

# LE CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEGLI ACCORDATORI D'ANTENNA

## Introduzione

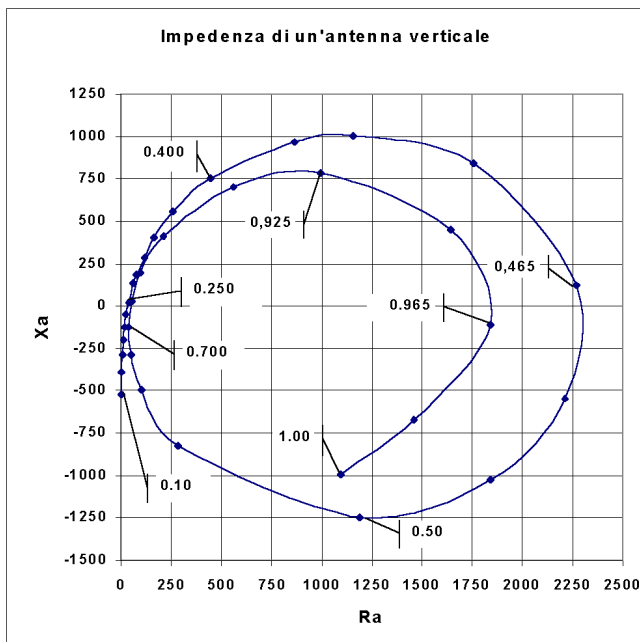
Questo lavoro deriva dalla necessità di confrontare le caratteristiche di diversi tipi di reti LC quando sono usate come accordatori. Sebbene questo sia un argomento molto dibattuto, nella letteratura specializzata difficilmente troviamo un esame delle relazioni che intercorrono fra l'impedenza della rete di adattamento e quella dell'antenna. Il Radio Amateurs Handbook [1] circoscrive il problema a carichi puramente resistivi, altri articoli presenti in QST [2] e in Antenne Vol.1 [3] riportano invece solo alcuni esempi riferiti a casi particolari.

In questo articolo, l'impedenza della rete vista dai morsetti d'antenna è riportata in un grafico il cui andamento dipende dal valore dei componenti impiegati. Per estendere il più possibile l'uso di questi grafici abbiamo usato come parametri variabili la reattanza induttiva  $X_L$  e quella capacitiva  $X_C$ . Questa scelta rende il diagramma indipendente dalla frequenza di lavoro e lo rende di uso universale.

I grafici, di facile lettura, mostrano immediatamente l'estensione dei valori di impedenza d'antenna accettabili e permettono la valutazione comparativa delle diverse configurazioni di accordatori. Nel caso sia nota l'impedenza dell'antenna consentono la scelta della rete più adeguata e la determinazione del valore dei suoi componenti.

## Stimare l'impedenza dell'antenna

Il progetto di una rete di adattamento richiede, come dato di partenza, la conoscenza del valore  $Z_a$  di impedenza dell'antenna. Per semplificare la ricerca di questo parametro, necessario per comprendere gli esempi inclusi in questo articolo, è stata calcolata l'impedenza di un'antenna verticale la cui lunghezza  $L$  varia fra  $\lambda/10$  e  $\lambda$ . In Tab.1 ed in Fig.1 sono riportati i valori della componente resistiva  $R_a$  e di quella reattiva  $X_a$  dell'impedenza al variare del rapporto  $L/\lambda$ .



$L/\lambda$	$R_a$	$X_a$
0,100	4	-522
0,125	6	-390
0,150	10	-286
0,175	14	-200
0,200	20	-124
0,225	29	-50
0,250	40	23
0,275	63	133
0,300	78	185
0,325	119	283
0,350	167	402
0,375	263	553
0,400	451	749
0,425	865	964
0,435	1156	1005
0,450	1758	838
0,465	2270	120
0,475	2214	-546
0,485	1841	-1028
0,500	1189	-1251
0,550	285	-825
0,600	104	-496
0,650	53	-287
0,700	43	-125
0,750	57	27
0,800	101	194
0,850	215	410
0,900	564	702
0,925	998	786
0,950	1646	451
0,965	1842	-110
0,980	1463	-673
1,000	1096	-992

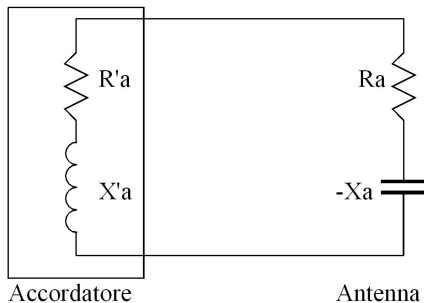
**Fig.1 - Andamento della resistenza ( $R_a$ ) e della reattanza ( $X_a$ ) di un'antenna verticale al variare del rapporto  $L/\lambda$ .**

**Tab.1 - Valori di resistenza ( $R_a$ ) e di reattanza ( $X_a$ ) di un'antenna verticale al variare del rapporto  $L/\lambda$**

I valori riportati in Tab.1 e Fig.1 sono stati ottenuti con il programma MMANA [4] per un filo verticale di diametro  $d=2.5\text{mm}$ . E' stato scelto questo valore perché un filo di questo diametro è stato usato in un'antenna "canna da pesca" con la quale sono stati eseguiti dei test di verifica. I valori sono però teorici e servono prevalentemente come esempio. Invito i lettori ad usare in ogni caso il programma MMANA per stimare il valore dell'impedenza dell'antenna che si desidera impiegare.

### Il massimo trasferimento di potenza

E' noto che, per avere il massimo trasferimento di potenza fra la rete accordatrice e l'antenna, la reattanza della rete deve annullare quella dell'antenna. In altre parole: la reattanza dell'antenna  $X_a$  deve essere di segno contrario a quella della rete  $X'a$  e la resistenza  $R_a$  deve essere uguale a  $R'a$ . Il valore dell'impedenza della rete, nelle condizioni prima descritte, viene detto anche complesso coniugato rispetto a quello dell'antenna.. La Figura 2 schematizza un caso particolare nel quale un'antenna con reattanza capacitiva (più corta di  $\lambda/4$ ) deve essere bilanciata dalla reattanza induttiva della rete.



**Fig. 2 - Schema di un'antenna capacitiva alimentata da un accordatore con reattanza induttiva. Il rettangolo indica l'impedenza vista dai morsetti di antenna (escludendo l'antenna) e comprende anche la resistenza  $R_o$  del Tx.**

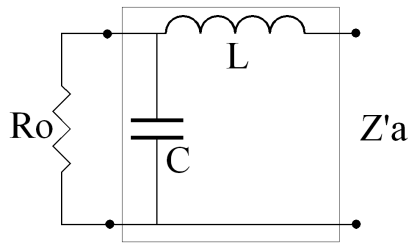
La Figura 2 fa riferimento ad un'antenna direttamente alimentata dalla rete, come nel caso di una verticale con accordatore alla base. Quando invece fra antenna ed accordatore è interposta una linea di alimentazione, l'impedenza vista alla fine della linea cambia. In questo caso, se  $Z_a$  non è una pura resistenza, il valore corretto di impedenza deve essere calcolato con la carta di Smith.

Per ogni tipo di rete sono state scritte le equazioni dell'impedenza  $Z'a$  viste dai morsetti d'antenna. I valori della componente resistiva  $R'a$  e di quella reattiva  $X'a$  di  $Z'a$  sono stati quindi calcolati tramite un programma scritto in linguaggio MatLab [5] e riportati in un grafico. Per non appesantire la lettura dell'articolo non sono state riportate le formule usate per ricavare  $R'a$  e  $X'a$ . Mi propongo però di descrivere la procedura di calcolo in un prossimo articolo.

Nota l'impedenza  $Z_a$  dell'antenna, deve essere riportato sul grafico (Figure 4, 6, 8 e10) il valore del suo complesso coniugato  $Z'a$ , quindi saranno ricercati i valori di  $X_C$  e di  $X_L$  Più vicini a  $Z'a$ . I valori di  $C$  e di  $L$  che caratterizzano la rete si ricavano quindi dai valori di  $X_C$  e  $X_L$ . Numerosi esempi chiariranno in seguito il procedimento.

Le reti considerate in questo studio sono descritte nei paragrafi seguenti.

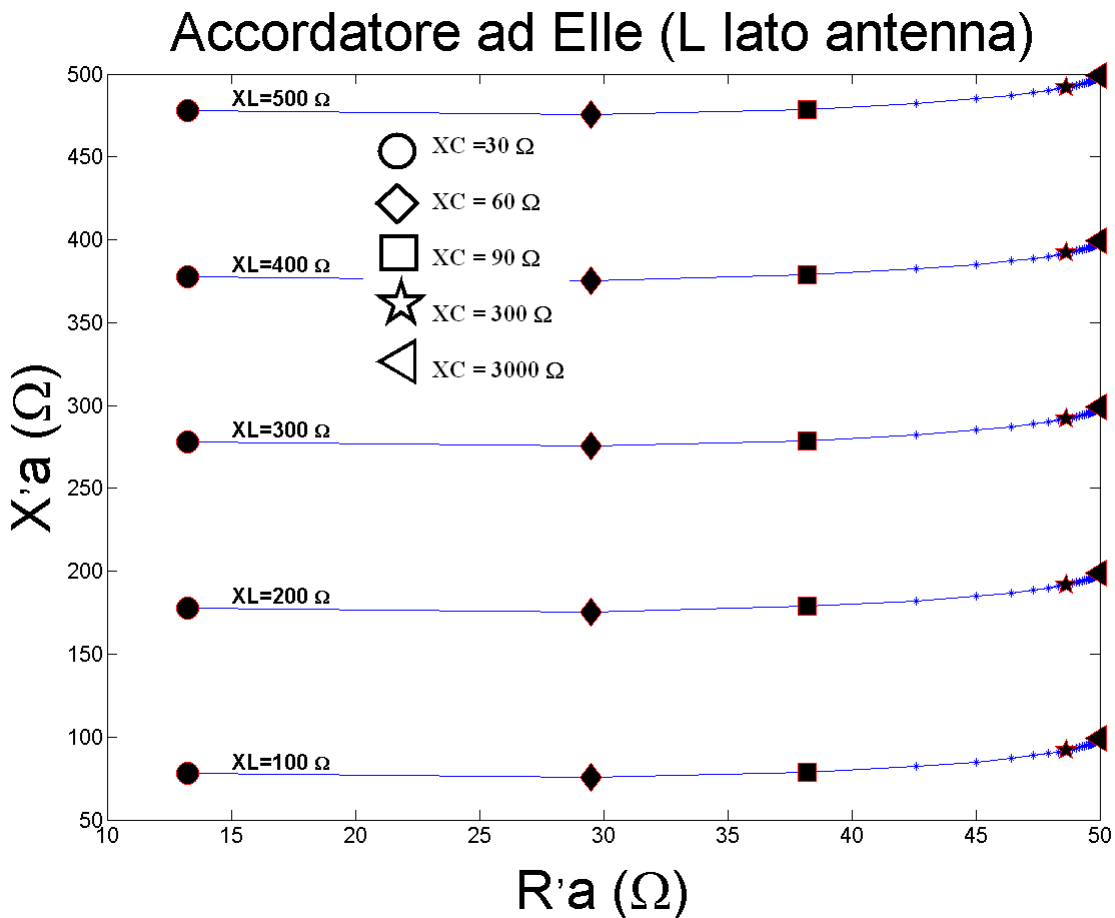
## Accordatore ad “Elle Rovesciata” con induttanza L verso l'antenna



**Fig.3 - Accordatore ad “Elle Rovesciata” con induttanza L verso l'antenna**

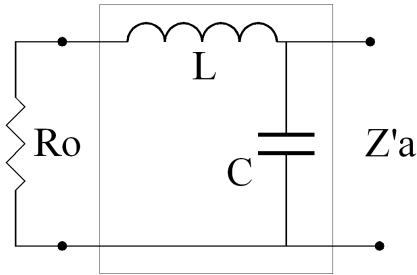
La Fig.3 illustra il tipo più semplice di accordatore ad Elle. Questa configurazione è usata prevalentemente nei prodotti commerciali ad accordo automatico.  $R_o$  rappresenta l'impedenza di uscita del trasmettitore,  $Z'a$  invece rappresenta l'impedenza di tutta la rete vista dai morsetti d'antenna. Le caratteristiche di  $R'a$  e  $X'a$  (Fig.4) sono state ricavate per  $R_o = 50 \Omega$  per  $X_L$  variabile da  $100 \Omega$  a  $500 \Omega$  a passi di  $100 \Omega$  e per  $X_C$  variabile da  $30 \Omega$  a  $3000 \Omega$  a passi di  $30 \Omega$ . Nella gamma di frequenze da  $3.5\text{Mhz}$  a  $28\text{Mhz}$  queste reattanze corrispondono ad induttanze variabili fra  $0.5\mu\text{H}$  a  $23\mu\text{H}$  ed a capacità variabili da  $2\text{pf}$  a  $1500\text{pF}$ .

Come si osserva dal grafico, i valori possibili di  $R'a$  sono molto piccoli e non superano i  $50 \Omega$ . D'altra parte i valori di  $X'a$  sono solo positivi, quindi è possibile accordare solo antenne più corte di  $\lambda/4$ , cioè capacitive.



**Fig. 4 - Andamento della resistenza  $R'a$  e della reattanza  $X'a$  ai morsetti d'antenna dell'accordatore di Fig.3 al variare di  $X_L$  e di  $X_C$**

**Accordatore ad ‘Elle Rovesciata’ con capacità C verso l'antenna**

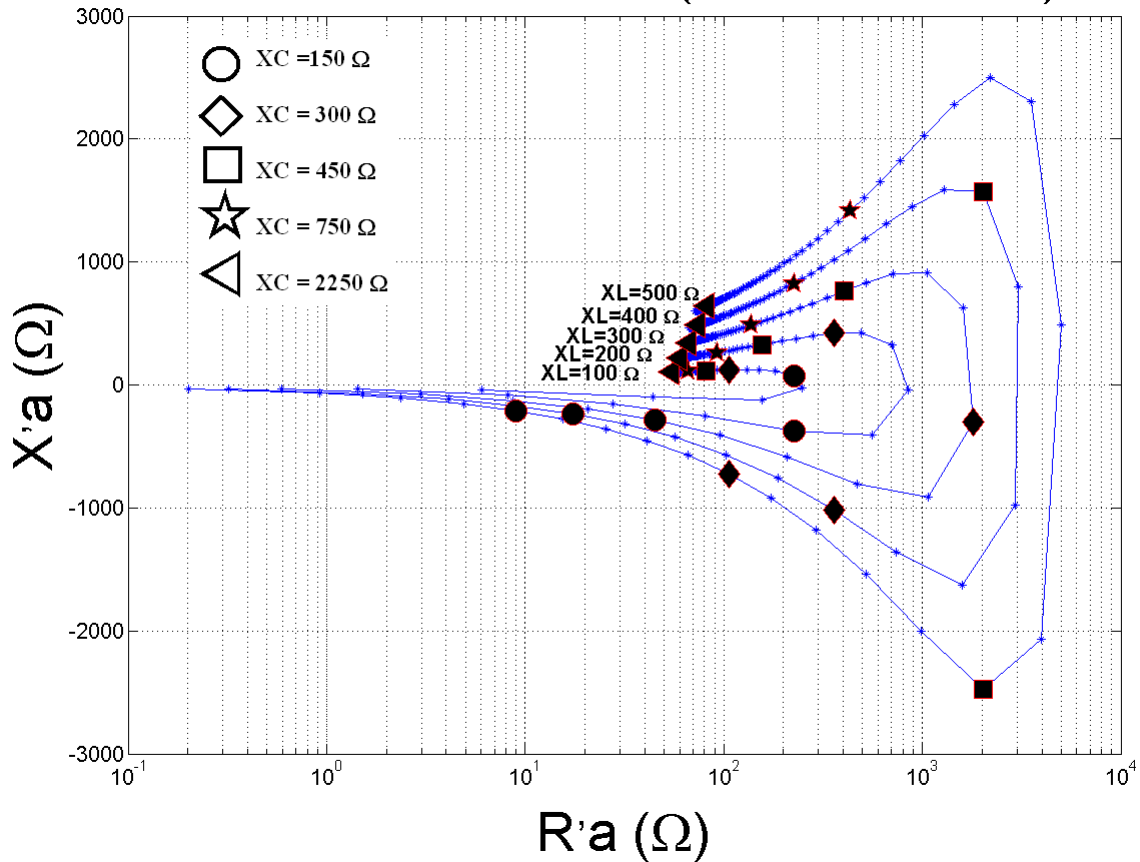


**Fig.5 - Accordatore ad ‘Elle Rovesciata’ con capacità C verso l'antenna**

La Fig.5 illustra un altro tipo di accordatore ad Elle. Questa configurazione che deriva dalla precedente, si realizza scambiando con un commutatore la posizione della capacità dopo l'induttanza

Le caratteristiche di  $R'a$  e  $X'a$  (Fig.6) sono state ricavate per  $R_0=50 \Omega$ ,  $X_L$  variabile da  $100 \Omega$  a  $500 \Omega$  a passi di  $100 \Omega$  e  $X_C$  variabile da  $30 \Omega$  a  $3000 \Omega$  a passi di  $30 \Omega$ . Come si osserva dal grafico, i valori di  $R'a$  che è possibile ottenere sono più vasti ed arrivano a migliaia di ohm. I valori di  $X'a$  possono essere sia positivi che negativi ed assumono valori elevati solo per resistenze di antenna piuttosto grandi. Le due reti ad Elle sono quindi complementari fra loro ma, per coprire tutti i valori ammessi di  $Z_a$ , l'induttanza  $L$  deve essere variata a passi molto stretti.

**Accordatore ad Elle (C lato antenna)**



**Fig. 6 - Andamento della resistenza  $R'a$  e della reattanza  $X'a$  ai morsetti d'antenna dell'accordatore di Fig.5 al variare di  $X_L$  e di  $X_C$**

### Accordatore a P Greco

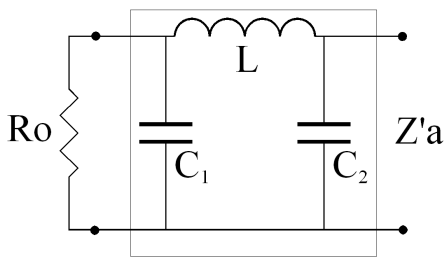


Fig.7 - Accordatore a P greco.

La Fig.7 illustra un classico accordatore a P greco. Le caratteristiche di  $R'a$  e  $X'a$  (Fig.8) sono state ricavate per le stesse condizioni dell'accordatore di Figura.4 ossia:  $R_0=50\Omega$ ,  $X_L$  variabile da  $100\Omega$  a  $500\Omega$  a passi di  $100\Omega$  e  $X_C$  variabile da  $30\Omega$  a  $3000\Omega$  a passi di  $30\Omega$ . La figura riporta il caso particolare di  $X_{C2}=600\Omega$  e dimostra che il suo effetto è quello di distorcere e dilatare le curve verso valori più elevati di  $R'a$  e  $X'a$ . Per  $C_2$  molto piccolo la rete si riconduce a quella ad Elle di Figura 4. Gli effetti della variazione di  $X_{C2}$  non sono però visualizzabili in un solo grafico perché ad ogni valore di  $X_{C2}$  il grafico cambia forma. Avremmo dovuto riportare tanti grafici quanti sono i valori di  $X_{C2}$ . Questo tipo di accordatore presenta però in ogni caso un grado di libertà in più rispetto alla rete ad Elle di Figura.4

### Accordatore a P Greco

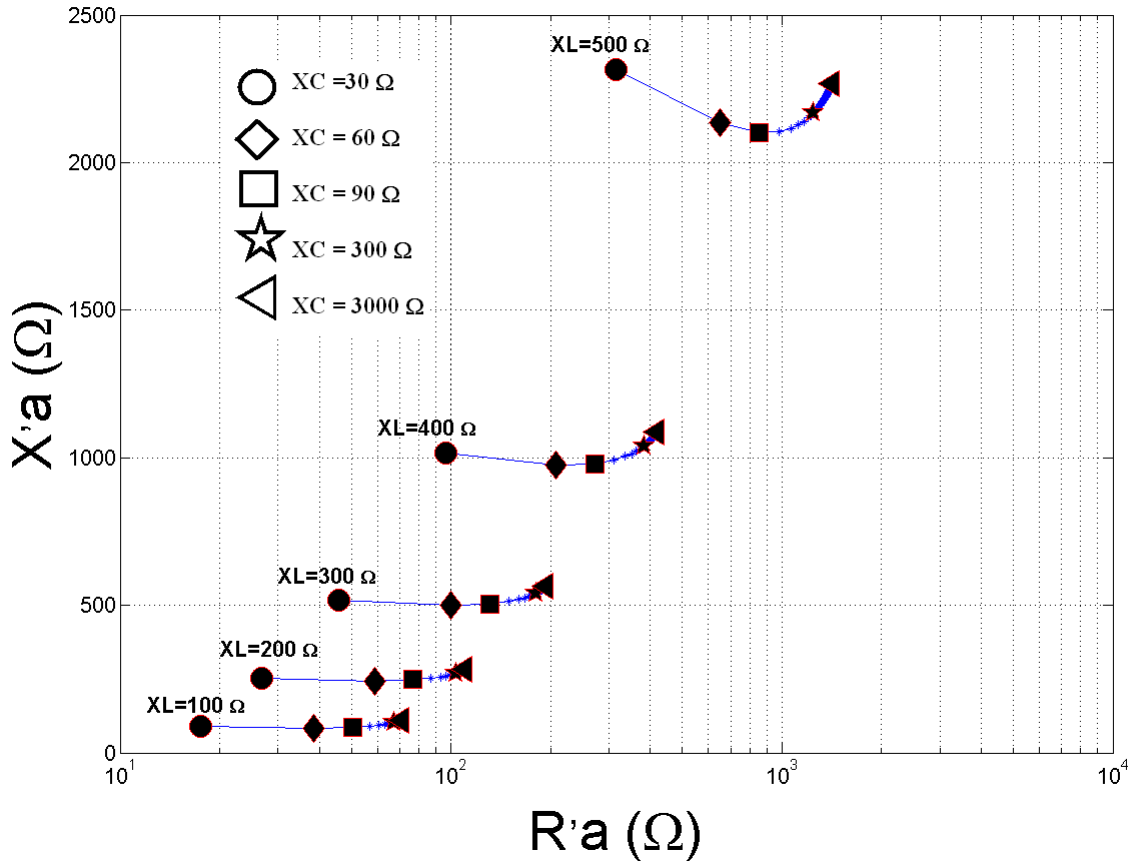


Fig.8 - Andamento della resistenza  $R'a$  e della reattanza  $X'a$  ai morsetti d'antenna di un accordatore a P greco al variare di  $X_L$  e di  $X_C$ . La figura è stata ottenuta per  $X_{C2}=600\text{ ohm}$ . Le variazioni di  $X_C$  si riferiscono invece ai valori di  $C_1$ .

## Accordatore a T

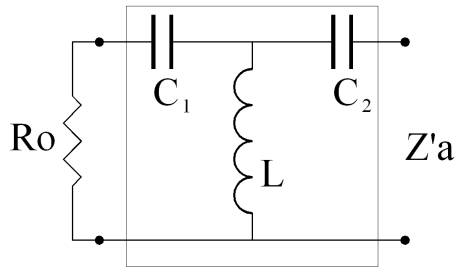


Fig. 9 – Accordatore a T

La Figura 9 illustra un accordatore a T. Le caratteristiche di  $R'a$  e  $X'a$  (Fig.10) sono state ricavate per  $R_0 = 50\Omega$  per  $X_L$  variabile da  $100\Omega$  a  $500\Omega$  a passi di  $100\Omega$  e per  $X_C$  variabile da  $30\Omega$  a  $3000\Omega$  a passi di  $30\Omega$ . La capacità  $C_2$  ha invece l'effetto di traslare tutta la famiglia di curve in basso. In altre parole, qualsiasi punto del grafico può essere spostato verso i valori negativi di  $X'a$  di una quantità che dipende dal valore della capacità  $C_2$ . Questo tipo di accordatore è senza dubbio quello più versatile: presenta una dinamica vastissima grazie alla quale è possibile accordare qualsiasi tipo di antenna. Una variazione della rete a T è quella nella quale il condensatore  $C_1$  è doppio ed in configurazione differenziale. In questo caso il trasmettitore è inserito in parallelo alla prima sezione di  $C_1$ . I valori di  $R'a$  e  $X'a$  possono raggiungere anche i  $10000\Omega$ .

## Accordatore a T

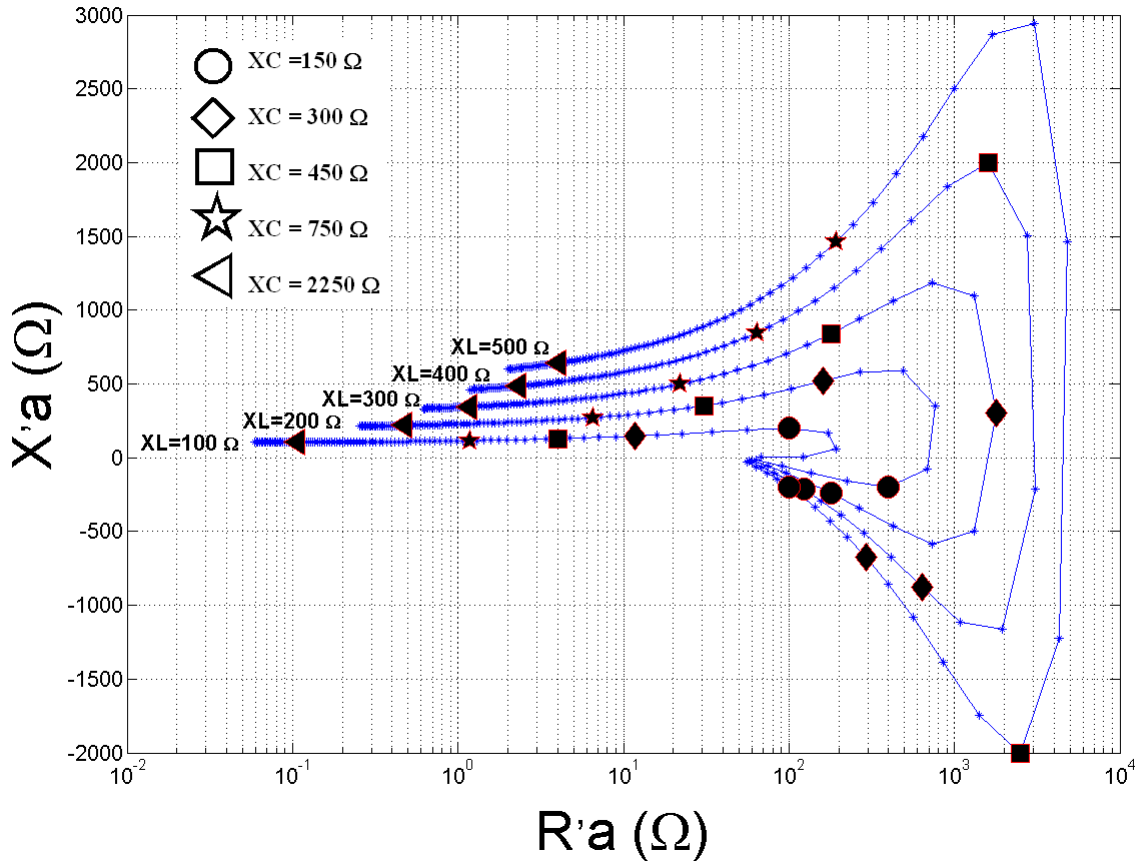


Fig. 10 - Andamento della resistenza  $R'a$  e della reattanza  $X'a$  ai morsetti d'antenna di un accordatore a T al variare di  $X_L$  e di  $X_C$ . Il valore di  $X_{C2}=0$ . Le variazioni di  $X_C$  si riferiscono invece ai valori di  $C_1$ .

## Alcuni esempi pratici

	<b>L(m)=</b>	<b>7</b>		
<b>Esempio</b>	<b>Banda</b>	<b>L / λ</b>	<b>Ra</b>	<b>Xa</b>
<b>n°1</b>	<b>40</b>	<b>0,175</b>	<b>14</b>	<b>-200</b>
<b>n°2</b>	<b>20</b>	<b>0,350</b>	<b>167</b>	<b>402</b>
<b>n°3</b>	<b>15</b>	<b>0,467</b>	<b>2270</b>	<b>120</b>
<b>n°4</b>	<b>10</b>	<b>0,700</b>	<b>43</b>	<b>-125</b>

Tab. 2 – Valori di Ra e Xa a diverse lunghezze d'onda per un'antenna lunga 7m.

Gli esempi che seguono sono relativi ad un'antenna verticale di 7m quando questa lavora nelle bande dei 40, 20, 15 e 10m. I valori di impedenza dell'antenna nei quattro casi indicati sono riportati in Tab.2 e sono stati ricavati dal grafico di Fig.1 e dalla Tab.1. Gli esempi indicano i criteri per la scelta del tipo di rete accordatrice e le modalità con le quali si deve operare sulle famiglie dei grafici  $R'a$ ,  $X'a$  per la ricerca dei valori dei componenti.

### Esempio n°1

L'antenna presenta una  $Ra$  di 14 Ω ed una  $Xa$  di -200 Ω per  $\lambda=40m$ . Il max trasferimento di potenza si ottiene quando la rete accordatrice presenta una  $R'a = 14$  ohm ed una reattanza  $X'a$  di segno opposto pari 200 Ω. Considerando che il valore di  $Ra$  è molto basso è conveniente usare la rete ad Elle di fig.3. Il punto di coordinate (14, 200) è individuabile sul grafico di Fig.4 per  $XC=31\Omega$  e  $XL=225\Omega$ . A questi valori corrisponde rispettivamente ad una capacità C ed una induttanza L che si ricavano tramite le formule seguenti:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f_0 XC} \quad L = \frac{XL}{2\pi \cdot f_0}$$

Per  $f_0=7Mhz$  i valori di L e di C sono rispettivamente 5,1μH e 730pF

### Esempio n°2

L'antenna presenta una  $Ra$  di 167 Ω ed una  $Xa$  di 402 Ω per  $\lambda=20m$ . Il max trasferimento di potenza si ottiene quando la rete accordatrice presenta una  $Ra=167\Omega$  ed una reattanza  $Xa$  di segno opposto pari -402 Ω. In questo caso è conveniente usare la rete ad Elle di fig.5.

Il punto di coordinate (167, -402) è individuabile sul grafico di Fig.6 per XL compreso fra 200Ω e 300 Ω e per XC compreso fra 120Ω e 210 Ω. Valutando che il valore medio di XL sia pari a 250Ω e che quello di XC sia 170Ω, per  $f_0=14Mhz$  si ricava  $L=2,8\mu H$  ed  $C=67pF$

### Esempio n°3

L'antenna presenta una  $Ra$  di 2270 Ω ed una  $Xa$  di 120 Ω per  $\lambda=15m$ . Il max trasferimento di potenza si ha quando la rete accordatrice presenta una  $Ra=2270\Omega$  ed una reattanza  $Xa$  di segno opposto pari -120 Ω. Questi valori sono davvero difficili da adattare perché il punto P che li rappresenta cade nella zona ripida delle curve sia che si faccia riferimento alla rete ad Elle-C sia che si faccia riferimento a quella a T. Per questa ragione piccole variazioni di C1 possono portare XC da valori positivi a valori negativi. Anche XL deve essere variata a piccoli passi per intercettare con precisione il punto P.

Se prendiamo in considerazione la rete ad Elle di fig.6 vediamo che il punto P di coordinate (2270, -120) è situato alla destra della curva per  $XL=300\Omega$  ed è vicino al "marker" di  $XC=300\Omega$ . I valori esatti sono:  $XL=340\Omega$  e  $XC=344\Omega$ . Alla frequenza di 21 Mhz i valori di L e di C sono rispettivamente 2,58μH e 22pF.

#### **Esempio n°4**

Dobbiamo accordare un'antenna che presenta una  $R_a$  di  $43\Omega$  ed una  $X_a$  di  $-125\Omega$  per  $\lambda=10m$ . Il max trasferimento di potenza si ha quando la rete di adattamento presenta una  $R_a=43\Omega$  ed una reattanza  $X'a$  di segno opposto pari  $125\Omega$ . Se prendiamo ancora in considerazione la rete a T osserviamo che tutte le curve, se traslate verso il basso possono soddisfare i valori richiesti. Il valore di  $R'a$  ( $43\text{ ohm}$ ) intercetta la curva relativa a  $X_L=100\Omega$  per  $X_C=196$ . In quel punto però il valore di  $X'a$  è di  $182\Omega$ , la curva deve quindi scendere di  $(182-125)=57\Omega$ . A questa funzione provvede il condensatore C2 la cui reattanza deve avere quel valore. Per  $f_0=28\text{Mhz}$  i componenti della rete hanno i seguenti valori:  $C_1=29\text{pF}$  che si ricava dal valore di reattanza di  $196\Omega$ ,  $C_2=100\text{pF}$  che si ricava da valore di reattanza di  $57\Omega$ ,  $L=0.57\mu\text{H}$  che si ricava dal valore di reattanza di  $100\Omega$ .

Se invece consideriamo l'intersezione del valore di  $R'a$  con la curva relativa a  $X_L=200\Omega$ , osserviamo che questo punto si ottiene per  $X_C=420\text{ohm}$  e che il corrispondente valore di  $X'a=392\Omega$ . Per raggiungere i  $125\Omega$  dobbiamo quindi scendere di  $(392-125)=267\Omega$ . I rispettivi valori dei componenti sono:  $C_1=13.50\text{pF}$ ,  $C_2=21.3\text{pF}$ ,  $L=1.17\mu\text{H}$ .

#### **Conclusioni**

In questo articolo è descritto un metodo che consente la progettazione della rete di adattamento per la nostra antenna. Il metodo è basato sull'uso di grafici, tramite i quali è possibile ricavare il valore dei componenti della rete. I grafici riportati nelle Figure 4, 6, 8 e 10 sebbene siano di semplice comprensione, presentano qualche difficoltà quando sia necessario valutare  $R'a$  e  $X'a$  tramite un'interpolazione. Negli esempi precedenti i valori di resistenza e quelli di reattanza sono stati individuati esattamente per mezzo di un programma di calcolo interattivo che, sulla base delle equazioni caratteristiche di ogni rete, consente il calcolo dei valori dei componenti L e C con un'ottima precisione.

La seconda parte di questo articolo, attualmente in preparazione, riporterà le formule usate per ricavare i valori di impedenza e le modalità per richiedere gratuitamente il programma di calcolo.

#### **Bibliografia**

1. Radio Hamateurs Hanbook. Nelle diverse edizioni, vedi il paragrafo: Impedence Matching Circuits
2. Te EZ-Tuner. QST pag.40-43, Aprile 2002
3. Nerio Neri. Antenne, Linee e propagazione, Vol.1. pag 165
4. MMANA <http://mmhamsoft.amateur-radio.ca/index.htm>
5. MatLab <http://www.mathworks.com/products/matlab/>