

## La linealitat i la intermodulació

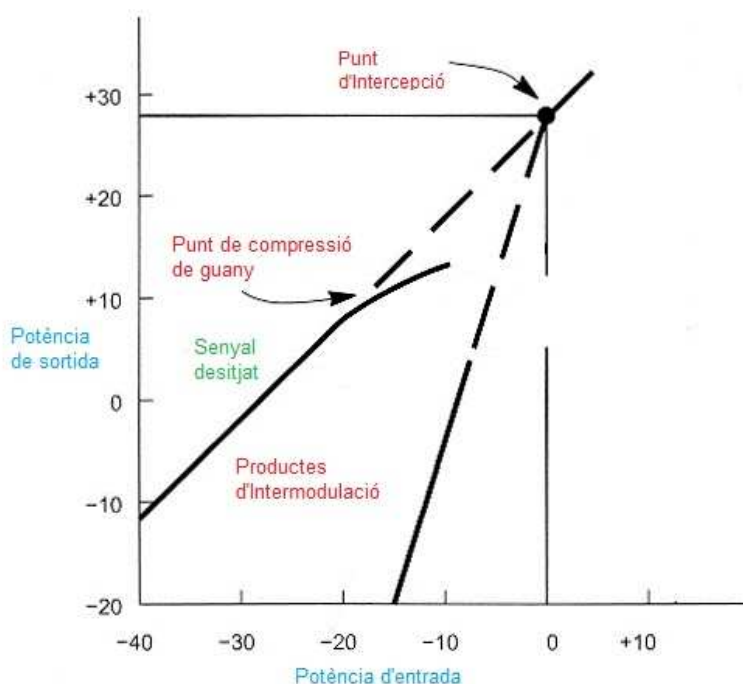
Comencem un tema àrid que normalment acostuma a venir acompanyat de moltes fórmules complicades, cosa que, a molts, els fa passar de full immediatament. I com no hi ha res millor que començar pel principi, fem la pregunta del milió: què és un sistema lineal?

### **Els sistemes lineals, i els que no ho són.**

Per a la majoria de lectors (pressuposo que radioaficionats i/o CBístes) la paraula “lineal” va automàticament associada a “amplificador”. Els “amplificadors lineals”, per a qui no ho sàpiga, són aparells situats entre el transceptor i l’antena destinats a incrementar la potència d’emissió. Però en enginyeria (i d’altres disciplines) hi ha moltes classes de sistemes que s’anomenen lineals, com per exemple sistemes mecànics, hidràulics, software, elèctrics.... com veieu, és tot un món.

Així doncs, què és el que defineix un sistema lineal? La resposta de llibre diu que és aquell en que la seva sortida, en relació a l’entrada, segueix una equació lineal, i ens quedem tan amples sense haver entès res. Dit senzillament (i parlant de radiotècnia), un circuit lineal és aquell en que en augmentar o disminuir el senyal d’entrada, augmenta o disminueix la seva sortida en una proporció fixada i sempre igual.

Per exemple, en un amplificador lineal estàndard de 100W de potència màxima i que augmenti la potència en 10 vegades, si li entrem 1W obtindrem 10W de sortida, si li entrem 3 en sortiran 30 i així successivament. Si ara agafem aquests valors d’entrada i de sortida i els dibuixem en un gràfic de coordenades cartesianes (sí, el que vàrem estudiar a l’escola, amb una escala vertical i una d’horitzontal) el dibuix que obtindrem serà una línia recta.



Gràfic del punt de compressió i punt d'intercepció.

Hem esbossat el funcionament d'un amplificador, però més enllà hi ha vida. I així, dins del camp dels circuits de ràdio analògics, quins circuits lineals hi podem trobar?

D'entrada podem parlar de quatre tipologies lineals però amb matisacions: atenuadors, amplificadors, commutadors i filtres. Les matisacions són degudes a que aquests circuits només són lineals dins d'un rang determinat de freqüències i potències. En anar augmentant la potència d'entrada, arribarà un punt on l'amplificador ja no serà capaç d'amplificar el senyal en la mateixa proporció. Aquest punt on l'amplificació es menor en  $x$  vegades s'anomena Punt de Compressió (generalment  $-1\text{dB}$ ). Conclusió: els circuits lineals ho són només dins dels paràmetres per als quals es van dissenyar.

Fàcilment es pot entendre que, amb el mateix amplificador de l'exemple anterior, si seguim incrementant la potència d'entrada arribarà un punt on ja no podrà amplificar més: amb  $1\text{W}$  en sortiran  $10$ , però amb  $80$  de cap manera en sortiran  $800$ . Amb  $80$ , com a màxim en sortiran  $100$ , per tant ja no estarà amplificant  $10$  vegades sinó  $1,25$  vegades.

Si els quatre circuits indicats abans poden ser lineals, quins no ho són? Doncs la resta! En els nostres muntatges més habituals, els oscil·ladors, mescladors, limitadors, multiplicadors i divisors. Tots aquests circuits per al seu funcionament es basen en obtenir un senyal de sortida no proporcional al d'entrada. Per exemple, un multiplicador obtindrà a la seva sortida un senyal de freqüència doble que el d'entrada, però amb un nivell massa baix d'entrada deixarà d'haver-hi sortida, i amb un nivell massa alt podem obtenir el quàdruple de la freqüència inicial enlloc del doble...

Això no vol dir que els circuits del primer grup siguin sempre lineals. Segons l'aplicació podem trobar, per exemple, atenuadors logarítmics o amplificadors per FM que no són lineals. La diferència rau en que els del segon grup, per natura han de ser no lineals, en cas contrari deixen de complir la seva funció.

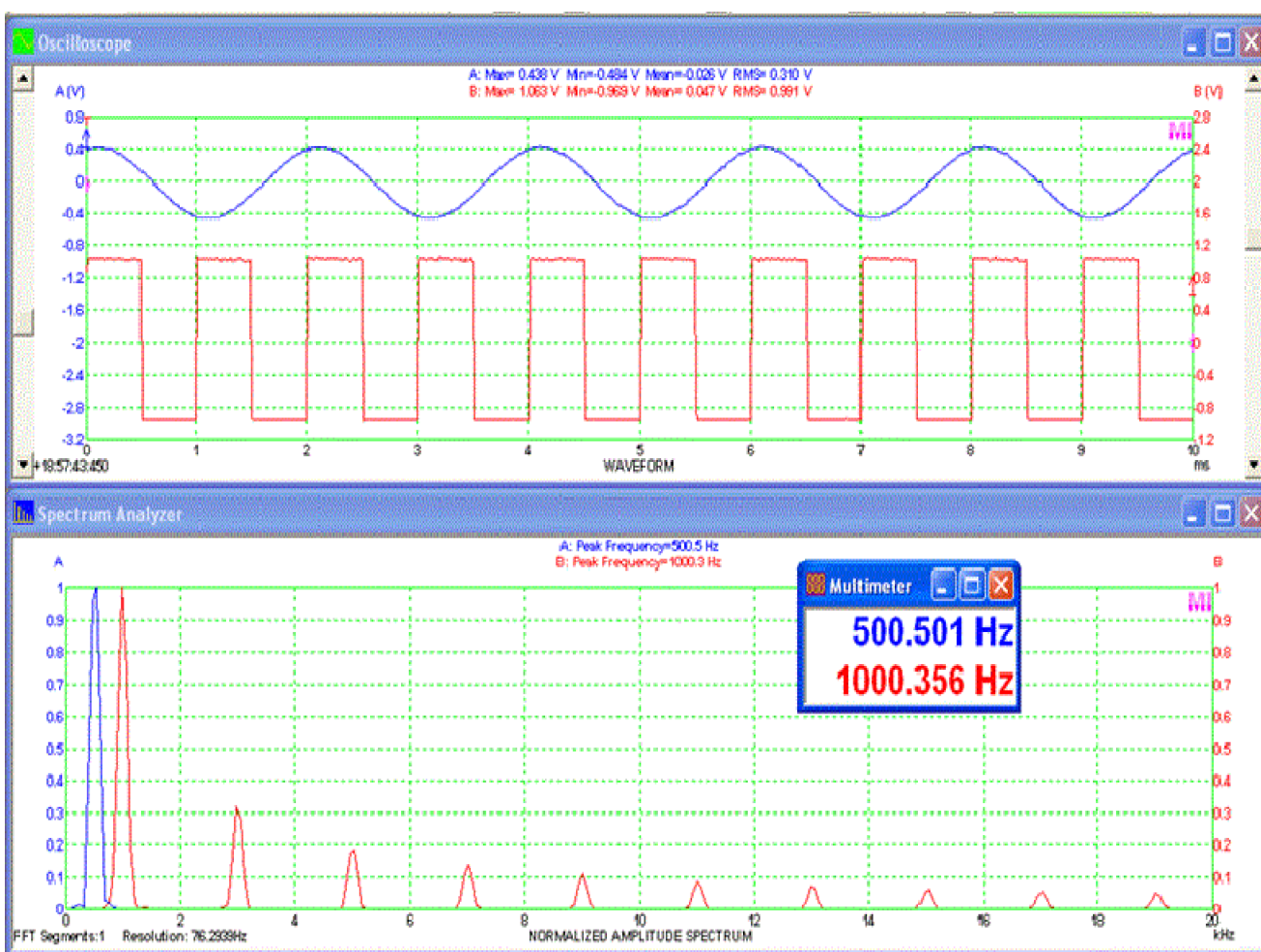
### **Les manifestacions “espectrals” de la radiofreqüència.**

Per a entendre fàcilment el que segueix cal tenir clara la manifestació dual dels senyals de ràdio. Com els fantasmes en una pel·lícula de terror es manifesten segons com els invoquen, la radiofreqüència es manifesta segons amb quin instrument l'estiguem mesurant.

Bàsicament, els radioaficionats solem mesurar la RF amb tres instruments diferents: vatímetres de diverses formes i maneres, oscil·loscopis i analitzadors d'espectre. Segons quin d'aquests aparells utilitzem, la RF se'ns presentarà de forma diferent: amb un vatímetre estarem llegint la potència sumada de tots els senyals presents, independentment de la seva freqüència; amb un oscil·loscopi veurem la forma que resulta de la combinació de tots els senyals presents, mentre que amb un analitzador veurem la potència individual de cada senyal. Això fa que, per exemple, amb el mateix senyal el vatímetre ens indiqui  $10\text{W}$  de potència (i prou), l'oscil·loscopi ens mostri un senyal quadrat de menys de  $10\text{W}$  i d'una freqüència de  $14\text{MHz}$  i l'analitzador ens mostri múltiples senyals de  $14\text{MHz}$  amb  $6\text{W}$ ,  $28\text{MHz}$  amb  $3\text{W}$ , de  $42\text{MHz}$  amb  $1,5\text{W}$ ,  $56\text{MHz}$  amb  $0,57\text{W}$ ...

Aquest exemple fictici ens fa veure que no tots els instruments ens proporcionen la mateixa informació. Si en l'exemple precedent intercalem un filtre passabaixos perfecte, el vatímetre ens dirà que la potència ha baixat fins a 6W, l'oscil·loscopi ens mostrarà que el senyal ja no és quadrat sinó sinusoidal i de 6W i l'analitzador mostrarà un únic senyal de 14MHz amb 6W de potència. Si interpretem l'efecte del filtre partint només d'un vatímetre podem pensar que el que ens ha fet és empitjorar la sortida, ja que abans marcava 10 i ara només marca 6. Si l'interpretem partint d'un oscil·loscopi podem pensar que ens ha distorsionat el senyal, ja que abans era quadrat i ara no. Finalment, si l'interpretem a partir d'un analitzador d'espectre veurem que el senyal útil segueix exactament igual i que el que hem fet és eliminar els harmònics perjudicials.

Això vol dir que qualsevol aficionat ha de disposar d'un analitzador d'espectre (que no és barat) al seu laboratori domèstic? Rotundament no. Poden fer-se milers de muntatges que funcionen perfectament sense necessitat d'instrumental sofisticat. El que cal és saber les limitacions dels nostres instruments i interpretar les lectures correctament. Quanta gent hi ha preocupada per estar en una freqüència xx.000.00 sense ser conscient que el seu transceptor té un error acceptable de 5 parts per milió? Això en 20m són 70Hz. Per molt que el display marqui 00 pot estar per sobre o per sota sense que a l'equip li passi absolutament res. El mateix passa amb els testers o vatímetres on les escales són més sensibles que l'error intrínsec del propi instrument.



La pantalla superior és un oscil·loscopi, la inferior un analitzador d'espectre. El senyal blau és una ona sinusoidal, mentre que el vermell és una ona quadrada. Podem veure com la segona està formada per múltiples senyals sinusoidals de freqüències diferents.

Per la seva pròpia natura els senyals de ràdio són sinusoidals. Això vol dir que la tensió va pujant i baixant suaument, com les onades del mar. En cap cas adopta formes quadrades o punxegudes. Quan en un oscil·loscopi estem veient un senyal de qualsevol forma que no sigui sinusoidal, podeu tenir per segur que el que estem veient és la suma de diversos senyals. Quan generem una ona quadrada (per exemple) el que realment estem generant és un conjunt d'ones sinusoidals de diverses freqüències i amplituds que quan es sumen generen l'ona quadrada. Això té un desenvolupament matemàtic en forma polinomial que obviarem en aquest article.

### **La Radiofreqüència i la importància de la linealitat**

Tot això està molt bé, però encara no hem dit perquè és important la linealitat. A la pràctica, què fa diferent un amplificador lineal d'un altre que no ho és? En un amplificador lineal el que obtenim a la sortida és una còpia exacta del senyal d'entrada. Més amplificat, però igual. Quan un amplificador no és lineal, a la sortida obtenim un senyal distorsionat que fa que en molts casos sigui difícil de descodificar. Però no solament això: aquest senyal distorsionat està format, entre d'altres coses, pel senyal original i múltiples (harmònics) d'ell mateix. Per exemple, un senyal de 7MHz passat per un amplificador no lineal a la sortida té múltiples senyals, entre d'altres uns de 14, 21, i 28MHz que són el 2n, 3r, i 4t harmònic respectivament. Clarament es veu que això no és acceptable.

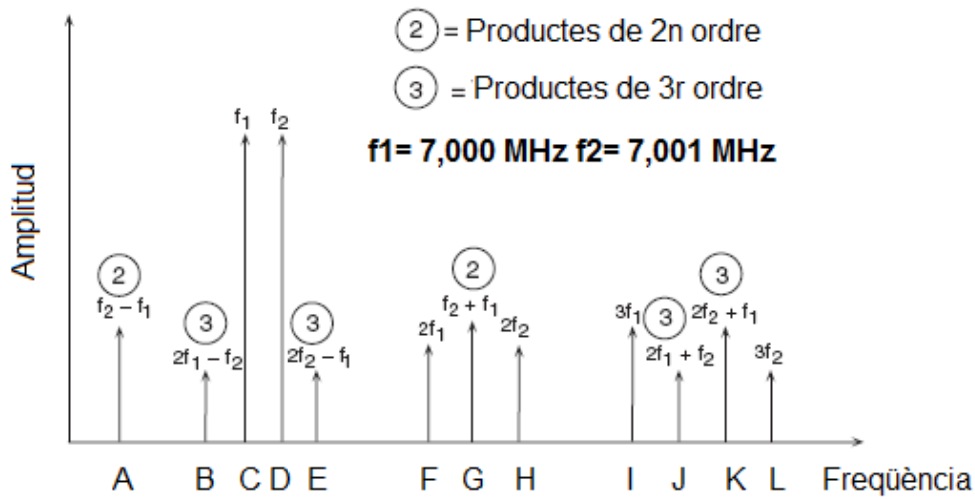
Però a la sortida no només hi ha harmònics. El senyal d'entrada normalment estarà modulad (am, ssb, digital), amb la qual cosa a la sortida hi haurà tot una gamma de senyals d'intermodulació formades per la suma i la resta del senyal inicial i dels seus harmònics.

Fem un exemple senzill amb números: suposem que a l'entrada només tenim dos senyals: un de 7.000 Khz i un de 7.001Khz. En parlar, a la realitat, generem múltiples senyals simultàniament amb la qual cosa el càlcul es complica. A la sortida del nostre amplificador, de manera simplificada, ens trobarem amb els següents senyals entre molts d'altres:

- Senyals fonamentals 7.000Khz i 7.001Khz
- 2n harmònic 14.000 i 14.002Khz.
- 3r. Harmònic 21.000 i 21.003Khz.
- Productes d'intermodulació d'ordre 3:
  - o  $14.002 - 7.000 = 7.002\text{Khz}$
  - o  $14.000 - 7.001 = 6.999\text{Khz}$
- Productes d'intermodulació d'ordre 5:
  - o  $21.000 - 14.002 = 6.998\text{Khz}$
  - o  $21.003 - 14.000 = 7.003\text{KHz}$

De seguida podem veure que hi ha dos grup de senyals ben diferenciats: els harmònics que fàcilment es poden eliminar amb un filtre passabaixos i les intermodulacions que no poden ésser eliminades amb un filtre. Aquest últim grup és especialment important, ja que fa que el nostre senyal sigui "brut". En origen teníem dos senyals dins de la banda de 40m (7.000 i 7.001Hz), però n'hem acabat tenint 6 (6.998, 6.999, 7.000, 7.001, 7.002 i 7.003KHz); així, una transmissió de 1kHz d'ample de banda ha acabat ocupant realment 5KHz de la banda.

## Vista parcial i simplificada dels productes d'intermodulació creat en un amplificador



- A - 0,001 MHz
- B - 6,999 MHz
- C - 7,000 MHz
- D - 7,001 MHz
- E - 7,002 MHz
- F - 14,000 MHz
- G - 14,001 MHz
- H - 14,002 MHz
- I - 21,000 MHz
- J - 21,001 MHz
- K - 21,002 MHz
- L - 21,003 MHz

**Audio:** serà eliminat pel desacoblament de l'amplificador

**Senyals en el canal de transmissió:** no es poden eliminar de cap manera

**Senyals fora del canal de transmissió:** s'eliminen amb el filtre passa-baixos

A partir d'aquí podem veure la importància de que els amplificadors per on passi el nostre senyal de transmissió siguin tan lineals com sigui possible ja que, com més s'apropin a la linealitat perfecta (els circuits ideals no existeixen), menys embrutarem la banda. Aquesta és la raó per la qual mai s'ha de forçar un amplificador fins al límit. Guanyant un 10% de potència incrementem un 90% la brutícia que estem llençant a la banda. Un consell pel be de tots és no excitar mai un amplificador més enllà del 80% de la potència màxima que pugui treure.

## La linealitat en els receptors

En l'apartat anterior hem vist la importància de la linealitat en els amplificadors de transmissió, però potser no és tan òbvia la importància crítica que té en els receptors. Simplificadament, la funció més crítica d'un receptor és poder rebre un senyal feble situat en mig i molt a prop de diversos senyals més forts. Per a que això sigui possible calen moltes coses:

Cal una bona selectivitat dels filtres d'entrada i de freqüència intermèdia. Totes dues coses eliminen els senyals fora de la banda d'interès. Per exemple, fora de la banda de 40m els primers i fora del 2,3KHz útils en LSB els segons.

Cal que el propi receptor no generi gaire soroll que pugui emmascarar els senyals febles. Aquí s'hi compta tant el soroll en buit de la cadena amplificadora, com el soroll de fase dels diversos oscil·ladors que hi intervenen.

Possiblement la característica més important i difícil d'aconseguir és que no es generin senyals espuris (ficticis) en el propi receptor. Això inclou la freqüència imatge (la que resulta de fer l'operació inversa a la conversió normal del receptor). Per exemple, en un receptor de 20m amb una freqüència intermèdia de 9MHz i un vfo de 5MHz, la freqüència imatge és 4MHz:

$$14\text{MHz}(\text{senyal}) - 5\text{MHz}(\text{vfo}) = 9\text{MHz}(\text{FI})$$

però també

$$4\text{MHz}(\text{imatge}) + 5\text{MHz}(\text{vfo}) = 9\text{MHz}(\text{FI})$$

i les intermodulacions que es produeixen.

En general, en els receptors moderns amb una FI elevada suprimir la freqüència imatge és relativament senzill. En el nostre exemple, el filtre passabanda d'entrada de 20m pràcticament suprimirà la freqüència imatge que es troba 10MHz fora de banda. Però les intermodulacions són un animal d'una espècie completament diferent. Si recordeu l'exemple de l'apartat dels transmissors, dues senyals de 7.000 i 7.001KHz generaven quatre nous senyals de 6.998, 6.999, 7.002 i 7.003KHz que no podien ser eliminats. Torneu a llegir aquesta última frase i copsareu com és d'important la linealitat dels receptors.

Els productes d'intermodulació, en particular els de tercer ordre, cauen dins de la banda del filtre d'alta i, en bona part, també dins del pas de banda del filtre de FI, per tant, un cop generats no hi ha manera d'eliminar-los. Les estacions semblen sobreposar-se i tenir una modulació excessivament ampla, quan en realitat la seva transmissió pot ser perfectament normal i el que estem sentint són artefactes que genera el nostre receptor. Corol·lari: en allò que no pot ser eliminat, el més important és evitar que es produeixi.

Les intermodulacions amb l'increment de senyals d'entrada creixen més de pressa que els propis senyals d'interès, de tal manera que, a partir d'un cert nivell d'entrada, les intermodulacions són tan potents com el propi senyal a rebre. A aquest nivell de senyal l'anomenem "Punt d'intercepció" i marca el nivell de senyal màxim teòric per sobre del qual el receptor és incapaç de rebre. Cap senyal més fort que aquest nivell no serà intel·ligible ja que contindrà més potència de distorsió que potència tindrà el senyal original. A la pràctica hi ha altres factors que limiten el nivell màxim de senyal, de forma que difícilment arribarem al punt d'intercepció ja que abans ja serem incapaços d'entendre que estem rebent.

En aquest apartat cal destacar un gran desconegut per a molts operadors: el botó de l'atenuador (ATT, IPO i d'altres nomenclatures). Molts receptors el tenen (i si el teu no el té, posa-li) i és un gran aliat per lluitar contra les intermodulacions. Com hem dit abans, les intermodulacions creixen més de pressa que el senyal útil, però també decreixen més de pressa. Si atenuem el senyal d'entrada i compensem incrementant el volum d'àudio en moltíssims casos, especialment en els receptors més senzills, escoltarem coses que eren inaudibles degut a la distorsió i el soroll.



Per una altra banda, tots els receptors tenen un nivell mínim de soroll generat en els seus propis circuits i un nivell d'amplificació determinat. Totes dues coses marcaran el senyal més petit que el receptor, en condicions ideals, és capaç d'amplificar fins a un nivell d'audició. Aquest és el Mínim Senyal Discernible (MDS en anglès): qualsevol senyal per sota d'aquest llindar serà inaudible.

Els nivells d'entrada en antena situats entre el Mínim Senyal Discernible i el Punt d'Intercepció constitueixen la gamma de senyals que aquest receptor serà capaç de rebre i l'anomenem Rang Dinàmic i, com més gran sigui, millor serà el receptor. Qualsevol senyal més feble o més fort que aquest rang dinàmic no serà intel·ligible per l'operador.

## Conclusió

En aquest article hem parlat fonamentalment d'amplificadors, però tot el que s'ha dit és perfectament aplicable a qualsevol dels altres circuits lineals. Per exemple, un filtre es comportarà de forma lineal, però si anem augmentant la potència, arribarà un punt que saturarà les inductàncies i deixarà de ser-ho. Igualment per a un commutador a díode: si augmentem la potència, el díode deixa de comportar-se com un interruptor per passar a rectificar part del senyal....

Comprendre la natura dels senyals de ràdio, les limitacions dels nostres instruments i els fenòmens que succeeixen a dins dels nostres equips de ràdio ens ha d'ajudar a fer millors els nous dissenys i operar amb més cura els equips actuals.