatore
- Sistema da vuoto, composto da 1 pompa rotativa e 1 pompa turbo
- Sistema di controllo, basato su PLC
- 1 generatore di segnale R&S, 1 generatore di funzioni Rhode&Schwarz, 1 oscilloscopio Agilent, un generatore di segnale Agilent

I segnali monitorati al PLC sono

- Potenza FORWARD e REVERSE al Coupler1 e al Coupler2, con directional coupler piazzati sulle guide d'onda (P-FWD-1 e 2, P-REV-1 e 2)
- Temperature dei couplers e della cavità
- Vuoto ai couplers
- Scariche elettriche nelle guide e nella cavità

Inoltre, all'oscilloscopio si visualizzano i segnali V-FWD-1 e V-REV-1 misurata dal directional coupler interno dell'Amplificatore. (Essendo voltaggi, le relative potenze sono proporzionali ai quadrati)

Il test è stato l'occasione per eseguire una caratterizzazione del guadagno dell'Amplificatore e dell'attenuazione del suo directional coupler interno, comparando la lettura sullo schermo con quella al PLC. Il guadagno è leggermente più alto da regime CW a regime impulsato. Abbiamo ottenuto: GUADAGNO ≈ 69.5 dB (zona lineare), ATT.FORWARD ≈ 57.2 dB, ATT. REVERSE ≈ 56.5 dB (Figura 2).

Il sistema "guide d'onda -couplers- cavità bridge" è stato caratterizzato a bassa potenza con un VNA, con Port1 e Port2 connesse alle transizioni Guida-Coassiale, abbiamo ottenuto i valori in Tabella 1.



Figura 1: strumentazione e apparato sperimentale in 3° Sala Sperimentale dei LNL.

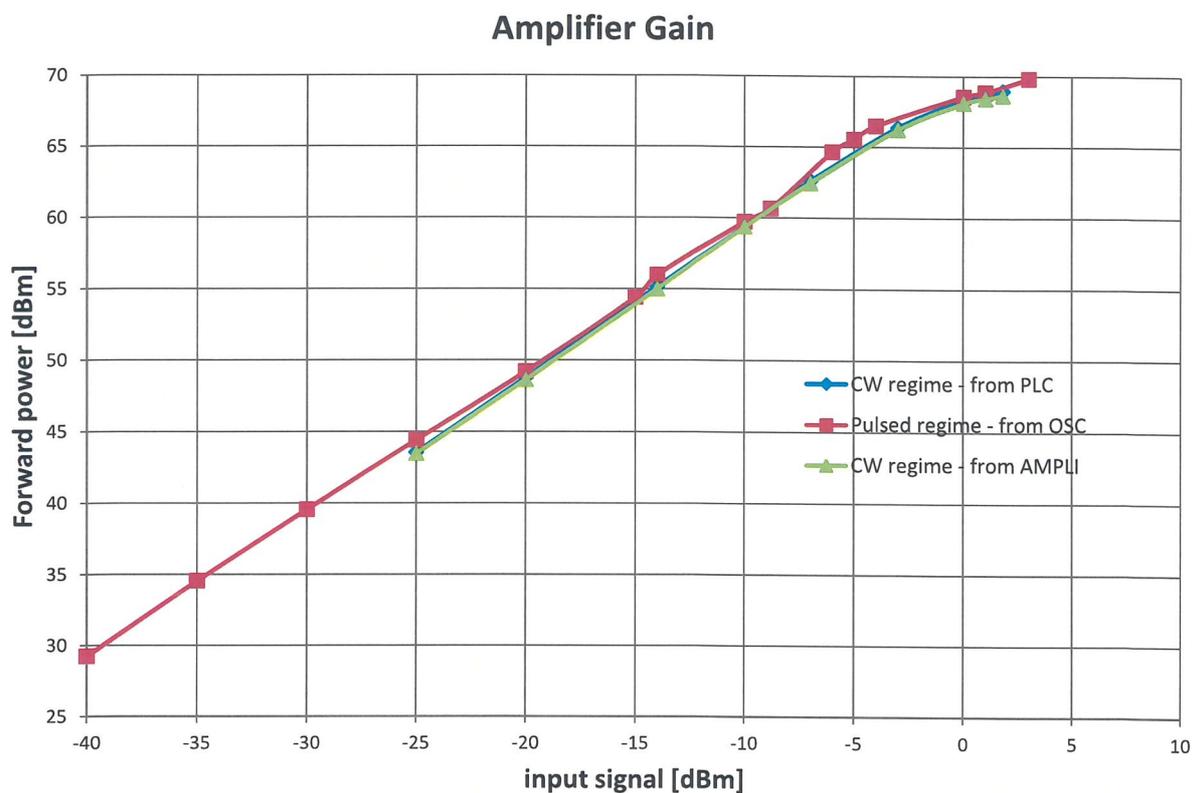


Figura 2: curve di guadagno dell'amplificatore a regime impulsato e continuo.

Tabella 1: caratteristiche RF del sistema Guide-Couplers-Cavità

Grandezza	Valore
Potenza Trasmessa (Coupler1→Coupler2 = S_{21}^2)	59%
P_{Rev} =Potenza Riflessa al Coupler 1 (S_{11}^2)	5%
Potenza Riflessa al Coupler2 (S_{22}^2)	5.5%
P_{Loss} =Potenza in cavità ($1 - S_{21}^2 - S_{11}^2 - S_{22}^2$)	31%
Frequenza Risonanza	351.250 MHz
Q_{Loaded}/Q_0 /Coupling Factor β (single coupler)	2300/5200/0.63

2. Fenomeni notati durante il condizionamento

Quando viene mandato un impulso rettangolare, si nota l'andamento del segnale V-REV-1 caratteristico di un sistema leggermente sotto-accoppiato (Figura 3). Il decadimento esponenziale della curva deriva dal

filling-time della cavità $\tau_L = \frac{2Q_L}{\omega} = 2\mu s$ e la misura del voltaggio della zona stazionaria conferma che

P_{Rev} =5%. Noi siamo nel caso in cui il Coupler2 fa da "pick-up", per cui il fattore di accoppiamento

$$\beta_1 = \frac{P_1}{P_{cav} + P_2} = 0.63 \text{ tiene già in considerazione anche la potenza uscita dal Coupler2.}$$

Già a basse potenze ($P\text{-FWD-1} < 100\text{W}$) si nota il fenomeno Multipacting, che si manifesta con un segnale V-REV-1 a dente di sega come in Figura 4(sx), che dilatato nella scala del tempo mostra la presenza di molte sinusoidi sfasate come in Figura 4(dx).

Una possibile spiegazione di questi segnali sta nel fatto che il Multipacting cambia la frequenza di risonanza del sistema:

1. f_{RF} è fissata alla frequenza di risonanza senza Multipacting
2. Parte il Multipacting: nel momento di massimo electron-loading nella cavità c'è il massimo del V-REV-1 e il massimo detuning del sistema rispetto alla f_{RF} , ovvero il massimo sfasamento del segnale V-REV-1 rispetto al V-FWD-1
3. Si condiziona il Multipacting, la frequenza del sistema ritorna verso f_{RF} . Diminuisce il picco e lo sfasamento di V-REV-1 (rampa discendente del dente di sega)
4. Si arresta il Multipacting, la frequenza della cavità è di nuovo = f_{RF} . Si arriva al minimo di V-REV-1, con segnale sostanzialmente in fase con V-FWD-1.
5. A questo punto il campo è di nuovo abbastanza alto da innescare altro Multipacting (2° picco...)

Il Multipacting alza la frequenza di risonanza del sistema. Infatti aumentando la f_{RF} al generatore R&S si diminuisce la V-REV-1, si trasferisce più energia alla cavità, riducendo il tempo condizionamento.

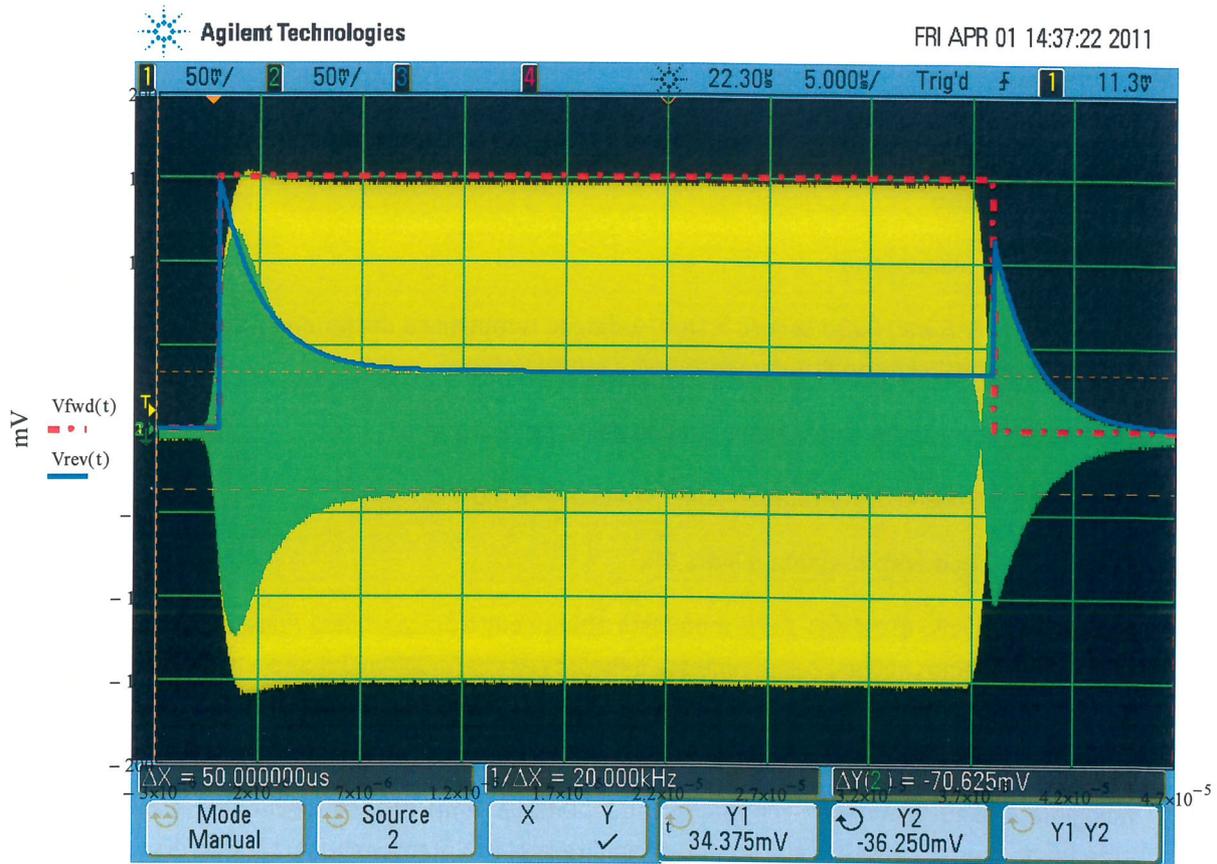


Figura 3: curve di Voltaggio FORWARD e REVERSE confrontati con le misure all'oscilloscopio (stessa scala).

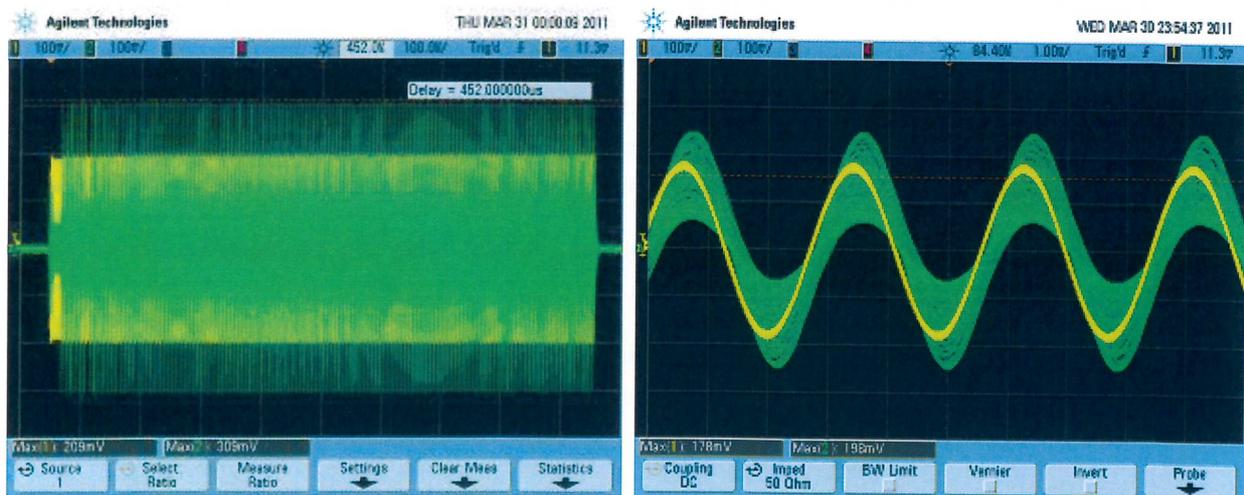


Figura 4: segnale REVERSE in presenza di Multipacting in 2 scale di tempi diverse (100micros - 1ns).

Quando P-REV-1 =100% si ha che P-FWD-2 = 0. Il Multipacting avviene nel Coupler1, senza trasmissione in cavità, e quindi si sta condizionando un solo coupler.

Altri fenomeni di electron-loading sono stati rivelati a potenze maggiori, notando delle incongruenze nei bilanci delle potenze. Ad esempio, aumentando P-FWD-1 aumentava la P-REV-1, mentre P-FWD-2 rimaneva costante; questo perché l' e-loading nella cavità assorbiva potenza, non permettendo al campo di salire, di

conseguenza tenendo costante P-FWD-2. Quando si esaurisce l'e-loading la P-FWD-2 aumenta all'improvviso.

Tutti i fenomeni di e-loading hanno dinamiche molto veloci, con tempi massimi dell'ordine di 200 μ s.

3. Condizionamento

Gli obiettivi che ci poniamo sono

1. *Peak Power* = 9.5 kW, *Pulse Length* > 1ms → date le tempistiche dei fenomeni elettronici questo dovrebbe garantirci il condizionamento fino a quella Potenza
2. *Peak Power* = 8 kW, CW massimo erogabile dall'Amplificatore
3. Mantenere un livello di vuoto accettabile → *vacuum* \leq 6.0 e-06 mbar.

Procedura di Condizionamento eseguita (Figura 5):

- Arrivati a un livello di P-FWD-1 che manifesta attività elettronica, si fissa *Pulse Length* a una lunghezza minima ($\geq 20 \mu$ s) e si diminuisce il *Period Length* (≤ 500 ms) mano a mano che il livello di vuoto lo consente.
- Se il vuoto non consente la diminuzione di *Period Length*, si fissa *Period Length* a un valore maggiore, e si aumenta *Pulse Length*. Essendo infatti i 2 tempi differenti di almeno 1 ordine di grandezza, questo consente alle pompe di ripulire la cavità mantenendo un livello di vuoto accettabile.
- 2 livelli di potenza hanno richiesto maggior condizionamento in impulsato, -14 dBm \approx P-FWD-1= 400 W e -7 dBm \approx P-FWD-1=2000 W.
- Poiché la situazione è abbastanza stabile, scendiamo a P-FWD-1= 1 kW – CW risalendo fino a 2 kW – CW. I residui fenomeni di e-loading causano un leggero detuning della cavità. La P-REV-1 e il vuoto sono mantenuti bassi aggiustando manualmente la frequenza del segnale f_{RF} .
- A questo punto spingiamo velocemente la potenza a **P-FWD-1=9.5 kW, con *Pulse Length* = 1.1 ms**, riducendo il *Period Length* da 200 ms a 50 ms.
- Infine, aggiustando poco la frequenza, passiamo da P-FWD-1 = 4.3 kW – CW a **P-FWD-1 = 8 kW – CW**, a cui il sistema viene mantenuto per alcuni minuti.

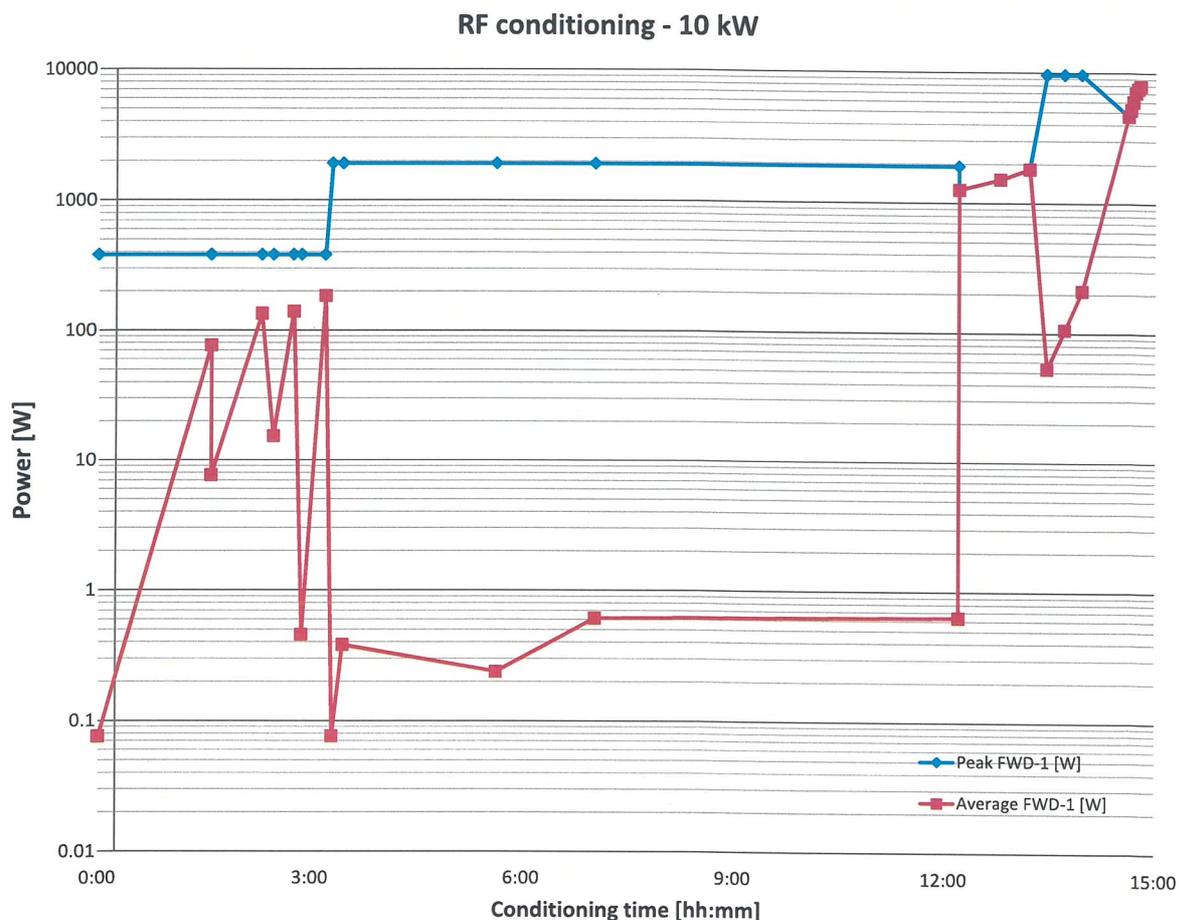


Figura 5: condizionamento RF dei couplers. Il tempo netto di condizionamento è stato di 15 ore.

4. Considerazioni sul Multipacting

I 2 livelli più importanti di Multipacting osservati (PFWD-1 = 400 W e 2000 W) sono previsti con un margine del 10 % del programma "Multipacting Calculator" della ESA (Figura 6) per una **linea coassiale** con le dimensioni dei couplers ($D_{ext}=38$ mm, $d_{int}=19.1$ mm).

Inoltre riportando al nostro caso le Multipacting Bands del coassiale illustrate in [ANALYSIS OF MULTIPACTING IN COAXIAL LINES](#) (Figura 7) si vede che le 2 linee nere dei 400 W e 2000 W intersecano 2 livelli di Single-Point-Multipacting. In particolare quello a 2 KW dovrebbe essere l'ultimo livello (Order-1) per la nostra linea coassiale.

Figura 8 riporta le bande di Multipacting per 2 piatti piani e paralleli, con le dimensioni della bridge cavity (GAP=6.47 cm). Sopra i 10 kW rimangono 2 livelli.

Per quanto riguarda il multipacting nel *loop* dei coupler occorre fare delle simulazioni con codici 3D.

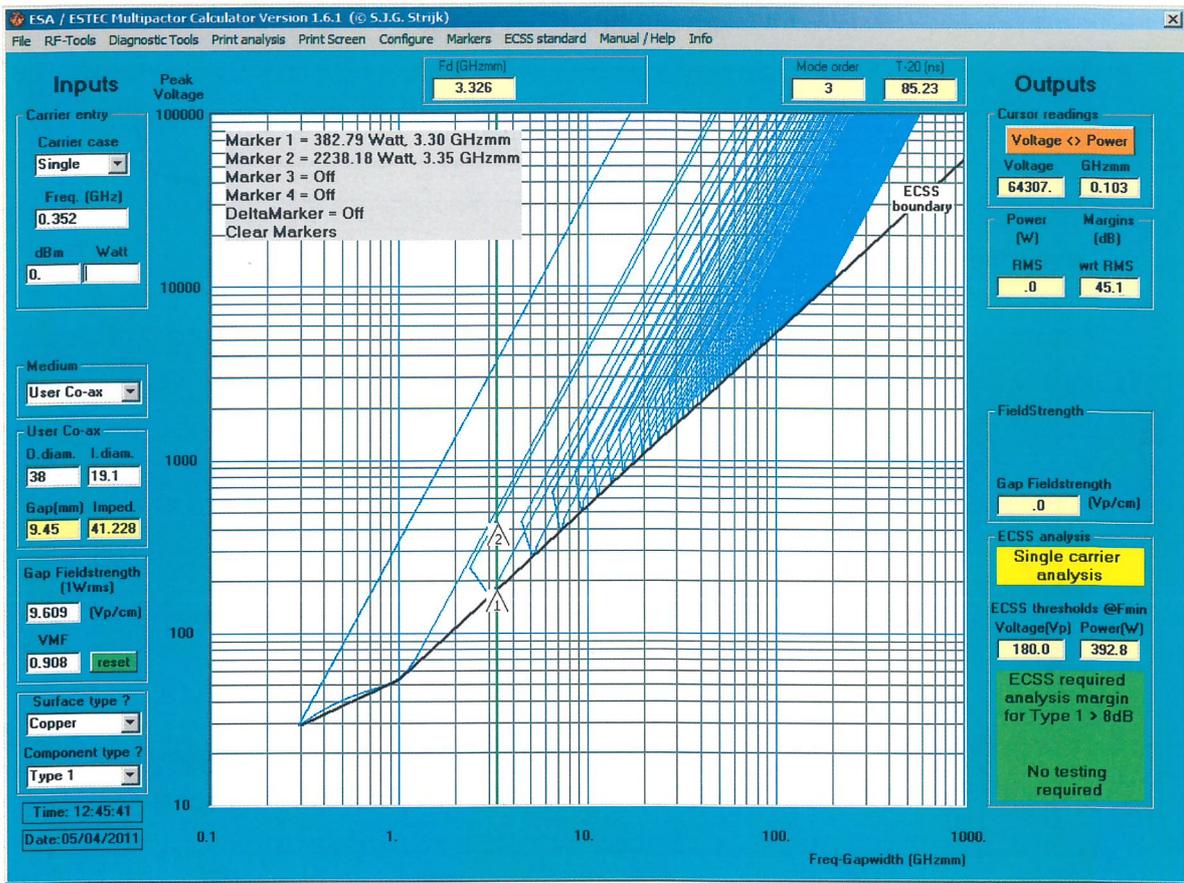


Figura 6: livelli calcolati dal programma della ESA per la linea coassiale dei couplers.

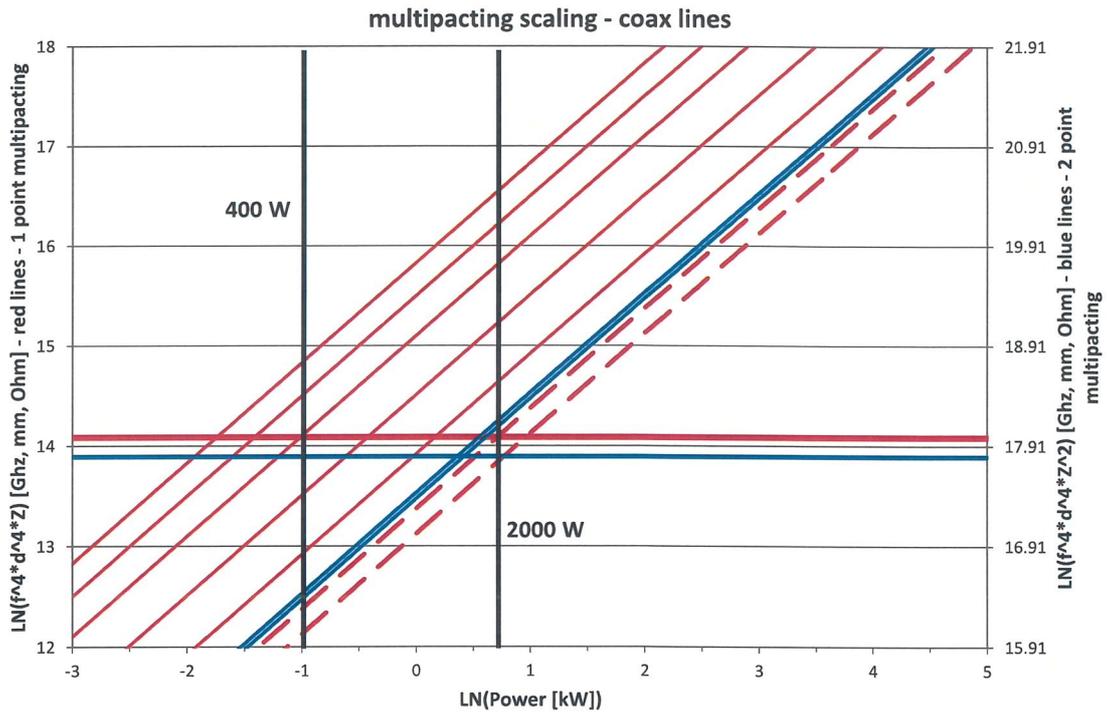


Figura 7: bande di multipacting per una linea coassiale, riportate al caso dei coupler TRASCO. Le linee rosse sono i *single point multipacting levels*, le linee blu i *2 point multipacting levels*.

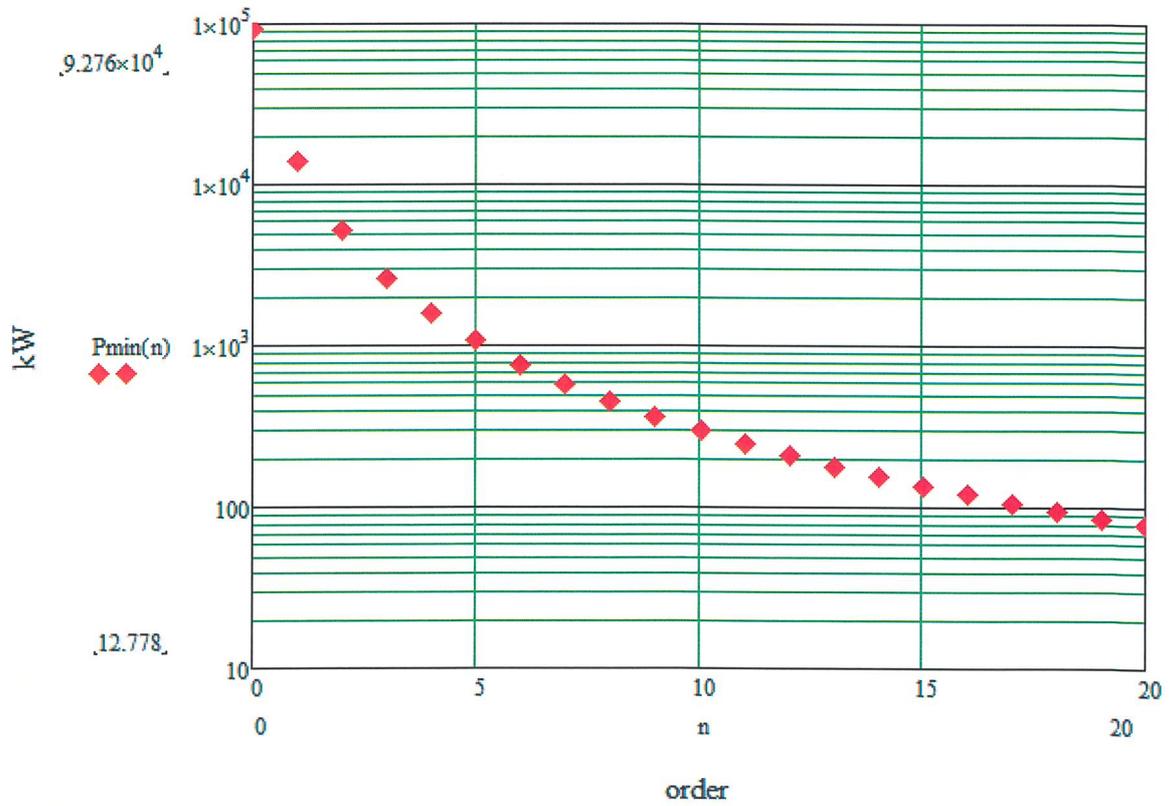


Figura 8: livelli di multipacting nella bridge cavity.

L'innalzamento della frequenza della cavità, che si nota durante il Multipacting nella cavità o nella linea di trasmissione, è dovuto a un cambiamento di impedenza del carico: il vuoto della linea coassiale o della cavità diventa un mezzo conduttivo a causa degli elettroni, variando l'impedenza vista dal generatore. Un modello per descrivere questo effetto è simile a alla teoria del *beam-loading* (Wangler, RF Linac, cap. 10), come mostrato in Figura 9 ([Kishek et al., Steady state multipactor and dependence on material properties](#)).

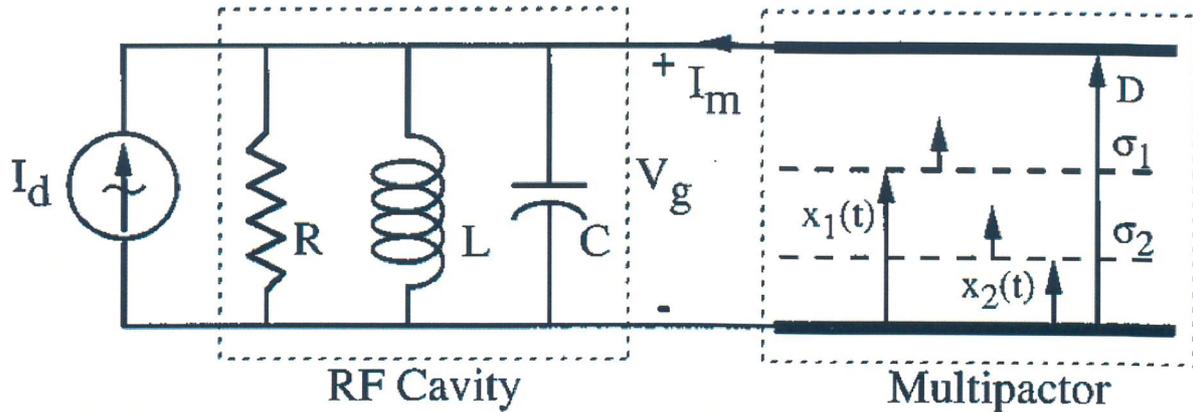


Figura 9: interazione di un circuito RLC (cavità) con multipacting.

Per mantenere in frequenza ($f_0=f_{RF}$) il sistema quando c'è il fascio, è necessario variare la frequenza della cavità di una quantità

$$f_0 - f_{RF} = -\frac{f_0}{2Q_L} \frac{P_b}{P_c (\beta+1)} \tan \phi ,$$

dove ϕ è la fase sincrona del *bunch*, P_b è la potenza del fascio, P_c la potenza dissipata sul rame, β il coefficiente di accoppiamento del coupler. Quindi se la fase sincrona è $\phi < 0$, il fascio ABBASSA la frequenza di risonanza.

Nel nostro caso osserviamo che il Multipacting INNALZA la frequenza di risonanza, quindi è come se in regime stazionario il "bunch di elettroni" avesse fase sincrona è $\phi > 0$. Sperimentalmente, nella gran parte dei casi si nota che il Multipacting INNALZA la frequenza di risonanza.

La teoria semplificata del Multipacting per 2 piatti piani e paralleli ([Hatch and Williams, JAP 25-4, 1954](#), [Farrell and Gallagher, IEEE 32-5, 1985](#)) dice che l'intervallo di fase iniziale in cui è permesso il Multipacting è $0 < \phi < \arctan(2/\pi)$, per velocità di emissione dell'elettrone secondario $v_0 \approx 0$.

In una cavità quarto d'onda (struttura coassiale TEM), considerando anche il campo magnetico, dalle equazioni del moto e le condizioni di persistenza del Multipacting per velocità di emissione nulla, si ottiene la condizione sulla fase ([Zvi and Sokolowski, Recent work on Superconducting QWR's](#))

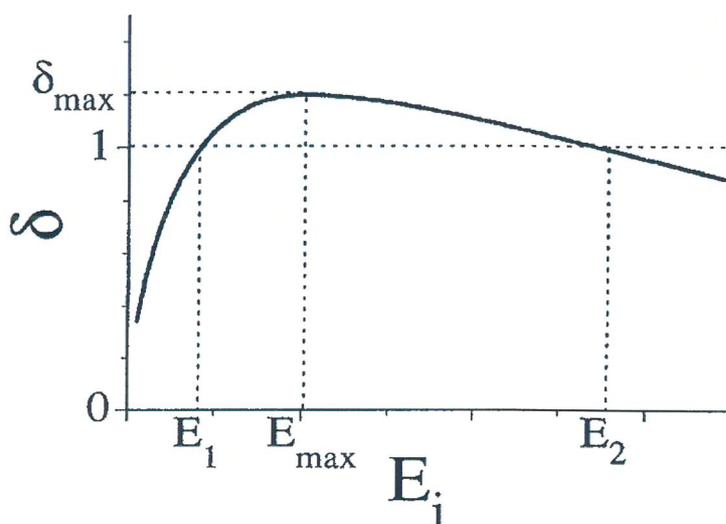
$$\frac{1}{\omega_{RF}} \frac{v_1}{g} \leq \frac{\cos \phi}{\sin \phi + n \frac{\pi}{2} \cos \phi} \leq \frac{1}{\omega_{RF}} \frac{v_2}{g} ,$$

dove v_1 e v_2 sono le velocità dell'elettrone primario tra le quali il coefficiente di emissione secondaria è $\delta > 1$

(Figura 10), g è la differenza tra i raggi del coassiale, ω_{RF} è la pulsazione del generatore. Nel nostro caso l'intervallo di fasi iniziali permesse è $-39^\circ < \phi < 55^\circ$, con periodicità 180° (Figura 11).

In generale, l'intervallo di fase "favorevole" al Multipacting è $0 < \phi < \pi$, in quanto il campo RF deve essere nella direzione tale da *emettere* l'elettrone dalla superficie ([Riyopoulos et al., Theory of multipacting in crossed field](#)).

Questa osservazione giustifica l'innalzamento della frequenza osservato sperimentalmente nella maggior parte dei casi di multipacting.



Material	δ_{max}	E_{max}	E_1 (eV)	E_2 (eV)
Cu (cleaned)	1.1–1.3	500–650	200–250	1700
Cu (baked, 350°C)	1.4	500	130	2150
Cu (baked, 100°C)	2.1	350–400	< 100	> 3000
Cu (as received)	2.5	300	< 100	> 3000
Cu ₂ O	1.19–1.25	400–440	-	-
C (soot)	0.45	500	n/a	n/a
C (graphite)	1.02	300	250	350
C (diamond)	2.8	750	-	-
Ti (cleaned)	0.7–0.9	280–300	n/a	n/a
Ti (as received)	2.0	200	< 100	1500
Iron	1.1–1.3	200–400	120	1400
Stainless steel	1.2	400	150–200	1000–1050
Nickel	1.0–1.35	450–550	140	1100
Molybdenum	1.0–1.2	350–400	140–200	1000–1100

Figura 10: coefficiente di emissione secondaria per diversi materiali. Nel nostro caso è stato utilizzato il Cu (baked, 350°C).

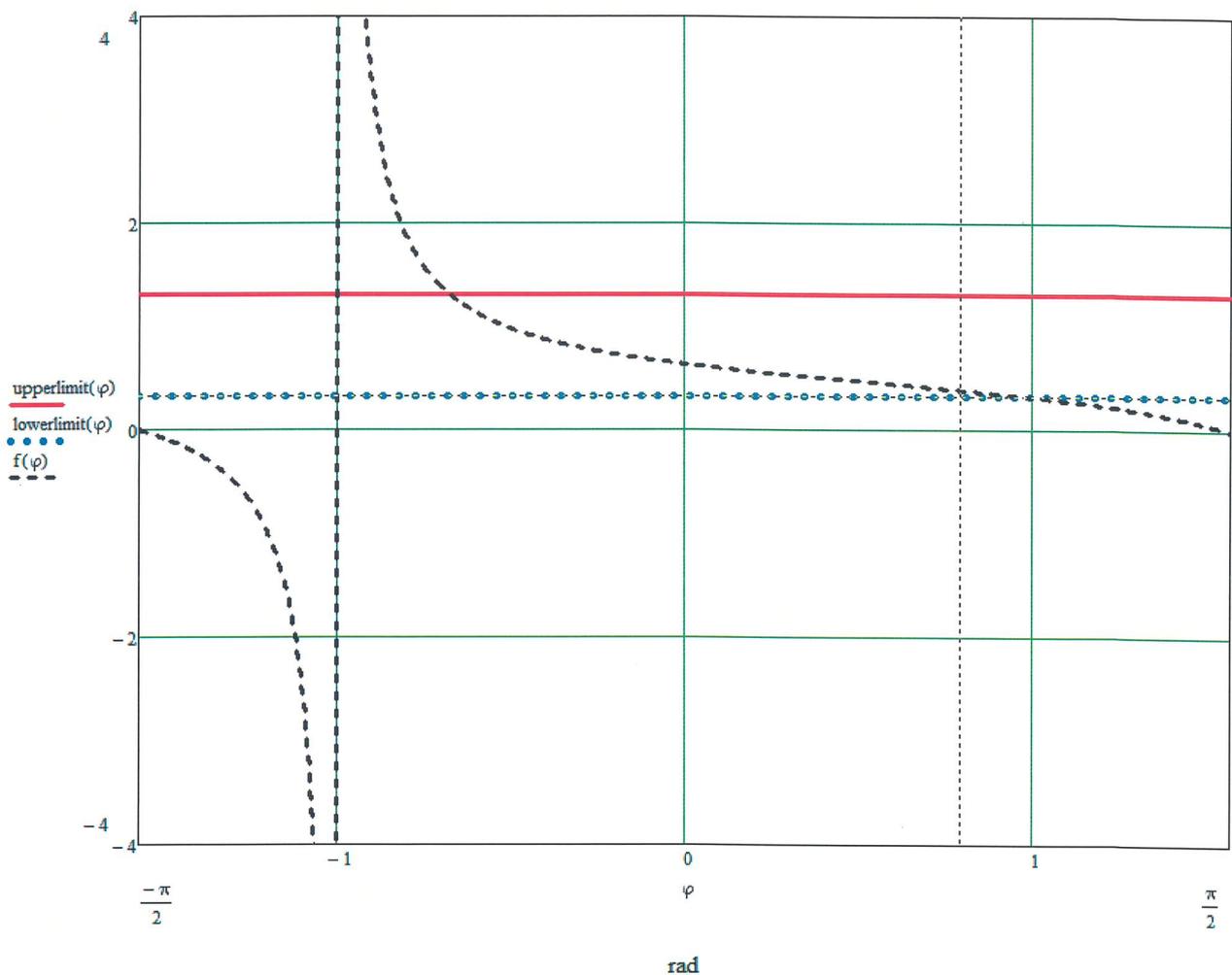


Figura 11: intervallo di fase in cui è permesso il Multipacting per una struttura coassiale.

5. Scheda di Interlock

A test terminati abbiamo testato il circuito di interlock mostrato in Figura 12.

Questo circuito, alimentato a 5Vdc, agisce sul segnale modulante che comanda il generatore di funzione R&S. In particolare in presenza di almeno uno dei 3 segnali di interlock in logica TTL, generati da ARC-detector, PLC, o pulsante di test, il segnale modulante proveniente dal generatore di segnale R&S viene sostituito con una tensione costante di -3V. Così facendo l'uscita del generatore di funzione R&S assume una potenza di circa il 3% rispetto a quella impostata.

Il tempo di reazione del circuito, come mostrato in Figura 13, è il tempo che intercorre tra il fronte di salita del segnale blu (che simula il verificarsi di un arco elettrico) e la conclusione (al 95%) del fronte di discesa del segnale modulante per il generatore di funzione (in giallo). In questo stesso intervallo si completa pure il transitorio per e la potenza P-FWD-1 (in verde). La Figura 13 è relativa all'intervento di un interlock generato dall'ARC-detector, interlock di durata $\approx 110\mu s$.

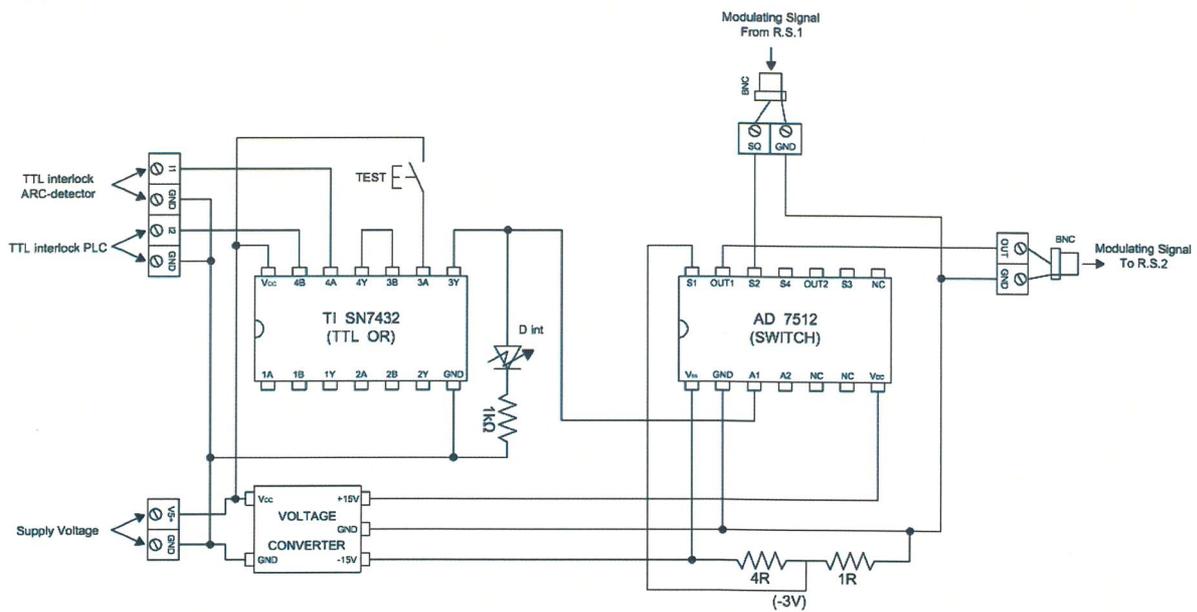


Figura 12: schema circuito di interlock.

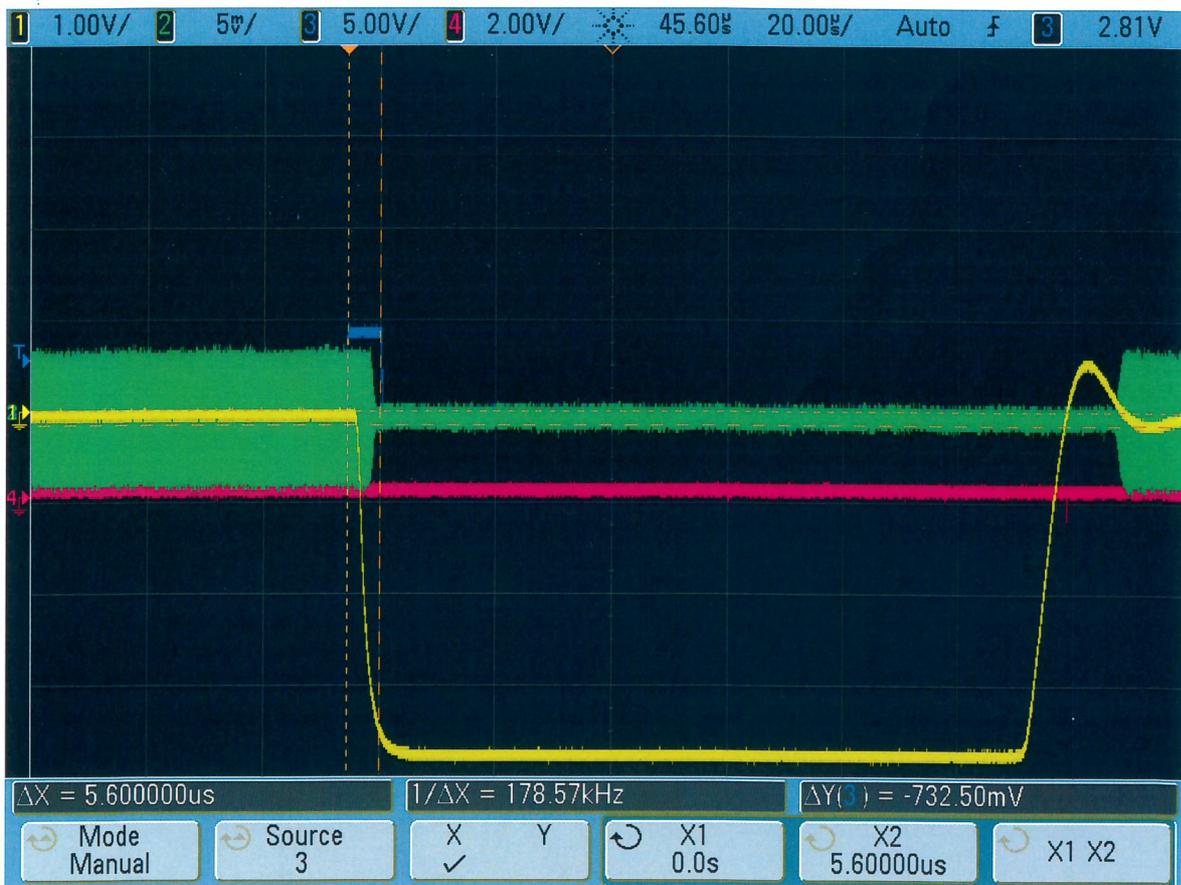


Figura 13: il tempo che intercorre tra il segnale TTL (blu) e l'azzeramento del segnale RF (giallo) è di 5.6 microsecondi, cioè comparabile al *filling time* della cavità.

