

# El transmissor sostenible

Del conjunt de dispositius dels subsistemes de comunicacions que configuren un transmissor, l'amplificador de potència (AP) de radiofreqüència (RF) és el que consumeix més energia. Per intentar reduir al màxim aquest consum, sense deixar de mantenir una determinada qualitat de servei, s'ha obert un seguit de línies de recerca en diferents àrees de l'Enginyeria de Telecomunicació, una de les quals es resumeix a continuació

L'increment mitjà anual del tràfic de dades en xarxes mòbils és del voltant d'un 400% i com que s'espera que continui com a mínim al mateix ritme en els propers anys, segur que es traduirà en un augment també molt significatiu del consum d'energia, que repercuteix de manera negativa en el medi ambient (emissió de gasos d'efecte hivernacle). A més, com que l'espectre radioelèctric és un bé escàs, les solucions proposades per optimitzar el seu aprofitament (eliminar les bandes de guarda, modulacions espectralment més eficients, etc.), augmenten considerablement la demanda de la linealitat dels subsistemes de comunicacions sense fils. Per tot plegat, un dels objectius compartits en moltes de les àrees de recerca en Enginyeria de Telecomunicació consisteix en intentar reduir al màxim el consum d'energia d'aquests subsistemes, tot mantenint una determinada qualitat de servei.

Dins dels subsistemes que conformen un transmissor, l'amplificador de potència (AP) de radiofreqüència (RF) és un dels dispositius que més consumeix, arribant fins i tot a representar un 70% del consum total del transmissor. D'altra banda, els actuals estàndards de comunicacions (UMTS,

LTE, WiMAX) utilitzen modulacions espectralment eficients, multipotadora, d'envoltant no constant i que presenten una gran relació de potència de pic a potència mitjana (*peak-to-average power ratio* - PAPR). Això comporta que en un transmissor Cartesià clàssic, per poder garantir la qualitat del senyal en l'amplificació, s'utilitzin APs lineals (classe A, AB) operant amb grans nivells de *back-off* (i.e. nivell de separació en dBs de la potència mitjana del senyal respecte al punt de compressió a 1 dB de l'AP). Tenint en compte que l'eficiència dels APs és major quan més vora del punt de compressió es treballa, l'ús d'APs lineals amb aquest tipus de senyals resulta força ineficient des del punt de vista energètic.

Per intentar pal·liar el compromís entre linealitat i eficiència, les tècniques de linealització a nivell de sistema: *Cartesian feedback*, *feedforward* o la predistorsió digital (*digital predistortion* - DPD), són capaces d'estendre el rang lineal dels amplificadors de potència. L'adequada combinació de tècniques de linealització amb tècniques orientades a la reducció del PAPR dels senyals modulats permeten treballar amb menys *back-off*, és a dir, més a la vora de la zona de compressió i per tant en la zona més eficient, a la vegada que preservant els requeriments de linealitat. Així doncs, per exemple, mentre els APs classe AB presenten eficiències que oscil·len entre el 5 i el 10 % quan s'operen amb nivells de *back-off* signifi-

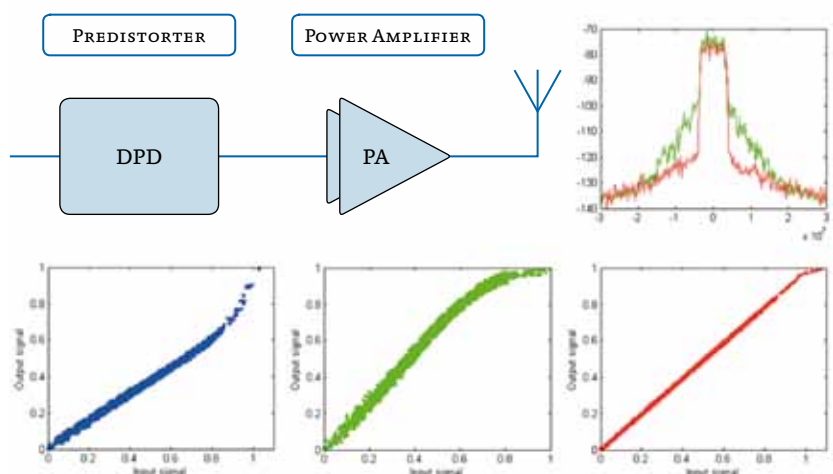


Figura 1. Diagrama de blocs dels subsistemes d'amplificació i predistorsió.

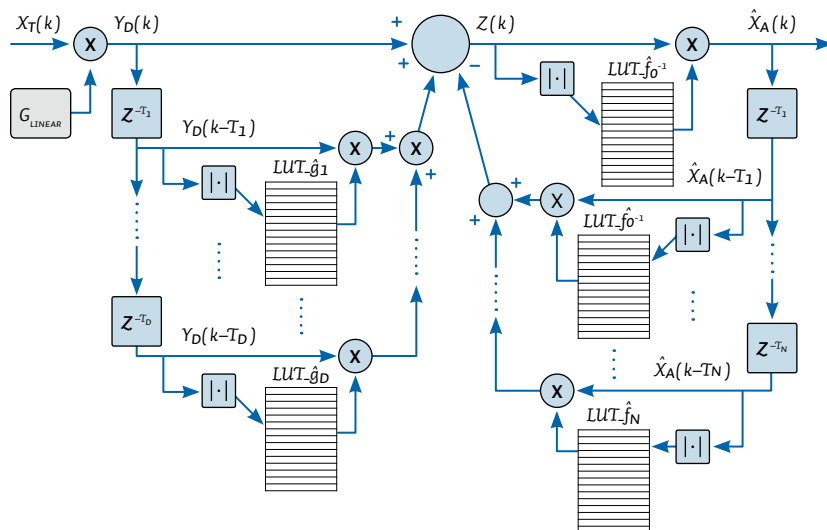


Figura 2. Estructura d'un DPD basat en un model NARMA i implementat mitjançant LUTs.

catius, a l'aplicar tècniques de reducció de PAPR combinades amb DPD adaptativa, l'eficiència de tot el subsistema amplificador se sol incrementar en un factor d'entre 3 i 5 vegades.

Finalment, gràcies a la velocitat i capacitat de càlcul dels actuals dispositius de processament digital (*digital signal processor* - DSP, *field programmable gate array* - FPGA) és possible el disseny d'arquitectures transmissores orientades a la gestió eficient de l'energia. Mitjançant l'ús de topologies més eficients, com poden ser les basades en una modulació dinàmica de la càrrega (l'amplificador Doherty o l'arquitectura LINC) o bé les basades en l'alimentació dinàmica dels APs (*envelope tracking* - ET o *envelope elimination and restoration* - EE&R), es poden aconseguir valors d'eficiència superiors al 50%.

### Predistorsió digital adaptativa

La predistorsió digital (DPD) és una de les tècniques de linealització actualment més utilitzades per compensar el comportament no lineal d'un AP (operant amb senyals modulades multinivell i de banda ampla), els efectes del qual es manifesten tant en forma de distorsió de la constel·lació transmesa (distorsió dins de la banda de transmissió), com en forma de recreixement espectral que perjudica la relació senyal a soroll en

els canals adjacents (distorsió fora de banda). Així doncs, la DPD resulta molt útil per mitigar els efectes de distorsió no lineal que apareixen quan s'utilitzen dispositius altament eficients però a la vegada molt no lineals (p.e. APs commutats classe D, E, F) o topologies eficients com és el cas del LINC, ET o EE&R.

La tècnica de predistorsió (Figura 1) consisteix en precedir l'AP amb un bloc predistorsionador que sigui capaç de reproduir el comportament invers de l'AP i d'aquesta manera contrarestar la distorsió no lineal generada per aquest.

Una forma eficient d'implementar la funció de predistorsió en un processador digital sense introduir un excésiu

cost computacional és mitjançant arquitectures basades en taules de memòria (*look-up tables* - LUTs). A mode d'exemple, la Figura 2 mostra l'estructura d'un DPD implementable en una FPGA, que està basat en un model NARMA (*nonlinear auto-regressive moving average*) i que és capaç de compensar tant el comportament no lineal com els efectes de memòria de l'AP. Enllaç tancat és possible dissenyar el DPD de manera que sigui capaç d'adaptar-se a qualsevol nova situació, la qual cosa fa més robust tot el conjunt transmissor.

### Topologies Eficients

Alguna de les tècniques basades en la modulació dinàmica de la càrrega que tot i no ser noves s'han tornat a considerar amb força són: l'arquitectura LINC i l'amplificador Doherty.

L'arquitectura LINC (*linear amplification with nonlinear components*), proposada ja per Cox el 1974, es basa en la separació del senyal d'entrada en dos senyals d'envoltant constant on la informació està continguda a la fase. Aquests dos senyals s'amplifiquen de forma independent mitjançant APs commutats (altament eficients) o bé APs lineals operats en saturació. A la sortida dels APs els dos senyals es recombinen per donar lloc al senyal original amplificat (Figura 3).

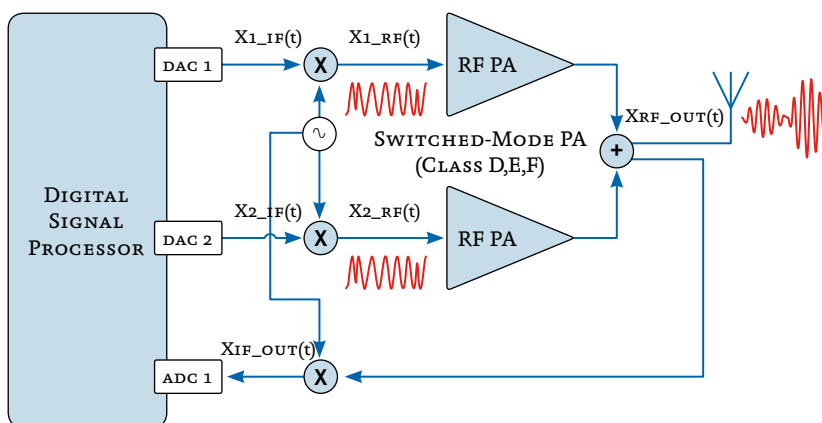


Figura 3. Diagrama de blocs d'un transmissor LINC.

Un dels subsistemes claus en l'arquitectura LINC és el combinador de potència, ja que si aquest és dissipatiu el senyal resultant és força lineal però la quantitat d'energia dissipada degrada l'eficiència del sistema. Si pel contrari s'utilitza un combinador no dissipatiu, cadascun dels APs passa a comportar-se com una càrrega variable per a l'altre, i en conseqüència aquesta modulació dinàmica de la càrrega provoca distorsió no lineal que cal compensar mitjançant DPD.

L'amplificador Doherty, proposat per W. Doherty el 1936, és capaç d'utilitzar el concepte de modulació dinàmica de la càrrega per obtenir bons nivells d'eficiència tot mantenint una certa linealitat. Tot i així, sempre hi ha distorsió no lineal residual que es pot compensar mitjançant la DPD. Així doncs, l'amplificador Doherty és una aproximació a la solució ideal que consistiria en tenir una càrrega que s'adaptés al seu valor òptim (des del punt de vista de l'eficiència) en funció de la tensió del senyal d'entrada.

De manera alternativa, per obtenir simultàniament grans nivells de linealitat i eficiència és duu a terme una 'alimentació dinàmica de l'AP', com per exemple és el cas d'un AP amb seguiment d'envoltant (*envelope tracking* – ET) o el transmissor polar (*polar transmitter* – PT), que és una variant de la tècnica d'eliminació i restauració de l'envoltant (*envelope elimination and restoration* – EE&R).

La tècnica d'ET (**Figura 4-b**) consisteix en alimentar un AP lineal de forma dinàmica. Així doncs, l'anomenat amplificador d'envoltant ha de ser capaç de subministrar els corrents i tensions necessaris per alimentar el drenador de l'AP tot seguint l'envoltant del senyal d'entrada, d'aquesta manera la tensió d'alimentació s'adapta al marge dinàmic

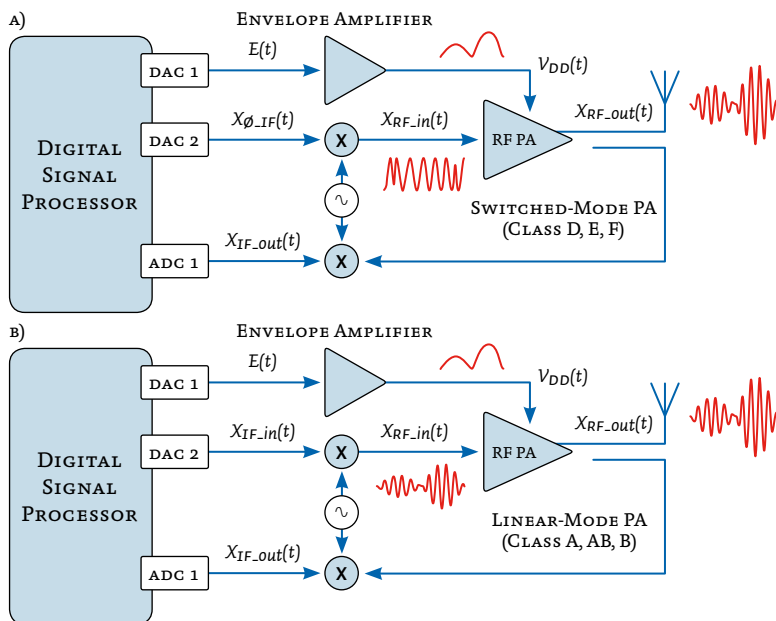


Figura 4a i 4b. Diagrama de blocs: a) transmissor polar (PT) i b) AP amb seguiment d'envoltant (ET).

requerit a cada instant. A diferència de la tècnica d'ET, el PT (**Figura 4-a**) utilitza un AP commutat altament eficient responsable d'amplificar el senyal de RF d'envoltant constant i modulats únicament en fase. La informació d'amplitud se li proporciona al senyal de sortida mitjançant la modulació de drenador de l'AP. Més enllà de la distorsió (corregible mitjançant DPD) que apareix per possibles desajustaments entre el senyal de RF i l'envoltant utilitzada en l'alimentació, una de les limitacions tecnològiques actuals que compromet l'eficiència total d'aquest tipus d'estructures és l'amplificador d'envoltant. Aquest ha de ser extremadament eficient des de valors de contínua fins a desenes de MHz (l'ample de banda de l'envoltant es calcula com unes 5 ó 7 vegades l'ample de banda del senyal modulats).

Si bé a l'actualitat existeixen nombroses publicacions i patents referents a aquest tipus de solucions o arquitectures altament eficients, tant sols l'amplificador Doherty està plenament explotat i s'utilitza en transmissors d'estacions base de telefonia. Tot i així, sembla evident que ja s'han assentat les bases per obtenir, en un futur proper, el transmissor plenament sostenible que superi el vell conflicte entre linealitat i eficiència propi del transmissor Cartesià clàssic. \*



**Pere Lluís Gilabert**  
Col·legiat núm. 1740  
Doctor Enginyer de Telecomunicació  
Professor Agregat de la UPC



**Gabriel Montoro**  
Doctor Enginyer de Telecomunicació  
Professor Titular de la UPC



**Eduard Bertran**  
Doctor Enginyer de Telecomunicació  
Professor Catedràtic de la UPC



**Jordi Berenguer**  
Col·legiat núm. 221  
Director de l'Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeroespacial de Castelldefels (BETAC).  
Doctor Enginyer de Telecomunicació.