

# Mitologia radioelèctrica: “Les estacionàries”.

## Què són i què no són les estacionàries.

Si hi ha un tema que per al radioaficionat novell (i per a molts veterans) sembla cosa de bruixes són les anomenades “estacionàries”. Uns éssers els quals semblen determinar el comportament de la nostra antena i que generen por, dubtes i malentesos a parts iguals.

Per començar hem posat al títol el terme estacionàries entre cometes ja que el seu nom correcte és Relació d'Ones Estacionàries (ROE o en anglès SWR). La definició de diccionari no aporta gaire llum sobre el seu significat: “La ROE és la relació numèrica entre la impedància de la línia de transmissió i la càrrega o generador ( $ROE=Z1/Z0$ )”.

Això vol dir que a efectes pràctics, la ROE ens indica la desadaptació entre el nostre cable coaxial (per facilitat al llarg de l'article sempre farem referència a cable coaxial de 50 Ohms, però absolutament tot és aplicable per igual a d'altres cables de diferent impedància o a línia paral·lela) i l'antena, però no té res a veure amb la potència radiada o perduda.

## Què no ens indica la ROE:

- \* El valor de la impedància de l'antena.
- \* La composició de la impedància (resistència i reactància).
- \* La potència radiada.
- \* La potència perduda.
- \* El rendiment de l'antena.

Ja que la ROE és una relació de dos valors, la mínima ROE que pot tenir un sistema d'antena és 1:1 (no zero, no existeix el “zero d'estacionàries”) que vol dir que el cable presenta la mateixa impedància que l'antena, però no ens diu quina és. Així 1:1 tant és aplicable a un dipol (75 Oh) alimentat amb cable de televisió (75 Oh) com a una ground-plane (50 Oh) alimentada amb RG-58 (50 Oh) o fins i tot a un dipol plegat (300 Oh) alimentat per línia paral·lela (300 Oh).

Una ROE més alta ens adverteix d'una diferència entre les dues magnituds, però no podem determinar si la impedància de l'antena és més alta o més baixa que la del cable. Si tenim una ROE de 1:3 tant pot ser que l'antena presenti 150 Ohms com 16,6 Ohms. La mesura de ROE per ella mateixa no ens ajudarà a diferenciar-ho.

## Com mesuram la ROE.

La resposta òbvia per a molts és: - “Amb un mesurador de ROE. Quines coses de preguntar!”

Com aviat veurem, les coses no sempre són el que semblen ser, encara que ho posi a l'etiqueta.

Hi ha diversos instruments que podem utilitzar per a saber la ROE d'un sistema d'antena: des dels més senzills mesuradors de ROE (també anomenats reflectímetres), passant pels analitzadors d'antena i acabant pels analitzadors vectorials (VNA per les seves sigles en anglès.) En aquest article ens centrarem en els del primer tipus, més habituals i força més barats.



Analitzadors d'antena

Per començar, la ROE no pot ser mesurada directament. Com hem indicat en l'apartat anterior, la ROE és una divisió entre dues magnituds, per tant caldria fer dues mesures d'impedància i una divisió per a mostrar-la. Segur que vosaltres, espavilats lectors, ja suposeu que no és això el que fan els mesuradors de ROE habituals.

Si la ROE no es pot mesurar directament, el que fan tots els instruments és una mesura indirecta: es transmet un senyal de potència coneguda i es llegeix quina part d'aquest senyal retorna cap al generador. Segons quin sigui el generador de senyal i la forma de llegir la potència retornada tenim un instrument o un altre.

Els mesuradors de ROE que trobem a les estacions d'aficionat utilitzen com a generador de senyal el propi transmissor i tenen dos detectors: per a la potència de sortida (directa) i per a la potència reflectida. El càlcul de ROE es fa visualment en l'escala graduada de l'instrument de potència reflectida. Aquesta indicació té un grau d'error força alt, generalment superior al 20%. Així no és estrany que dos mesuradors en el mateix sistema indiquin coses diferents. Per a l'instrument senzill d'ús habitual, l'error de mesura és particularment important en la part més baixa i més alta de l'escala. El rang de ROE on la lectura és més acurada esta entre 1:1,3 i 1:10 aproximadament, fora d'això les lectures no tenen gaire sentit. Amb aquest tipus d'instrument determinar si un sistema té 1:1,15 o 1:1,25 és impossible, igual que saber si en té 1:30 o 1:300.



Això vol dir que aquest tipus de mesurador no serveix per a res? En absolut. És un instrument molt pràctic i molt útil en una estació de ràdio, la prova és que en el 100% d'estacions d'aficionat n'hi ha com a mínim un.

El que hem de ser conscients és de per a què serveix aquest mesurador:

- \* Per tenir-lo permanentment connectat i veure canvis sobtats en la ROE. Ens avisa de problemes en l'antena o en la línia de transmissió.
- \* Per afinar una antena que ja està molt propera al punt de ressonància. Especialment les antenes comercials on l'ajust és limitat.
- \* Per ajustar un acoblador d'antena de manera que tinguem la mínima potència reflectida.

Aquestes tres aplicacions tenen una cosa en comú: no ens importa el valor de la ROE sinó la seva variació. En la primera aplicació l'objectiu és veure que el sistema es comporta sempre de la mateixa manera i, per tant, la ROE no varia. En la segona i la tercera aplicacions el que fem és cercar el mínim de ROE. Tant l'antena com l'acoblador estan correctament ajustats quan obtenim la mínima potència reflectida, tant li fa que sigui amb una ROE de 1:1,2 o amb una ROE de 1:1,5.

### **Aclariment sobre la notació complexa de la impedància.**

"Notació complexa" no vol dir que sigui complicada, sinó que utilitzem nombres complexos (C) per a representar-la.

Un nombre complex té dues parts: la real, formada per un nombre real (R) i una de imaginària, formada per un nombre real (R) multiplicat per l'operador  $j$  (arrel quadrada de  $-1$ ). La representació són dos quantitats precedides del signe  $+$  o  $-$ . En aquest cas, el signe no és una operació sinó indica que el número següent és positiu o negatiu.

Alguns exemples són:  $2 + j5$ ;  $-0,07 + j9,8745$ ;  $1,05 - j3$ . Podem veure com tant la part real com la imaginària poden ser nombres "rodons" o amb decimals, i que tant en una part com l'altra poden ser positius o negatius. Podeu obtenir més informació a qualsevol llibre de matemàtiques.

Les impedàncies utilitzen aquesta notació ja que és molt convenient per a representar les dues magnituds presents: la resistència indicada com a part real i la reactància com a part imaginària. La reactància inductiva és positiva i la capacitativa és negativa.

#### **Exemples:**

$50 \text{ Ohms} + j0 \text{ Ohms}$  pot ser una càrrega artificial ja que té 50 Ohms de resistència i cap altre component. (En aquest cas particular pot expressar-se com a  $+0j$  o  $-0j$  ja que el zero no té signe.)

$80 \text{ Ohms} + j5 \text{ Ohms}$  pot ser un dipol lleugerament llarg ja que  $+j5$  indica una reactància inductiva, per tant com si tingués una bobina en sèrie.

$36 \text{ Ohms} - j6,4 \text{ Ohms}$  pot ser una antena vertical amb pla de terra lleugerament curta.

## **Transferint potència a l'antena.**

La transferència de potència entre una línia i una càrrega (coaxial i antena) és màxima quan s'acompleix que, a la freqüència de treball, les dues impedàncies tenen una part resistiva igual i una part reactiva conjugada entre si [Conjugate Match theorem].

Baixant a terra, això vol dir que segons la impedància que presenta el sistema d'antena ens podem trobar en tres casos diferents:

*L'antena presenta 50 Ohms i està en el seu punt de ressonància.*

Explicació: estar en ressonància vol dir que no presenta cap reactància, per tant la impedància de l'antena són 50  $-j0$  Ohms. Com que el cable coaxial presenta una impedància de 50  $+j0$  Ohms s'acompleix que les parts resistives són iguals i les reactives conjugades ( $+j0 -j0$ ).

En aquest cas, el mesurador de ROE ens dona indicació aproximada de si s'acompleix la condició: la ROE ha de ser 1:1 o molt propera.

Corol·lari: si l'antena ressona a la freqüència de treball (això és molt important!) i la ROE està propera a 1:1 estem en el punt de màxima transferència de potència.

*L'antena presenta una impedància desconeguda que és compensada per un acoblador d'antena.*

Explicació: suposem que l'antena presenta una impedància de 250  $+j5$  Ohms (resistència 250 Ohms, reactància inductiva 5 Ohms). La transferència serà màxima si a l'altra punta del cable coaxial posem un acoblador ajustat de tal manera que al connector del coaxial que va a l'antena (i no a la sortida de l'acoblador) hi hagi una impedància de 250  $-j5$  Ohms (resistència 250 Ohms, reactància capacitativa 5 Ohms).

En aquest cas, el mesurador de ROE ha d'estar intercalat entre el transmissor i l'acoblador, no entre l'acoblador i l'antena. Ajustarem l'acoblador de manera que el mesurador de ROE ens indiqui molt a prop de 1:1. En aquesta condició tindrem a la sortida del transmissor 50  $-j0$  Ohms i a l'entrada de l'acoblador 50  $+j0$  Ohms, i per tant la màxima transferència de potència.

*La resta de casos*

En la resta de casos sempre hi ha una part de la potència que surt del transmissor que no aconsegueix arribar a l'antena, ja que es veu reflectida per la desadaptació d'impedàncies.

Però malgrat el que pugui semblar, aquest no és el final de la història, seguiu llegint.

## La potència reflectida i la salut dels transmissors

La potència reflectida per l'antena es perd. Aquest és un altre dels mites recurrents entre els aficionats.

La potència reflectida torna al transmissor, però com que la impedància que presenta el coaxial degut a la desadaptació de l'antena està lluny de la impedància nominal del transmissor, una gran part d'aquesta potència torna a sortir cap a l'antena reflectida per segona vegada.

Aquest fenomen de múltiples reflexions a l'antena i al transmissor es va repetint fins que la totalitat de la potència del transmissor s'ha exhaurit per radiació a l'antena i per les pèrdues del cable coaxial. Les reflexions de potència no causen cap pèrdua, l'única pèrdua és deguda al coaxial.

El nombre de "voltes" (reflexions d'anada i tornada) que necessita el senyal de RF per a ser radiat depèn de la desadaptació d'impedàncies: com més diferents siguin aquestes, més "voltes" ha de fer el senyal per a ser radiat. Com a cada volta passa per tot el coaxial, com més voltes faci, més pèrdues de senyal hi hauran.

Degut a que les pèrdues dels cables coaxials augmenten amb la freqüència, en les bandes de V-UHF és crític que les antenes presentin una bona adaptació a la línia (baixa ROE), ja que en cas contrari una gran part de la potència es perdria en forma de calor al cable coaxial. Pel contrari, la línia paral·lela té unes pèrdues extremadament baixes i permet treballar perfectament amb grans desadaptacions d'impedància (alta ROE).

Si la potència reflectida finalment és radiada, per quin motiu perilla la salut dels transmissors sotmesos a una alta ROE?

Partim de dues consideracions: l'efecte d'una ROE alta a la línia de transmissió i les causes de defunció dels transmissors d'estat sòlid.

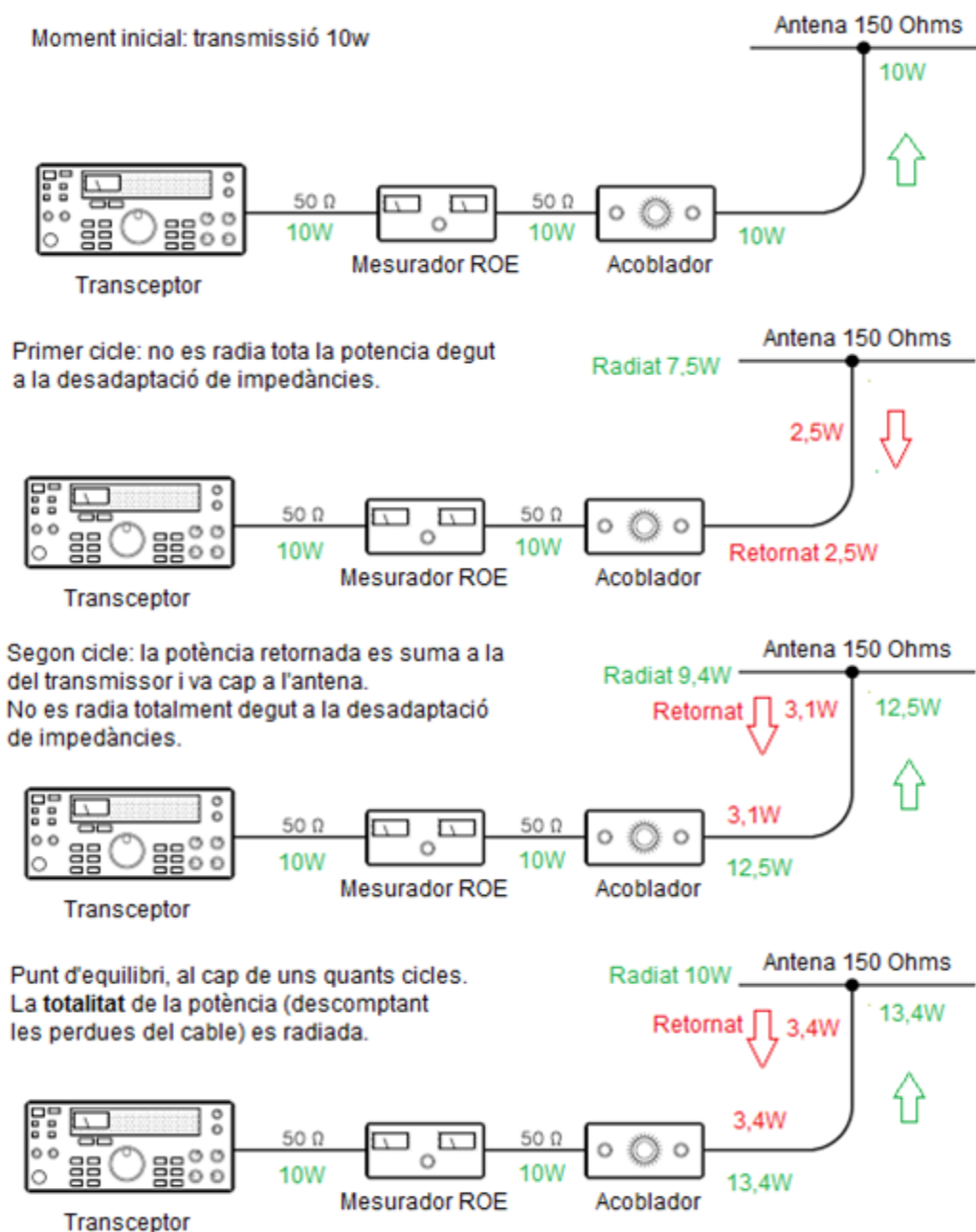
\* Al llarg de la línia existeixen punts de màxima tensió (on es sobreposen múltiples vegades els màxims de tensió del senyal del transmissor) i punts de màxim corrent (ídem pel corrent). Una ROE alta causa que el mateix senyal volti moltes vegades amunt i avall del coaxial, aquesta superposició d'ones pot portar a incrementar per cinc, per deu o per més vegades la tensió i corrent normals en una línia adaptada. L'increment de tensió i corrent és proporcional a la ROE, fins el punt que amb alta ROE i altes potències s'acaben produint perforacions en l'aïllament als punts d'alta tensió o fusions del dielèctric als punts de màxim corrent.

\* Els passos amplificadors d'estat sòlid (transistors i fets) tenen tendència a morir per tres causes: sobretensió, sobrecorrent o excés de temperatura.

Quan connectem un transmissor a una línia desadaptada poden passar moltes coses, depenent de la magnitud de la desadaptació (la ROE) i de la longitud de la línia.

Com hem indicat abans, en tota línia hi ha punts d'alta tensió i d'alt corrent, pot ser que en l'acabament que connectem al transmissor es trobi en algun d'aquests punts i això faci passar a millor vida els nostres apreciats transistors de potència. Imagineu-vos un transistor dissenyat per treballar a 13,8V, al qual li estem aplicant de tornada fàcilment 50 o 60V de RF... els focs artificials estan garantits. També pot passar que la sobretensió o sobrecorrent sigui suportable pel transistor, però estarà dissipant més potència que per a la qual va ser dissenyat el dissipador de calor. Podem tenir sort i el transistor resistir-ho de forma indefinida o, a la llarga, fregir-lo.

El resultat pràctic d'aquesta disquisició teòrica és el que ja sabem: els transmissors transistoritzats aguanten petites desadaptacions però fan fallida davant d'una alta ROE. (No hem considerat que hi hagin circuits de protecció que disminueixin la potència o tallin la transmissió en presència de ROE elevada.)



## La ROE com a detector del funcionament de l'antena.

Una creença generalitzada, encara que incorrecta, és: “Una antena que presenta una baixa ROE ha de funcionar correctament”. Aquesta creença es basa en la contrària: “una antena comercial dissenyada per a 50 Ohms que presenta una baixa ROE està en el punt d'ajust òptim.”

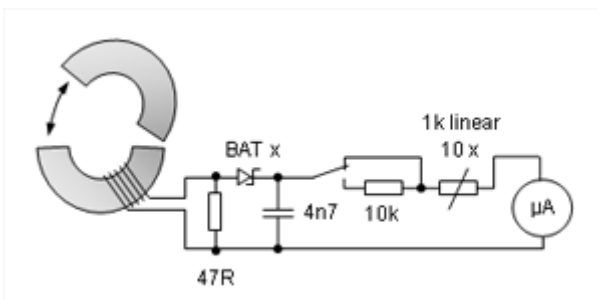
Analitzem les dues afirmacions començant per la segona: “una antena comercial de 50 Ohm”. Generalment això pressuposa una antena ressonant a la banda en que estem fent l'ajust i amb unes mesures molt properes a les correctes. En aquestes condicions, certament el punt òptim d'ajust és a mínima ROE, cosa que no vol dir a 1:1.

D'aquest context se n'extreu erròniament la primera frase: “una antena que presenti una baixa ROE funciona correctament”. Cosa rotundament falsa: presentar una baixa ROE només vol dir que estem connectant al mesurador un sistema que presenta 50 Ohms. No ens dóna cap idea en absolut de què està passant amb la RF que hi posem per un extrem. Pot ser que funcioni perfectament o que no funcioni gens. No ho sabem. L'exemple més rotund és la càrrega artificial: si connectem una resistència no inductiva de 50 Ohms tindrem 1:1 d'estacionàries (al cap i a la fi està feta per això) però no radiarem absolutament res.

Un exemple de la vida real: tenim una antena vertical de 5m de llarg sense radials (de les que anomenem “antenes màgiques” que cobreixen des de 6m fins a 80m sense acoblador), amb un adaptador amb una ferrita amb altes pèrdues i una llarga tirada de cable prim. Aquest sistema pot presentar unes estacionàries molt decentes en 80m, mentre que una L invertida de 21m, amb 8 radials enterrats de 10m de llarg presentar estacionàries molt més altes. Però quina creieu que rendirà millor? Doncs la segona amb diferència llarga.

Hi ha moltes antenes que no presenten 50 Ohms de forma natural. Només per citar-ne algunes: verticals amb pla de terra, dipòls, delta-loops, quads, yagis... Generalment aquestes antenes necessiten adaptadors d'impedància per a poder-les ajustar a 50 Ohms.

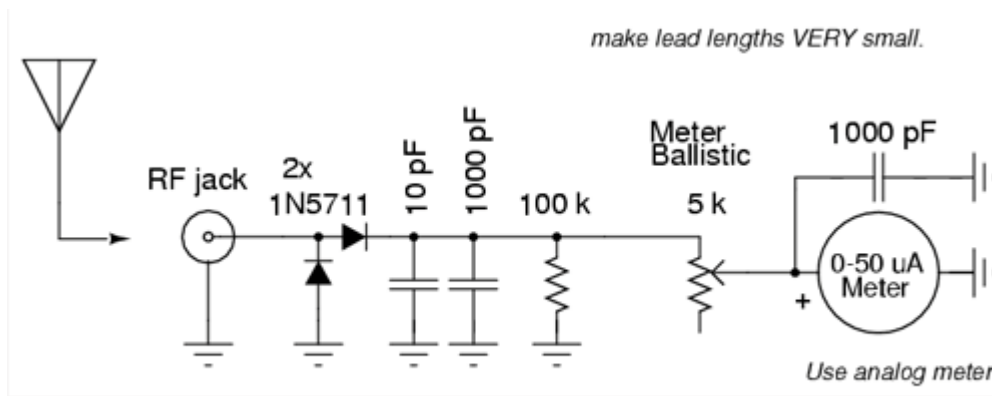
Si en els casos anteriors la lectura de ROE no ens serveix com indicador per valorar l'antena, què podem utilitzar?



Amperímetre de RF

Hi ha dos indicadors que tenen una estreta vinculació entre si i són molt senzills de construir: l'amperímetre de RF i el mesurador de camp. La radiació d'una antena és proporcional al corrent que passa per la seva estructura (fil o tub), per tant podem fer-nos una idea de quant està radiant mesurant el corrent o bé mesurant el camp elèctric resultant de la radiació. L'instrumental professional per aquestes finalitats és molt car però, tal com passa amb la ROE, l'aficionat no

necessita el valor absolut del corrent o del camp, només veure la seva variació i fer les modificacions a l'antena que calguin per a assolir-ne un màxim.



Mesurador de camp

### Epíleg:

La ROE és una magnitud fàcilment mesurable amb equipament senzill i econòmic que no pot faltar en cap estació de ràdio professional o d'aficionat.

Un mesurador de ROE ens ajudarà en la nostra operació diària a detectar problemes amb el sistema radiant i com indicador per a l'ajust d'acobladors d'antena, però no ens proporcionarà cap indicació sobre l'eficiència radiant.

Si empreu una antena no ressonant amb alta ROE, feu servir línia paral·lela i/o un cable coaxial tan bo i tan curt com sigui possible.

Ni la longitud del cable coaxial ni l'ús de balun no influeixen en la ROE.

Aquest article és intencionadament simplificat en l'explicació del fenòmens físics implicats en la ROE per evitar tant com sigui possible la càrrega matemàtica. Hom ha procurat tocar de peus a terra més que adreçar-se a un lector avesat en els temes d'enginyeria (a qui per altra banda no li cal aquest article).

16/01/2015

73's de Toni, EA3ERT