

**Enrique J. Dede García-Santamaría**

**Passat, present i futur  
de l'electrònica**

**La influència de la Universitat  
de València en el seu desenvolupament  
a la Comunitat Valenciana**

**Lliçó magistral**

**llegida en el solemne acte**

**d'obertura del curs**

**2022-2023**







*Passat, present i futur de l'electrònica*

*La influència de la Universitat de València  
en el seu desenvolupament a la Comunitat Valenciana*



# **Passat, present i futur de l'electrònica**

## **La influència de la Universitat de València en el seu desenvolupament a la Comunitat Valenciana**

Llicó magistral llegida en el solemne acte  
d'obertura del curs 2022-2023

**Enrique J. Dede García-Santamaría**

VNIVERSITAT  
E VALÈNCIA



Aquesta obra està sota una Llicència Creative Commons  
Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 4.0 Internacional.

© *Del text*: Enrique J. Dede García-Santamaría, 2023  
© *D'aquesta edició*: Universitat de València, 2023  
*Maquetació*: Publicacions de la Universitat de València

ISBN: 978-84-1118-118-1 (paper)  
ISBN: 978-84-1118-119-8 (PDF)

DOI: <http://dx.doi.org/10.7203/PUV-OA-119-8>

Edició digital



# Índex

- 9 INTRODUCCIÓ
- 10 PASSAT I PRESENT DE L'ELECTRÒNICA
- 37 L'EVOLUCIÓ DE L'ELECTRÒNICA  
A LA COMUNITAT VALENCIANA  
I LA INFLUÈNCIA DE LA UNIVERSITAT  
DE VALÈNCIA EN EL SEU DESENVOLUPAMENT
- 41 EL FUTUR DE L'ENGINYERIA ELECTRÒNICA
- 51 BIBLIOGRAFIA
- 52 RECURSOS ELECTRÒNICS





Excel·lentíssima i Magnífica Sra. Rectora de la Universitat de València,  
Honorable Sra. Consellera d'Innovació, Universitats, Ciència i Societat Digital  
de la Generalitat Valenciana,  
Excel·lentíssimes i Il·lustríssimes autoritats,  
Companyes i companys, amigues i amics, senyores i senyors,

## INTRODUCCIÓ

Aquesta lliçó magistral versa sobre l'electrònica, el seu passat, present i futur, i també sobre la influència que ha tingut la Universitat de València en el seu desenvolupament a la Comunitat Valenciana.

L'electrònica és una branca del coneixement que comprèn la física, l'enginyeria, la tecnologia i les aplicacions que estudien l'emissió, el flux i el control dels electrons o altres partícules carregades elèctricament en el buit i la matèria.

Més concretament, l'electrònica és la branca de la ciència que s'ocupa de l'estudi dels materials, dispositius, circuits, sistemes i conceptes associats que es fan servir per al processament, control i generació de senyals elèctrics, és a dir, per al tractament de la informació, així com els que s'utilitzen per al processament i control de la potència elèctrica.

L'avanç de l'electrònica ha sigut sorprenent al llarg dels darrers vuitanta anys. Així, la primera calculadora electrònica, anomenada ENIAC-I i construïda a base de vàlvules electròniques, va ser presentada al juny del 1945 a la Universitat de Pennsilvània pels professors Eckert i Mauchly. Ocupava una superfície de 140 m<sup>2</sup>, consumia 150 kW i pesava 30 tones. Avui dia tenim ordinadors portàtils amb una potència de càlcul molt superior a la d'ENIAC-I que pràcticament caben a la butxaca.

### *Els orígens de l'electrònica*

Els orígens de l'electrònica es remunten al començament del segle XVII. Les experiències que es van desenvolupar a partir d'aquesta data i en els segles següents van establir les bases, tant teòriques com experimentals, d'aquesta disciplina.

A la primavera de l'any 1600 es va publicar a Londres un llibre titulat *De magnete, magneticisque corporibus, et de magne magnete tellure* ('Sobre els imants, els cossos magnètics i el gran imant terrestre'), més conegut com a *De magnete*. Després d'un gran nombre d'experiments, el seu autor, William Gilbert, va deduir que tot el globus terraquí devia ser un gran imant.

Calgué esperar més d'un segle perquè es produïren resultats importants en els experiments desenvolupats durant aquest període. A Anglaterra, cap al 1840, Désaguliers experimentava amb l'electricitat. Duent a terme experiments elèctrics en el buit i en l'aire, va demostrar que la humitat hi influïa notablement. A aquest científic li devem la introducció del concepte *conductor* en l'electrotècnia.

Tanmateix, potser les experiències sobre l'electricitat més cèlebres d'aquella època provenen d'Amèrica, en concret de Franklin. El 28 de juliol de 1747 enviava a la Reial Societat de les Ciències de Londres un comunicat sobre la conducció elèctrica en l'aire. Franklin no havia sigut el primer a pensar que un llamp no era sinó una gran descàrrega elèctrica, però sí que va ser el primer que ho va demostrar experimentalment.

Durant aquells anys, l'únic descobriment notable no va ser la demostració que en l'electricitat hi havia amagada una gran energia, sinó que, a més, es va trobar com es podia emmagatzemar l'energia elèctrica. Es va descobrir l'ampolla de Leyden com a element emmagatzemador de l'energia elèctrica. Va ser Volta qui, en la segona meitat del segle XVIII, va introduir el concepte de condensador, que és, en conseqüència, el primer element passiu dels circuits electrònics. Dos segles més tard de la difusió de les experiències de Gilbert sobre magnetisme, es publicava en la revista *Philosophical Transactions* de Londres un text transcendent en la història de l'electricitat, en el qual Volta descrivia un invent que

«generava» energia elèctrica: la pila elèctrica, que va ser considerada en el seu temps un *perpetuum mobile*.

En relació amb el magnetisme, durant els dos segles següents a l'esmentat treball de Gilbert *De magnetibus* no hi havia hagut cap resultat notable. El text *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, publicat el 21 de juliol de 1820 per H. C. Ørsted, descriu un experiment que lliga electricitat i magnetisme. Aquest treball va provocar una commoció en la comunitat científica, que immediatament va començar a proposar noves experiències i teories sobre la connexió entre l'electricitat i el magnetisme.

Gray ja havia descrit l'any 1729 que uns materials conduïen l'electricitat i altres no. Volta va anar una mica més enllà i va introduir un nou concepte: els semiconductors, que estaven a mig camí entre conductors i aïllants. D'altra banda, Franklin havia descrit l'electricitat positiva i la negativa. Però no va ser fins a l'any 1826 que tots els conceptes anteriors van ser totalment compresos. En aquell any, Ohm va publicar el seu treball sobre la connexió entre la resistència elèctrica del material, la tensió i el corrent.

### *Les primeres aplicacions de l'electrònica*

La tardor de l'any 1820 va ser un dels temps més productius en la història de l'electrodinàmica. Va ser llavors que es van començar a establir les bases de l'electromagnetisme. Potser el resultat més notable d'aquella època ens ve d'Ampère. Al setembre del 1820 demostrava que el corrent elèctric no solament exerceix força mecànica sobre un imant, sinó també sobre un altre conductor pel qual circule el corrent elèctric. Generadors, motors i transformadors existeixen gràcies a la inducció electromagnètica.

Les primeres idees sobre la telegrafia sorgeixen immediatament després que Ørsted presentara el seu descobriment el 21 de juliol de 1820. No obstant això, l'impuls definitiu a la comunicació telegràfica el donarà S. Morse. El 7 d'abril de 1838 va patentar el seu telègraf a Washington i dos anys més tard va proposar l'alfabet punt-ratlla, que porta el seu nom. La primera línia telegràfica

amb tecnologia Morse va enllaçar les ciutats de Washington i Baltimore, i va ser inaugurada el 27 de maig de 1844. El desenvolupament de la telegrafia va ser tan vertiginós que, ja el 1851, Reuter va inaugurar a Londres l'Agència Reuter.

La llei d'inducció de Faraday tingué repercussions pràctiques molt importants per a la transformació de l'energia elèctrica en mecànica, és a dir, per al desenvolupament dels motors elèctrics. L'italià Paccinotti, el belga Gramme, l'anglès Wheatstone i l'alemany Siemens van ser els inventors més acreditats en els anys seixanta i setanta del segle XIX en la concepció de motors elèctrics.

Així doncs, l'equador d'aquell segle marca un punt d'inflexió important en la història de l'electrònica. Tots els esforços científics anteriors van conduir a resultats pràctics. A més, cada vegada es feia més palès el fet que l'electricitat hauria de tenir un paper molt important en el desenvolupament industrial. W. Siemens va fundar, l'any 1847, la primera empresa electrònica alemanya i, a Suïssa, Hipp va fundar el primer taller electrònic el 1850. L'electricitat teòrica i científica donava pas a la tècnica elèctrica que avui dia rep el nom d'electrotècnica.

De manera anàloga al que havia passat amb el desenvolupament de la telegrafia, també en la telefonia, després de llargs anys d'assajos físics a Europa, van guanyar la batalla pràctica els Estats Units. El professor A. G. Bell, escocès de 29 anys, i Gray, de Chicago, van marcar, mitjançant la seua patent del 14 de febrer de 1876, una nova fita en les comunicacions.

La primera transmissió telefònica intel·ligible, la va fer Bell a la Universitat de Boston el 10 de març de 1876. IMés tard, el 12 de febrer de 1877, va presentar el seu telèfon a l'Institut Essex de Salem davant de sis-cents assistents, i la primera línia telefònica del món es va posar en funcionament a Boston el 4 d'abril de 1877.

El desenvolupament de les línies de distribució elèctrica va seguir un camí paral·lel, en els anys vuitanta del segle XIX, al de les línies telefòniques. Així, el 1879 W. Siemens introdueix el concepte *electrotècnica* per a l'electricitat aplicada. Aquests anys poden ser considerats com els anys del naixement de l'electricitat aplicada, que més endavant rebria el nom general d'electrònica.

Així mateix, en els anys vuitanta del segle XIX es va desenvolupar plenament la segona revolució industrial mitjançant l'ús de l'energia elèctrica com a font

d'energia en el sector industrial. Paral·lelament, la telefonia, el transport elèctric i la il·luminació elèctrica constituïren les fites bàsiques que més van influir en el desenvolupament ulterior de la història de l'electrònica i de la indústria electrònica en aquesta primera fase.

Les primeres centrals elèctriques havien sigut projectades per a generar corrent continu. El sistema actual d'alimentació industrial, la xarxa trifàsica, va ser desenvolupat a la primeria de la dècada de 1890 gràcies, fonamentalment, a l'invent del motor d'electricitat alterna trifàsic de Dolivo-Dobrowolsky i C. Brown el 1889. Llavors, Dolivo-Dobrowolsky treballava en l'empresa AEG (Frankfurt) i C. Brown seria anys més tard, concretament el 2 d'octubre de 1891, el fundador, juntament amb W. Boveri, d'una empresa multinacional suïssa del sector electrònic coneguda llavors com a Brown-Broveri (BBC) i actualment per ABB.

La segona dècada del segle XIX no solament va ser summament important en l'aspecte del desenvolupament pràctic de l'electricitat, sinó que també ho va ser en l'aspecte teòric. Thomson va desenvolupar, el 1853, les equacions bàsiques dels circuits oscil·lants. J. C. Maxwell va publicar el 1865 el treball «A dynamical theory of the electromagnetic field» en la revista *Physical Transactions*. J. H. Poynting va demostrar en «On the transfer of energy in the electromagnetic field», que es va publicar en *Philosophical Transactions*, un resultat sorprenent deduït a partir de les equacions de Maxwell: l'energia elèctrica no solament es propaga per cable, sinó que també es pot propagar en l'aire o en el buit.

H. Hertz, professor de Karlsruhe, va aconseguir demostrar experimentalment l'any 1886 l'existència d'aquestes ones electromagnètiques. Hertz treballava amb oscil·ladors de 100 MHz que ja tenien capacitat d'emissió d'energia electromagnètica en l'espai. Aquestes ones van ser batejades per Hertz com a «ones de propagació de la força elèctrica».

El 1899, Guglielmo Marconi va realitzar experiències de radiotransmissió entre Chamonix i el Mont-Blanc. El 1900 es va instal·lar a Brussel·les la primera emissora i el 1901 s'enviaven telegrams entre Brussel·les i Anvers. El 1902 ja era possible enviar notícies d'Anglaterra als Estats Units i a partir de l'any 1907 la comunicació radioelèctrica entre Europa i Amèrica era habitual.

Molts consideren Nikola Tesla el vertader inventor de la ràdio, encara que va ser Marconi qui en va presentar la patent l'any 1904. Com a conseqüència, Marconi va rebre el 1909 el Premi Nobel de Física juntament amb K. F. Braun.

### *La ràdio i la televisió*

Com a aplicació de l'efecte Edison, A. Fleming patentava l'any 1904 el díode termoiònic com a detector de senyals elèctrics. Fleming es va basar per a la seua invenció en el fet conegut que, en un tub de buit amb un ànode fred i un càtode calent, el corrent només circula en un sentit.

Un any més tard, un enginyer de la Western Electric Company, l'americà Lee de Forest, patentava a Amèrica un dispositiu semblant al de Fleming i que va ser anomenat *audió*.

L'any 1906, Von Lieben, a Viena, va incorporar al díode termoiònic un tercer elèctrode anomenat reixeta. El tríode, que podia controlar el flux d'electrons a través de la reixeta, havia nascut, i un any més tard De Forest el va incloure com a amplificador de senyals de radiofreqüència.

El tríode va ser la base dels sistemes de ràdio per a l'amplificació i modulació dels senyals que es volien transmetre. Això permetia realitzar una amplificació del senyal mitjançant amplificadors sintonitzats a una freqüència única d'eixida, anomenada *freqüència intermèdia*. Aquest sistema de transmissió i recepció ha perdurat fins avui amb el nom de *superheterodi* i és l'únic que es va fer servir en la tècnica de modulació en amplitud.

La radioemissió va necessitar el coneixement de la modulació, que ja havia sigut estudiada teòricament el 1914 per C. Englund, el qual va descobrir les bandes laterals típiques de la modulació en amplitud. Així mateix, va començar a usar-se el tríode com a modulador en la segona dècada del segle XX, i s'hi van aconseguir nivells alts de perfecció gràcies als treballs de H. J. van der Bijl, Colpitts i C. White, entre altres.

Un altre gran protagonista de l'aplicació del descobriment de Hertz, i que en aquests anys va començar a adquirir una importància creixent, va ser la te-

levisió. El disc de Nipkow, patentat el 1884, va ser el més emprat fins al 1930, aproximadament, fins al punt que el primer sistema comercial de televisió desenvolupat per la Bell System l'any 1927 feia servir aquest disc.

A. C. Swinton va proposar, el 1908, un sistema completament electrònic en què la part electromecànica del transmissor era substituïda per un tub de raigs catòdics el doll d'electrons del qual es dirigia sobre una placa de cèl·lules de seleni, desenvolupant així un sistema de televisió tal com avui la coneixem. A Londres es va inaugurar, el 2 de novembre de 1936, la transmissió regular d'imatges. Aquesta, doncs, es pot considerar la data de naixement de la televisió actual.

La transmissió sense fil de l'energia elèctrica va conduir al desenvolupament de dos productes electrònics comercials força populars: la ràdio i la televisió; tanmateix, aquests productes no van ser els únics derivats del descobriment de les ones hertzianes. Així, l'any 1922, Taylor i Young van demostrar experimentalment la detecció de vaixells mitjançant l'ús d'ones de ràdio i vuit anys més tard van descobrir que la detecció d'avions també era possible mitjançant les ones hertzianes. El 1939 es comença a emprar el radar a Anglaterra i als Estats Units per a la detecció d'avions.

Al començament de la Segona Guerra Mundial, Hedwig Eva Maria Kiesler, coneguda actriu de nom artístic Hedy Lamarr, i el compositor George Antheil van desenvolupar la patent d'un sistema guiat dels torpedes que utilitzava l'espectre eixamplat i la tecnologia de salt de freqüència. Encara que l'armada dels Estats Units no va adoptar aquesta tecnologia fins a la dècada dels seixanta, els seus treballs van ser el fonament de totes les tecnologies sense fil de què disposem en l'actualitat, com la wifi, el GPS i el bluetooth.

El 1904, gràcies a la iniciativa de J. Stark, va eixir a la llum el primer número de la revista *Radioaktivität und Elektronik*. Per primera vegada apareixia la paraula *electrònica* en el títol d'una revista. Aquest concepte abraçava els aparells i mètodes associats que funcionaven gràcies al lliure moviment dels electrons. Des del principi, es van distingir dues branques importants dins del camp de l'electrònica: l'electrònica de senyal i l'electrònica de potència. La primera manejava senyals elèctrics i la segona, potència elèctrica.

## *Els inicis de l'electrònica de potència*

Paral·lelament al desenvolupament de la ràdio i la televisió, tot i que amb un ressò popular molt menor, es duïen a terme certes experiències d'aplicació de l'energia elèctrica que donarien com a resultat l'electrònica de potència. L'inici d'aquestes experiències daten de l'any 1901, quan P. Cooper Hewitt va demostrar experimentalment el funcionament de la làmpada de vapor de mercuri a la Universitat de Columbia, a Nova York.

Un any més tard, el mateix Cooper Hewitt patentava, en concret el 19 de desembre de 1902, el «rectificador per a corrent altern», el descobridor del qual va comentar: «És una invenció de gran utilitat en els casos en què es requereix corrent continu i només es disposa d'un subministrament d'altern». Les centrals elèctriques generaven, quasi totes, energia alterna, i els ferrocarrils, els tramvies i la indústria electroquímica, els consumidors més importants d'energia elèctrica aleshores, requerien corrent continu.

L'any 1912, B. Schaefer va presentar a Darmstadt la seua tesi doctoral, *Sobre rectificadors de vapor de mercuri per a altes potències*, en la qual exposava la resolució del problema tècnic del manteniment del buit en un gran volum. Poc després, el 1913, es va posar en funcionament a l'hospital infantil de Zuric la primera gran instal·lació rectificadora. Havia nascut l'era de l'electrònica d'alta potència. La conversió electrònica de l'energia elèctrica havia abandonat els reduïts espais dels laboratoris per a penetrar en l'ampli món de la indústria. Al principi, el desenvolupament de l'electrònica d'alts corrents va anar paral·lel al de baixos corrents. Així, Fleming havia patentat el seu díode de buit tres anys després que Hewitt patentara el rectificador de vapor de mercuri. La forma d'operar de tots dos descobriments era el mateix, però el principi físic dels dispositius era totalment diferent.

I si bé Thomas, col·laborador de Cooper Hewitt, ja el 1903 havia proposat el control del rectificador de mercuri i Langmuir patentava el 1914 la reixeta per a aquesta làmpada de mercuri, no va ser fins als anys trenta que es va iniciar el desenvolupament pràctic de rectificadors controlats amb làmpades de mercuri. A partir d'ací es va desenvolupar una gran varietat de circuits especials. No només es podia transformar el corrent altern en continu, sinó que, gràcies als



rectificadors controlats, es podia obtenir la conversió inversa, és a dir, de continu a altern. Es van construir sistemes de potència que transformaven la freqüència de la connexió en una altra freqüència. Aquests dispositius no solament podien transformar altern en continu, sinó també totes les altres possibilitats, és a dir, continu-altern i altern-altern. Aquest tipus de circuits se'ls va batejar com a «*convertidors* de potència».

En contraposició a la popularitat de l'electrònica de la informació, gràcies a la ràdio i la televisió, el gran desenvolupament experimentat per l'electrònica de potència amb prou feines va ser percebut pel públic. El fet que, l'any 1915, a Zuric, per primera vegada en la història del transport, es posaren en circulació els tramvies elèctrics gràcies a l'existència de la conversió electrònica de l'energia, a penes va arribar al gran públic. Tampoc el fet que, per primera vegada en la història europea, Anglaterra i Europa estigueren connectades mitjançant la mateixa línia de distribució d'energia elèctrica, gràcies a les làmpades de vapor de mercuri. Que l'electrònica de potència es trobava darrere de tots els avanços de la primera de segle no era un fet de domini públic. Metros, tramvies i trens de llarga distància requerien convertidors de potència.

Així mateix, els oients de ràdio mai no van saber que per a l'alimentació de les emissores es requeria l'existència de rectificadors de mercuri. També l'alumini es produïa amb grans instal·lacions rectificadores. Aplicacions com les que s'han esmentat i moltes altres requerien l'electrònica de potència per al seu funcionament.

Tot i que la tècnica de rectificació amb làmpades de mercuri havia nascut als Estats Units, aquesta va progressar més ràpid a Europa, sobretot perquè en aquest continent el transport ferroviari era elèctric, a diferència del que passava als Estats Units, on estava basat en el carbó com a font d'energia. Aquesta és la raó per la qual les grans instal·lacions de conversió energètica van tenir un gran desenvolupament a Europa, mentre que els Estats Units van quedar endarrerits en aquest camp.

L'anàlisi matemàtica dels circuits rectificats de corrent altern a corrent continu va ser iniciada l'any 1905 per K. P. Steimetz. Ell va ser el fundador de l'electrotècnica teòrica i va introduir el concepte de reactància en l'electrònica, així com el càlcul amb nombres complexos per a l'anàlisi de circuits i sistemes.

## *El trànsit de l'electrònica de buit a l'electrònica d'estat sòlid*

La introducció dels elements semiconductors en l'electrònica data dels primers anys del segle XX. En aquesta època es van emprar els anomenats *detectors de cristall* per a la detecció d'ones de ràdio i es van provar gran quantitat de materials per a fabricar-los.

El 1906, H. H. C. Dunwoody va patentar un detector d'ones de ràdio de carbó i silici pur, i amb aquesta finalitat va ser emprat en aquells anys per Picard. A causa del desenvolupament de l'electrònica de buit, aquests components d'estat sòlid van caure en l'oblit en la seua aplicació pràctica fins a mig segle més tard. No obstant això, els treballs teòrics, i més tard els experimentals, van ser intensos. Així, a partir del començament del segle XX es van iniciar una sèrie de treballs la importància dels quals es faria palesa quasi mig segle després.

En l'aspecte teòric, Drude va elaborar a la primavera del 1900 la teoria, que en podríem dir «clàssica», de la conducció elèctrica, que H. A. Lorentz va reelaborar utilitzant l'estadística de Maxwell-Boltzmann i l'equació de transport d'aquest últim, per aconseguir la justificació teòrica de la llei d'Ohm i una expressió quantitativa per a la conductivitat elèctrica.

El model de Lorentz i Drude no proporcionava dades concordes amb els resultats experimentals sobre la calor específica dels metalls, que resultava ser més baixa que la prevista a partir dels electrons de conducció. En aquest sentit, A. Einstein va elaborar-ne el 1911 un model bastant simple, consistent a suposar que la calor específica dels sòlids és deguda a les vibracions de la xarxa i que aquestes vibracions tenen la mateixa freqüència per a tots els punts. La primera part va resultar ser correcta, però no la segona, que només oferia resultats concordants amb l'experiència a temperatures no gaire baixes, on no es complia la llei de Dulong i Petit.

L'any 1912, Debye va modificar el model d'Einstein considerant els àtoms dels cristalls com a oscil·ladors acoblats que poden propagar ones elàstiques amb una freqüència que varia en un ampli rang de valors. Tot i que així s'obtenien encara alguns resultats aproximats, les prediccions sobre la calor específica a la regió de baixes temperatures van ser superiors a les del model d'Einstein. Potser

el seu mèrit més destacat va ser el fet de proporcionar una base per a diverses investigacions posteriors més detallades.

L'any 1933, M. Blackman va estudiar amb un cert detall algunes modificacions de la teoria de Debye i va arribar a la conclusió que, en alguns casos específics, el procediment de Debye pot portar a errors notables i que, en aquests casos, és millor usar el procediment de Born-von Karman.

D'altra banda, van sorgir altres punts conflictius: el coeficient de Hall variava de signe en certs cristalls i el recorregut lliure mitjà deduït de l'efecte Hall resultava molt més gran que els espais interatòmics i augmentava a mesura que baixava la temperatura, contràriament al que es preveia.

Aquests inconvenients van quedar resolts aplicant l'estadística de Fermi-Dirac als electrons de conducció, en principi considerats electrons lliures en un potencial de xarxa nul (Sommerfeld, 1927), i així quedava resolta, en primer lloc, la seua contribució a la calor específica dels sòlids; en segon lloc, la conductivitat (que va coincidir amb la de Drude), i, en tercer lloc, el paramagnetisme de Pauli.

Més tard, davant la necessitat d'explicar el comportament divers dels sòlids (metalls, semimetalls, semiconductors i aïllants) des del punt de vista elèctric, es va desenvolupar la teoria d'electrons quasi lliures i electrons sotmesos a un fort lligam. Amb aquests dos mètodes apareixen les bandes d'energia prohibida, que expliquen la conducta dispar dels diferents tipus de materials, i el temps de relaxació troba sentit físic, encara que per al cas dels metalls les conclusions són les mateixes que amb la teoria de Sommerfeld.

El primer treball sobre la possibilitat de controlar el corrent en semiconductor es publica l'any 1938 en la revista *Zeitschrift für Physik*. Hilsch i Pohl, en l'article «Control del corrent en cristalls amb tres elèctrodes», presentaven un model d'un díode de junció al qual se li incorporava un elèctrode de control consistent en un fil de platí. El 1939, el físic alemany Walter Schottky va explicar teòricament el procés de conducció en juncions PN i establia així les bases teòriques del comportament dels semiconductors.

Els anys quaranta del segle XX van ser fonamentals per al descobriment ulterior del transistor. En aquella dècada es van posar les bases teòriques del comportament dels rectificadors semiconductors. Les aportacions més importants

es deuen al físic nascut a la Xina W. A. Brattain, a l'americà A. H. Wilson, a l'anglès N. F. Mott, a l'alemany W. Schottky i al rus B. Davydow.

El 1946, després de la Segona Guerra Mundial, es va formar en l'empresa Bell Laboratories un equip reduït de físics dirigit per W. Shockley per desenvolupar un programa d'investigació sobre semiconductors. El treball va finalitzar dos anys més tard amb el descobriment, no planejat, del transistor (acrònim de l'anglès *transfer-resistor*, 'resistor de transferència'), i el 23 de desembre de 1947 va veure la llum el primer element amplificador semiconductor.

Aquest transistor descobert el 1947 era del tipus de puntes de contacte. Aquest primer gran èxit de la nova electrònica va ser efímer, perquè un any més tard es va fer un pas de gegant en l'avanç d'aquesta disciplina amb la invenció del transistor bipolar per part d'investigadors de la Bell Laboratories, també dirigits pel físic Shockley, que va rebre per això el Premi Nobel de Física el 1956. Les junccions realitzades eren de tipus metal·lúrgic i les tres zones rebien, respectivament, els noms de col·lector, emissor i base (si bé la seua disposició física era col·lector-base-emissor).

La revista *Electronics* va publicar el descobriment del transistor al setembre del 1948 i el va anomenar *triode cristal·lí*. «El transistor substitueix els tríodes de buit en moltes aplicacions i obri un nou camp en l'electrònica», així concloïa de manera profètica l'article. Com a aplicació dels transistors se citava la seua implantació en els radioreceptors. Així doncs, el primer treball de recerca sobre el comportament de díodes i transistors de junció es deu a Shockley i es recull en el seu llibre, ja clàssic, *Electrons i buits en semiconductors*, publicat el 1950. La teoria descrita va ser ampliada més tard per Sah (1957) i Moll (1958).

També la tecnologia de fabricació de transistors de junció ha patit innovacions constants. Amb l'aparició dels primers transistors d'aliatge a la primèria de la dècada dels anys cinquanta del segle XX, es va iniciar un llarg camí que al principi ni les ments més imaginatives havien pogut concebre. El 1956 els transistors d'aliatge base difús milloraven les freqüències de transició i mantenien un compromís raonable amb les tensions de ruptura. Al voltant d'aquells anys, i sempre sobre tecnologia semiconductor de germani, comencen a produir-se els primers transistors que fan pensar en la utilització industrial d'aquests dispositius.

A partir dels transistors de tecnologia mesa es comença a sentir la necessitat d'un procés que tinga baixa dispersió en els paràmetres clau i que alhora reduïska el procés de fabricació. La utilització de màscares per a controlar la difusió de la base i de l'emissor sobre el cristall, crescut epitaxialment, i que constitueix el col·lector, va representar l'adveniment de la tecnologia planar-epitaxial (1960), que uneix a la perfecta repetitivitat en els paràmetres el fet de poder fabricar entre 1.000 i 10.000 transistors per oblea. Amb aquesta tecnologia es fabriquen avui dia la major part dels transistors de propòsit general.

Una altra etapa important en la història del transistor va ser el desenvolupament del transistor d'efecte de camp (FET). L'any 1928, el físic alemany J. Lilienfeld va descriure teòricament un element semiconductor de tres elèctrodes per a controlar el corrent elèctric, amb un comportament anàleg al tríode de buit. Era l'antecessor del transistor d'efecte de camp. L'any 1934, O. Heil presenta la seua patent, «un amplificador o controlador elèctric amb una o més capes semiconductoras», i proposa una estructura metall-aïllant-semiconductor com a element amplificador. El transistor d'efecte de camp de Heil estava construït sobre la base d'un cristall en què es controlava la conductivitat del canal mitjançant un tercer terminal anomenat porta.

El 1945, Shockley va imaginar un dispositiu semblant al FET i va demostrar teòricament que podia controlar el pas de corrent elèctric. Gràcies als seus treballs de l'any 1952, el primer transistor d'efecte de camp de junció que va funcionar correctament va ser el JFET. En aquest tipus de transistor, el corrent elèctric era produït per un únic tipus de portadors, la qual cosa va fer que el mateix Shockley el batejara amb el nom de transistor unipolar, a diferència del transistor bipolar del 1948.

Basant-se en la idea original de Lilienfeld i Heil d'alterar la conductivitat d'un semiconductor mitjançant l'aplicació d'un camp elèctric, D. Kaugh i J. Atalla van proposar, el 1960, el primer transistor d'efecte de camp metall-aïllant-semiconductor (MOSFET). El primer dispositiu pràctic que va funcionar amb aquests principis va ser construït l'any 1962 per Hofstein i Heiman en l'empresa RCA.

## *Els inicis de l'electrònica de potència mitjançant semiconductors*

L'electrònica de potència amb semiconductors es va desenvolupar sobretot a partir del naixement del tiristor el 1950; tanmateix, el tiristor, element de control de potència per excel·lència fins a mitjan dècada dels vuitanta, va ser introduït cinc anys més tard. En aquell any, 1956, Moll va proposar una estructura de quatre capes de cristall semiconductor de tipus P i N alternades. Aquesta estructura funcionava com un commutador dependent de la tensió aplicada als extrems. El control de conducció del dispositiu es duia a terme mitjançant la injecció de corrents en un elèctrode auxiliar que rep el nom de porta.

El primer intent d'introduir en el món industrial la tecnologia semiconductor de control de potència va ser l'any 1957. En aquest any, la firma Siemens va construir la primera electrolocomotora amb rectificadors de silici en substitució dels antics de làmpada de mercuri i els de seleni.

Des de llavors, els conceptes electrotècnics es van convertir en electrònics. Entre els anys 1965 i 1980 es van desenvolupar una gran quantitat de convertidors per al processament de la potència elèctrica basats en aquest dispositiu. Els sistemes desenvolupats es poden agrupar en convertidors AC/DC (rectificadors controlats), convertidors DC/AC i AC/AC (inversors) i convertidors DC/DC (*choppers* de potència).

Anys més tard es va presentar el TRIAC, un element bidireccional en corrent en el qual, a diferència del tiristor, el corrent només circula en un sentit. En canvi, la seua capacitat de control de potència és bastant reduïda enfront del tiristor, per això és un element emprat en aplicacions «domèstiques» o menors, de manera que el lideratge del tiristor es manté en les aplicacions industrials.

El tiristor va ser l'element de control de potència per excel·lència fins al final dels anys vuitanta, però pels volts d'aquells anys va haver-hi un fort increment de la penetració en el mercat d'equips de potència, degut fonamentalment a la incorporació d'altres nous elements de potència com el transistor bipolar de potència (BJT), el transistor MOSFET de potència o el transistor IGBT (*insulated gate bipolar transistor*), que permeten freqüències de commutació més altes i consegüentment la reducció de les dimensions dels equips. El tiristor continua

ocupant avui dia, malgrat tot, un lloc preferent per a les potències molt altes (majors dels MW) i freqüències baixes.

En relació amb els transistors bipolars de potència, cap al 1978 es produeix una important evolució motivada sobretot pels desenvolupaments de l'equip de semiconductors de l'empresa Thomson a Aix-en-Provence. Així mateix, les empreses japoneses Fuji i Toshiba van introduir en el mercat darlington triples, relativament lents, però amb nivells de tensió de fins a 1.200 V i de corrent de fins a 600 A (any 1984).

Pel que fa a la tecnologia de transistors MOSFET de potència, el desenvolupament en aquells anys no va ser menys espectacular gràcies a les noves tecnologies de fabricació d'aquests dispositius. Siemens, amb la tecnologia SIPMOS (Siemens Power MOS) i l'encapsulatge de l'empresa Semikron, va posar en el mercat transistors MOSFET d'alta tensió (900 V) i alta capacitat de corrent (36 A). Altres components de potència amb un gran auge van ser els IGBT, que van nàixer en la seua versió de gran potència cap a l'any 1987. Consisteixen en una estructura de capes, de manera que per la porta s'assemblen a un MOSFET (alta impedància d'entrada) i pel canal de conducció, a un BJT. Són menys ràpids que els MOSFET, però més ràpids que els BJT, i consumeixen una potència més baixa que els MOSFET i una mica més alta que els BJT.

Actualment, en el mercat es disposa de dispositius de 1.200 V i 600 A per al sector industrial, i dispositius amb tensions de fins a 3,3 kV per a aplicacions de tracció en els sectors ferroviari, eòlic, etc. A partir de l'any 2015, nous materials semiconductors, com el carbur de silici i l'arsenur de gal·li, han obert fronteres desconegudes en el terreny de l'electrònica de potència, on s'han aconseguit eficiències superiors al 99 %, inimaginables fa un parell de dècades amb el silici.

### *El trànsit cap a la microelectrònica*

Després de descriure el procés històric de desenvolupament dels components discrets, explicaré, a continuació, l'evolució en els últims anys d'un concepte que va nàixer l'any 1959 per obra de Kilby, la integració de components sobre

un dau semiconductor, i que ha portat a la miniaturització i major potència de processament de senyals dels sistemes electrònics.

Tot i que el naixement de la integració de components en un xip se sol datar en l'any 1959, la idea provenia de molts anys abans. El 1919, els físics W. H. Eccles i F. W. Jordan van desenvolupar el «flip-flop» mitjançant dues vàlvules. Perquè aquest circuit funcionara de manera òptima, era aconsellable que les dues vàlvules tingueren paràmetres semblants, per això es van dissenyar tríodes dobles en una mateixa làmpada de buit. El 1930, la firma Loewe va presentar un aparell de ràdio en què tríodes, pentodes i elements passius estaven integrats en una mateixa làmpada de buit, i el 1952 G. W. A. Dummer va establir les idees bàsiques d'un circuit integrat amb dispositius electrònics semiconductors. No obstant això, va ser J. S. Kilby, de l'empresa Texas Instruments, qui a l'octubre del 1958 va materialitzar el primer circuit integrat (CI) semiconductor. Sobre un substrat semiconductor de germani va integrar transistors de tipus mesa, resistències i condensadors. Quatre mesos després, el 1959, Kilby presentava el seu invent per a ser patentat, però la patent va tenir una vigència escassa, ja que, pràcticament en les mateixes dates, l'americà R. Noyce va descobrir un procediment molt més simple per a la integració. Es tractava de la difusió planar, que donaria lloc més endavant a la producció en massa de xips. Llavors, l'any 1960, es va aconseguir integrar en un xip uns 500-800 transistors. En l'actualitat, i en una investigació conjunta d'IBM, Global Foundries i Samsung, s'ha aconseguit integrar 30.000 milions de transistors en un xip de la mida d'una ungla gràcies a la tecnologia de 5 nanòmetres.

La microelectrònica pròpiament dita va nèixer quan va ser factible la tècnica de difusió monolítica de transistors de diferents polaritats en un mateix substrat. Això tingué lloc en la primera meitat de la dècada dels seixanta. Els primers amplificadors operacionals (AO), sense compensació de freqüència, com el MA709, van aparèixer en aquelles dates. La distància recorreguda entre els primers i els actuals AO ha sigut enorme, ja que s'han aconseguit millores de mil vegades en els valors de les tensions d'òfset i del corrent d'entrada.

En realitat, tot el desenvolupament dels CI és un camí en el sentit d'especialització de funcions. També va ser un èxit, en la dècada dels setanta del segle XX,



el fet de reforçar la similitud entre els paràmetres d'AO ideal i real. Els BIFET en són un exemple clar. Les impedàncies d'entrada han augmentat entre  $10^4$  i  $10^6$  vegades respecte als AO convencionals, la impedància d'eixida s'ha mantingut millorada lleugerament i la variació de la tensió d'òfset roman pràcticament constant en variar la temperatura.

La dècada dels seixanta va conèixer el naixement i desús de diverses formes tecnològiques de CI digitals. El progrés ha estat emmarcat per tres eixos coordinats, dos dels quals semblaven, i encara ho semblen en bona part, incompatibles. Ens referim al consum energètic i la velocitat de processament. La tercera direcció de progrés ha sigut la immunitat al soroll elèctric.

A la primeria dels anys setanta del segle passat, per a cobrir totes les necessitats de disseny industrials, hi havia les famílies lògiques següents: l'*emitter coupled logic* (ECL), molt ràpida (temps de propagació mitjà de 2-3 ns) i amb un consum elevat, 20-30 mW per porta; la *diode transistor logic* (DTL), com a família estàndard d'aplicacions generals, deu vegades més lenta i amb un consum cinc vegades menor que l'ECL, i la família *high threshold family* (HTL), que permetia cobrir aplicacions en ambients sorollosos.

Així mateix, en aquella època apareix i es consolida ràpidament la que hauria de ser la família lògica de més ús en circuits electrònics de l'època: la família lògica *transistor-transistor-logic* (TTL), amb un temps d'accés de 10-12 ns i un consum de 15 mW per porta a 5 V. Més endavant (anys 1973 i 1974), amb la maduració industrial de la producció de juncions Schottky, arriben les dues tecnologies que milloren el compromís velocitat-consum de la seua predecessora. La TTL *low speed* (TTL LS) aconseguix 8 ns amb 3 mW, mentre que la família TTL *high speed* (TTL HS) aconseguix els 3 ns amb només 25 mW.

Entre els anys 1974 i 1975 apareix una nova tecnologia, la MOS, i especialment la família lògica CMOS (*complementary MOS*). Aquesta família és més lenta que la TTL, amb un temps de propagació d'uns 60 ns, però amb un consum extremament baix (a freqüències baixes, uns 50 nW). Les tecnologies CMOS dominen en l'actualitat les aplicacions industrials.

Una altra família lògica, gràcies a les noves tècniques de producció del substrat de safir, és la *silicon on sapphire* CMOS (SOS/CMOS). En concret, RCA, paladí del SOS/CMOS, va presentar el 1982 un microprocessador de 32 bits amb 375.000 transistors integrats. Un indicatiu de la densitat d'integració en aquesta tecnologia és la família ASIC (*application specific integrated circuit*), presentada el 1989 per l'empresa National, capaç d'integrar 100.000 portes i oferir un retard de propagació de 120 ps.

### *El camí cap als microprocessadors*

Una vegada que la tecnologia de circuits integrats digitals havia aconseguit una maduresa significativa, amb les diferents famílies lògiques digitals descrites anteriorment, es va prosseguir el camí de la miniaturització mitjançant el desenvolupament de components microelectrònics, especialment els digitals. El progrés en l'àmbit dels microprocessadors i de les memòries ha sigut espectacular des de llavors.

L'any 1971 va ser vertaderament important. Gràcies al desenvolupament realitzat per l'enginyer M. E. Hoff el 1969, l'empresa Texas Instruments va presentar el primer microprocessador comercial. Aquest producte tindria més endavant un protagonisme fonamental en l'evolució de sistemes electrònics, com ara rellotges, càmeres de fotos, electrodomèstics, aparells mèdics, maquinària industrial, robots, indústria automobilística, trànsit, etc. La primera aplicació d'aquest nou dispositiu es deu també a Texas Instruments, amb la introducció en el mercat de la primera calculadora de butxaca.

Al final del 1971, la companyia Intel va comercialitzar el primer conjunt de microprocessadors i memòries aplicable al disseny de sistemes integrats. El producte es va anomenar 4004 i tingué una acceptació enorme a tot el món. Al començament de l'any següent, Intel introdueix el microprocessador 8008, pare de la posterior sèrie de microprocessadors de les empreses Intel, Zilog, etc. El 1973, Intel va comercialitzar el 8080, germà gran del 8008, amb tecnologia NMOS, amb un canvi de concepció física i més instruccions. Aquest micropro-

cessador va ser sens dubte el més famós i del qual es van fabricar més unitats. Entre 1974 i 1975, Motorola presenta la seua sèrie 6800 i, l'any següent, Zilog dona a conèixer el primer microprocessador *enhaced* de 8 bits: el Z80. Els anys següents i en el camp dels 8 bits, les empreses van millorar la potència dels seus dissenys originals. Van sorgir, així, el microprocessador 6809 de Motorola, el 8085 d'Intel, etc. Gràcies al desenvolupament de la lògica ECL, el 1976 la firma Motorola va introduir en el mercat el microprocessador més ràpid del món, el model 10800.

L'any 1972, el consum de microprocessadors s'estimava en 50.000 unitats; el 1977, en 6 milions; el 1979, en 60 milions, i el 1980, en 160 milions d'unitats. Així mateix, hi ha altres components que, sense tenir l'enorme desenvolupament dels microprocessadors i les memòries, també obtenen una atenció creixent, com els captadors integrats, els mòduls per a la síntesi i el tractament de la paraula, les xarxes lògiques i els perifèrics intel·ligents per als microprocessadors.

A partir del 1979 sorgeix un interès creixent pels microprocessadors de 16 bits. En concret, les expectatives de mercat indicaven un creixement relatiu molt superior per als microprocessadors de 16 bits que per als de 8 bits. Entre els microprocessadors de 16 bits que es podien trobar en el mercat en aquella època, destaquem la família 9900 de Texas Instruments, la 9440 de Fairchild i la 8086 de Motorola.

La tendència en el món dels microprocessadors es va enfocar cap a la creació de perifèrics intel·ligents capaços de realitzar el seu propi processament de dades. Així, Intel va presentar el coprocessador 8087, dotat d'un joc d'instruccions propi, aritmètica en coma flotant, 64 bits i doble precisió, el qual s'utilitzava per a intensificar la potència aritmètica del micro 8086. Intel també va presentar el controlador d'E/s 8089, també per al micro 8086, que era un altre xip perifèric amb un joc propi d'instruccions i programa. Disposava dels canals d'E/s (entrada/eixida), lògica i aritmètica de 20 bits, i era susceptible a transferir dades a una velocitat de 5 MHz. El microprocessador 8289, també d'Intel, controlava el bus del sistema tant per al perifèric E/s 8089 com per al processador 8086.

En el camp de les memòries, el desenvolupament no va ser menys espectacular que el que van experimentar els microprocessadors. Fins a l'any 1968

aproximadament, tots els ordinadors utilitzaven només memòries de ferrita, els avantatges de les quals eren evidents (no volatilitat i densitat bastant apreciable), però els desavantatges eren també notables (fabricació difícilment automatitzable, marges de temperatura reduïts, que requerien ambients protegits i condicionats, etc.). La primera memòria de semiconductors, que per cert mai no es va comercialitzar, es va anomenar 1101 i es tractava d'una memòria estàtica de 256 bits en PMOS amb porta de Si. El segon producte fabricat (Intel) i comercialitzat va ser una memòria dinàmica de 1.024 bits amb la mateixa tecnologia.

De llavors ençà, el camí recorregut en matèria de memòries ha sigut enorme. Les memòries actuals són ultradenses. En aquella època va haver-hi una pluralitat de tecnologies de fabricació: des de les memòries MOS fins a les CCD i de bombolla magnètica. El 1989, NEC inicia una línia pilot de producció per a RAM dinàmiques CMOS de 16 Mbits, i al final d'aquell any Toshiba en produeix 100.000 unitats/mes de 4 Mbits i posa a punt un dispositiu experimental de 16 Mbits amb litografia de 0,7 micres.

### *L'evolució dels ordinadors*

El desenvolupament de la microelectrònica, i especialment el dels microprocessadors i les memòries, ha portat a la fabricació de circuits i sistemes cada vegada més potents i complexos, que han donat com a resultat la implantació de l'electrònica en gran quantitat d'aparells i equips. El desenvolupament d'aquests ha sigut enorme al llarg dels últims seixanta anys. Potser el més espectacular i conegut són els ordinadors, que s'han desenvolupat gràcies a la miniaturització dels circuits electrònics i que naixen molt abans de l'invent del transistor.

Les primeres màquines de càlcul van ser construïdes per B. Pascal, Leibniz i altres científics en el segle XVII. Una descripció de la màquina de Pascal, de la qual es van construir cinquanta unitats, es troba en *Machines et inventions approuvées* de l'Acadèmia de les Ciències, París, 1735. La producció en sèrie de màquines de calcular va ser iniciada l'any 1820 per C. X. Thomas a París. Entre els anys 1820 i 1880, la seua fàbrica va construir més de 1.500 màquines.

No obstant això, l'avanç conceptual d'aquell temps, que més endavant va tenir una gran repercussió en la concepció dels ordinadors, es deu a la «màquina analítica» de C. Babbage, construïda el 1833. Aquesta màquina disposava ja de «memòria» i estava controlada per un programa en targetes perforades. El concepte de programa mitjançant targetes perforades ja havia sigut introduït prèviament, el 1807, per J. M. Jacquard en la indústria tèxtil de la seda.

L'any 1886, l'enginyer alemany establert als Estats Units H. Hollerith va fer un pas més en la concepció dels ordinadors. Les targetes perforades, a més de contenir el programa d'execució, també van ser emprades com a magatzem de dades. El sistema de perforació de targetes va ser, en la màquina de Hollerith, el primer que es va realitzar per mitjans electromecànics. El 1890, la màquina de Hollerith va ser emprada per a elaborar el cens de població als Estats Units i el 1910 a Alemanya. La seua introducció en la indústria data de l'any 1911, a la fàbrica Bayer de Leverkusen (Alemanya).

El 1920 es va construir la primera màquina electromecànica de càlcul amb terminal, en què diversos operadors podien treballar simultàniament amb una única unitat central de càlcul. L'any 1936 es fa un altre pas important per al desenvolupament posterior dels ordinadors. El francès R. Valtat presenta la patent d'una màquina de càlcul que treballava en el sistema binari de numeració, descrit pel matemàtic anglès G. Boole el 1854. Un model mecànic amb els principis indicats va ser construït per la firma Philips d'Holanda el 1936. El 1937, l'enginyer alemany K. Zuse presenta el primer prototip electromecànic concebut com un «calculador universal». Aquest dispositiu va rebre el nom de Z1.

El 12 de maig de 1941, Zuse presenta a l'Institut Experimental d'Aviació alemany el seu prototip Z3. Va ser el primer ordinador programable que treballava en sistema binari. Contenia 2.000 relés capaços de processar qualsevol problema aritmètic. La màquina era també capaç d'emmagatzemar 1.400 bits d'informació. El programa era emmagatzemat en una cinta de pel·lícula de cinema perforada. La màquina duia a terme les quatre operacions bàsiques i l'extracció d'arrels quadrades, però no posseïa la capacitat de bifurcació en el programa.

L'americà J. V. Atanasoff va introduir, el 1942, la primera màquina de càlcul amb tècnica de tubs de buit. Aquest fet va passar desapercebut en la seua època. L'11 de juny de 1943, l'enginyer alemany H. Schreyer, juntament amb K. Zuse, presentaven la patent d'un ordinador totalment electrònic amb vàlvules. Atesa la data de la patent (Segona Guerra Mundial), no se'n va poder fabricar un prototip d'acord amb les idees de Schreyer.

El 7 d'agost de 1944, H. Aiken desenvolupava la primera màquina de calcular programable a Amèrica, el MARK-I, i l'americà J. von Neumann iniciava el desenvolupament (1944-1952) del seu autòmat programable, anomenat EDVAC.

El primer ordinador totalment electrònic va ser presentat l'any 1945 a la Universitat de Pennsilvània. Va ser desenvolupat durant tres anys per J. P. Eckert i J. W. Mauchly, que el van anomenar ENIAC-1 (*electronic numerical integrator and calculator*) i va treballar fins al 2 d'octubre de 1955. Ocupava una superfície de 140 m<sup>2</sup>, tenia més de 18.000 vàlvules i 1.500 relés i consumia 150 kW. Pesava 30 tones. Aquell mateix any, Zuse va presentar el Z4. El 1947, amb tècnica de relés, es presentava als Estats Units una versió millorada del MARK-I, concretament el MARK-II. El 1948, el matemàtic J. W. Turkey introduïa el concepte de bit com a unitat bàsica de la informació digital.

El 1949, a la Universitat de Manchester, sota la direcció de M. V. Wilkes, es va desenvolupar l'EDSAC (*electronic delay storage automatic computer*), un ordinador totalment electrònic, i en IBM, a Nova York, sota la direcció de J. P. Eckert, es va presentar l'SSEC (*selective sequence electronic calculator*). Els primers circuits amb ferrita per a emmagatzemament de la informació van eixir al mercat l'any 1950.

Un nou avanç en la tècnica dels ordinadors tingué lloc el 1957, a la Universitat de Cambridge, gràcies al matemàtic H. A. Aiken. Aquell any va presentar el MARK-III, que contenia 2.000 relés, 5.000 vàlvules i 1.300 díodes. Les dades i els programes eren emmagatzemats en una cinta magnètica.

Al maig del 1955, J. W. Backus va desenvolupar el llenguatge FORTRAN i als laboratoris Bell es va presentar la primera calculadora totalment transistoritzada, TRADIIAC, de J. H. Felker. Poc després eixien al mercat els primers ordinadors totalment transistoritzats, la sèrie 7090 d'IBM i la gamma

60 de Bull, i el 1956 IBM construeix el primer ordinador amb emmagatzematge magnètic.

Les novetats en aquests ordinadors eren: 1) el programa i les dades podien ser codificats en la màquina, 2) el programa permetia bifurcacions, i 3) cada ordre del programa podia ser alterada durant el procés d'execució segons els resultats obtinguts.

De llavors ençà, el desenvolupament dels ordinadors ha sigut espectacular, per això només citarem aquells fets que considerem més significatius en l'evolució d'aquesta tecnologia. La introducció, l'any 1962, de transistors de mida extraordinàriament reduïda en els ordinadors va permetre que aquests tingueren més compacitat i més velocitat de càlcul (ordinadors de tercera generació). Les bombolles magnètiques com a element d'emmagatzematge van ser descobertes el 1966. En mostres de laboratori s'aconseguien densitats d'emmagatzematge de  $10^5$  bits/mm<sup>2</sup>.

Els anys 1958 i 1960 es van desenvolupar els llenguatges d'alt nivell, com ALGOL i COBOL, respectivament, i el 1961 IBM-Alemanya creava un nou concepte en el diàleg humà-màquina: el teleprocés.

El 1965 es van introduir els ordinadors per al control del trànsit. Zuse i els seus col·laboradors desenvoluparen la primera taula de dibuix assistit per ordinador (CAD), que van anomenar GRAPHOMAT Z64, i la firma Siemens AG va presentar la instal·lació de càlcul 2002 com la primera sèrie d'ordinadors totalment transistoritzats del món.

Així mateix, el 1965, l'empresa Digital Equipment Corporation va introduir el primer miniordinador en el mercat, que va anomenar PDP. L'anglès N. Kitz va introduir el 1967 el primer ordinador electrònic de sobretaula, batejat amb el nom d'Anita Mark 8 i que gràcies a la tècnica monolítica en integració i als LED posseïa unes dimensions reduïdes. La potència de càlcul era molt reduïda. El 1968 apareixen els primers ordinadors de la quarta generació, és a dir, amb circuits integrats. N'és un exemple significatiu la sèrie 360 d'IBM.

Per a aplicacions en el terreny de la geofísica, l'americà Cragon va desenvolupar el primer ordinador amb tècnica LSI el 1969. Cap a l'any 1972 els ordinadors es van tornar multiusuari. El sistema 370 d'IBM és un clar exponent d'aquest

nou concepte. Amb el model HP 65, la firma americana Hewlett-Packard va fabricar el primer ordinador programable de butxaca el 1974.

L'any 1980, diverses companyies japoneses i americanes van introduir els primers ordinadors de taula en el mercat. En general, la visualització es feia mitjançant díodes de cristall líquid, descoberts el 1889 per O. Lehmann i introduïts per primera vegada en el mercat per les empreses suïsses La Roche i Brown-Bovery.

Cap al 1983, els ordinadors personals s'introdueixen de manera massiva en empreses, despatxos professionals i fins i tot a les cases particulars. Com a element d'emmagatzematge massiu d'informació es va imposar també, cap a l'any 1983, el disc flexible (*floppy disc*).

Cap al 1987 naix un nou concepte en el processament de la informació: el processament òptic. De fet, en els últims anys, al laboratori, ja s'han desenvolupat prototips d'ordinadors òptics que potser en el futur substituiran els actuals de processament elèctric de les dades.

### *La tercera revolució industrial i l'automatització dels processos productius*

Cap al 1970, l'automatització dels processos productius era una preocupació constant de les grans empreses, especialment en el sector automobilístic. Així, en aquells anys, Ford i General Motors plantejaren les especificacions que hauria de complir un controlador electrònic programable per a ser realment útil en la indústria. Es van desenvolupar els primers autòmats programables, basats en microcontroladors que, al final dels anys setanta, anirien augmentant les prestacions i serien incorporats per a l'automatització dels processos productius mitjançant el suport de robots industrials i una altra maquinària. Constitueix la tercera revolució industrial o etapa d'automatització dels processos productius i de desenvolupament de les tecnologies de la informació.

Els principis teòrics de funcionament d'aquests sistemes van ser desenvolupats bastants anys abans. El concepte bàsic de retracció va ser introduït, l'any



1927, per H. Black per a millorar la qualitat i l'estabilitat dels amplificadors en radioreceptors. Es demostrava experimentalment que, realimentant l'amplificador, les seues característiques elèctriques eren pràcticament independents de la temperatura i els paràmetres de dispersió de les diferents sèries de les vàlvules utilitzades. Aquest concepte va donar pas a la producció en sèrie de radioreceptors sense selecció prèvia de components ni ajustos crítics. La base matemàtica de la teoria de la retracció va ser establerta el 1932 pel suec H. Nyquist.

Tal vegada la recent història dels sistemes productius naix l'any 1949, quan la força aèria americana encarrega al MIT (Massachusetts Institute of Technology) el desenvolupament d'un control numèric per a màquines eina. Tres anys després, el 1952, el MIT presenta la primera màquina eina amb control numèric (NC). En aquest cas es tractava de controlar numèricament, a partir de les dades de les dimensions de la peça, la maquinària per a la seua producció. Amb els principis desenvolupats al MIT es va presentar, el 1954, la primera màquina eina industrial amb control numèric, el control de la qual contenia vora 300 vàlvules. El 1958, i també com a resultat de les investigacions al MIT, es va desenvolupar el primer llenguatge per a controls numèrics, que es va anomenar APT (*automatically programmed tools*).

El 1970, els controls numèrics estaven tan desenvolupats que eren capaços de canviar selectivament de peça i, el 1972, la tecnologia de microcomputadora va ser introduïda en aquests sistemes, que a partir d'aquella data van rebre el nom actual de CNC (*computerized numerical control*) i permeteren una major versatilitat en comparació amb els NC, de manera que, el 1975, eren capaços de variar i corregir automàticament les dimensions de la peça que s'havia de fabricar.

Al Japó i als Estats Units es va introduir, el 1978, un nou concepte en l'automatització de la producció: la producció centralitzada. Mitjançant aquest sistema, un ordinador central controla els controls numèrics (CNC), els sistemes de transport de peça i les instal·lacions de potència (convertidors de potència).

El 1981 es va introduir un nou concepte en els sistemes productius. Els sistemes de control numèric CNC van començar a admetre programes sense bifurcacions condicionals. Mitjançant la introducció dels PLC (*programmable*

*logic controler*) s'havia ampliat l'operativitat dels controls numèrics, la qual cosa va permetre aquest tipus de bifurcacions en el programa.

En la VII Fira de la Màquina Eina de Milà (EMO) es va presentar, el 1987, un controlador de processos totalment nou. Es tractava d'un PLC amb intel·ligència artificial i capacitat d'alterar el programa d'acord amb els resultats obtinguts en el procés.

Paral·lelament al desenvolupament dels controls numèrics es van desenvolupar procediments mecànics que, controlats mitjançant CNC o PLC, podien desplaçar la peça a voluntat (robots industrials). Un primer desenvolupament preliminar va ser realitzat en l'empresa americana Unimation (1963), que va introduir un nou concepte en l'automatització de processos. Es tractava d'un robot (braç articulat) industrial que va ser anomenat Unimat. Aquests dispositius van trobar ràpidament aplicació industrial, encara que al principi tenien una capacitat de moviment reduïda. S'empraven fonamentalment en treballs bruts o perillosos, com en soldadura elèctrica, pintura, etc. L'any 1983 hi havia 14.250 robots instal·lats al Japó, xifra que representava un 62,7 % del parc mundial d'aquests dispositius. Als Estats Units n'hi havia 4.100 unitats (18,1 %), a la República Federal d'Alemanya 1.420 (6,2 %), a Suècia 940 (4,1 %), a França 600 (2,6 %), a Anglaterra 371 (1,6 %), a Itàlia 353 (1,5 %) i al Canadà 250 (1,1 %). Actualment, els robots són un dels elements bàsics en l'automatització de la producció i constitueixen la base de l'anomenada tercera revolució industrial.

Mentre que la primera revolució industrial, que va nàixer a Anglaterra cap al 1700, estava basada en la producció mecànica mitjançant l'ús de l'energia generada pel vapor d'aigua, i la segona revolució industrial (cap al 1850) es basava en la producció en sèrie de tasques repetitives amb l'ajuda de l'electricitat, la tercera revolució industrial, iniciada als Estats Units (cap al 1970), va ser conseqüència de l'ús dels controladors numèrics, que van permetre l'automatització dels processos productius, la reconfiguració de tasques mitjançant el programa apropiat en els controladors de lògica programable (PLC) i l'ús dels robots industrials.

## *De la microelectrònica a la nanoelectrònica*

La nanotecnologia té com a punt de partida la cèlebre conferència que va fer el físic Richard Feynman el 1959, al Caltech, titulada «There is plenty of room at the bottom», en què va afirmar que en el futur seria possible mesurar i controlar la matèria en l'escala atòmica. Si bé és cert que encara hi ha un reduït marge per a una major integració amb la tecnologia de silici actual, el marge de miniaturització és cada dia més reduït. More Moore, More than Moore i Beyond-CMOS són actualment les principals tendències tecnològiques per a una major miniaturització dels components electrònics.

És ben conegut, per l'anomenada llei de Moore, que el nombre de transistors en un xip es duplica aproximadament cada dos anys. Però la llei de Moore té un límit: la dimensió física de l'àtom. L'enfocament de More Moore (MM), descrit en el Full de ruta tecnològic internacional per a semiconductors (ITRS), és el desenvolupament de tecnologies avançades CMOS per a proporcionar els requisits físics, elèctrics i de confiabilitat per a les tecnologies de memòria i lògica per a sostenir l'escalament de More Moore (potència, rendiment, àrea, cost) en aplicacions de *big data* (dades massives), mobilitat, processament en el núvol, internet de les coses (IdC), etc.

More Moore es troba ja prop de la limitació que suposa l'aproximació a les distàncies atòmiques, si bé encara queda un recorregut, d'uns pocs anys, per a arribar a una barrera que es perfila al voltant dels nanòmetres. De fet, el transistor d'un sol electró (*single-electron transistor*, SET) ha guanyat interès amb la irrupció de la internet de les coses i les aplicacions enfocades a la salut, on un consum energètic ultrabaix és molt important.

El concepte More than Moore (MtM) es va introduir en l'edició de 2005 de la ITRS amb el propòsit de descriure característiques tecnològiques que no s'ajusten a les tendències de la miniaturització implícites en la llei de Moore. Aquestes característiques normalment permeten funcionalitats no digitals, com ara comunicació sense fil, administració d'energia, detecció i actuació. A mesura que aquestes noves funcionalitats s'incorporen progressivament als formats *system-in-package* (SiP) i *system-on-chip* (SoC), la complexitat dels micro sistemes

resultants augmentarà ràpidament. Aquests nanosistemes incorporen sensors i actuadors per a facilitar una interacció àmplia amb mitjans no electrònics: fluids, pressió, temperatura, òptica i concentracions químiques i bioquímiques, entre altres.

Aquest conjunt de tecnologies permet incorporar també funcions no digitals, això és, components analògics. Els dispositius MtM proporcionen conversió no digital, així com informació no electrònica, com ara mecànica, tèrmica, acústica, química, òptica i funcions biomèdiques.

Els actuals transistors de semiconductors metall-òxid complementaris (CMOS) han constituït la base essencial de les tecnologies electròniques digitals durant dècades. La reducció contínua de la mida del transistor i la millora de les seues característiques han portat a avanços significatius, però el seu grau d'integració tendeix gradualment al límit.

Les tecnologies Beyond-CMOS són les tecnologies futures de lògica digital més enllà dels límits de l'escala actual CMOS, que limiten la densitat i la velocitat dels dispositius degut a l'efecte del calfament. Es basen en un principi de funcionament que no se sustenta en el moviment de càrrega elèctrica, ja que en aquest cas es requeriria corrent i, en conseqüència, dissipació de potència, i han de proporcionar tecnologies amb iguals o millors figures de mèrit que les cel·les CMOS de silici, com ara capacitat de fabricació en massa, preu baix i pèrdues molt reduïdes.

### *Cap a la quarta revolució industrial*

La tercera revolució industrial es va basar en el desenvolupament de la micro-electrònica i la seua aplicació en controladors industrials numèrics i robots industrials, que permetien programar els processos productius i canviar el programa d'aquests d'acord amb els plans de producció. Però els robots no prenen decisions, simplement actuaven en funció d'un programa amb què el tècnic corresponent els havia programat. Era l'era de l'automatització.

En l'actualitat, cinquanta anys després de la tercera revolució industrial, ens trobem ja immersos en la quarta revolució industrial o la revolució del coneixement, en la qual fonamentalment les màquines o els robots prenen decisions per si mateixos.

Si la tercera revolució industrial va ser factible gràcies al desenvolupament de la microelectrònica, la quarta revolució industrial és possible i solament serà possible gràcies al desenvolupament de la nanoelectrònica, amb processadors molt més potents, majors capacitats de càlcul, sensors avançats, com ara els anomenats *machine learning sensors*, i algorismes intel·ligents que emulen el pensament humà.

Avui dia hi ha nombrosos exemples, de més simples i de més complexos, en què la intel·ligència humana és traslladada a una màquina que executa les ordres rebudes i pot reconfigurar-les d'acord amb certs paràmetres. Així, l'eixugaparabrises d'un cotxe que es posa en marxa quan plou, sense intervenció del conductor, és un exemple d'un sistema ciberfísic molt simple, i la conducció autònoma és un altre exemple, en aquest cas d'HW i algorísmia molt més complexa.

En resum, si la tercera revolució industrial es basava en l'electrònica digital, fonament dels autòmats programables amb capacitat d'executar instruccions programades, la quarta revolució es fonamenta en els sistemes ciberfísics, que integren sensors, unitats de procés avançades i algorismes intel·ligents que doten els sistemes de capacitat d'executar instruccions programades, així com de prendre decisions pròpies en funció de les característiques del procés.

## L'EVOLUCIÓ DE L'ELECTRÒNICA A LA COMUNITAT VALENCIANA I LA INFLUÈNCIA DE LA UNIVERSITAT DE VALÈNCIA EN EL SEU DESENVOLUPAMENT

En els anys seixanta, l'electrònica era una gran desconeguda a la Comunitat Valenciana, tant en l'àmbit acadèmic com en l'industrial. Pràcticament, l'única electrònica que es feia en aquella època era la que feien els radioaficionats i els aficionats als sistemes d'àudio.

Si comparem aquest escenari amb l'actual, avui dia hi ha grans empreses nacionals i multinacionals que han triat València per a situar-hi centres d'R+D a fi de diversificar els seus negocis o centres de producció. Així, una empresa alemanya amb més de 80.000 treballadors ha implantat un centre d'R+D per a desenvolupar sistemes de potència en el sector de l'electromobilitat; una empresa americana amb més de 100.000 clients a tot el món i dedicada a la microelectrònica té al Parc Científic de la Universitat un centre de desenvolupament dels seus productes; una altra empresa alemanya té, també al Parc Científic, un centre d'R+D per a l'estudi de filtres per a la compatibilitat electromagnètica (EMC); una empresa valenciana dedicada a l'electrònica de potència i amb presència global, amb seu a Lliria, ofereix solucions innovadores en convertidors per a aplicacions en electromobilitat, energies renovables; i una molt coneguda empresa automobilística alemanya instal·larà a Sagunt una megafàbrica de bateries per al sector de l'electromobilitat.

I així, un llarg nombre d'empreses nacionals i internacionals que tenen l'electrònica com a objecte de negoci o bé necessiten l'electrònica per als seus productes, i que han triat la Comunitat Valenciana com a seu de les seues activitats o una part d'aquestes.

Segons algunes fonts consultades, una de les causes, no l'única, per les quals la nostra comunitat s'està convertint en un lloc preferent per a la indústria electrònica es deu al fet que ofereix enginyers electrònics molt ben formats, especialment per a tasques d'R+D, i al meu entendre la Universitat de València ha tingut un protagonisme molt important en aquest aspecte, ja que ha sigut bressol i capdavantera de moltes àrees del coneixement. No obstant això, només em referiré a aquelles que conec per experiència personal. Així, la Universitat de València va ser capdavantera en el camp de la física de partícules per iniciativa del professor Joaquín Catalá de Alemany, del qual l'autor d'aquest escrit va tenir el privilegi de ser alumne.

Cap a l'any 1965, a la Facultat de Ciències es va crear la Càtedra d'Electricitat i Magnetisme, i cap al 1970 l'Agregadòria d'Automàtica i Electrònica, i es va establir, en el segon cicle de la carrera de Ciències Físiques, l'especialitat d'Electricitat i Electrònica, amb assignatures com ara Electrònica, Automàti-

ca, Teoria de circuits, etc., fet que va convertir la Universitat de València en el germen dels estudis d'electrònica, tal com se'ls coneix en l'actualitat a la Comunitat Valenciana.

El 1976, i amb la inclusió d'estudis d'informàtica, es va transformar l'especialitat inicial en la d'Electricitat, Electrònica i Informàtica, i una part de l'alumnat, i també del professorat, va passar a formar part dels quadres docents i investigadors d'altres universitats, amb la qual cosa es va estendre el germen inicial de l'electrònica de 1965 a altres àmbits.

Amb la reforma dels plans d'estudis motivada per l'LRU de 1993, l'especialitat d'Electricitat, Electrònica i Informàtica es va transformar en carreres completes d'enginyeria, concretament en l'Enginyeria Electrònica, Enginyeria Informàtica i Enginyeria Tècnica de Telecomunicació (Sistemes Electrònics). Amb aquesta reforma es van remodelar els estudis d'electrònica, amb la inclusió de matèries referents a l'electrònica de potència, i la nostra Universitat va ser capdavantera, a la Comunitat Valenciana, en la impartició d'aquest tipus de matèries, que tan en voga estan actualment en empreses del sector.

El 2003 es crea l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE-UV) per organitzar millor, unir i projectar els estudis i les investigacions en les àrees d'electrònica, informàtica i enginyeria química. En el curs 2010/11 es van implantar, a l'ETSE-UV, els graus, adaptats a l'espai europeu d'educació superior, d'Enginyeria Química, Enginyeria Electrònica Industrial, Enginyeria Electrònica de Telecomunicació, Enginyeria Telemàtica, Enginyeria Informàtica, Enginyeria Multimèdia i Ciències de Dades, tots molt apreciats pel sector productiu de la Comunitat Valenciana i amb índexs d'atur pràcticament nuls.

L'any 2016 veuria la llum el primer màster oficial en Ciència de Dades de la Comunitat Valenciana, que feia novament la Universitat de València capdavantera al nostre territori en aquests estudis, i que juntament amb el màster oficial d'Enginyeria Electrònica ofereix a l'alumnat un quadre d'assignatures molt apreciades per la indústria valenciana.

Cal dir que el Departament d'Electrònica i Informàtica va ser el germen de l'actual Institut de Robòtica i Tecnologies de la Informació i les Comunicacions, fundat el 1991, que compta amb aproximadament cinquanta investigadors que

realitzen activitats d'investigació en els camps de la telemàtica per a trànsit i transport, gràfics per computador i realitat virtual, serveis de xarxa i seguretat informàtica, entre altres.

Un altre aspecte que vull destacar és l'adaptació dels estudis del grau d'Enginyeria Electrònica a les necessitats de formació de la societat valenciana. Aquesta transformació ha sigut una constant des de les assignatures inicials de l'any 1965 fins avui, amb assignatures en l'actualitat com ara Automatització industrial, Ciències de materials, Medi ambient i sostenibilitat, Màquines elèctriques, Termodinàmica i transmissió de la calor, Energies renovables, Aplicacions industrials, Sensors i instrumentació virtual, Sistemes integrats en telecomunicacions, Sistemes electrònics multimèdia, etc.

La investigació és un altre dels aspectes fonamentals a l'ETSE-UV. Sistemes intel·ligents aplicats al trànsit, reconeixement de patrons i de processament de senyals d'imatges –incloent-hi dispositius i arquitectures HW–, investigació en sistemes i entorns virtuals distribuïts, processament de senyals i imatges –incloent-hi el desenvolupament d'algorismes d'aprenentatge automàtic–, *big data*, intel·ligència artificial, sistemes experts, caracterització de components electrònics de potència, sistemes d'instrumentació, etc., són algunes de les àrees d'investigació referides a l'enginyeria electrònica i l'enginyeria informàtica que es realitzen a l'ETSE-UV.

D'altra banda, la Universitat de València és molt activa en activitats d'investigació en l'electrònica, ja que ha participat en un nombre considerable de projectes d'R+D amb finançament regional, nacional o europeu, i ha formalitzat, des de l'any 1990, un bon nombre de contractes d'R+D amb empreses del sector electrònic, que han enfortit la relació entre la universitat i l'empresa.

És important esmentar també que el Departament d'Enginyeria Electrònica de l'ETSE-UV manté, des dels anys noranta, relacions amb grans organismes d'investigació, com ara l'Agència Espacial Europea (ESA) i l'Organització Europea per a la Investigació Nuclear (CERN), i que també forma part del consorci VAL-SPACE, amb un laboratori per a la investigació de materials d'alta potència per a l'espai.



Tot això ha fet que l'edició de l'any 2022 del rànquing de Xangai atorgue a la Universitat de València la primera posició de la Comunitat Valenciana en les matèries d'enginyeria elèctrica i electrònica.

Com a resum cal indicar que, des de l'any 1970 aproximadament, la Universitat de València ha sabut respondre, en el terreny de l'electrònica, a les demandes de formació i investigació requerides pels avanços tecnològics i les necessitats de la indústria valenciana, formant físics i enginyers, en l'àrea de l'electrònica, que han contribuït a les activitats de les empreses del sector, especialment en tasques d'R+D. Tot això, junt amb les capacitats d'investigació del Departament d'Enginyeria Electrònica de l'ETSE-UV, ha afavorit, al meu criteri, el desenvolupament de l'electrònica i l'establiment d'empreses del sector a la Comunitat Valenciana.

## EL FUTUR DE L'ENGINYERIA ELECTRÒNICA

A continuació oferiré una visió personal del futur de l'enginyeria electrònica, la seua connexió amb els actuals reptes tecnològics de la societat, la seua vinculació amb la quarta revolució industrial i les necessitats futures de formació i investigació.

En aquest punt, cal assenyalar que l'enginyeria és una disciplina que transforma el coneixement científic en coneixement aplicat per donar solucions a reptes econòmics, tecnològics i industrials de la societat.

### *Els actuals reptes tecnològics de la societat vinculats amb l'electrònica*

*Increment de la població.* L'any 2000, la població mundial era de 6.000 milions d'habitants; la previsió per a 2050 és d'uns 10.000 milions, concentrats majoritàriament en megaciutats de més de 30 milions d'habitants. Els sistemes ciberfísics, la intel·ligència artificial i l'electrònica de potència són actors molt importants per a aconseguir els objectius del canvi demogràfic en el futur, a través de les anomenades ciutats intel·ligents o *smart cities*.

La *smart city* serà un concepte que revolucionarà la manera en què veiem i vivim la vida urbana. Les xarxes 5G i els avanços informàtics d'avantguarda marcaran el començament d'una nova era per a les ciutats, amb plataformes digitals integrades que combinaran serveis, energia, mobilitat, etc., amb la finalitat de millorar la qualitat de vida i reduir els costos d'energia i l'impacte ambiental.

Il·luminació regulada per a millorar l'eficiència energètica, targetes intel·ligents per a la ciutadania, sistemes de mobilitat sostenible, trànsit intel·ligent, gestió eficient dels residus i subministrament intel·ligent de l'aigua i de l'energia són algunes de les aplicacions que es poden englobar en una *smart city*.

*Descarbonització del medi ambient.* L'any 2000, les emissions de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera eren de 22 Gt, el 2050 se'n preveu una emissió de 55 Gt. Nous sistemes productius més eficients i sostenibles, així com nous conceptes de transport de persones i mercaderies, contribuiran a donar solucions a aquest repte.

La Unió Europea pretén ser neutra en termes climàtics amb vista a l'any 2050. És a dir, s'ha fixat l'objectiu de tenir una economia amb zero emissions netes de gasos amb efecte d'hivernacle. Aquesta meta constitueix el nucli de l'Acord Verd Europeu i està en línia amb el compromís comunitari d'augmentar l'acció climàtica global, en concordança amb els compromisos de l'Acord de París.

L'energia renovable, un transport més net (verd) o els edificis energèticament eficients es troben en el centre de les tendències en tecnologia neta. A mesura que caiguen els costos associats a la tecnologia neta, el seu ús es tornarà més generalitzat i irromprà en un nombre creixent d'indústries.

L'ús de la tecnologia de motors elèctrics de plasma implementada en els futurs avions comercials podria ser clau per a descarbonitzar l'aviació comercial, ja que permetrà que els avions funcionen únicament amb electricitat, prescindint de combustibles contaminants.

*Mobilitat sostenible.* L'any 2000, el nombre de vehicles era de 1.000 milions; es preveu que el 2050 siga de 3.000 milions. La mobilitat, i en general el transport basat en els motors d'explosió, és una de les causes fonamentals del calfament global a causa de l'emissió de CO<sub>2</sub>, així com de partícules tòxiques NO<sub>x</sub>, que repercuteixen en la salut de les persones. Una mobilitat basada en tracció elèctrica serà fonamental per al desplaçament de persones i mercaderies,

especialment en megaurbs. Seran imprescindibles nous sistemes d'emmagatzematge d'energia i sistemes de potència més eficients i de menys mida i pes per a desenvolupar aquest tipus de mobilitat, a més d'una infraestructura intel·ligent de recàrrega elèctrica de vehicles elèctrics.

*Subministrament elèctric ininterromput i sostenible.* L'any 2000, el consum mundial d'electricitat era de 15.000 TWh; la previsió per a 2050 és de 54.000 00TWh. D'altra banda, en l'actualitat, més del 70 % dels recursos naturals d'energia estan concentrats en uns pocs països. El sistema elèctric actual de generació, transmissió i distribució de l'energia elèctrica patirà canvis molt importants. Són les anomenades *smart grid*, *super grid* o «internet de l'energia elèctrica», en la qual tots els actors lligats a la generació, transmissió, distribució i emmagatzematge d'energia elèctrica estaran connectats.

L'emmagatzematge eficient d'energia serà un pilar fonamental perquè permetrà flexibilitzar la producció d'energia renovable, garantir la seua integració en el sistema i donar suport a l'electrificació. En aquest sentit, els algorismes, com el V2G (*vehicle-to-grid*), tindran un paper fonamental per a oferir més flexibilitat a la xarxa elèctrica, obrir el camp per a la creació de nous serveis de planificació i operació, establir esquemes de resposta a la demanda i promoure la integració de sistemes d'emmagatzematge d'energia i renovables.

### *La quarta revolució industrial i les tecnologies bàsiques de l'electrònica del futur*

Si la tercera revolució industrial, iniciada cap a l'any 1970, es va basar en l'automatització dels processos productius, incloent-hi l'ús de robots programables, la quarta revolució industrial, ara en les albrors, és la *revolució del coneixement*, conduïda en bona part per l'enginyeria electrònica i informàtica.

Des del punt de vista purament electrònic, la quarta revolució industrial és l'etapa de la intel·ligència artificial, és a dir, l'etapa de la transformació del coneixement humà a sw, a través dels anomenats sistemes ciberfísics, constituïts per sensors que envien informació a processadors dotats d'algorismes intel·ligents

que controlen els processos, i els processos en si afecten els algorismes, amb els components HW, *microprogramari* i SW profundament entrelaçats. A continuació descrivim algunes de les tecnologies habilitadores de l'electrònica del futur.

## Materials i semiconductors d'última generació

Els avanços en la ciència dels materials tenen el potencial de transformar múltiples sectors del mercat, inclosos el farmacèutic, l'energètic, el de transport, el sanitari, el dels semiconductors i l'industrial. Aquests materials inclouen el grafè, una sola capa d'àtoms de carboni disposats en una configuració de xarxa de bresca, que és unes dues-cents vegades més resistent que l'acer, malgrat la seua increïble primesa. És un conductor molt eficient i promet revolucionar el rendiment dels semiconductors. Un altre material és el disulfur de molibdè, les nanopartícules del qual ja s'estan utilitzant en l'electrònica flexible. Els xips de tecnologia nanomètrica i els xips fotònics sobre silici seran així mateix el suport HW dels sistemes ciberfísics intel·ligents.

A títol d'exemple, la Xina està invertint quantitats ingents de diners per desenvolupar semiconductors avançats i, especialment, en el desenvolupament generalitzat dels xips fotònics de silici per usar-los en la transmissió de dades a gran escala amb molt alta velocitat als centres de dades, així com per a la investigació en altres materials del futur, com l'estanè, material que té un potencial enorme en el camp de l'electrònica per la seua superconductivitat i la capacitat que té per a aïllar la calor, i les anomenades terres rares, per a la fabricació de cotxes elèctrics, bicicletes o patinets, que requereixen motors de poc volum i pes i amb un rendiment altíssim. Les energies renovables també depenen de les terres rares.

## *Intel·ligència artificial*

La intel·ligència artificial (IA) és una de les més importants tendències tecnològiques del futur. La pròxima generació de tecnologies d'IA promet comprendre les emocions i les intencions humanes. A mesura que la tecnologia es torne més sofisticada, s'aplicarà per a desenvolupar més eines basades en tecnologia.

Aquesta tendència té els nivells més alts d'aplicabilitat per a la indústria automotriu. Els algorismes d'IA entrenaran les màquines perquè reconeguen millor els patrons i executen una acció en conseqüència. La conducció autònoma és un clar exemple de l'ús de la IA com a ajuda en la conducció de vehicles i flotes.

Així, la IA i les comunicacions ultraràpides, com la tecnologia 5G, tindran un paper fonamental en la consecució d'objectius com la descarbonització, la mobilitat sostenible, la reducció de la dependència energètica, el canvi demogràfic, les necessitats d'electricitat, un món més connectat, etc.

## La internet de les coses

La internet de les coses (IdC) serà un altre dels pilars de la nova societat per a la millora substancial i l'aprofitament òptim de recursos. Així, per exemple, actualment els sistemes de trànsit (semàfors) són autòmats que, amb independència de les condicions de trànsit, de persones, etc., realitzen una seqüència programada d'accions. Mitjançant la interconnexió de vehicles, persones, sistemes de navegació, semàfors i altres actors del trànsit rodant s'optimitzarà la circulació, amb els consegüents estalvis energètics i una menor emissió de gasos contaminants.

## Computació quàntica

Els ordinadors quàntics, molt més ràpids i amb una capacitat de càlcul i d'emmagatzematge més elevada, seran necessaris per a multitud d'aplicacions

futures que comporten el processament de quantitats ingents d'informació. Per exemple, es necessitaran en solucions avançades, a nivell molecular, en la indústria farmacèutica o en el desenvolupament de químiques més eficients per a les bateries de vehicles elèctrics.

A tall d'exemple, avui dia ja existeix un prototip d'ordinador quàntic desenvolupat a la Xina sota la direcció del físic quàntic Jian-Wei Pa, de la Universitat de Pequín. Funciona amb fotons i és capaç de calcular en un mil·lisegon tasques que l'ordinador convencional més ràpid del món tardaria uns trenta mil milions d'anys a realitzar.

## Electrònica de potència avançada

Els convertidors de potència d'altíssima eficiència i de mida i pes reduïts seran totalment necessaris per a aplicar-los a sistemes d'alimentació en grans centres de càlcul, mobilitat elèctrica, sistemes de transport ferroviari, electrònica espacial, etc.

Els semiconductors de potència de quarta generació, com el diamant o el diòxid de vanadi, seran els pròxims materials semiconductors bàsics dels sistemes de potència, els quals permetran altíssimes eficiències, de vora el 99,5 %, i densitats de potència superiors a 200 kW/litre.

## Ciència de dades i *big data*

La ciència de dades és la disciplina que aplega tot el treball d'anàlisi sobre conjunts de dades i que requereix una quantitat considerable d'habilitats en programació, enginyeria i maneig de programari, així com amplis coneixements en matemàtiques, estadística i informàtica. La resolució de problemes mitjançant ciència de dades comporta una sèrie d'etapes, com ara la comprensió de les dades, l'extracció de les seues propietats, el modelatge i l'anàlisi del problema, la presentació de resultats i el desenvolupament de programari per a analitzar el coneixement extret. La ciència de dades proporciona les eines per a tractar

amb el *big data* i el seu ús serà imprescindible en aplicacions com ara el màrqueting digital i la segmentació de clients, els sectors bancari i governamental, la logística, el control d'estocs, la salut pública, la investigació científica, les ciutats i les xarxes elèctriques intel·ligents, el trànsit, etc.

### *Una visió dels sectors vinculats amb l'enginyeria electrònica del futur*

Totes les tecnologies esmentades més amunt són algunes de les tecnologies necessàries per als sectors vinculats amb l'enginyeria electrònica. Així, en el *sector de l'energia*, i d'acord amb un estudi de la Unió Europea, un increment en l'eficiència energètica del 20 % implicaria no importar 2.600 milions de barrils de petroli cada any.

Per posar un exemple de nova font d'energia, la iniciativa anglesa UK Space Energy Initiative persegueix desenvolupar, mitjançant una tecnologia disruptiva, una planta d'energia solar en l'espai que siga capaç d'enviar sense fil, mitjançant microones, a través d'amplificadors de potència de radiofreqüència d'estat sòlid, que transmeten en un feix de microones coherent, gigawatts de potència a la Terra.

D'altra banda, la Xina ha presentat un pla de cinc anys, de 2021 a 2025, per al desenvolupament de tecnologies d'energia que impulsen el creixement verd a través de fonts d'energia avançades, com ara eòlica, solar, hidroelèctrica, nuclear i de biocombustibles.

La *indústria manufacturera* del futur experimentarà canvis molt importants a fi d'augmentar la seua competitivitat gràcies als sistemes d'IA, que permetran línies d'assemblatge d'«automatització flexible» habilitades per sensors intel·ligents. El procés de fabricació no només estarà completament automatitzat, sinó que també s'ajustarà dinàmicament per a reconfigurar les màquines, els requisits de processament i els materials, i adaptarà la seua producció a les comandes en línia existents.

Les cadenes de producció seran autoconfigurables sobre la base de les necessitats de producció i, en conseqüència, s'augmentarà la productivitat i es

reduiran els costos. L'ús d'actuadors reconfigurables i intel·ligents constituirà la base d'aquesta transformació, que només serà possible amb circuits electrònics basats en tecnologies nanoelectròniques, anteriorment descrites, amb unes capacitats de càlcul inimaginables en l'actualitat.

Així, la finalitat de la iniciativa alemanya Industry 4.0 és la millora de la productivitat, de la qualitat dels processos, de l'estalvi energètic i de matèries primeres i de la seguretat dels treballadors, per la realització de les tasques perilloses per *cobots* (robots intel·ligents que interactuen amb humans en un entorn col·laboratiu de treball).

En aquest sentit, l'objectiu de la iniciativa Industry 4.0 és que totes les empreses manufactureres per damunt d'una certa grandària siguin autoconfigurables d'acord amb les necessitats de producció ajustada a comandes, i en les quals maquinària i *cobots* prenguen decisions per si mateixos, interactuen amb els operaris i estiguen interconnectats mitjançant processament en el núvol, internet industrial de les coses i *big data*.

Respecte al *sector transport*, i amb l'objectiu de reduir l'emissió de gasos contaminants i la dependència energètica del petroli, serà fonamental la mobilitat basada en noves fonts d'energia i en la conducció autònoma per al desplaçament terrestre, aeri i marítim, tant de persones com de mercaderies.

Materials com el silici, el carbur de silici, el grafit o el liti són cridats a exercir un paper fonamental per a aconseguir bateries més petites i lleugeres i cada vegada amb més capacitat d'emmagatzematge d'energia. D'altra banda, la recàrrega de les bateries dels vehicles elèctrics tindrà un impacte tècnic i econòmic en el sistema elèctric, i el desenvolupament dels centres de recàrrega serà vital per a la implantació de l'electromobilitat a escala global.

La integració del vehicle en una xarxa elèctrica intel·ligent (*smart grid*) serà un altre dels reptes futurs, per això la tecnologia bidireccional de «vehicle a la xarxa», més coneguda com a V2G, serà un altre dels desafiaments per a fer possible que els vehicles elèctrics puguin retornar a la xarxa l'energia que acumulen en les bateries.

Taxis, autobusos i transports de mercaderies amb tracció elèctrica, noves fonts d'energia i vehicles sense conductor ja comencen a provar-se, i investiga-



dors de l'Institut de Fotònica i Nanotecnologies del CNR italià i del Politècnic de Milà han construït un prototip de bateria quàntica per a vehicles elèctrics que és capaç de ser carregada en tan sols alguns segons, i no en 30 minuts. En el transport aeri, la Xina ha completat amb èxit un prototip d'avió de càrrega no tripulat, propulsat per hidrogen i que conté les tecnologies bàsiques per a l'aviació comercial del futur.

Quant al transport marítim, el Zhi Fei és un prototip de vaixell contenidor autònom que disposa de conducció tripulada, conducció remota i conducció no tripulada. Aquesta versatilitat de navegació li permet realitzar la percepció intel·ligent de l'entorn de navegació, la planificació de rutes independents, la prevenció intel·ligent de col·lisions i la conducció per control remot.

Un altre dels objectius de la Xina és un sistema de transport ferroviari ultramodern. El prototip ART-1 és un tren que no necessita conductor ni rails i que promet revolucionar el sistema de transport ferroviari de mercaderies i passatgers. Es tracta d'un tren d'última generació que utilitza una xarxa de sensors en comptes de rails tradicionals i posseeix tecnologia de conducció autònoma, que monitorea les dimensions de la carretera i traça la seua pròpia ruta en lloc d'utilitzar vies físiques.

Pel que fa al *sector espacial*, dominar l'espai i els satèl·lits és i serà de gran importància en activitats civils i militars, com ara comunicacions, navegació, transmissió de dades, missions científiques, etc. Així, els sistemes de propulsió espacial de tecnologia iònica, proposada el 1929 pel físic Hermann Oberth en la seua obra *Die Rakete zu den Planetenräumen*, amb font d'energia nuclear, són les alternatives als motors dels satèl·lits actuals i permetrien arribar a Mart en un temps rècord: només 39 dies.

### *La formació i innovació en l'electrònica del futur*

Davant el desafiament tecnològic futur, molt més ràpid, competitiu i agressiu que en anteriors revolucions industrials, el desenvolupament dels coneixements científic i aplicat hauria de ser una màxima de qualsevol eco-

nomia per a no perdre el tren de l'evolució i la revolució tecnològica de les pròximes dècades.

En l'àmbit formatiu és important planificar una educació amb una forta càrrega teòrica, però alhora amb la visió de la seua aplicabilitat en tecnologies de futur, com ara els sistemes ciberfísics, la intel·ligència artificial, el *big data*, els sensors intel·ligents, els sistemes per a la fabricació autoconfigurables, els *cobots*, els sistemes de potència d'altíssim rendiment, etc.

Així mateix, cal no oblidar les tecnologies que es troben a la frontera de l'ignot, com l'enginyeria biomimètica, estudis consistents en l'observació dels sistemes i els elements de la natura per a la seua comprensió, emulació i implementació mitjançant sistemes nanoelectrònics.

Des del punt de vista de l'organització de la innovació, descriuré com dues economies representatives i de concepció històrica diferent organitzen la innovació tecnològica.

Alemanya, una economia tradicional, consolidada i basada en el coneixement, i que compta amb una vasta xarxa de centres d'educació superior, una forta investigació industrial i quatre reconegudes institucions d'investigació extrauniversitària, organitza la innovació a través de plans estratègics transversals d'R+D a llarg termini impulsats i liderats per la indústria, i articulats a través de xarxes sectorials específiques d'innovació, i que són definits, de manera coordinada, per l'administració, les universitats, les institucions d'investigació i les empreses.

La Xina, una economia emergent, força puixant i altament competitiva, s'ha marcat, a través del pla Made in China, situar-se l'any 2049 com a primera potència mundial en coneixement aplicat, i amb aquest objectiu organitza el desenvolupament tecnològic a través de megaàrees d'innovació, les anomenades zones econòmiques especials, que concentren el coneixement i la innovació per àrees específiques, i integren universitats, investigadors, instituts d'investigació, empreses emergents i indústries clau, per aconseguir un teixit industrial altament innovador i competitiu.

Així, i pel que fa a l'electrònica, la regió de Shenzhen concentra la indústria electrònica, la regió de Xangai està especialitzada en disseny de xips i sensors avançats, la zona de Pequín en bateries i investigació aeroespacial, etc.

I davant la revolució tecnològica futura, es torna més d'actualitat la coneguda frase que va pronunciar cap al 1850 el geni alemany Goethe: «El saber no és suficient, cal aplicar-lo».

### *Agraïments*

M'han de permetre acabar aquesta lliçó magistral amb un comentari personal: al setembre de 1972 vaig donar la meua primera lliçó en aquesta, la meua universitat, i just cinquanta anys més tard, al setembre de 2022, acabe de donar la meua última lliçó. Voldria expressar en aquest moment el meu més sincer agraïment a la direcció de l'ETSE per haver-me proposat per a impartir aquesta lliçó magistral i als òrgans de govern de la Universitat de València per la seua acceptació.

Moltes gràcies

### BIBLIOGRAFIA

GRAEF, Mart: «Positioning More Than Moore Characterization Needs and Methods within the 2011 ITRS», *Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics* 1395 (1). DOI: 10.1063/1.3657913.

IBÁÑEZ DE ALDECOA, Juan Miguel: «Micro y nanoelectrónica: aspectos básicos de una de las seis tecnologías habilitadoras clave desde un punto de vista técnico y económico», *Economía Industrial* 409.

KLOSS, Albert (1987): *Von der Elektrizität zur Elektrizität*, Basilea, Birkhäuser Verlag.

- MARTÍNEZ CORTÉS, José Ignacio: «VI Simposio Electrónico Internacional. China 2050: Base 2030», en línea: <[www.politica-china.org](http://www.politica-china.org)>.
- PATURI, Felix R. (1988): *Chronik der Technik*, Dortmund, Chronik Verlag.
- VALENCIA GARCÍA, Alejandro (2021): *El plan Made in China 2025: Desarrollo de industrias 4.0 en China y sus impactos en las relaciones políticas y económicas con sus principales socios comerciales*, treball de final de grau, Facultat de Ciències Humanes i Socials, Universitat Pontificia de Comillas.
- VOLKMANN, Peter (1990): *“Technikpioniere”: Namensgeber von Einheiten physikalischen Grössen*, Berlin / Offenbach, VDE Verlag.
- WORLD ECONOMIC FORUM (2021): «Top 10 tech trends that will shape the coming decade, according to McKinsey», en línea: <<https://www.weforum.org/agenda/2021/10/technology-trends-top-10-mckinsey/>>.

## RECURSOS ELECTRÒNICS

- <https://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia-china-presenta-computadora-cuantica-10000-millones-veces-mas-rapida-20211026114927.html>
- [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-05-15/planta-de-energia-solar-espacio-2035\\_3424467/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-05-15/planta-de-energia-solar-espacio-2035_3424467/)
- [https://www.hosteltur.com/127645\\_china-prueba-un-avion-con-hidrogeno-y-sin-piloto.html](https://www.hosteltur.com/127645_china-prueba-un-avion-con-hidrogeno-y-sin-piloto.html)
- <https://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia-china-presenta-computadora-cuantica-10000-millones-veces-mas-rapida-20211026114927.html>
- [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-06-04/china-motor-iones-space-x-elon-musk\\_3115251/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-06-04/china-motor-iones-space-x-elon-musk_3115251/)
- <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/china-muestra-prototipo-motor-electrico-plasma-aviones-comerciales/20220601201841058635.html>
- <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/materiales-del-futuro-ciencia/>

<https://www.caranddriver.com/es/estilo-de-vida/a30297440/china-tren-autonomo-sin-railes/>

<https://www.xataka.com/otros/china-lanza-primer-buque-teledirigido-autonomo-mundo-para-transportar-drones-zhu-hai-yun>

[https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2022-05-26/barco-tecnologia-china-mar-misiones-militares\\_3431279/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2022-05-26/barco-tecnologia-china-mar-misiones-militares_3431279/)

[https://www.vozpopuli.com/next/material-revolucionario-futuro-ciencia-ficcion\\_0\\_1106590118.html](https://www.vozpopuli.com/next/material-revolucionario-futuro-ciencia-ficcion_0_1106590118.html)

<https://www.weforum.org/agenda/2021/10/technology-trends-top-10-mckinsey/>

<https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/Business%20Functions/McKinsey%20Digital/Our%20Insights/The%20top%20trends%20in%20tech%20final/Top-trends-in-tech-executive-summary-6-24-21>.

<https://mexicobusiness.news/automotive/news/mckinseys-top-trends-tech-influencing-automotive-part-i>

<https://mexicobusiness.news/automotive/news/mckinseys-top-trends-tech-influencing-automotive-part-ii>

<https://europeansting.com/2021/10/13/these-are-the-top-10-tech-trends-that-will-shape-the-coming-decade-according-to-mckinsey/>





LLIÇONS



MAGISTRALS

VNIVERSITAT  
® VALÈNCIA