

Progetto e realizzazione di una Yagi 3 el. per i 50 MHz

1. Introduzione

Dopo aver fatto alcune interessanti esperienze con le antenne verticali HF ho deciso di dedicarmi alla realizzazione di una antenna direttiva Yagi, complice anche l'avvicinarsi della stagione invernale e l'interminabile periodo di scarsa propagazione in HF.

Mi sono orientato sulla banda dei 50 MHz per ovvii motivi di ingombro limitato, anche se devo dire che questa banda dà delle discrete soddisfazioni, anche solo con un'antenna omnidirezionale.

L' ARRL Antenna Handbook [1] presenta alcuni progetti di Yagi per i 50 MHz, ma su Internet si trovano facilmente descrizioni di realizzazioni fatte da OM italiani e stranieri (per es. quella di Riccardo IK5MEN).

Per una mia maggiore soddisfazione ho preferito affrontare il progetto dall'inizio, al limite per giustificare le scelte fatte da altri costruttori ma anche per capire come muovermi in fase di collaudo per ottimizzare le prestazioni elettriche e radiative dell'antenna.

L'approccio seguito in fase di progetto, realizzazione e collaudo è descritto in dettaglio nel presente articolo, unitamente alle prestazioni attese, con lo scopo di divulgare concetti non proprio immediati ed invitare altri amici OM ad intraprendere simili attività.

Infine ho descritto il materiale utilizzato per la costruzione, di facile reperibilità presso centri Brico e simili.

2. Descrizione generale di un'antenna Yagi

Un'antenna Yagi, nella sua accezione più generale, è un "array multi-elemento", composto da un elemento lineare attivo che è alimentato direttamente dalla sorgente, e da un certo numero di elementi lineari parassiti che ricevono energia dall'elemento attivo attraverso accoppiamento nello spazio.

L'elemento lineare attivo, collegato elettricamente alla sorgente tramite cavo coassiale, prende il nome di Radiatore, mentre gli altri elementi prendono il nome di Riflettore e Direttori, a seconda delle fasi relative delle correnti che scorrono in essi rispetto a quella che scorre nel Radiatore.

Per le spazature normalmente usate, dell'ordine di $0.10\lambda \div 0.25\lambda$, dove λ è la lunghezza d'onda usata, un elemento parassita si comporta da Riflettore se è di lunghezza superiore rispetto alla lunghezza di risonanza, mentre si comporta da Direttore se è di lunghezza inferiore rispetto alla lunghezza di risonanza.

La configurazione più diffusa per un'antenna Yagi è quella con 3 elementi, ovvero Radiatore, Riflettore ed un solo Direttore, dove il Radiatore è collocato in mezzo fra Riflettore e Direttore. Questa è la configurazione descritta nel presente articolo, e rappresenta un buon compromesso fra difficoltà di progetto, procedura di messa a punto, prestazioni operative e problemi meccanici ed installativi.

3. Progetto della Yagi 3 elementi 50 MHz

Il progetto della Yagi 3 elementi per i 50 MHz prevede le seguenti analisi :

- determinazione della spaziatura fra i 3 elementi
- predizione del guadagno ottenibile
- determinazione della lunghezza dei 3 elementi
- predizione della resistenza di radiazione
- scelta del sistema di alimentazione

come di seguito descritto.

Per la lunghezza d'onda λ si assume quella corrispondente alla frequenza di centro banda SSB, ovvero 50.150 MHz, che porta al valore :

$$\lambda = 300 : 50.150 \text{ MHz} = 598 \text{ cm}$$

3.1 Determinazione della spaziatura fra i 3 elementi

Una serie di lavori teorici e sperimentali, citati in [1], ha dimostrato che la spaziatura fra Riflettore e Radiatore deve essere contenuta nell'intervallo $0.15\lambda \div 0.25\lambda$, con 0.2λ che rappresenta il valore migliore. Pertanto il primo dato di progetto che scaturisce dall'analisi è il seguente :

$$\text{Distanza fra Riflettore e Radiatore} = 0.2\lambda = 119.6 \text{ cm}$$

La distanza fra Direttore e Radiatore, sempre secondo quanto riportato in [1], non è un parametro critico nel senso che sue variazioni nell'intervallo $0.15\lambda \div 0.25\lambda$ non alterano sensibilmente il guadagno, come mostrato più avanti, per cui si sceglie il valore medio 0.2λ .

Il secondo dato di progetto che scaturisce dall'analisi è il seguente :

$$\text{Distanza fra Direttore e Radiatore} = 0.2\lambda = 119.6 \text{ cm}$$

Quanto sopra riportato determina implicitamente la lunghezza "utile" del Boom, ovvero :

$$\text{Lunghezza del Boom} = 0.2\lambda + 0.2\lambda = 0.4\lambda = 239.2 \text{ cm}$$

La struttura sarà simmetrica, come mostrato in figura 1, ovvero con Riflettore e Direttore equidistanti dal Radiatore.

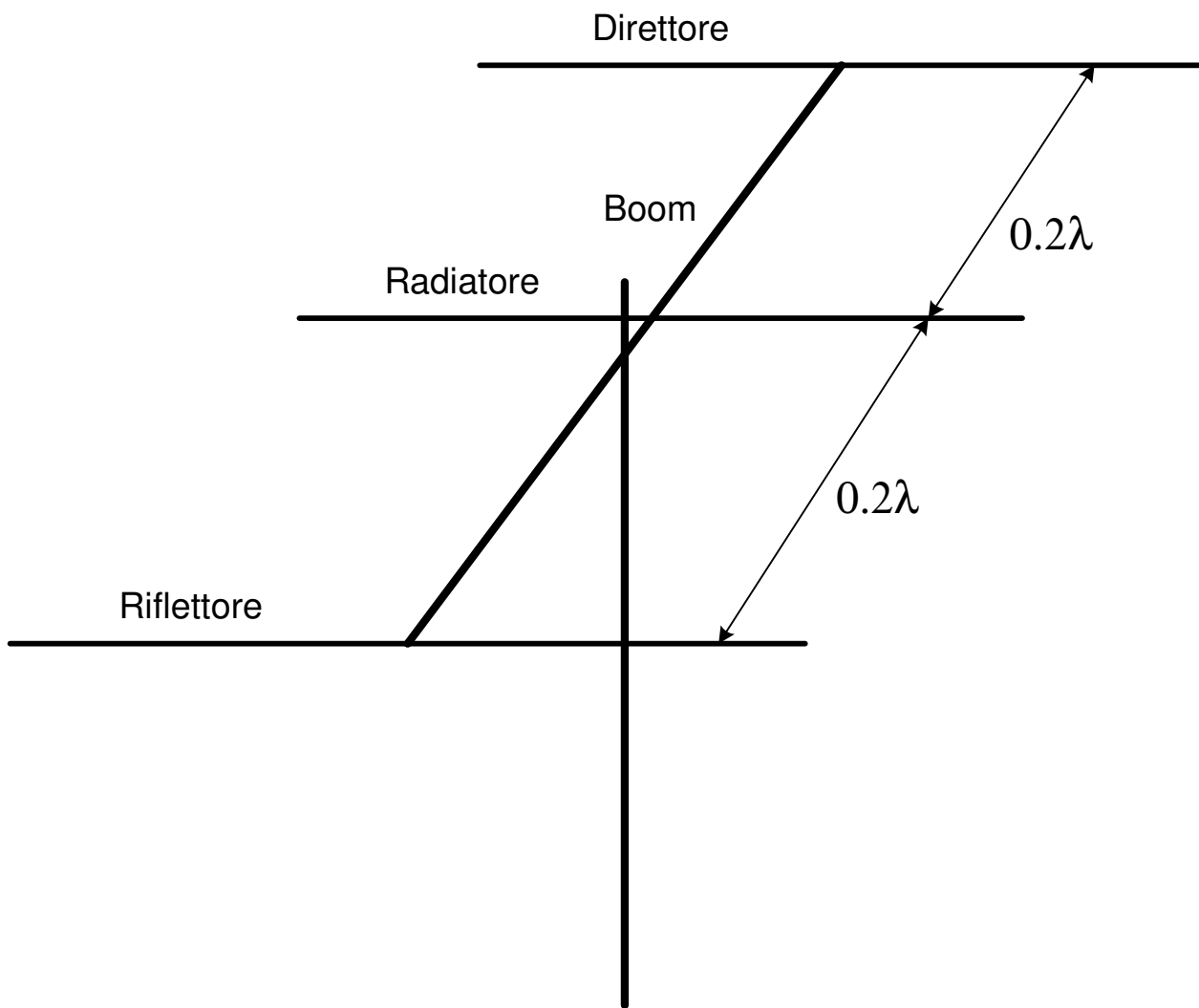


Figura 1 – Struttura della Yagi 3 Elementi

3.2 Determinazione della lunghezza dei 3 elementi

Avendo determinato, nel precedente paragrafo, le spaziature Radiatore-Riflettore e Radiatore-Direttore, si può procedere alla determinazione della lunghezza “teorica” degli elementi stessi che compongono la Yagi, ovvero :

- Riflettore
- Direttore
- Radiatore

utilizzando i grafici sotto riportati. Sottolineo l’aggettivo teorico perché questi sono i valori forniti da grafici che vanno successivamente ottimizzati una volta realizzata l’antenna ed ottenuti i primi risultati.

3.2.1 Lunghezza teorica dell’elemento Riflettore

Il grafico mostrato in figura 2 riporta la lunghezza normalizzata del Riflettore in funzione della spaziatura Riflettore-Radiatore :

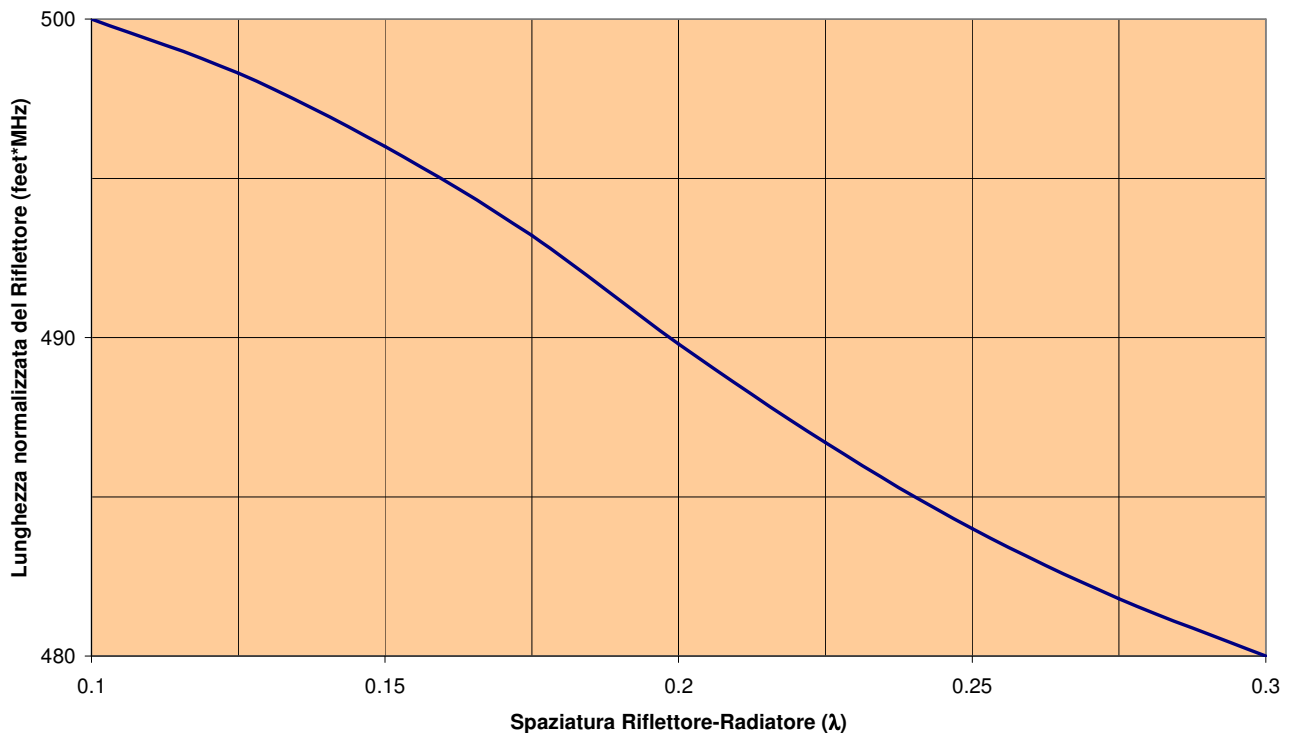


Figura 2 – Lunghezza del Riflettore in funzione della distanza dal Radiatore

Entrando nel grafico con una spaziatura Riflettore-Radiatore pari a 0.2λ , si ottiene una lunghezza normalizzata del Riflettore pari a 489.8 feet*MHz.

Dividendo per la frequenza di centro banda, ovvero 50,150 MHz, e trasformando i feet in cm, si ottiene una lunghezza del Riflettore pari a :

$$\text{Lunghezza teorica del Riflettore} = 297.6 \text{ cm}$$

3.2.2 Lunghezza teorica dell'elemento Direttore

Il grafico mostrato in figura 3 riporta la lunghezza normalizzata del Direttore in funzione della spaziatura Direttore-Radiatore :

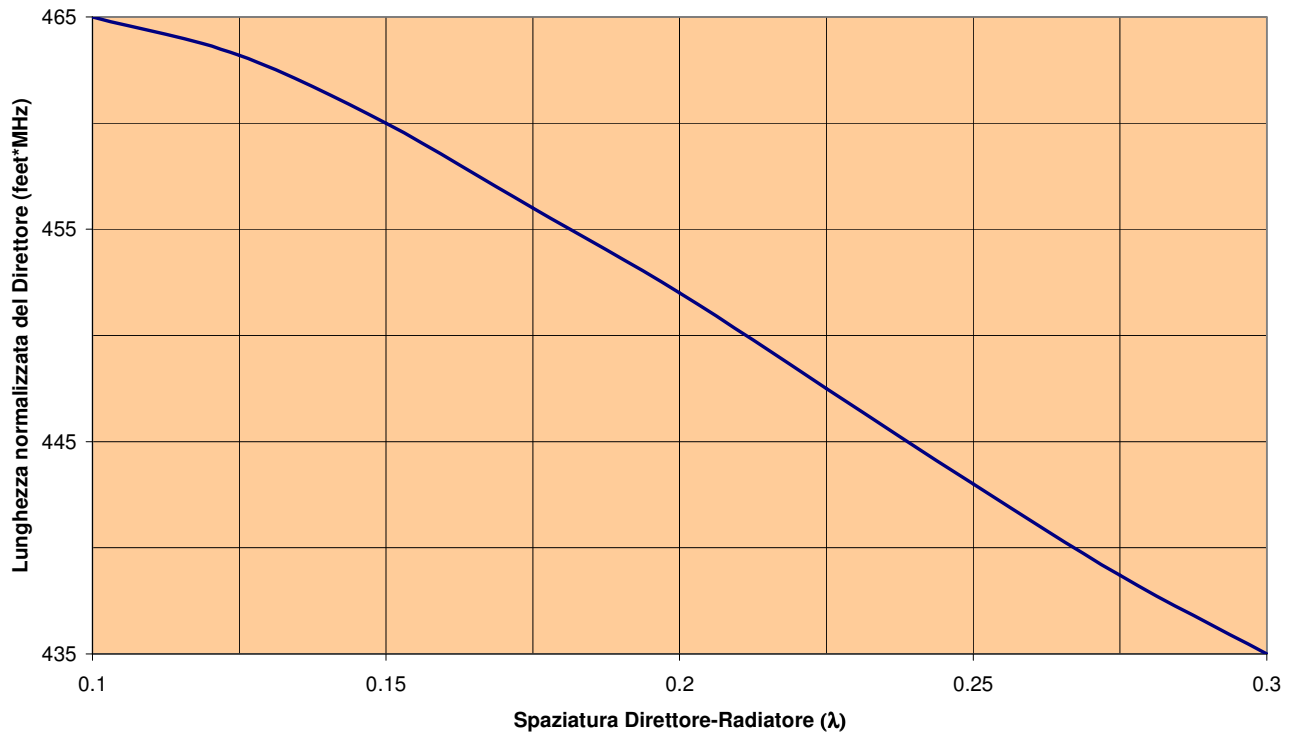


Figura 3 – Lunghezza del Direttore in funzione della distanza dal Radiatore

Entrando nel grafico con una spaziatura Direttore-Radiatore pari a 0.2λ , si ottiene una lunghezza normalizzata del Direttore pari a 452.5 feet*MHz.

Dividendo per la frequenza di centro banda, ovvero 50,150 MHz, e trasformando i feet in cm, si ottiene una lunghezza del Direttore pari a :

$$\text{Lunghezza teorica del Direttore} = 275.2 \text{ cm}$$

3.2.3 Lunghezza teorica dell'elemento Radiatore

Il grafico mostrato in figura 4 riporta la lunghezza normalizzata del Radiatore in funzione della spaziatura Direttore-Radiatore :

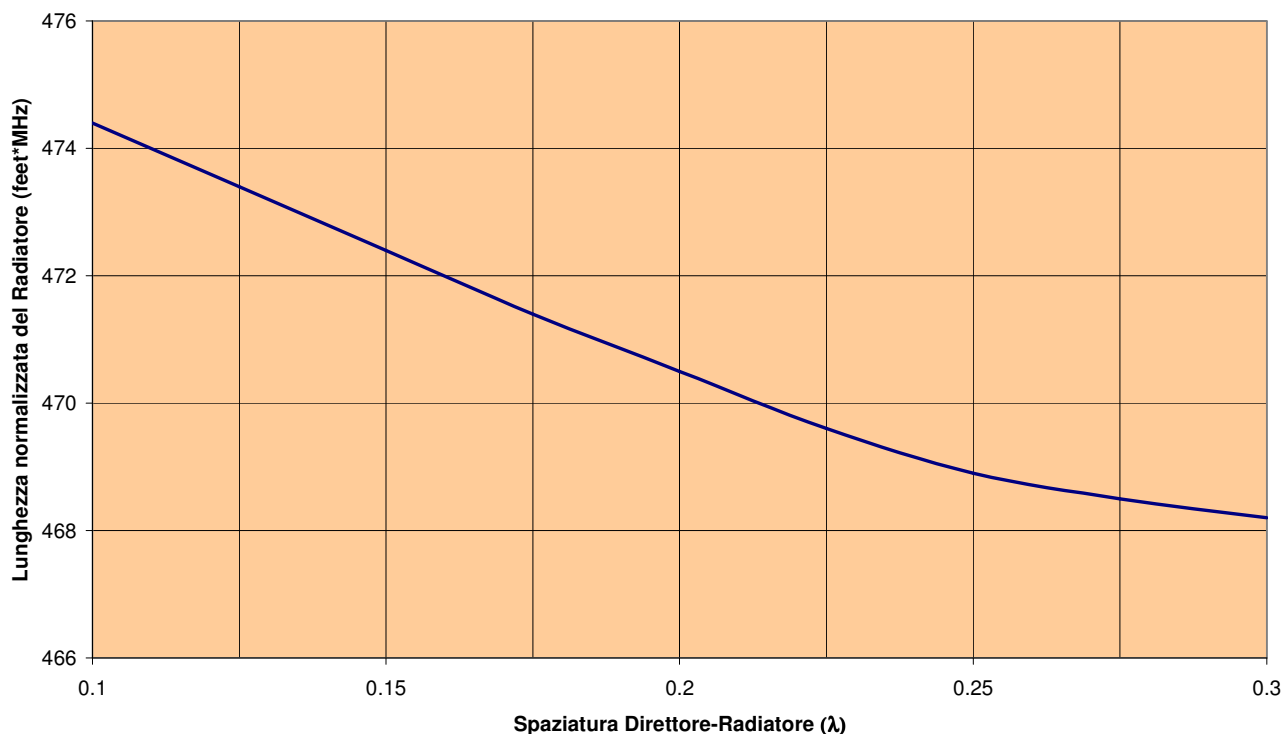


Figura 4 – Lunghezza del Radiatore in funzione della distanza dal Direttore

Entrando nel grafico con una spaziatura Direttore-Radiatore pari a 0.2λ , si ottiene una lunghezza normalizzata del Radiatore pari a 470.5 feet*MHz.

Dividendo per la frequenza di centro banda, ovvero 50,150 MHz, e trasformando i feet in cm, si ottiene una lunghezza del Radiatore pari a :

$$\text{Lunghezza teorica del Radiatore} = 285.9 \text{ cm}$$

Già la teoria prevede che la lunghezza del Radiatore vada ridotta al fine di creare, nel punto di alimentazione, una reattanza capacitiva da compensare per mezzo di una corrispondente reattanza induttiva ottenuta con una rete Beta Match, come descritto più avanti.

3.3 Predizione del guadagno ottenibile

La scelta effettuata per la spaziatura fra gli elementi e quindi per la lunghezza del boom consente di ottimizzare il guadagno, ottenendo praticamente il massimo ottenibile da una Yagi 3 elementi.

Analizzando infatti il diagramma mostrato in figura 5, che riporta il guadagno (rispetto ad un dipolo) di una Yagi 3 elementi in funzione della spaziatura Direttore-Radiatore, avendo assunto la spaziatura Riflettore-Radiatore uguale a 0.2λ , si evince che il guadagno massimo si ottiene nell'intorno di una spaziatura Direttore-Radiatore pari a 0.2λ .

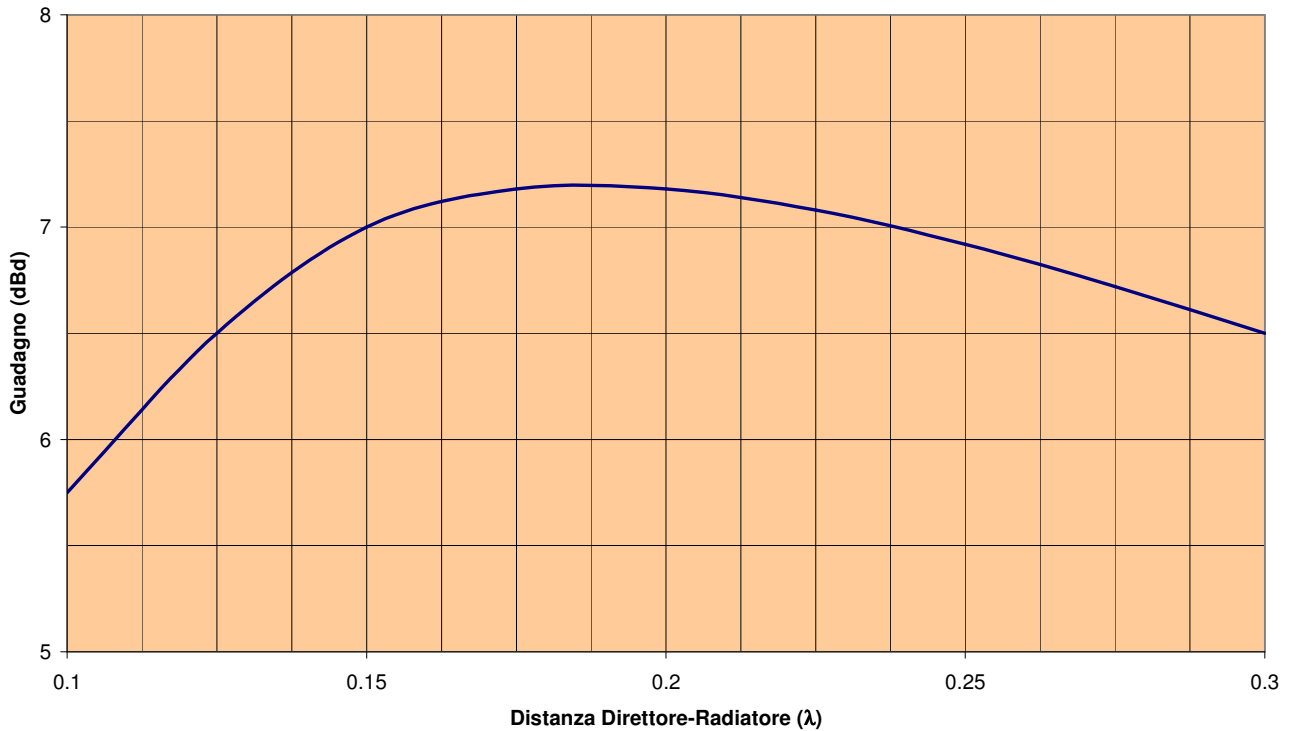


Figura 5 – Guadagno in funzione della spaziatura Direttore-Radiatore

Entrando con un valore di spaziatura Direttore-Radiatore pari a 0.2λ si ottiene un guadagno atteso pari a 7.18 dBd rispetto al dipolo mezz'onda, che corrisponde ad un guadagno di 9.33 dBi rispetto ad una sorgente isotropica, dal momento che il dipolo mezz'onda ha un guadagno pari a 2.15 dBi :

$$\text{Guadagno rispetto all'isotropica} = 9.3 \text{ dBi} = 7.18 \text{ dBd} + 2.15 \text{ dBi}$$

Il guadagno di una Yagi 3 elementi si può esprimere anche in funzione della lunghezza del Direttore, avendo fissato le spaziature fra gli elementi. Infatti la figura 6 mostra la dipendenza del guadagno di una Yagi 3 elementi (rispetto al dipolo mezz'onda) rispetto alla lunghezza del Direttore, avendo assunto le spaziature fra gli elementi pari a 0.2λ . Il grafico è stato ottenuto avendo fissato un diametro medio degli elementi dell'ordine di $\lambda/300$.

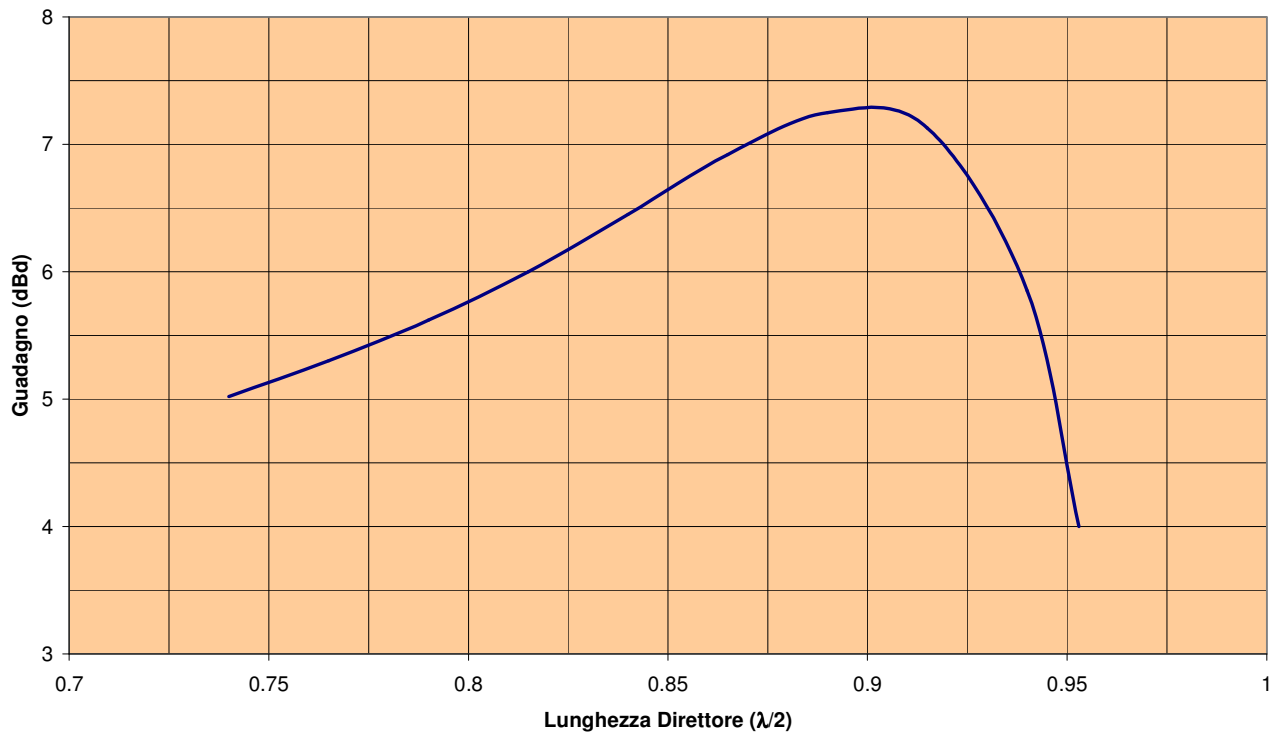


Figura 6 – Guadagno in funzione della lunghezza del Direttore

Avendo assunto la lunghezza (teorica) del Direttore pari a 275.2 cm, che corrisponde a 0.92 $\lambda/2$, si ottiene dal grafico di figura 6 un guadagno dell' ordine di 7.1 dBd, in accordo con quanto trovato prima.

3.4 Predizione della resistenza di radiazione

Analizzando il grafico di figura 7, che mostra la dipendenza della resistenza di radiazione, per una Yagi 3 elementi, dalla spaziatura Direttore-Radiatore, avendo assunto la spaziatura Riflettore-Radiatore uguale a 0.2λ , si vede che l'aver scelto le spaziature tra gli elementi pari a 0.2λ porta ad una resistenza di radiazione di circa 30-31 Ohm.

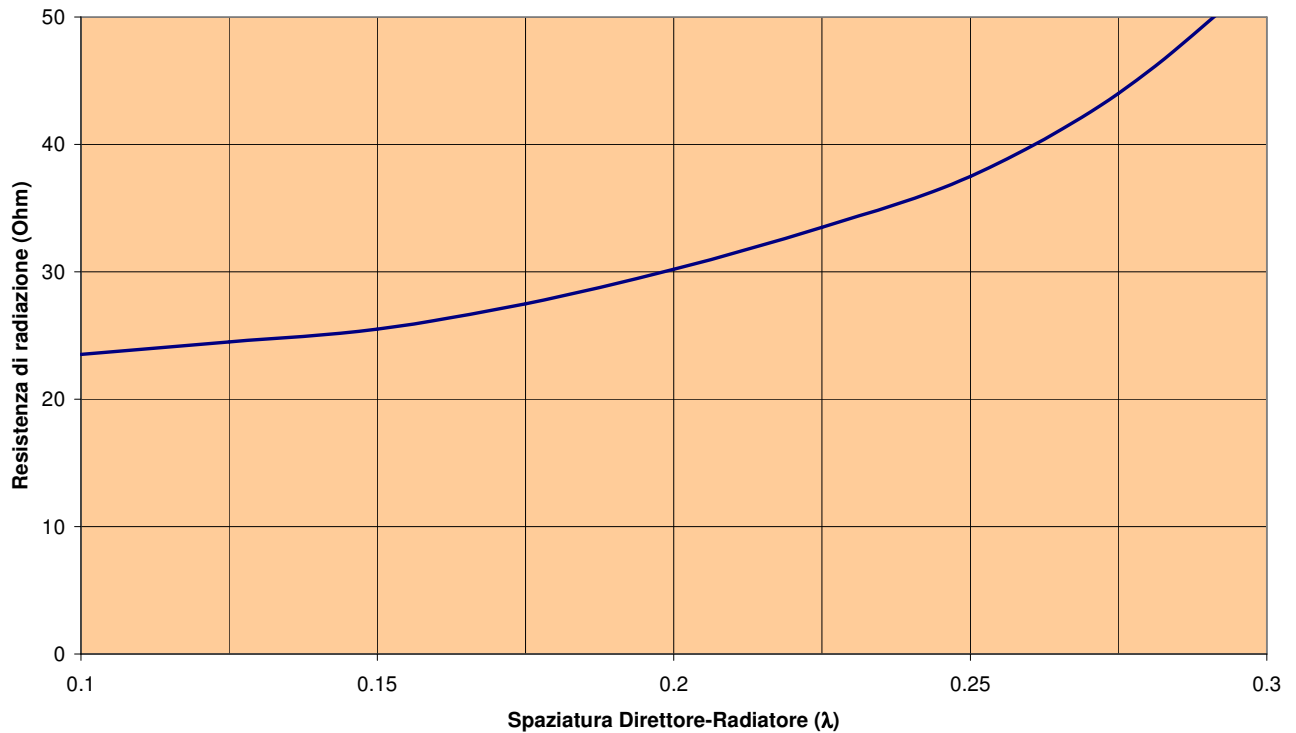


Figura 7 – Resistenza di radiazione in funzione della spaziatura Direttore-Radiatore

3.5 Scelta del sistema di alimentazione

In generale, il tipo di sistema di alimentazione determina la lunghezza finale dell'elemento Radiatore; in [1] si asserisce che è preferibile un sistema di alimentazione bilanciato per prevenire distorsioni del pattern di radiazione e l'insorgere di lobi laterali associati a sistemi di alimentazione sbilanciati.

La scelta di un sistema di alimentazione bilanciato porta le due seguenti conseguenze :

- isolare l'elemento Radiatore dal Boom
- dividere l'elemento Radiatore a metà lunghezza, ottenendo due "mezzi elementi" che vanno raccordati meccanicamente mediante un tubo isolante (o soluzioni alternative)

Il sistema di alimentazione bilanciato farà capo proprio ai due "mezzi elementi" Radiatore, isolati dal Boom. Al fine di ottenere una differenza di fase di 180° fra i due "mezzi elementi" Radiatore, si utilizza una linea sfasatrice a $\lambda/2$, ottenuta con un tratto di cavo coassiale di lunghezza adeguata, come spiegato più avanti.

Il cavo coassiale che arriva dall'apparato avrà il conduttore centrale collegato ad una delle due metà elemento, e simultaneamente alimenterà l'altra metà elemento tramite la linea sfasatrice a $\lambda/2$ (equivalente ad un Balun 1:4), ottenendo la differenza di fase di 180° , mentre la sua maglia esterna si terrà isolata dal boom (vedi figura 8).

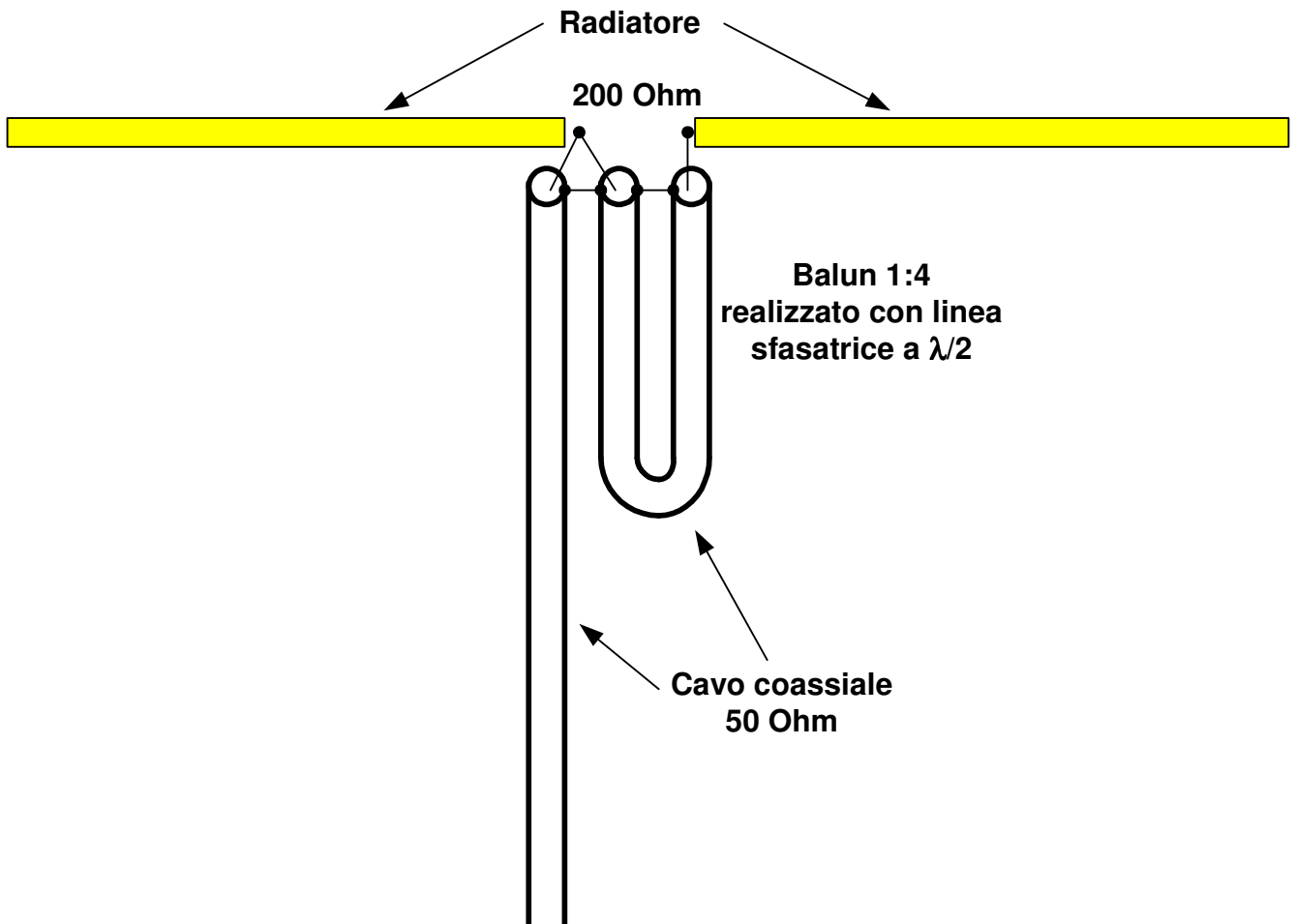


Figura 8 – Sistema di alimentazione

Da quanto appena detto si evince che la linea sfasatrice a $\lambda/2$ svolge intrinsecamente un ruolo di Balun, nel senso che “adatta” la linea di alimentazione sbilanciata (cavo coassiale) al Radiatore che invece si presenta bilanciato; in particolare si comporta da Balun con rapporto 1:4.

La scelta di un sistema di alimentazione bilanciato porta a selezionare, fra i vari sistemi di adattamento di impedenza antenna-cavo, il cosiddetto sistema Hairpin, che altro non è che una rete di adattamento a L e può essere considerato come un caso particolare di Beta Match (la differenza risiede nella realizzazione meccanica).

3.6 Principio di funzionamento dell’Hairpin

L’utilizzo di una rete di adattamento a L si rende necessario perché bisogna adattare l’impedenza della sorgente (cavo coassiale = 50 Ohm) alla impedenza del carico (resistenza di radiazione $\approx 25\text{-}30$ Ohm). Un modo per ottenere ciò è mettere un’induttanza L in parallelo alla sorgente ed una capacità C in serie al carico, il tutto assumendo che sia sorgente che carico siano puramente resistivi (figura 9).

L’induttanza L è rappresentata dall’Hairpin mentre per ottenere la capacità C (e relativa reattanza), il Radiatore viene realizzato di lunghezza inferiore rispetto a quanto calcolato teoricamente, in modo da presentare, ai capi dei due “mezzi elementi”, una reattanza capacitiva. In particolare, alla risonanza, l’impedenza d’antenna vista ai suoi capi sarà rappresentata dalla resistenza R_A d’antenna in serie con la capacità C_A d’antenna (vedi figura 9).

L’adattamento di impedenza fra antenna e linea di trasmissione si realizza per mezzo di un circuito equivalente “risonante parallelo”, in cui l’induttanza L è rappresentata proprio dall’induttanza dell’Hairpin, collegato in parallelo ai morsetti d’antenna.

L’impedenza di questo circuito “risonante parallelo” varia in modo inversamente proporzionale alla resistenza R_A d’antenna, per cui esso fa sì che una piccola resistenza R_A si trasformi in un’elevata resistenza ai capi del circuito equivalente.

Se poi si scelgono i valori di C_A e di L, agendo rispettivamente sulla lunghezza del Radiatore e sulle dimensioni dell’Hairpin, in modo che l’impedenza d’antenna risultante sia uguale proprio all’impedenza caratteristica della linea di trasmissione, il gioco è fatto.

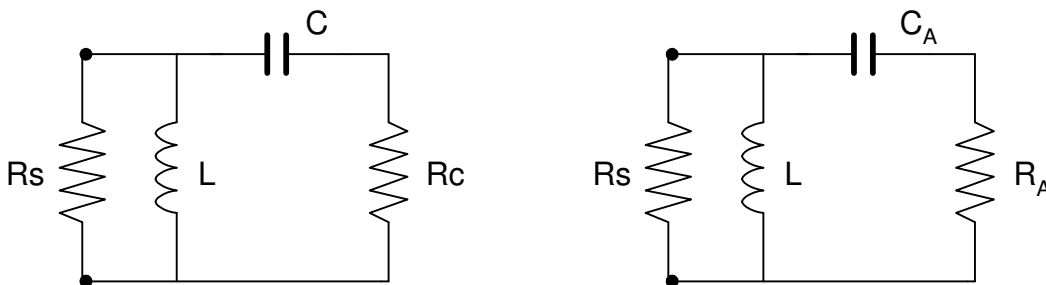


Figura 9 – Rete di adattamento a L fra due carichi resistivi

Le equazioni della rete di adattamento ad L forniscono la seguente relazione fra la resistenza R_A d'antenna, l'impedenza R_S della linea coassiale e la reattanza induttiva X_L richiesta all'Hairpin :

$$X_L = \frac{R_S}{\sqrt{(R_S / R_A) - 1}}$$

Tale relazione è riportata graficamente in figura 10, avendo posto $R_S = 50$ Ohm.

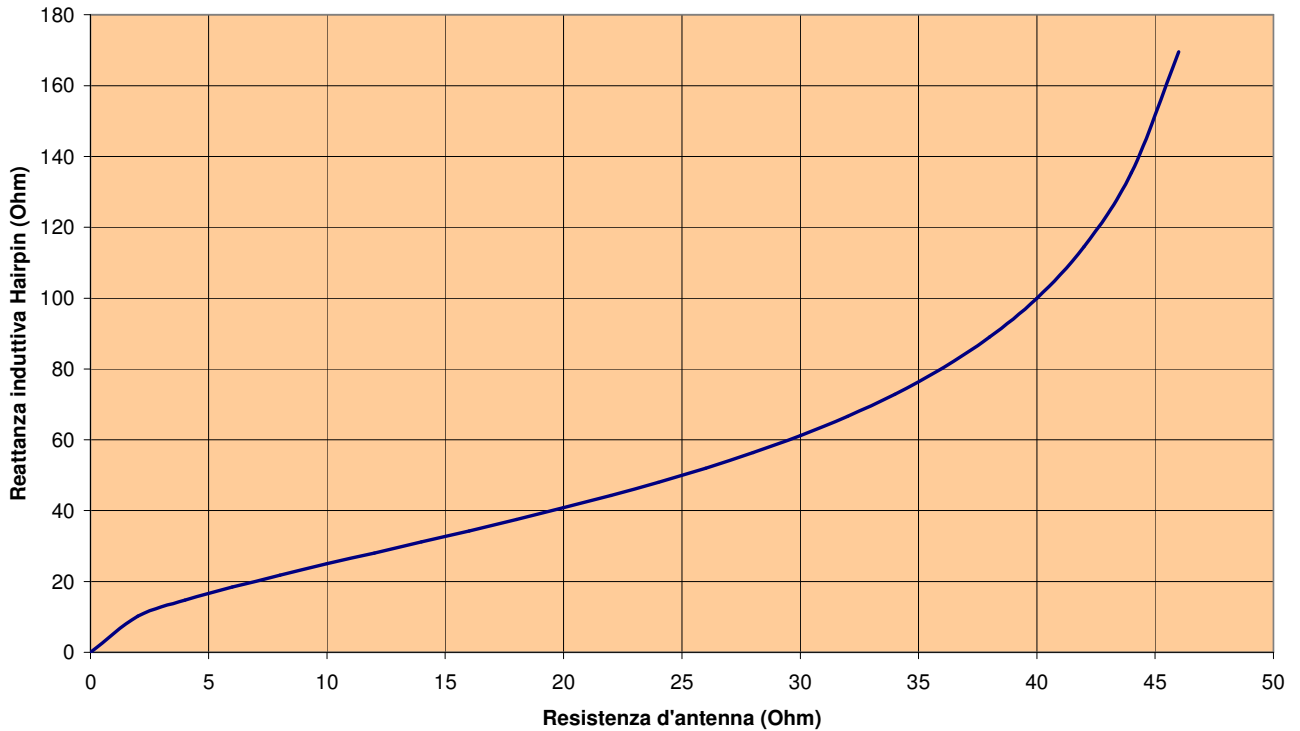


Figura 10 – Reattanza induttiva dell'Hairpin in funzione della resistenza d'antenna

Essendo la resistenza di radiazione dell'antenna dell'ordine di 30-31 Ohm, come trovato in para. 3.4, il grafico di figura 10 restituisce un valore della reattanza X_L induttiva dell'Hairpin uguale a 63 Ohm.

La figura 11 riporta, per l'Hairpin definito come sopra, la relazione fra la lunghezza elettrica in gradi e la reattanza X_L normalizzata all'impedenza caratteristica Z_0 , secondo la relazione :

$$\frac{X_L}{Z_0} = j * \tan(\theta)$$

tipica di una linea di trasmissione, ad impedenza caratteristica Z_0 , terminata in corto circuito, quale è il nostro Hairpin (vedi fig. 12).

L'impedenza caratteristica Z_0 in Ohm si dimostra [1] essere uguale a :

$$Z_0 = 276 * \log\left(\frac{2S}{d}\right)$$

dove :

S = distanza fra i conduttori (centro-centro)

d = diametro esterno dei conduttori

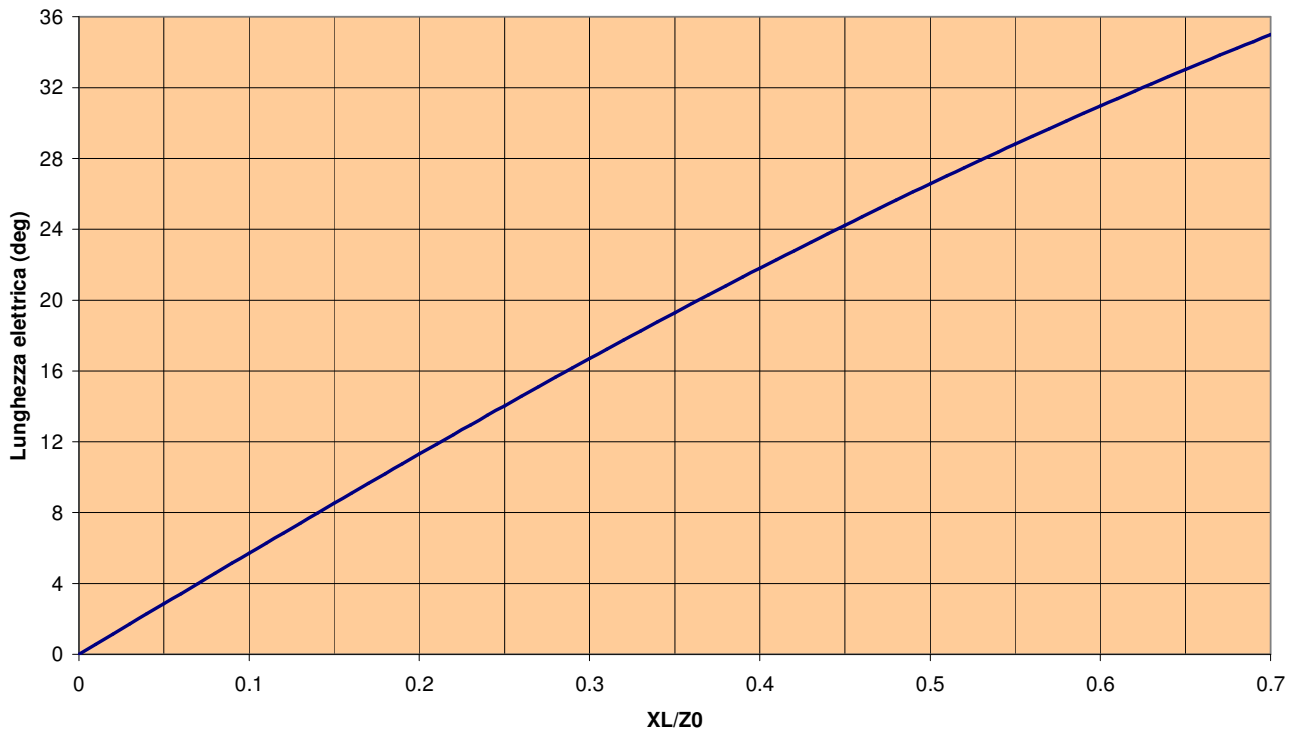


Figura 11 – Lunghezza elettrica dell’Hairpin in funzione della reattanza normalizzata

Avendo posto il diametro esterno d del tubo di alluminio pari a 6 mm e la spaziatura S pari a 55 mm, si ottiene una impedenza caratteristica Z_0 uguale a 348.6 Ohm, da cui X_L/Z_0 sarà uguale a 0.181.

Questo valore restituisce una lunghezza elettrica dell’Hairpin pari a 10.27 deg, da cui deriva una lunghezza fisica L pari a 16.6 cm.

La figura 12 mostra come è formato un classico Hairpin, con i parametri geometrici definiti sopra.

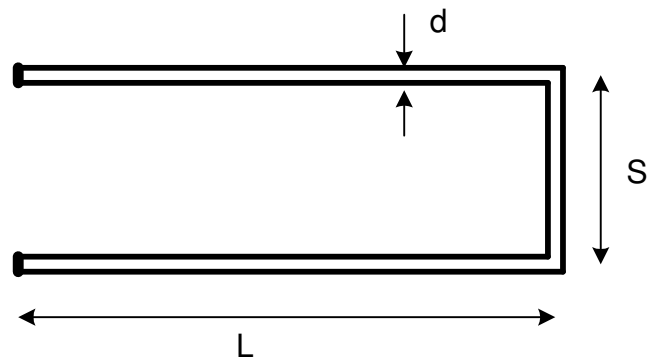


Figura 12 – Hairpin e suoi parametri geometrici

4. Realizzazione pratica

L'antenna è stata realizzata utilizzando materiale facilmente reperibile in centri Brico, ed in particolare :

- 1) n° 1 tubo di alluminio a sezione quadrata di lunghezza 2,50 m e con lato pari a 20 mm
- 2) n° 3 tubi di alluminio a sezione circolare Ø 20 mm di lunghezza 2 m
- 3) n° 3 tubi di alluminio a sezione circolare Ø 16 mm di lunghezza 1 m
- 4) n° 1 tubo di alluminio a sezione circolare Ø 12 mm di lunghezza 2 m
- 5) n° 1 piastra di ferro di dimensioni 20 cm x 8 cm, spessore 2 mm
- 6) n° 1 piastra di poliver (o equivalente) 25 cm x 50 cm
- 7) n° 12 fascette stringi-tubo
- 8) n° 1 tubo di alluminio pieno Ø 6 mm di lunghezza 1 m
- 9) n° 1 supporto di alluminio ad L

a cui aggiungere il seguente materiale prettamente radiantistico :

- 10) n° 3 connettori SO-239 flangiati
- 11) n° 1 cavo RG-213 di lunghezza 2 m
- 12) n° 2 connettori PL-259

Il Boom dell'antenna è stato realizzato utilizzando l'item #1, mentre i 3 elementi sono stati costruiti come descritto nella seguente tabella, dove i valori di lunghezza riportati sono quelli finali :

Elemento	Lunghezza totale	Sezione centrale	Sezione intermedia	Sezione finale
Radiatore	267 cm (*)	Item #2	Item #3 40 cm	Item #4 30 cm
Riflettore	293 cm	Item #2	Item #3 50 cm	Item #4 30 cm
Direttore	277 cm	Item #2	Item #3 40 cm	Item #4 30 cm

(*) la lunghezza del Radiatore include la spaziatura di 4 cm localizzata nella zona di alimentazione

La sezione intermedia entra nella sezione centrale per circa 10 cm, mentre la sezione finale entra nella sezione intermedia fino a raggiungere la lunghezza totale dell'elemento. L'elemento che "ospita" l'elemento più piccolo deve avere delle asole di 3-4 cm per consentire alla fascia stringi-tubo di bloccare l'elemento interno.

La sezione centrale, per il solo Radiatore, deve essere tagliata a metà per consentire l'alimentazione ed il collegamento dell'Hairpin, con una spaziatura fra le due metà di 4 cm (figura 13).

Il Riflettore ed il Direttore sono montati su piastre di poliver (item #5), di dimensioni 15 cm x 8 cm, e queste a loro volta vengono bloccate sul Boom. In realtà gli elementi parassiti si potrebbero anche montare su piastre di alluminio e quindi stare in contatto elettrico con il Boom: alcuni costruttori fanno così.

Il Radiatore invece necessita di un supporto isolante (item #5) e, siccome il materiale utilizzato non è rigido, sono stato costretto ad utilizzare una doppia piastra che consentisse di aumentare la rigidità. Ovviamente, se si trova un materiale più rigido questo artificio non è necessario.

L' Hairpin è stato realizzato utilizzando l' item #8 con dimensioni (vedi para 3.6) :

- S = 55 mm
- d = 6 mm
- L = 16.6 mm

La rete sfasatrice a $\lambda/2$ (Balun) è stata realizzata con 197.5 cm di cavo RG-213 intestato con connettori PL-259. Se si utilizza un cavo coassiale diverso la lunghezza potrebbe essere diversa, sulla base del fattore di velocità. Il cavo viene arrotolato su 2-3 spire, fissato sul Boom e collegato ai due connettori SO-239 esterni. L' item #9 serve ad alloggiare i tre connettori SO-239, di cui il centrale deve essere collegato alla linea di alimentazione mentre i due laterali vanno collegati al Balun (figura 14).

I collegamenti fra il centrale dei connettori SO-239 e tra questi e le due metà dell'elemento Radiatore devono essere realizzati con striscia di rame, e la lunghezza dei 2 tratti che vanno dagli SO-239 esterni all'elemento Radiatore devono essere uguali. Una differenza di lunghezza fra questi due tratti di striscia di rame introduce un errore di fase nell'alimentazione del radiatore perché si somma ai 180 deg introdotti dal Balun.

L'item #9, che è collegato elettricamente alla calza del cavo coassiale di discesa nonché a quello usato per il Balun, è preferibile che non sia in contatto elettrico con il Boom.

Come si vede dalle foto, la realizzazione che ho implementato, soprattutto per la parte sezione di alimentazione, poco si presta ad installazioni esterne fisse. Per questo tipo di applicazione la suddetta sezione dovrebbe essere posta in un contenitore stagno.

Io ho realizzato questa antenna per applicazioni Field Day, quindi ho privilegiato la semplicità di montaggio. La spesa per il materiale necessario alla realizzazione della Yagi si aggira sui 70 euro.

5. Taratura

La taratura dell'antenna prevede prima di tutto la regolazione della lunghezza del Radiatore in funzione della rete di alimentazione utilizzata ed in particolare dell'Hairpin; l'obiettivo è minimizzare il VSWR in banda.

Uno strumento come l' MFJ-259B, da me utilizzato, consente di velocizzare il lavoro nonché di misurare volta per volta parte reale e parte immaginaria dell'impedenza. Sono arrivato ad un VSWR di 1.3 nella banda utile per la SSB (figura 16), con una discreta larghezza di banda $VSWR < 2:1$.

Le lunghezze del Riflettore e del Direttore non influenzano la risonanza dell'antenna quanto piuttosto il diagramma di radiazione. I valori finali che ho utilizzato per questi 2 elementi sono molto vicini a quelli trovati teoricamente ma sono stati presi da [1] e [2], non avendo la possibilità di fare una misura fine del diagramma di radiazione.

Realisticamente mi aspetto un guadagno di circa 8 dBi con rapporto avanti-dietro dell'ordine di 15-18 dB.

Le misure sono state fatte tenendo l'antenna ad una altezza di circa 4 m dal piano calpestabile, ed ovviamente con un cavo coassiale di lunghezza pari a multipli di $\lambda/2$ elettrici.

6. Conclusioni

Spero di aver fatto cosa gradita ed utile descrivendo le fasi del progetto di una antenna Yagi, facile da realizzare con modica spesa, e resto a disposizione per domande e chiarimenti all'indirizzo e-mail aprotopapa@selex-si.com.

Bibliografia

[1] The ARRL Antenna Handbook – 16th edition

[2] Sito Web di IK5MEN

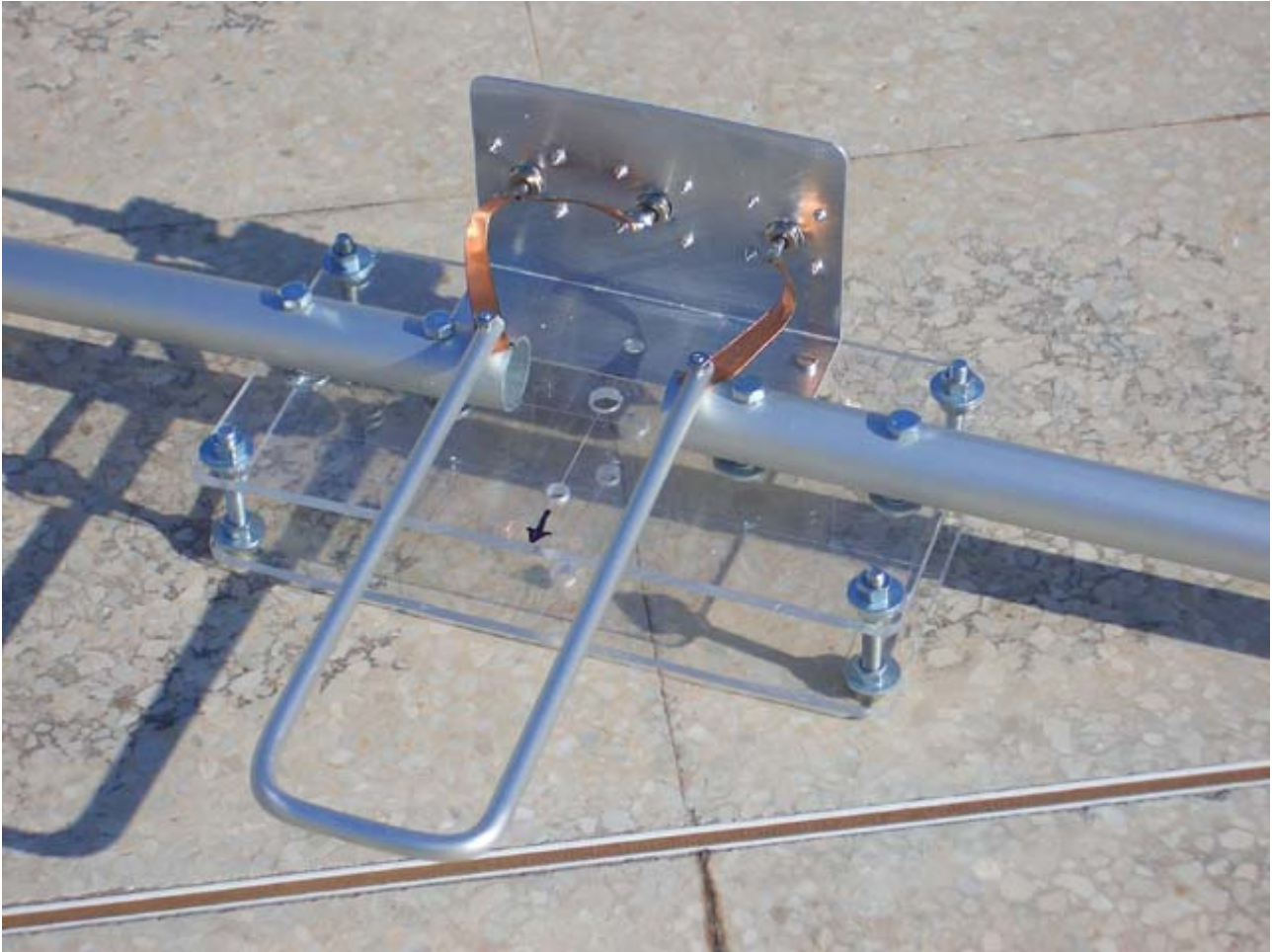


Figura 13 – Particolare del Radiatore e dell' Hairpin



Figura 14 – Supporto connettori per Balun e linea di discesa



Figura 15 – Antenna Yagi completa



Figura 16 – Misura di VSWR con Analizzatore d'Antenna