

Applicatori di Potenza in guida a 2,45 GHz: progetto e caratterizzazione di una transizione da connettore 7/16 a guida d'onda WR340

Andrea Bruschi⁽¹⁾, Sadik Malaj⁽²⁾

⁽¹⁾ IFAC-CNR, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), Italy

⁽²⁾ Elab Scientific, Via Madonna del Piano, 10 50019 Sesto Fiorentino (FI)

1- Introduzione

Questo studio si inquadra all'interno del progetto TemArt, che mira a sviluppare prodotti e servizi innovativi per la caratterizzazione e la conservazione di beni culturali. Più in particolare l'obiettivo del gruppo di lavoro è la realizzazione di un prototipo di apparato per il trattamento a microonde di superfici (lapidei, pareti in genere) attaccate da biodeteriogeni (soprattutto licheni, ma anche muffe e alghe).

Questo apparato è composto da un generatore a microonde commerciale, costituito da un alimentatore Dipolar AB (modello Magdrive1000 standard) e da un magnetron Panasonic 2M244-M14, e da un applicatore di potenza collegato al generatore tramite cavo coassiale. L'applicatore può essere schematizzato come una cavità risonante accoppiata tramite una terminazione a diaframma al materiale da trattare. Per la realizzazione dell'applicatore si ha bisogno di tre componenti (Fig. 1): la transizione da cavo a guida d'onda, che trasferisce la potenza dal generatore alla guida d'onda, un tratto di guida con *stubs* che funge da adattatore di impedenza per disaccoppiare il generatore dalla cavità risonante e dalla fessura che accoppia la cavità risonante con il materiale. Il circuito equivalente dell'applicatore di potenza è riportato in Fig. 2. In questo lavoro tratteremo la prima parte dell'applicatore: la transizione da cavo a guida d'onda.

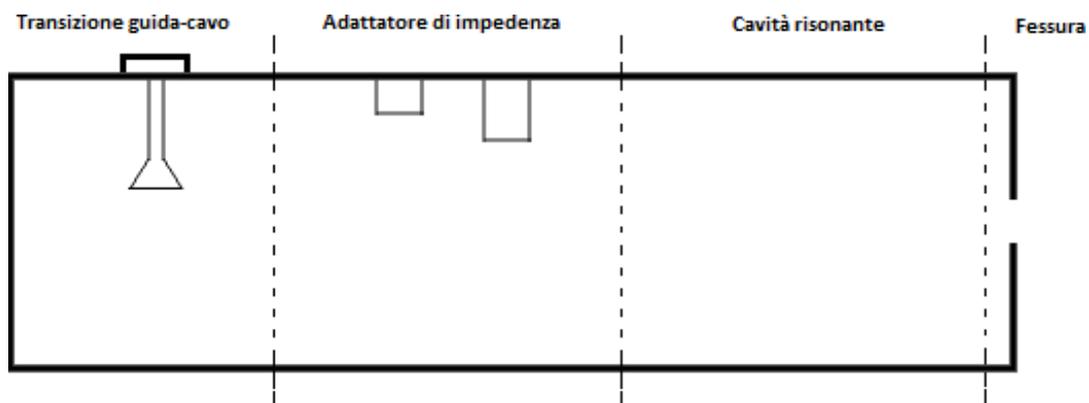


Fig. 1 - Schema di realizzazione dell'applicatore: a sinistra la transizione cavo-guida, in mezzo il tratto di guida che agisce da adattatore di impedenze, il tratto che realizza la cavità risonante di $\lambda_g/2$ e a destra la fessura che accoppia la cavità al materiale da trattare.

L'ottimizzazione della transizione da cavo a guida d'onda è un passo importante per la realizzazione di un applicatore. Partendo da studi già precedentemente effettuati [1] e dallo studio di transizioni cavo-guida reperibili sul mercato, è stata realizzata e caratterizzata una transizione da cavo a guida d'onda per la banda ISM 2450 MHz.

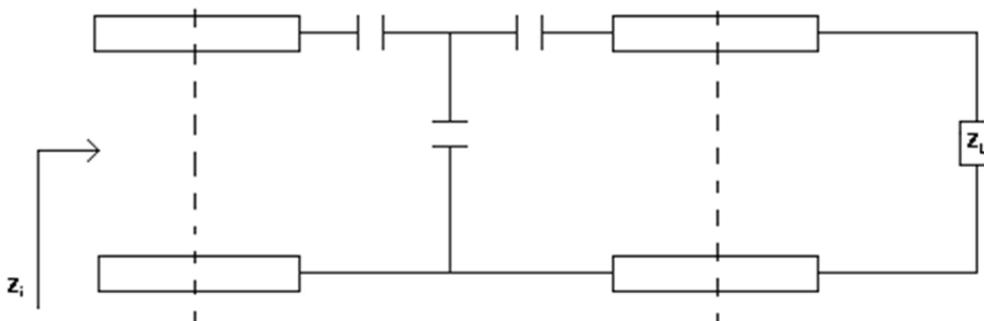


Fig. 2 - Schema circuitale equivalente dell'applicatore: la cavità risonante chiusa sul carico Z_L (che schematizza il materiale da trattare) viene disaccoppiata dal generatore tramite un tratto di guida che funziona da adattatore di impedenza; in questo modo il generatore "vede" un tratto di guida chiusa sull'impedenza caratteristica della guida indipendentemente dal carico.

Il connettore utilizzato è un 7/16 (un esempio è mostrato in Fig. 3) adatto per le applicazioni di potenza mentre la guida utilizzata ha dimensioni interne uguali a quelle di una guida d'onda WR340, adatta per l'intervallo di frequenze 2,20 - 3,30 GHz (Fig. 4). La transizione è stata caratterizzata stimando la lunghezza in guida λ_g e la distanza dal fondo della guida L (vedere Fig. 4) per ottenere il massimo trasferimento di potenza.

Per ottimizzare le prestazioni della transizione, sono state studiate diverse forme e dimensioni del lanciatore misurando il rapporto d'onda stazionaria (ROS) e il coefficiente di trasmissione delle transizioni ottenute nell'intervallo di frequenze 2,4 – 2,5 GHz accoppiate con una transizione dalle prestazioni eccellenti (*IMC. Microwave Industries Ltd*). Una volta stabilite le dimensioni ottimali del lanciatore, sono state costruite due transizioni cavo-guida e sono stati misurati per entrambe il coefficiente di trasmissione e il ROS accoppiandole tra loro nel primo caso e con una terminazione adattata di precisione in guida WR340 nel secondo.



Fig. 3 - Esempio di connettore utilizzato nella transizione.

Successivamente sono state effettuate delle prove di potenza per monitorare il riscaldamento della transizione quando impiegata in trattamenti a massima potenza (1300 W nominali applicati) per tempi dell'ordine delle decine di minuti.

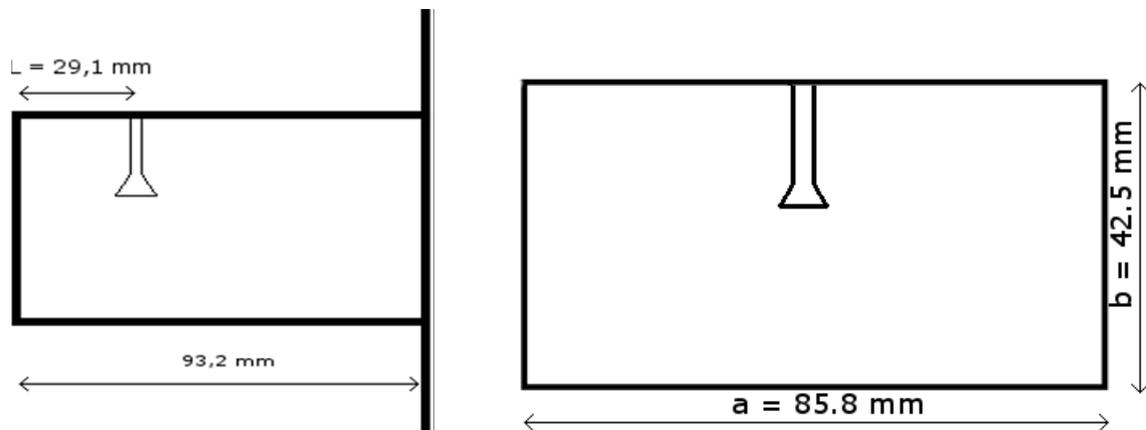


Fig. 4 - Sezioni trasversale (a destra) e longitudinale (a sinistra) della transizione cavo-guida progettata; le dimensioni interne a e b sono uguali a quelle di una guida d'onda WR340 ($a = 86,36$ mm e $b = 43,18$ mm).

2- Dimensioni e studi preliminari sulla transizione

La transizione cavo-guida d'onda può essere schematizzata dal punto di vista circuitale (Fig. 5), guardando dalla parte del cavo, come un trasformatore e il parallelo di due impedenze, una introdotta dal lanciatore, Z_{La} , e l'altra invece dovuta al cortocircuito terminale della transizione che è pari a:

(1)

dove Z_0 è l'impedenza caratteristica della guida e L è la distanza tra il lanciatore e il fondo della guida (Fig. 4). Al variare di L questa impedenza può diventare di tipo induttivo o capacitivo.

La presenza del lanciatore nella guida che si inoltra parallelamente alla direzione del campo elettrico, produce un fenomeno di risonanza simile ad un circuito risonante serie. Al variare del diametro del lanciatore e della sua distanza dalla base della guida, si ottiene una modifica della lunghezza d'onda in risonanza con la guida [2]. Per una data guida d'onda e fissato il diametro del lanciatore, la distanza tra il lanciatore e il fondo della guida tale che sia presente una condizione di massimo trasferimento di energia per la frequenza operativa della guida (2,45 GHz) prende il nome di *lunghezza risonante*. Di solito questa è approssimativamente un quarto della lunghezza d'onda in guida (solo nel caso ideale di lanciatore senza spessore la distanza è $\lambda_g/4$). In Fig. 4 sono riportate le sezioni trasversali e longitudinali della guida WR340 con le dimensioni della stessa. Da queste è possibile ricavarsi la frequenza di taglio della guida e la lunghezza d'onda in guida λ_g .

La frequenza di taglio viene stimata dalla seguente relazione:

$$f_c = \frac{c}{2a} \quad (2)$$

dove c è la velocità della luce mentre a è la larghezza della guida (Fig. 4); per la transizione trattata in questo lavoro la frequenza di taglio è pari a 1,748 GHz.

Per stimare invece la lunghezza d'onda in guida si utilizza:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (3)$$

dove λ_0 è la lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza di lavoro (2,45 GHz). La lunghezza d'onda in guida corrispondente alle condizioni della transizione è circa 175 mm.

In questa transizione la distanza L tra il lanciatore e il fondo della guida deve essere diversa da quella canonica e più in particolare deve essere inferiore in modo da introdurre un effetto induttivo: questo è dovuto alla forma del lanciatore. Infatti la sua particolare forma (Fig. 4) introduce un effetto capacitivo che deve essere bilanciato per ottenere la condizione di massimo trasferimento di energia.

3- Studio del lanciatore

Il secondo passo del lavoro è stato ricercare la configurazione ottimale del lanciatore. Partendo dalla configurazione di una transizione commerciale, sono realizzati due tipi di lanciatori (come si nota in Tab. 1) con la parte finale di forma conica e cilindrica. Per verificare la variazione delle prestazioni sono stati studiati il ROS e il coefficiente di trasmissione della transizione per ognuna delle modifiche effettuate. Queste due variabili sono state misurate per tre frequenze (2,4, 2,45 e 2,5 GHz). Le misure sono state effettuate con l'analizzatore di reti *HP Agilent 8753A Network Analyzer*.

In Tab. 1, Tab. 2 e Tab. 3 sono riportati i risultati delle misure effettuate per le diverse configurazioni: la prima configurazione di Tab. 1 corrisponde alle dimensioni del lanciatore della transizione commerciale. Per le misure del ROS (Tab. 2) sono riportati anche i valori massimi e minimi dello stesso, e le relative frequenze in parentesi, all'interno dell'intervallo 2,4 – 2,5 GHz: queste misure sono state effettuate per verificare che la variabile non abbia un comportamento "strano" nei punti non campionati. In Tab. 3 sono invece riportate le misure del coefficiente di trasmissione per l'accoppiamento delle diverse modifiche sotto studio della transizione con una transizione dalle prestazioni note usata come riferimento. Sono riportati anche i grafici dell'andamento del ROS e del coefficiente di trasmissione al variare dei parametri. Per quanto riguarda i lanciatori di forma conica, il ROS è stato misurato, accoppiando le transizioni a terminazioni in guida a basso ROS, sia in una banda più ampia (2 - 3 GHz), con passi di 0,2 GHz, sia in banda di lavoro (2,4 – 2,5 GHz) a passi più fini (25 MHz): i risultati sono mostrati in Tab. 4 e Tab. 5.

La configurazione scelta per la realizzazione della transizione cavo-guida è quella che presenta un ROS più vicino all'unità e che presenta la minore attenuazione nel coefficiente di trasmissione: il lanciatore scelto ha la parte finale di forma conica in cui, facendo riferimento alla Tab. 1, A è pari a 10,34 mm, B è 15,5 mm, C è 6,29 mm e D 7mm.

Tab. 1 - Dimensioni e forme del lanciatore nelle diverse configurazioni; la prima configurazione è equivalente a quella di una transizione commerciale mentre l'ultima è una via di mezzo tra la forma conica e quella cilindrica.

Configurazione	Dimensioni (mm)				Materiale
	A	B	C	D	
I	10,9 (A1)	15,5 (B1)	7,35 (C1)	7 (D1)	
II	9,54 (A1)	15,5 (B1)	7,48 (C1)	7 (D1)	ottone
III	10,34	15,5	6,29	7	
IV	12	16,5	6,2	7	
V	14,5	12,45	3,6	7	alluminio
VI	11,64 (A1)	12,53 (B1)	6,58 (C1)	7 (D1)	

Tab. 2 - Misure del ROS della transizione con diverse configurazioni di lanciatore; oltre alle misure effettuate alle frequenze 2,4 , 2,45 e 2,5 GHz sono riportati i valori di massimo e minimo, con le rispettive frequenze, riscontrati nell'intervallo 2,4 – 2,5 GHz.

Configurazione	ROS						
	2,4 GHz	2,45 GHz	2,5 GHz	Minimo	f (GHz)	Massimo	f (GHz)
I	1,26	1,14	1,22	1,108	2,46	1,277	2,414
II	1,23	1,084	1,19	1,06	2,437	1,23	2,4
III	1,09	1,09	1,04	1,035	2,42	1,1	2,46
IV	1,33	1,28	1,3	1,22	2,465	1,38	2,426
V	1,13	1,27	1,14	1,11	2,409	1,28	2,456
VI	1,02	1,17	1,03	1,01	2,403	1,17	2,45

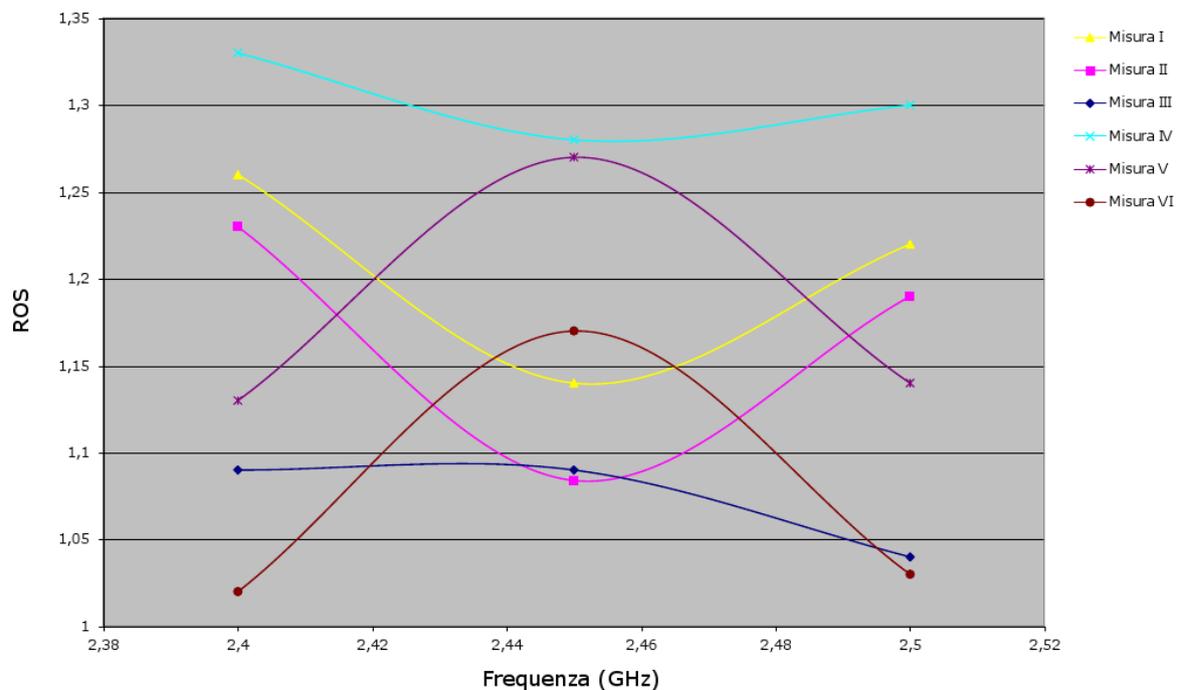


Fig. 6 - Andamento del ROS per le frequenze 2,4 , 2,45 e 2,5 GHz; ogni colore corrisponde ad una serie di misure effettuate con un lanciatore diverso (Tab. 1) come riportato in legenda.

Tab. 3 - Coefficiente di trasmissione misurato per diverse frequenze e dimensioni del lanciatore (vedere Tab. 1), accoppiando la transizione sotto studio con una transizione campione utilizzata per la calibrazione .

Configurazione	S21 (db)		
	2,4 GHz	2,45 GHz	2,5 GHz
I	(-) 0,19	(-) 0,11	(-) 0,15
II	(-) 0,18	(-) 0,12	(-) 0,14
III	(-) 0,12	(-) 0,10	(-) 0,10
IV	(-) 0,24	(-) 0,18	(-) 0,20
V	(-) 0,13	(-) 0,19	(-) 0,13
VI	(-) 0,14	(-) 0,16	(-) 0,13

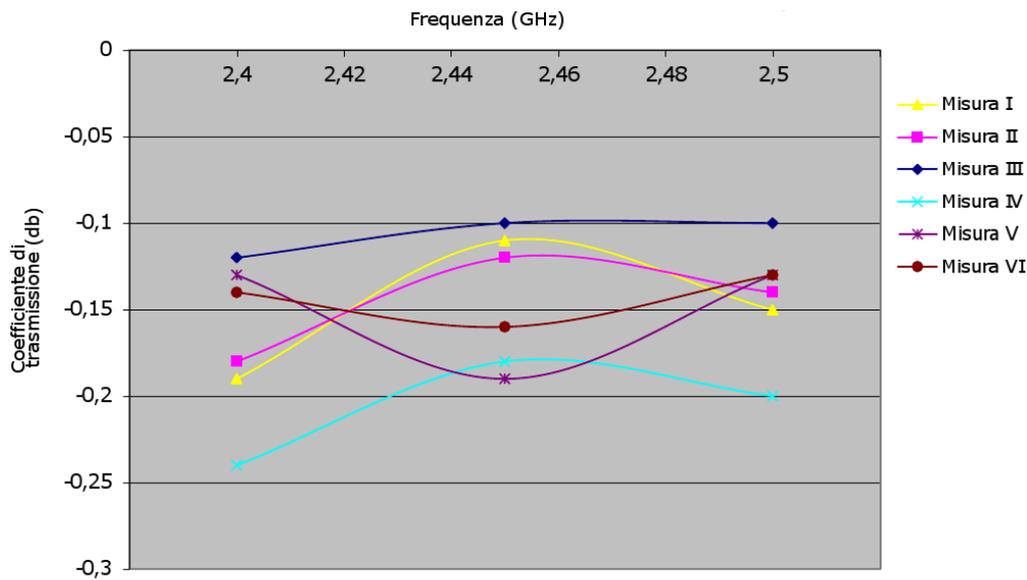


Fig. 7 - Andamento del coefficiente di trasmissione per le frequenze 2,4, 2,45 e 2,5 GHz; ogni colore corrisponde ad una serie di misure effettuate con un lanciatore diverso (Tab. 1) come riportato in legenda.

Tab. 4 - ROS misurato nella banda 2 – 3 GHz per transizioni con diversi lanciatori (con la parte finale di forma conica) accoppiate a una terminazione in guida con basso ROS.

Dimensioni (mm)				ROS Banda 2 - 3 GHz				
A	B	C	D	2,2 GHz	2,4 GHz	2,6 GHz	2,8 GHz	3 GHz
10,34	15,5	6,29	7	1,1	1,125	1,195	1,275	1,21
14,5	12,45	3,6	7	1,24	1,27	1,3	1,39	1,346
11,64	12,53	6,58	7	1,105	1,156	1,23	1,33	1,255

Tab. 5 - ROS misurato nella banda 2,4 – 2,5 GHz per transizioni con diversi lanciatori (con la parte finale di forma conica) accoppiate a una terminazione in guida con basso ROS.

Dimensioni (mm)				ROS Banda 2,4 - 2,5 GHz				
A	B	C	D	2,4 GHz	2,425 GHz	2,45 GHz	2,475 GHz	2,5 GHz
10,34	15,5	6,29	7	1,1	1,109	1,108	1,108	1,109
14,5	12,45	3,6	7	1,28	1,27	1,26	1,26	1,26
11,64	12,53	6,58	7	1,155	1,15	1,15	1,157	1,169

4- Verifica delle prestazioni della transizione progettata

Una volta scelte dimensioni e forma del lanciatore, è stata costruita una coppia di transizioni cavo-guida. In questo modo è stato possibile verificare per ognuna delle due il ROS ed anche il coefficiente di trasmissione delle due transizioni accoppiate. La prima misura è stata effettuata accoppiando le transizioni ad una terminazione in guida a basso ROS (*IMC. Microwave Industries Ltd*) mentre la seconda è stata effettuata accoppiando le due transizioni tra loro; in questo caso sono state misurate sia S_{12} che S_{21} . In Tab. 6 e Tab. 7 sono riportate le misure effettuate con l'analizzatore di reti.

Tab. 6 - Misure del ROS per le due transizioni cavo-guida costruite (A e B).

Misura	ROS		
	2,4 GHz	2,45 GHz	2,5 GHz
A	1,27	1,32	1,4
B	1,26	1,33	1,4

Tab. 7 - Misure del coefficiente di trasmissione per due transizioni accoppiate; la misura I consiste nel S_{21} mentre la misura II corrisponde al S_{12} .

Misura	Coefficiente di trasmissione (db)		
	2,4 GHz	2,45 GHz	2,5 GHz
I	(-) 0,67	(-) 0,55	(-) 0,64
II	(-) 0,70	(-) 0,60	(-) 0,70

5- Prove di potenza

Sono state effettuate delle prove di potenza per monitorare il riscaldamento delle transizioni costruite se utilizzate in trattamenti a potenza massima (circa 1 kW) per tempi dell'ordine delle decine di minuti. L'apparato di misura è mostrato in Fig. 8 mentre in Appendice 1 è descritta la caratterizzazione del misuratore di potenza (l'accoppiatore direzionale a 2450 MHz e il misuratore di potenza sono della *Sairem*), impiegato nella misura effettuata: il generatore di potenza è stato collegato all'applicatore, che è costituito dalle due transizioni cavo-guida costruite, tramite un accoppiatore direzionale (collegato al misuratore di potenza che permette la misura di potenza trasmessa e riflessa in uscita al generatore) e un cavo di potenza. L'applicatore è chiuso a sua volta su un carico adattato costituito da una serie di due attenuatori coassiali (*Tenuline Coaxial Attenuator 30 dB Model 8327-300* della *Bird Electronic Corporation* e un attenuatore da 20 dB della *Narda* modello 765-20 mostrati in Fig. 9) per un totale di 50 dB di attenuazione. Le misure di temperatura sono effettuate con un termometro a fibra ottica (*Teltron* modello *FT905*) posto sulla transizione da studiare, ad intervalli di tempo di un minuto.

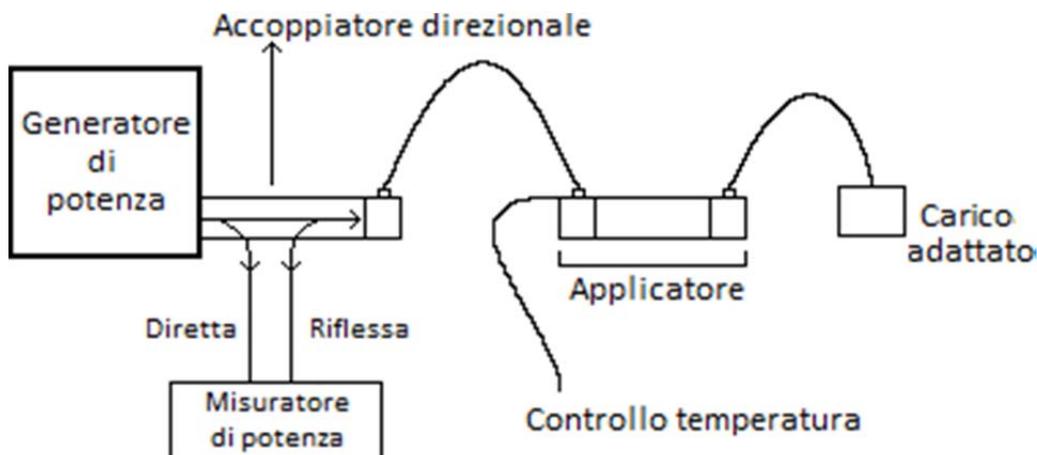


Fig. 8 - Schema dell'apparato di misura utilizzato per le misure di potenza e per la caratterizzazione del misuratore di potenza.

L'andamento è riportato in Fig. 10: all'accensione del generatore di potenza la transizione cavo-guida si trovava ad una temperatura di 24,9 °C e come si può notare la curva raggiunge un plateau dove la temperatura non cresce più in modo rilevante; è importante far notare che, alla temperatura raggiunta, le prestazioni delle transizioni non si sono deteriorate.



Fig. 9 – Attenuatori utilizzati per la misura di potenza e la caratterizzazione del misuratore di potenza: a sinistra *Tenuline Coaxial Attenuator 30 dB Model 8327-300* della *Bird Electronic Corporation* mentre a destra l'attenuatore da 20 dB della *Narda* modello 765-20.

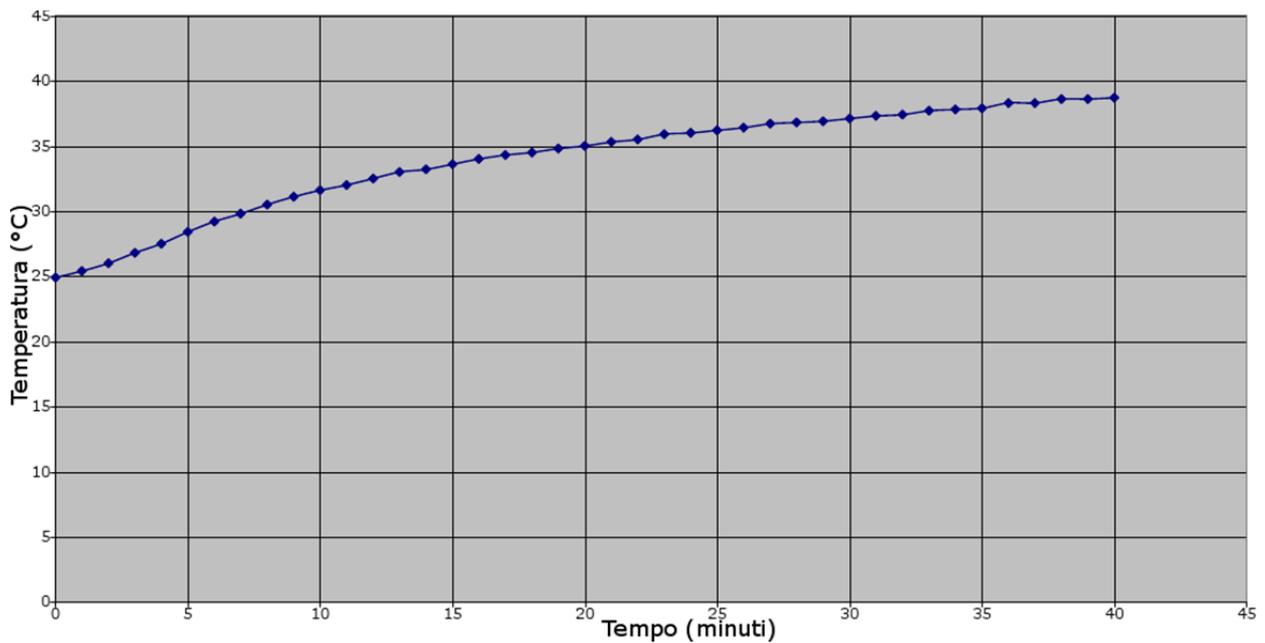


Fig. 10 - Temperatura della transizione studiata in condizioni di potenza applicata pari a 1300 W nominali; la temperatura a tempo zero è pari a 24,9 °C.

6- Conclusioni

In questo lavoro sono riportati gli studi effettuati per la costruzione della prima parte dell'applicatore di potenza in guida a 2,45 GHz, cioè la transizione da connettore 7/16 a guida d'onda WR340. Sono state realizzate due transizioni, le cui dimensioni esterne sono riportate in Fig. 11: la forma e le dimensioni del lanciatore utilizzato sono riportati in Fig. 12.

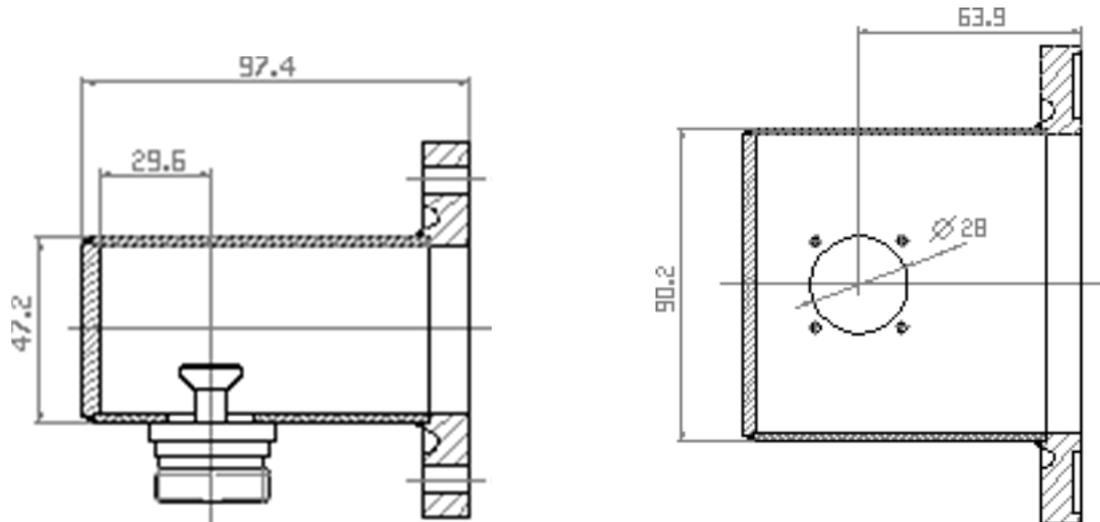


Fig. 11 – Vista in sezione (a sinistra) e dall'alto (a destra) della transizione progettata con dimensioni (in mm) della stessa.

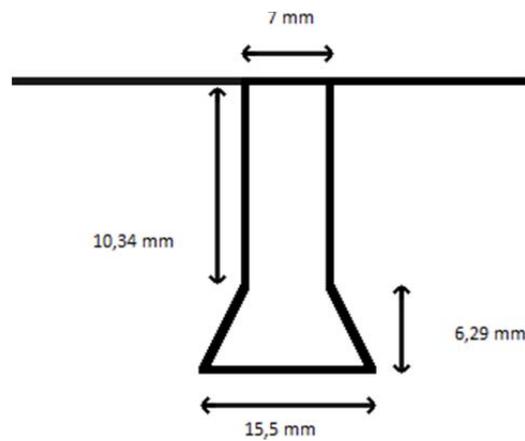


Fig. 12 – Forma e dimensioni del lanciatore utilizzato per la costruzione della transizione in oggetto.

Sono state poi studiate le caratteristiche delle transizioni costruite (ROS e coefficiente di trasmissione) nell'intervallo di frequenze 2,4 – 2,5 GHz e i risultati sono riepilogati in Tab. 8.

Tab. 8 – Riepilogo delle caratteristiche delle transizioni costruite: i risultati sono stati ottenuti accoppiando le due transizioni tra loro e misurandone il ROS e il coefficiente di trasmissione nell'intervallo di frequenze 2,4 – 2,5 GHz.

Transizione	ROS			Coefficiente di trasmissione (dB)		
	2,4 GHz	2,45 GHz	2,5 GHz	2,4 GHz	2,45 GHz	2,5 GHz
A	1,27	1,32	1,4	-0,67	-0,55	-0,64
B	1,26	1,33	1,4	-0,7	-0,6	-0,7

Successivamente è stata anche effettuata una prova di potenza verificando che le transizioni, se utilizzate per tempi prolungati in applicazioni di potenza (1 kW di potenza erogata dal generatore), non deteriorano le loro prestazioni a causa del loro riscaldamento. In Fig. 13 sono riportate due immagini delle transizioni completamente assemblate.

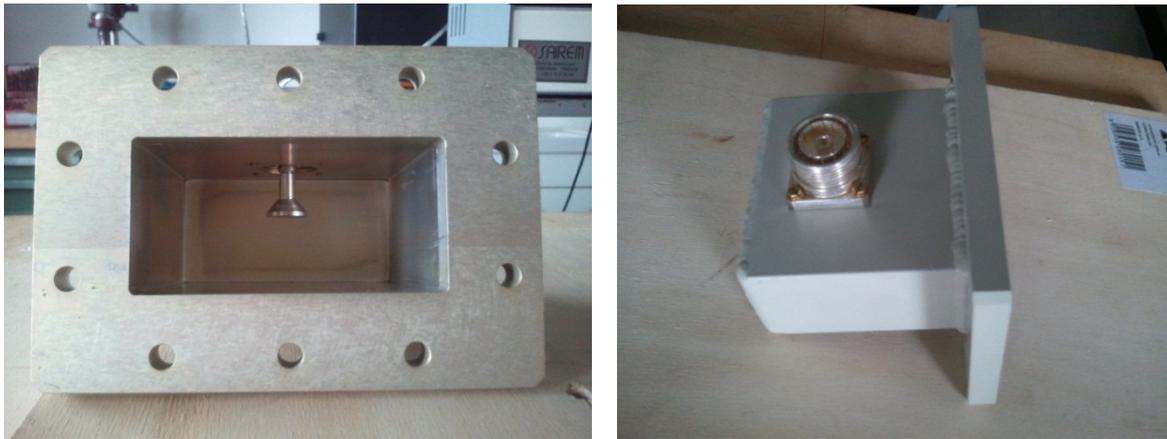


Fig. 13 – Transizione cavo-guida completamente assemblata: a sinistra una vista trasversale dove si nota il lanciatore; a destra una vista dall’alto che mostra il connettore 7/16 utilizzato.

Appendice 1 *Caratterizzazione del misuratore di potenza*

La calibrazione del misuratore di potenza è stata effettuata con lo stesso assetto sperimentale utilizzato per la misura di potenza che è mostrato in Fig. 8: questo strumento (Fig. 14) permette di misurare la potenza trasmessa (fondo scala 1200 W) e riflessa (fondo scala 600 W) all’interno di un accoppiatore direzionale al quale è collegato tramite due cavi coassiali. L’accoppiatore direzionale è adattato per lavorare nelle condizioni utilizzate in questo lavoro (potenza 1200 W e frequenza 2,45 GHz). Per caratterizzare lo strumento è stata effettuata, al variare della potenza erogata dal generatore (da 100 W a 1300 W nominali a passi di 100 W), la misura della potenza trasmessa rilevata dal misuratore di potenza. Contemporaneamente è stato verificato che l’indicatore della potenza riflessa non si muovesse: infatti poiché l’apparato è chiuso sulla sua impedenza caratteristica, non sono attese riflessioni di potenza. In Fig. 15 è riportato l’andamento della potenza trasmessa misurata dallo strumento in analisi confrontata con la potenza effettiva emessa, precedentemente ricavata tramite una calibrazione del generatore, in funzione della potenza nominale impostata sul generatore stesso.



Fig. 14 - Immagini degli strumenti utilizzati: a sinistra il misuratore di potenza sotto analisi, a destra l’accoppiatore direzionale al quale è attaccato.

Per la calibrazione della potenza riflessa è stato invece utilizzato un metodo diverso: è stato attaccato un bolometro dopo il carico adattato in modo da misurare la potenza dopo averla attenuata di 50 dB; per bassi valori di potenza erogata (da 100 a 400 W) è stata rilevata la potenza tramite il misuratore di potenza (potenza trasmessa) e il bolometro. A questo punto è stato ruotato di 180° l’accoppiatore direzionale in modo che l’uscita che prima misurava la potenza riflessa adesso misuri la potenza trasmessa: sono state effettuate, per le stesse potenze erogate, le rilevazioni di potenza tramite lo strumento sotto analisi e il bolometro.

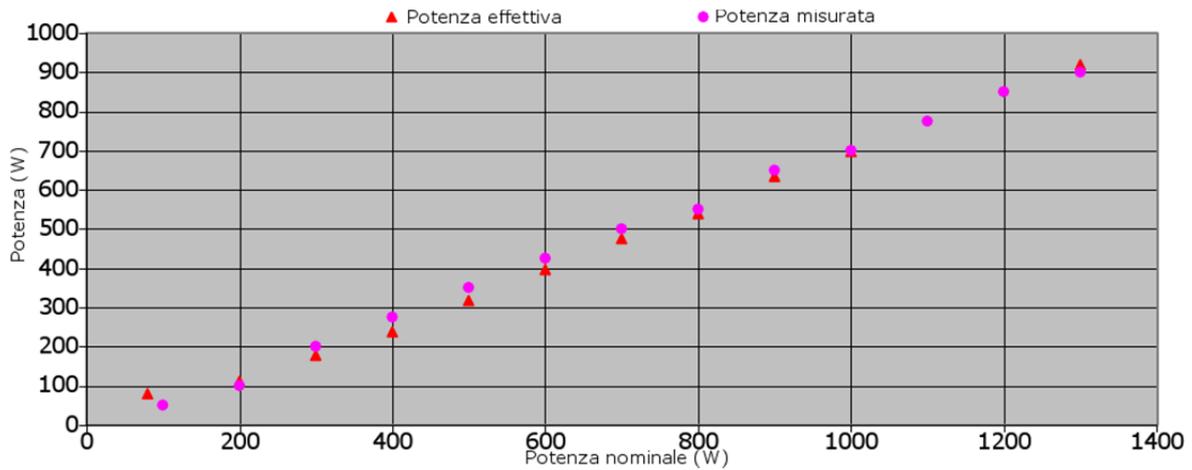


Fig. 15 - Confronto tra la potenza effettivamente emessa dal generatore (ricavata tramite calibrazione), in rosso, e la potenza misurata tramite il misuratore di potenza, in viola.

L'utilità del bolometro è verificare che le condizioni del circuito prima e dopo la rotazione dell'accoppiatore direzionale siano le stesse (per le stesse potenze erogate nei due casi il bolometro deve misurare la stessa potenza). In Tab. 9 sono riportate le misure effettuate dal bolometro (sia attenuate che applicando la correzione per risalire alla potenza non attenuata) e dal misuratore di potenza nelle due condizioni appena descritte.

Tab. 9 - Confronto fra misure di potenza trasmessa effettuate nel caso diretto e inverso dal misuratore di potenza e dal bolometro (ricostruendo il valore non attenuato), applicando una certa potenza nominale; è stato verificato che il bolometro, applicando la stessa potenza, misurasse la stessa quantità in entrambi i casi.

Bolometro (mW)	Potenza bolometro (W)	Potenza nominale (W)	Canale diretto (W)	Canale inverso (W)
0.6	60	100	100	75
0.8	80	200	150	125
1.2	120	300	200	175
1.6	160	400	275	225

Appendice 2 Disegni tecnici della transizione realizzata

In questa appendice riportiamo i disegni tecnici di realizzazione della transizione cavo-guida che abbiamo trattato in questo lavoro: in Fig. 16 sono riportate le viste dall'alto e da dietro della transizione cavo-guida, mentre in Fig. 17 sono riportate quella da davanti e la sezione trasversale.

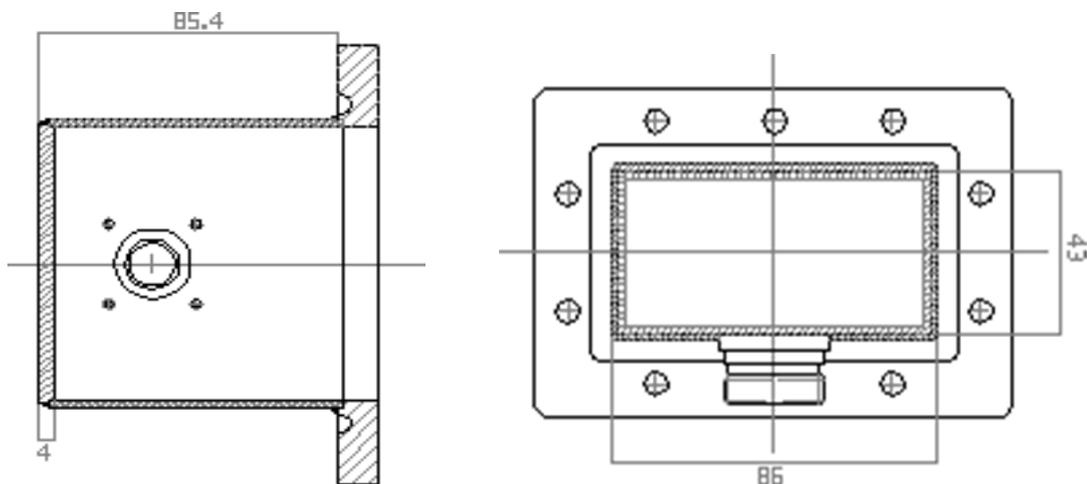


Fig. 16 – Disegni tecnici della transizione cavo-guida: vista dall'alto (a sinistra) e da dietro (a destra) con le principali dimensioni (in mm).

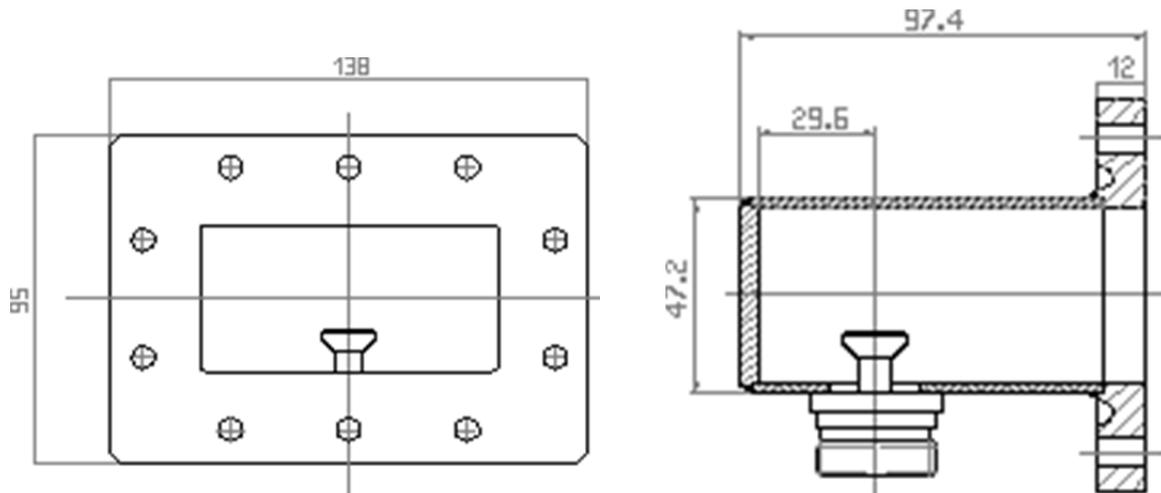


Fig. 17 – Disegni tecnici della transizione cavo-guida: vista dal davanti (a sinistra) e la sezione trasversale (a destra) con le principali dimensioni (in mm).

Riferimenti Bibliografici

1. R. Olmi and N. Rubino, *Progetto e realizzazione di una transizione da cavo coassiale a guida d'onda per la banda ISM 2450 MHz*, Firenze, (1983).
2. T. Moreno, *Microwave Transmission Design Data*, New York, Dover Publication. (1958), p. 152-155