



Dels tubs de buit als nanotubs

Zenón Navarro*

Ara fa cent anys es va inventar el tríode.¹ Per sort, un amic sabia que l'inventor es deia Lee de Forest i el més fàcil és entrar a Internet i buscar-ho. És difícil imaginar que es pot consultar a Internet «Lee de Forest» si no fos per l'invent de Lee de Forest.

Que John Ambrose Fleming em perdoni! Ell va ser l'inventor del díode de buit a la University College de Londres. Ambrose era probablement un científic brillant, però el gran pas de l'electrònica començà amb la invenció del tríode. Permeteu-me silenciar avui John Ambrose Fleming.

De la informació objectiva que he llegit sobre tecnologia i ciència, relacionada amb els tubs de buit, m'he adonat que havia après moltes coses, però que, en aquest moment, no m'interessen gens. Sospito que a la majoria de lectors els deu passar el mateix.

És poca la llum que travessa aquests boscos d'informació tan espessos. Malgrat tot, en la penombra, em semblà veure el camí que van seguir els esdeveniments científics i tècnics que iniciaren l'electrònica i els que en van fer possible el creixement posterior. He dit «em semblà veure». Són reflexions i alguna peça de coneixement tècnic que fa falta per seguir les conseqüències de l'invent. Que quedi clar que, en aquest escrit, hi ha temes opinables i algunes «veritats» tecnològiques. La meua modesta contribució és posar juntes les dues categories.

En l'invent del tríode hi ha aspectes suggestius, que resumeixo en les frases i qüestions següents, amb les quals configuraré els continguts d'aquest text.

1. Quina mena de persona era l'inventor? Científic? Tecnòleg? Empresari? Publicista?
2. Quin és el principi de funcionament dels tubs de buit? Fenomenologia del primer component «actiu».
3. Per què una activitat, nascuda el 1900, ha tingut conseqüències decisives fins avui?

*Zenón Navarro (Barcelona, 1947) és llicenciat en Física per la Universitat de Barcelona (1969) i treballa al Centre Nacional de Microelectrònica (CNM) a Bellaterra (Zenon.Navarro@cnm.es).

¹Es pot trobar informació buscant en una enciclopèdia o demanant els catàlegs de Ràdio Maymó en una hemeroteca.

4. Què és el que no agradava del tríode? La disminució de dimensions, el preu i l'encapsulació dels components electrònics.

5. Per què es fa investigació en nanotubs?

6. Una mirada a l'economia.

El contingut de l'escrit consistirà en el desenvolupament de cadascuna de les sis qüestions precedents. Les preguntes són més interessants que les respostes que jo puc donar, però intentarem fer-ne una primera aproximació.

Lee de Forest

Neix l'any 1873. Acaba els estudis secundaris a Massachusetts i ingressa a la Scientific School de Yale. Als 26 anys presenta el doctorat i fa de professor universitari. La seva situació era semblant a la d'alguns professors d'aquí i ara. Treballa fonamentalment de professor fins als 29 anys. Després crea diferents empreses per fabricar emissors i receptors de ràdio.

Fa cent anys Lee feia exhibicions públiques dels seus sistemes de comunicacions sense fils i començà a vendre'ls a la US Navy. El 1917 va vendre els drets d'utilització del seu amplificador telefònic Audion. El comprador va ser la AT&T. Us sona aquest nom?

El 1920 tenia 47 anys, i va diversificar esforços. Es va interessar en les *talking motion pictures*, és a dir, el cine sonor i la TV. Estudis anteriors, fets a Alemanya, li van servir de punt de partida.

Fa noranta anys De Forest ja es feia publicitat, va fer emissions de ràdio des de la emissor de ràdio que hi havia a la torre Eiffel. Val a dir que la torre Eiffel pot ser un bon lloc per l'antena, però sospito que De Forest no buscava un lloc discretet. Fins i tot va fer emissions a Nova York amb la música sortida d'un gramòfon. La primera emissor per a la diversió!

Inventa, fabrica, promociona i ven, és clar que era un home excepcional, però devia coincidir amb un entorn econòmic i productiu favorable. Recordo que, a la Grècia clàssica, van fer una màquina que girava gràcies a la força del vapor. L'anomenaren *colípila*. En van fer

una joguina i prou. L'inventor de l'eolípila estava en un entorn diferent al de l'inventor del tríode. Uns dos mil anys després de l'eolípila, encara discutíem sobre la possibilitat de transformar calor en treball mecànic.

Lee de Forest va morir el 1961 als 88 anys amb 300 patents enregistrades i les medalles dels professionals del ram. Però em sembla brillant també per algunes de les seves opinions: l'any 1920 ja deia que la TV era un «gegant adormit» i que la «radioporqueria» l'avergonyia.

El principi de funcionament dels tubs de buit

Tub de buit és el nom que es donà als primers díodes de buit. El tríode és el primer tub de buit que fa una cosa semblant a una vàlvula o una aixeta, però sobre un flux electrònic. És la primera «vàlvula de buit».

El tríode és un tub tancat de vidre on s'ha fet el buit a l'interior. El buit ha de ser prou bo perquè els electrons puguin moure's per dintre amb poques col·lisions. Dins el tub hi ha tres elements metàl·lics amb tres connexions per a un circuit exterior:

- El càtode K és l'entrada del torrent principal d'electrons. En la nostra analogia amb un corrent d'aigua, seria l'entrada d'aigua a l'aixeta.
- La placa o ànode A és la sortida del torrent principal d'electrons. En la nostra analogia amb un corrent d'aigua, seria la sortida d'aigua de l'aixeta.
- La reixa G fa de porta (*gate*) i barra més o menys el pas al corrent principal d'electrons càtode-placa. En la nostra analogia amb un corrent d'aigua, seria la maneta per obrir i tancar l'aigua.

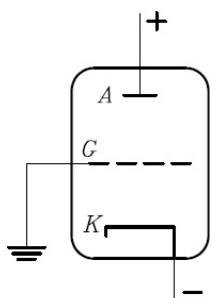


Figura 1

El càtode K s'escalfa fins que allibera electrons per emissió termoiònica. Aquests electrons són les úniques càrregues mòbils que hi ha dins el tub de buit. En molts tríodes hi ha dues connexions addicionals per connectar un calefactor al càtode. No cal considerar aquestes connexions addicionals per entendre'n el funcionament; ens centrarem en els tres elements bàsics: càtode K , ànode A i reixa G . Tot seguit es consideren les possibilitats següents:

Si la reixa no existís (díode de buit):

- En connectar la placa o ànode A a un potencial (+)

respecte al càtode K , els electrons (-) alliberats al càtode K anirien a la placa A (+): el corrent circularia entre càtode i placa.

- En connectar un potencial (-) a la placa A , llavors dins el tub només hi ha les càrregues (-) dels electrons alliberats pel càtode. Amb la placa a potencial (-) els electrons més aviat tornarien a caure al càtode K . No «volarien» pel tub per anar a una placa $A(-)$! El corrent no circularia entre càtode i placa. El tub conduiria en un sentit i no conduiria en el contrari. Seria un díode.

Cal advertir que el moviment dels electrons (-) té sentit oposat al sentit atribuït als corrents en la convenció habitual en electrònica.

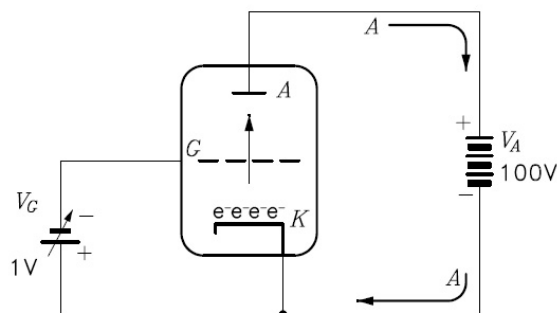


Figura 2

Fent servir la reixa (tríode):

Prenem el potencial 0 V del càtode K com a referència. Connectem la placa o ànode A a un potencial de (+100 V). La reixa G és un elèctrode amb forats (com un filat de galliner). La geometria de la reixa permet que els electrons puguin travessar-la. Dependrà també de la forma del potencial en l'espai interior del tub de buit. La reixa G és a poca distància del càtode K i moltes vegades té una forma envoltant. Per aquestes dues raons un petit potencial connectat a la reixa produeix un gran canvi del potencial a l'espai pròxim al càtode.

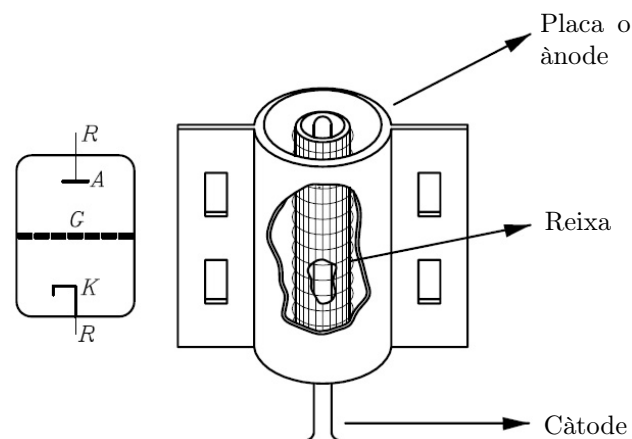


Figura 3

Aquesta disposició dels tres elèctrodes dins el tub

dóna el resultat que es volia. Per aclarir-ho apliquem valors numèrics, d'ordres de magnitud habituals. S'han fabricat tríodes per a aplicacions molt diferents, en alguns casos els valors de l'exemple no encerten ni l'ordre de magnitud, però ens permetrà obtenir-ne un model.²

1. Mantindrem la placa o ànode A a un potencial (+) elevat, 100 V, per exemple.
2. Mantindrem el càtode K (0 V) calent, perquè ens proporcionï electrons per emissió termoiònica.
3. a) Connectem la reixa G a 0 V. La majoria d'electrons que surten del càtode arribaran a la placa (+100 V). Només uns quants electrons es perdran en impactar contra la reixa. El corrent entre el càtode K i la placa A serà gran. Suposem uns 20 mA, per exemple. El corrent de reixa G és negligible.
- b1) Connectem la reixa a $-0,5$ V. No tots els electrons que surten del càtode podran travessar la zona de reixa per arribar a la placa (+100 V). El corrent entre càtode i placa serà més petit que en el cas a . Per exemple, 10 mA.
- b2) Connectant la reixa a $-0,6$ V, el corrent baixa a 3 mA.
- c) Connectant la reixa G a -1 V, el corrent caurà a 0. És la tensió de reixa de tall.

El que hem descrit és un component electrònic que ens permet controlar un corrent important (20 mA) entre càtode (0 V) i placa (+100 V).

El control es fa canviant el potencial de l'elèctrode de comandament, la reixa. El potencial necessari a la reixa és només de fraccions de volt i el corrent que hi circula és molt petit. La potència consumida al circuit de reixa G és molt petita.

En canvi, podem controlar la potència del circuit de placa, que, en el nostre exemple, seria de $2 \text{ W} = 20 \text{ mA} \cdot 100 \text{ V}$.

Cal afegir una circuiteria adequada, però és possible fer servir el petit potencial obtingut de la recepció d'una radiació de radiofreqüència (RF) per aplicar-lo a una reixa. El circuit de placa seguirà les variacions de potencial de la reixa, però els valors recorreguts pel potencial i el corrent seran, al circuit de placa, molt més grans. Ja tenim un amplificador de potència!

Caldrà anar fent diferents amplificacions per obtenir la potència necessària per moure la membrana d'un altaveu. Però ja tenim la ràdio a casa.

Els components electrònics passius obeeixen a relacions lineals entre corrent i potencial. El tríode no és

²No tots els tríodes treballen amb valors semblants als de l'exemple que hem donat. S'han fet vàlvules molt diverses, i a les aplicacions d'alt voltatge i alt corrent encara són una opció vigent. És el cas de l'etapa de potència d'algunes emissores de ràdio de baixa freqüència, són tubs de buit que poden mesurar 1 m d'alçària. Sovint cal refrigerar-los amb aigua circulant. En el seu temps les vàlvules més populars no eren els tríodes. Els més utilitzats van ser els dobles tríodes dins un mateix tub de buit o tubs pentode.

un component «passiu». Permet funcions impossibles amb resistències, bobines i condensadors. El tríode és el primer component «actiu» amb tots els mèrits. Permet «copiar» un senyal elèctric per obtenir-ne un altre amb la potència augmentada. Té tres connexions.



Figura 4: Vista interior d'una ràdio Zenith. (Foto: Enric Cabruja)

Conseqüències d'aquest invent

Amplificar la potència d'un senyal elèctric és el pas que permet que l'electrònica lideri activitats d'interès econòmic, científic i militar. En descriurem les més evidents:

— Les comunicacions. Ja es feia servir l'electricitat com a suport de la informació des del temps del telègraf. El fet de rebre comunicacions, sense connexió elèctrica per fil, obliga a amplificar el senyal captat per una antena per arribar a convertir-lo en un senyal capaç de bellugar la membrana d'un altaveu. L'emissió també fa servir l'amplificació per passar del senyal d'un micròfon al senyal que necessita l'antena d'una emissora de ràdio.

— Els sensors. Hi ha molts observables que poden mesurar-se gràcies a diferències de potencial elèctric, les quals són funció del valor de l'observable. Un sensor és un material o un dispositiu per mitjà del qual podem mesurar aquestes diferències de potencial en el cas de molts observables: temperatura, llum incident, posició, pressió, etc. Per tant, podrem mesurar-les si podem amplificar aquests valors! Les diferències de potencial que generen els sensors són habitualment massa petites. Un termoparell, per exemple, és un bon termòmetre, però dóna mV.

— Ordinadors. Un element amplificador permet construir totes les funcions lògiques de l'àlgebra binària fins i tot biestables per a les memòries.

És una tecnologia que permet mesurar, comunicar i calcular. El suport físic és, en totes aquestes funcions, el mateix: potencials i corrents elèctrics. És possible relacionar les diferents funcions entre si, fins i tot sense que els humans hi estiguin sempre presents, mentre els siste-

mes funcionen i conversen entre ells amb un llenguatge comú: l'electrònica.

De tota manera caldrà esperar l'electrònica «d'estat sòlid» perquè els xips siguin una tecnologia imprescindible. La seva aplicació com a eines de producció marcarà diferències econòmiques decisives en la indústria electrònica i en totes les altres també.



Figura 5: El transformador de l'alimentació de la mateixa ràdio. És la peça més gran i pesada. (Foto: Enric Cabruja)

Limitacions del tríode

- El tríode té una vida limitada. El càtode es desgasta particularment.
- Triga massa temps a commutar de l'estat conductor a l'estat tallat.
- És massa gran de mides i de pes.
- És poc resistent als impactes, a les vibracions i acceleracions.
- En funcionament dissipa una calor important. La temperatura de funcionament és un problema, especialment si s'han de muntar moltes vàlvules en un mateix aparell.
- Necessita unes fonts d'alimentació potents i pesants.
Respecte a això, recordem dos esdeveniments del passat per deixar-ho clar:
 - La imatge dels pobres soldats de la Segona Guerra Mundial, carregats amb aquells equips de transmissions dins una motxilla enorme. Quin mal d'esquena, si sobreviuen!
 - El primer ordinador es va fer amb milers de vàlvules de buit. Ocupava tot un edifici. El temps mitjà entre dues avaries era de l'ordre del minut. Era un ordinador gran i beneït com un diplodocus.

Un xip és un dispositiu que integra centenars de milers de components actius dins un mateix encapsulat. Avui, el fet que contingui centenars de milers de components ja resulta obsolet. Sistemes amb aquesta complexitat no serien possibles amb les antigues vàlvules de buit. El transistor i el xip representen una disminució de les dimensions i un augment de la velocitat si ho comparem amb el vell tríode.

Però l'electrònica d'estat sòlid constitueix un canvi qualitatiu per altres diferències: els components actius, fabricats amb tecnologia d'estat sòlid, no tenen cap dels desavantatges del tríode però el gran avantatge és poder fabricar-ne 100.000 de cop per construir una funció electrònica. Es fabriquen tots alhora i neixen amb les interconnexions i tot.

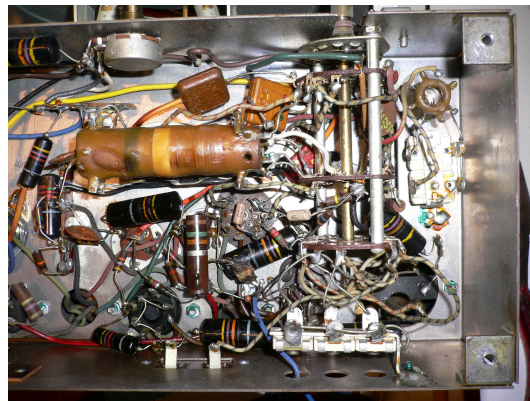


Figura 6: Connexions interiors d'una ràdio. No hi ha placa de circuit imprès. (Foto: Enric Cabruja)

Ja tenim xip. Abans, dels xips, en dèiem *integrats* per diferenciar-los dels components discrets. A més, la fabricació de 100.000 transistors d'un integrat no és gaire més costosa que la de dos transistors discrets.

L'integrat que en resulti serà una peça petita, lleugera, barata i ràpida. Només mostrarà a l'exterior les connexions necessàries per a les alimentacions i les entrades/sortides. Es fabriquen integrats amb milions de biestables.

La recerca en nanotubs

En aquest moment potser hi ha algú que necessita un ordinador molt més potent i molt més petit. Això sembla, perquè es fan grans inversions per aconseguir-ho. Segur que un ordinador, més potent, més petit i més ràpid, el comprarien fins i tot els clients que no el necessiten.

Es busquen dimensions mínimes nanomètriques, de l'ordre d'alguns centenars d'àtoms de silici posats en fila.

Són prou 100 àtoms per considerar-ho un «potencial periòdic indefinit»?

Quants àtoms de dopant correspondrien a 100 àtoms de la malla base? Dos, un, o potser mig? Caldrà repensar les concentracions de dopants. Estem fregant els límits de la «física d'estat sòlid».

Però també sembla que les tecnologies de fabricació queden obsoletes. Els aparells aptes per fabricar components amb tecnologia de silici estan al límit de les seves possibilitats.

És difícil baixar de dimensions fent evolucionar la tecnologia actual. En el millor dels casos evolucionar és

multiplicar per deu el preu dels aparells per reduir-ne a la meitat les dimensions. Les tècniques fotolitogràfiques utilitzades són les primeres (no són les úniques) a quedar fora de servei. S'estan dissenyant equips fotolitogràfics òptics per treballar amb longituds d'ona més curtes com ara UV o raigs X. Hi ha equips e-BEAM que fan fotolitografia amb feix d'electrons. La longitud d'ona associada a un feix d'electrons permet unes dimensions mínimes molt més petites que les que permet la llum UV. El preu d'un e-BEAM (2 milions d'euros) és més alt que el d'un equip de fotolit UV. La producció/hora d'un e-BEAM és baixa, i potser per això s'han construït equips fotolitogràfics òptics EUV (ultraviolat extrem). Els clixés (reticles) incorporen tècniques de *phase shift*. Les últimes meravelles en aparells òptics poden costar 14 milions de dòlars i el preu dels clixés és d'uns 20.000 dòlars. Les dimensions mínimes són 50 nm.

En aquesta situació apareixen les *nanotecnologies* a diverses àrees d'R+D. En el camp electrònic hi ha treballs en *nanotubs*.³ Els nanotubs van ser observats al microscopi electrònic l'any 1991. Sumio Ijima, de l'empresa NEC, analitzava el sutge produït en una descàrrega elèctrica entre dos elèctrodes de carbó. Hi va veure unes estructures de forma semblant a la d'un tros de pasta de macarrons, però milions de vegades més petit.

Els nanotubs són tubs de grafit amb un diàmetre interior d'uns 2 nm. Tenen un comportament metàl·lic o semiconductor depenent de com estiguin enrotllats.

El 1998 es van obtenir alguns transistors que feien servir nanotubs com a canals per conduir corrent elèctric. Els nanotubs no són tríodes en miniatura. Són components que no tindran les limitacions de la física d'estat sòlid i que no es produiran amb els aparells de les actuals fàbriques de xips. Si es fabriquessin en algun lloc, probablement seria en un lloc molt llunyà. Fer-ne un, fotografiar-lo i publicar-ho, no és fabricar.

Una mirada a l'economia

Se suposa que estem escrivint sobre tecnologia i hem fet servir les paraules: *preu, entorn econòmic, producció industrial, importància militar*, etc. No és gens sorprenent, perquè tothom sap que producció, guerra, ciència i tecnologia estan relacionades, però, en el cas de l'electrònica, estan més relacionades que en altres àrees científiques o tècniques.

Quan es repassa la història de l'electrònica es veu que els invents importants en aquest camp han sortit

³Samsung confia a comercialitzar monitors fabricats amb tècniques basades en nanotubs. Diuen que serà per l'any 2007. Sembla que caldrà esperar uns cinquanta anys per poder comprar una CPU feta amb nanotubs. Informem del temps d'espera previst per si algú pensava canviar l'ordinador quan en la fabricació de CPU s'apliqués la tecnologia nanotub. No cal fer-ne gaire cas, les bones previsions per als propers cinquanta anys no es compleixen gairebé mai. Fa uns vint anys es preveia la substitució del silici per semiconductors de compostos III-V com ara AsGa, cosa que ha quedat limitada a l'optoelectrònica.

de les empreses. Això no és tan aclaparador en altres àrees científiques. Els inventors, en electrònica, han estudiat a la universitat, però han fet els invents a les empreses. Ara mateix Samsung va primera en nanotubs; Siemens està invertint per investigar en «fotolitografia òptica avançada» i la unió de Intel-Motorola-Advanced Microdevices gastarà 250 milions de dòlars en «fotolitografia EUV». Probablement les empreses són molt actives en electrònica perquè n'esperen grans beneficis econòmics.

Probablement són comptades les que poden invertir els diners necessaris per treballar en tecnologies realment punta. Són les mateixes empreses, comptades, que tenen la capacitat de producció necessària per treure beneficis de l'aplicació industrial de les descobertes científiques punta.

També hi ha investigadors i tecnòlegs treballant en centres finançats amb diners públics. Com a mínim n'hi ha a tots els països europeus. Suposo que aquests països mantenen l'activitat investigadora en electrònica, perquè la consideren necessària per augmentar la capacitat productiva del país.

Els temes preferents per aquesta investigació pública sembla que són les tecnologies que el país pot fer servir, l'any que ve o l'altre, a les indústries existents o en projecte.

Em sento desorientat quan dic «l'economia del país» en un escrit sobre electrònica. Quan parlem d'electrònica no sé si el país és el Vallès, Catalunya, Espanya, Europa, el G8 o el planeta Terra. Si alguna autoritat ens pot orientar que ho faci. Lectors!, encara que no sigueu una autoritat, també esteu convidats a donar pistes.

Seria bo «sortir de la desorientació» perquè correm el risc de treballar, amb els diners públics del país, per formar excel·lents doctors en tecnologies punta. Tan punta que només trobin feina a les empreses punta, com per exemple Samsung (Corea) i Microsoft (planeta Terra). Abans, la coreana Samsung era també al Vallès; Microsoft, per exemple, contracta experts en programari a l'Índia.

Però hi ha pèrdues anunciades també a l'extrem oposat. Pèrdues com a conseqüència de gastar els diners públics en temes d'artesanía electrònica, que ja estaven als apunts de curs de fa vint anys. Centres d'investigació, més envellits que vells, amb un instrumental antiquíssim, poden patinar per aquest vessant tradicionalista. En tecnologia electrònica, antiquíssim és el que era nou deu anys enrere.

Augmentar la inversió en investigació seria bo, però sortir de la desorientació és bo i necessari.

Agraïments

Voldria agrair als companys del CNM-CSIC, Carles Mateu, Ana Sánchez i Josep M. Cirera, els comentaris que m'han fet durant l'elaboració d'aquest article.