



RASC

Real Academia
Sevillana de Ciencias

Circuitos electrónicos para procesamiento en tiempo discreto

discurso pronunciado por el

Ilmo. Sr. D.

José Luis Huertas Díaz

en el acto de recepción como académico numerario
el día 27 de noviembre de 2006

y

contestación del académico numerario

Excmo. Sr. D.

Rafael Márquez Delgado

PROCESAMIENTO EN TIEMPO DISCRETO

*Discurso pronunciado por el
Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas Díaz,
en el Acto de su recepción como Académico Numerario
celebrado el día el 27 de noviembre de 2006*

1. INTRODUCCIÓN Y SUMARIO

Excelentísimo Señor Presidente de la Academia, Excelentísimos e Ilustrísimos Señores Académicos, Apreciados colegas, Señoras y Señores.

Aunque por lógico pueda parecer superfluo, quiero comenzar diciendo que es para mí un honor y una satisfacción estar aquí cumplimentando lo establecido para ingresar en la Real Academia Sevillana de Ciencias. Y no sería correcto en esta introducción no dejar constancia de mi profundo y sincero agradecimiento hacia los miembros de esta Corporación que, con tanta generosidad, han apostado por incluirme en este ilustre Claustro, y con tanta paciencia me han permitido dilatar este acto.

Y ya que empiezo dando las gracias, quiero también expresar mi reconocimiento a todos aquellos que han contribuido a que esté aquí en este día. A aquellos que fueron mis maestros, especialmente al recientemente desaparecido Profesor Civit Breu, a quien tanto debo yo y tanto debe la Física en la Universidad de Sevilla; a los compañeros de estudios y de Claustro; a los que fueron mis estudiantes de doctorado y hoy son mis colegas y pueden darme lecciones en muchos campos. Y, por supuesto, a mi familia, que soportó soledades y ausencias, y pese a ello todavía me apoya y me quiere. A los amigos que, de una forma u otra, en un contexto u otro, aportaron su valiosa contribución. A todos, muchas gracias.

No es fácil elegir tema para una lección como ésta. Se asume que debe “explicar” –o justificar– para la audiencia las razones por las que el que la imparte ha sido elegido para formar parte de esta Institución académica, desarrollando algunas de las contribuciones que el candidato haya podido hacer al avance de la ciencia. En este sentido, he supuesto que, dado mi carácter de especialista en Electrónica, se espera que esta disertación plantee cuestiones en relación con esta materia científica que puedan ser de interés para colegas de otras áreas, incluidas –y quizá, sobre todo– las relacionadas con la Física y las Tecnologías Físicas. Intentaré no defraudar esas expectativas.

Pero incluso con esta idea como centro, no ha sido sencillo decidirme. En primer lugar, porque la Electrónica es, pese al uso y abuso que hacemos de ella a diario, una

materia menos familiar para el no especialista que las áreas clásicas de la Física. En segundo lugar, porque mi trabajo a lo largo de todos mis años de vida profesional ha sido bastante variado y ha estado tan conectado con el trabajo de otros que, a mí mismo, me cuesta separarlo. A esto hay que añadir mi intención de no quedarme en un nivel que escape a la comprensión de aquella parte de la audiencia que no es especialista en esta materia.

He sido un estudioso de las vertientes científica y tecnológica de la Electrónica a lo largo de los últimos treinta y siete años. Me resulta difícil –deben comprenderlo– seleccionar un tema específico de esta materia para hacer de él el eje nuclear de esta exposición, y hablar de tal tema en detrimento del resto.

De ahí que haya optado por una solución que quizá sea poco ortodoxa –aquí estaría bien hacer la broma de decir poco “académica”– y abordar esta charla desde una perspectiva que pretenda sobre todo el interés de la audiencia. Para hacer esto estructuraré mi presentación en cinco partes.

Una primera en la que pretendo reflexionar sobre el concepto de cuantización de la Información, como un elemento básico en el desarrollo de la Electrónica y de sus continuantes (la Microelectrónica o la Nanoelectrónica).

Para reforzar esa idea y fundamentar su importancia, así como para ayudar al no especialista a entender el contexto, pasaré a dar unas pinceladas básicas sobre la evolución de la Electrónica. A esto seguirá una tercera parte en la que, al hilo de los problemas existenciales de esta materia en un momento determinado de su historia, pongo énfasis en la aparición de una técnica de circuito que ha sido muy importante para el desarrollo actual del área y, en particular, tuvo gran impacto sobre la investigación que hemos hecho y continuamos haciendo en el Instituto de Microelectrónica de Sevilla. Me refiero a las técnicas analógicas de procesamiento de tiempo discreto, basadas en ese concepto de cuantización al que he hecho referencia.

Siguiendo ese hilo argumental, en una cuarta parte haré un pequeño resumen de mis contribuciones personales y las de mis discípulos y colegas, las de aquellos que formamos parte del IMSE-CNM.

Finalmente me permitiré hacer unos comentarios sobre las orientaciones futuras de la Electrónica, con todo lo que eso conlleva de elucubrativo y arriesgado.

Pido perdón, de antemano, por errores y omisiones, que no se deberán más que a mi desconocimiento o falta de competencia, y espero, sobre todo, no tener que disculparme por el peor de estos errores: el de haberlos inducido a aburrirse.

2. LA ELECTRÓNICA Y LA DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

La Electrónica es la ciencia que estudia el *intercambio*, el *almacenamiento* y el *tratamiento* de la información contenida en señales eléctricas y es también la tecnología que proporciona dispositivos y circuitos para hacerlo posible. Como ven, una ciencia íntimamente unida a una tecnología; o quizá sea posible hablar de una ciencia tecnológica. En cualquier caso, la imbricación de dos maneras complementarias de

contemplar un mismo problema: el transporte de carga eléctrica y su uso como soporte de información.

Desde luego, en estas tareas que se reflejan en su definición, la Electrónica está hoy día auxiliada por cuerpos de doctrina que nacieron a su calor pero que, aunque todavía muy vinculados a ella, tienen vida propia y métodos específicos. Me refiero a la Teoría de Modulación, los Sistemas de Comunicaciones, la Teoría de Codificación y la Informática, entre otras. Muchas de estas materias están tan próximas que es imposible evitar solapes cuando hablamos de Electrónica.

Volviendo a la definición que hemos dado, los aspectos de *intercambio, almacenamiento y tratamiento* de datos son tan antiguos que, con seguridad, son coetáneos a la aparición del lenguaje hablado y han sido de interés para el hombre desde que los primeros homínidos traspasaron el brumoso umbral que los convirtió en seres racionales –cualquiera que sea lo que signifique racionalidad–. La escritura es un buen ejemplo de lo que decimos: está orientada a intercambiar, guardar y elaborar información, siendo el lenguaje y sus símbolos la vertiente “científica”, y conformando su soporte (tabletas de barro, madera, papiro, papel,...) junto con los utensilios o dispositivos para escribir (punzones, pinceles, plumas, impresoras,...), los elementos característicos de la tecnología desarrollada.

Sin embargo, lo distintivo de la Electrónica es que tanto el soporte como los utensilios tienen naturaleza eléctrica; es decir la Electrónica trata de comprender los mecanismos que controlan el flujo de electrones y/o huecos en ciertos medios, y de crear y combinar dispositivos que usen ese flujo y esos portadores para manejar información.

Cuando damos una visión como ésta, no podemos dejar de pensar en la aplicación más conocida de la Electrónica, el computador u ordenador digital, actualmente omnipresente en nuestras vidas. Pero, aunque muy importante, no es la única y probablemente valga la pena mencionar otras aplicaciones en esta exposición. Ciertamente la aparición y popularización del computador digital ha sido fundamental en la influencia social y tecnológica de esta materia. Define y ejemplifica –el ordenador– todo un mundo dentro de la Electrónica: el de la llamada Electrónica Digital, soportada en el manejo de datos en formato binario y, por tanto, con un valor cuantizado. Frente a ese mundo binario se alza el mundo continuo que llamamos Electrónica Analógica, caracterizado por la manipulación de señales y variables eléctricas de carácter continuo.

Quiero enfocar nuestra atención sobre un hecho que, aunque bastante conocido, pasa desapercibido –al menos en cuanto a sus implicaciones– para quien no trabaja en este campo científico. Me refiero al carácter discreto del procesamiento de información. Desde luego, una mayoría está hoy familiarizada con el uso de las técnicas de codificación binarias, al menos desde una perspectiva generalista. Todos sabemos que los ordenadores representan la información por medio de secuencias numéricas de ceros y unos, discretizando por tanto cada valor de una variable que contenga esa información. Esto conduce al hecho de que el mundo “continuo”, que nuestros sentidos perciben y la Física describe, quede reducido a una aproximación “numérica”.

La Física ha demostrado que, cuando el universo se observa a nivel submicroscópico, la materia no es continua sino que hay una cuantización vinculada a la dualidad

materia-energía. En una curiosa analogía, la Electrónica actual favorece considerar la Información como una sucesión de valores cuantizados en el tiempo. Sólo en instantes discretos del tiempo –normalmente espaciados de manera uniforme– hay un cambio en el contenido de la Información.

Hay, en el caso que nos ocupa, dos procesos diferenciados de cuantización. Por un lado, el hecho obvio de que en el ámbito de un computador los valores de las variables implicadas se representan en un código binario, que necesariamente introduce un cierto error de redondeo, debido a la precisión finita con la que podemos representar la información. Este proceso es suficientemente conocido y afecta sólo a la Electrónica digital, pero no es aquel al que queremos prestar nuestra atención en esta conferencia.

Al contrario, nuestra protagonista es la necesaria discretización temporal, también fundamental para los sistemas digitales. Es decir, el hecho de que, para poder procesar la información, debemos tomar muestras de los datos continuos que queramos analizar y limitarnos, por tanto, a manipular una aproximación que no es una función continua del tiempo sino una secuencia de datos generada a partir de una variable física continua. Este proceso de muestreo no es más que la realización de una medida periódica del valor de una señal.

Puede resultar sorprendente, pero el auge de la electrónica digital ha llevado a cuantificar el universo de la información a través de su representación “numerizada”. Los ordenadores trabajan sobre esta hipótesis, pero no son los únicos sistemas o circuitos electrónicos en manipular señales discretas. En esta presentación vamos a intentar introducir la importancia -mejor, la relevancia- que la cuantización o discretización ha adquirido incluso en la Electrónica Analógica actual. Desde luego no pretendo equiparar las visiones que del concepto abstracto “discretización” tienen la Cuántica y la Electrónica. Pretendo simplemente hacer reflexionar sobre el papel que ese concepto tiene en la Electrónica y, en virtud de su aplicación, incluso sobre nuestra vida cotidiana, dado que usamos continuamente aparatos electrónicos cuya operación y funcionamiento dependen y están basados en ese concepto de discretización.

En esta presentación, voy a intentar hacer evidente dos hechos: una, la aparición de la discretización como elemento esencial en el tratamiento de datos, y otro su simplicidad conceptual e importancia práctica para procesar señales continuas. Asimismo, quiero hacer ver que ese concepto ha dado lugar a la existencia de entidades físicas muy sencillas –o relativamente sencillas– que se gobiernan, con algunas simplificaciones, por ecuaciones discretas y que se conectan y entroncan con representaciones matemáticas tomadas prestadas del cálculo numérico. Como consecuencia de todo ello, veremos también que –sorpresas de la naturaleza– tales entidades pueden dar lugar, pese a su aparente simplicidad, a comportamientos complejos cuyo estudio merece atención y dista de ser de interpretación trivial.

En este contexto, se me ha ocurrido elegir un tipo específico de circuitos cuya operación, siendo como digo muy simple, aparece como novedosa para el no iniciado y permite ilustrar elementos conceptuales y prácticos que son interesantes y probablemente sólo conocidos por especialistas. A los que hay en la sala, pido disculpas de antemano por detenerme en algo que les puede parecer trivial.

Me refiero a un tipo de procesamiento que no es digital ni tampoco analógico en stricto sensu, y que da lugar a sistemas que permiten realizar eficientemente alguna de las tres tareas básicas que hemos mencionado respecto a la manipulación de Información.

Insisto en que, aunque su operación puede parecer poco compleja, resume aspectos muy curiosos en los que los especialistas de otras ramas de la Física y las Matemáticas –al menos ellos– encontrarán interesantes paralelismos con su propia actividad, fundamentalmente aquellos que recurren a la simulación y/o el cálculo numérico como herramientas clave.

Comenzaré por hacer un repaso histórico, intentando que el hilo conductor sean los tres ejes mencionados en la definición de la Electrónica: *intercambio*, *almacenamiento* y *tratamiento* (empleando un soporte eléctrico). Y que ese hilo, como el de Ariadna, nos lleve hasta ese tipo de circuitos que quiero descubrir hoy para los legos en la materia. Si lo consigo, si les sorprende y entusiasma con su simplicidad y elegancia, habré conseguido mi objetivo.

3. LOS INICIOS DE LA ELECTRÓNICA

La Electrónica tiene una deuda importante con los avances de la Física a lo largo del siglo XX. Así, sin el desarrollo y evolución de la Física Atómica, de la Mecánica Cuántica, de la Mecánica Estadística o de la Física del Estado Sólido, no habría sido posible la invención de los dispositivos electrónicos actuales. A partir de ahí, sin embargo, los mecanismos de conducción macroscópicos –y, por tanto, la Física más clásica– son los que regulan las ecuaciones de estos dispositivos (con algunas notables excepciones como el diodo túnel o ciertos dispositivos emergentes basados en el desarrollo actual de la Nanotecnología), por lo que la vinculación mayor de la Electrónica es, sin duda, con el Electromagnetismo.

Partiendo de la definición que hemos dado, es muy difícil hacer una separación dicotómica entre los aspectos científicos de la Electrónica y su vertiente tecnológica, debido a la fuerte interrelación entre ambas. Se admite que su nacimiento –el de la Electrónica– tiene lugar con el descubrimiento del electrón y el estudio de las propiedades de la corriente eléctrica. Sin embargo, de forma casi simultánea, las primeras aplicaciones del transporte de electrones orientan y condicionan la evolución temática y metodológica de la materia.

Entre estas aplicaciones hay dos que, con la perspectiva actual, son nucleares. Por una parte las comunicaciones y por otra la computación, actividades muy separadas entre sí originariamente, aunque hoy día han confluído hasta estar íntimamente relacionadas. Obsérvese que resumen las tres coordenadas de la Electrónica. Las comunicaciones en cuanto se refiere al *intercambio* de información, y la computación en relación a su *almacenamiento* y *tratamiento*. Ambas aplicaciones –aparte de otras que no mencionaré– incentivan a lo largo del siglo XIX y en los albores del siglo XX el estudio de dispositivos que permitan una ganancia local de potencia (dispositivos activos). Estos

dispositivos son característicos de la Electrónica en contraposición a los componentes pasivos objeto de estudio por parte del Electromagnetismo. El interés despertado por los experimentos de Wheatston (1839) y Morse (1845) en telegrafía, de Bell (1875) en telefonía, y posteriormente los trabajos de Herz (1888) y Marconi (1896) en radio, prepararon el camino para que la nueva ciencia se consolidara. De la misma forma, se había ido gestando un gran interés en implementar máquinas de calcular eficientes, empleando los avances tecnológicos disponibles. Destacan en este sentido los prototipos contruidos por Babbage (1833), Scheutz (1854) y Hollerit (1890), entre otros.

La invención del diodo de alto vacío por Fleming en 1904 marca el primer hito histórico importante de esta materia. Se trataba de dos electrodos separados y confinados en una ampolla de vidrio en la que se había hecho el vacío, a los que se unía un sistema interno de calentamiento de uno de esos dos electrodos (el cátodo). Cuando se procede al calentamiento del cátodo se desprende un flujo de electrones que es atraído por el ánodo. Al hecho de que los portadores de esa corriente a través del vacío fueran electrones, se debe que estos dispositivos fueran llamados tubos electrónicos y a la ciencia que se interesaba por ellos Electrónica. Es Einstein quien describe y explica el principio en que se basan estos dispositivos: el efecto termoiónico.

En 1906, Lee de Forest añade un tercer electrodo –comúnmente llamado rejilla– que permite controlar el flujo de la corriente de electrones cátodo-ánodo. El nuevo dispositivo recibe el nombre de triodo o audión. La capacidad de control que proporciona el tercer terminal permite la amplificación de la variable eléctrica o señal aplicada a la rejilla, lo que entonces se comenzó a emplear en la transmisión de señales por radio. Había nacido una nueva ciencia tecnológica.

Estos tubos o válvulas evolucionan a lo largo de cuatro décadas desde diferentes perspectivas. Se rellenan de distintos gases o se generan haces de electrones controlables por medio de campos electromagnéticos, por ejemplo. Así nacen los tiratrones, magnetrones y klystrones o los tubos catódicos para la emergente televisión.

Al aparecer el triodo, surge el problema de cómo conectarlo a resistencias, condensadores y/o inductores para realizar sistemas capaces de transmitir información. De forma natural se echa mano de un cuerpo de doctrina nacido al amparo del Electromagnetismo, la Teoría de Circuitos, que contribuyeron a configurar a lo largo del siglo XIX nombres insignes tales como Ohm (su célebre ley fue enunciada en 1826), Kirchhoff, Helmholtz, Heaviside, Kennelly y Russel.

El concepto de impedancia, el uso –en forma ad-hoc inicialmente– de la variable compleja (Campbell, 1911) y el concepto de bipuerta o cuadripolo (Breisig, 1921), configuran las bases de la herramienta que la Electrónica precisa para realizar circuitos.

A esto hay que añadir el esfuerzo que se estaba realizando en paralelo para el desarrollo de la telefonía de larga distancia. La teoría de líneas cargadas, el diseño de los primeros amplificadores bi-direccionales (o repetidores) y los incipientes problemas de inestabilidad que aparecen en los sistemas telefónicos empujan en la misma dirección que las necesidades de la Electrónica. La consecuencia más importante es el descubrimiento, independientemente por Campbell y Wagner, durante la Primera Guerra Mundial, del filtro eléctrico; un circuito capaz de tener un comportamiento selectivo

con respecto a la frecuencia de las señales con que es excitado. A ello le siguen los primeros pasos en la síntesis y modelado de tales filtros.

Las primeras aplicaciones importantes de los triodos fueron amplificadores y osciladores, usados extensamente en radiocomunicaciones. Aunque se construían sin problemas aparentes, los modelos utilizados eran toscos y, como demostró Nyquist en 1932, incorrectos. El razonamiento dominante estaba basado en suposiciones que sólo pueden mantenerse en régimen transitorio, pero no cuando se alcanza el estacionario. En esencia, se trataba de una mala formulación del concepto de realimentación, que hoy aplicamos ampliamente en muchos campos de la Ciencia. El concepto de estabilidad condicional, predicho por Nyquist, fue verificado experimentalmente por Peterson en 1934 y sistemáticamente discutido por Black el mismo año. Sin embargo, la domesticación del concepto de realimentación negativa y su empleo en el diseño de amplificadores altamente lineales de banda ancha no tiene lugar hasta los trabajos de Bode (1940-1945).

Por completar el panorama, en el ámbito de las comunicaciones tiene lugar la invención y perfeccionamiento del receptor superheterodino (Armstrong, 1918), y la introducción del muestreo de señales y de diferentes técnicas de modulación, que perfeccionaron la calidad y el alcance de las transmisiones radioeléctricas.

Una de las pocas ventajas de la Segunda Guerra Mundial fue, sin duda, el esfuerzo investigador que trajo consigo. Es una pena que tengan que darse situaciones tan dramáticas para que los políticos se convenzan de la importancia de la Ciencia, pero ese es el hecho. Hubo numerosos avances en ambos bandos pero, en lo que concierne a la Electrónica y materias afines, los más importantes se produjeron en tres líneas concretas. De una parte, las comunicaciones demostraron su carácter estratégico y fueron perfeccionadas enormemente, sobre todo las inalámbricas. Por otra, se generó una necesidad acuciante de disponer de máquinas capaces de realizar cálculos complicados en un tiempo corto. Finalmente, se llegó al convencimiento de que la Electrónica era un elemento esencial para esas dos aplicaciones –y para otras muchas–, pero que los tubos de vacío presentaban problemas importantes que aconsejaban buscar en otro tipo de dispositivos el soporte para la futura evolución de este ámbito científico.

Lo que vino a demostrar el desarrollo de esta guerra fue la importancia de disponer de armamento con mejoras basadas en la Electrónica. Especialmente en el caso de la Aviónica, ya que el peso, tamaño, potencia y fiabilidad de la electrónica embarcada se convirtió en elemento crítico. Por ejemplo, un B-52 –la célebre fortaleza volante– portaba sistemas electrónicos con más de un millar de válvulas, lo que venía a significar un peso en el rango de la tonelada, una disipación de potencia del orden de kilowatios y un tiempo entre fallos que no era muy superior al tiempo de vuelo de una misión típica. Estos números llevaron a apuntar como estratégica la búsqueda de dispositivos basados en otros principios físicos que no impusieran las restricciones que presentaban los basados en el efecto termoiónico.

Precisamente, justo después de la guerra, en 1946, se construye el primer computador electrónico, ENIAC, una gigantesca máquina cuyas capacidades nos hacen sonreír hoy día. Un mastodonte de tres pisos con unas 18000 válvulas electrónicas, que pesa-

ba unas 100 Tm, ocupaba 100 metros cuadrados, disipaba 150 kilowatios –¡toda una estufa!– y demostró tener un tiempo medio entre fallos en torno a una hora. Y todo ello para proporcionar unas prestaciones inferiores a las de una calculadora de bolsillo actual. De nuevo los problemas derivados del empleo de válvulas conducían al mismo punto: era imprescindible buscar otros dispositivos.

Finalmente, en el año 1947 –un año que para mí es muy importante, ya que nací en él– tiene lugar la invención y construcción del primer dispositivo activo de estado sólido: el transistor bipolar de unión (estrictamente hablando, transistor de punta de contacto). Descrito y patentado a finales de ese año, significó el premio Nobel para Shockley, Bardeen y Brattain, investigadores de Bell Labs que demostraron que una estructura semiconductor formada por tres capas de germanio con dopados apropiados podía actuar como un amplificador elemental, esto es, como un dispositivo que permitiera transmitir una señal eléctrica desde uno de sus terminales (entrada) a otro (salida) pero incrementando la energía de esa señal. Se trataba del primer transistor bipolar llamado BJT (de Bipolar Junction Transistor), un dispositivo o componente de tres terminales en el que el transporte de carga es soportado por portadores de ambas polaridades (electrones y huecos).

No existe un hito puntual tan significativo en las comunicaciones de esa época, aunque hay que señalar la enorme expansión en el uso del espectro de VHF y UHF en radio y televisión que tuvo lugar durante e inmediatamente después del conflicto bélico. Quizá cabe resaltar la publicación en 1948 del libro “Mathematical Theory of Communication”, de Claude Shannon, piedra angular de esta área.

Revisando los tres campos (comunicaciones, computación, y dispositivos) observamos una diferencia importante. En los dos primeros los avances son fundamentalmente avances tecnológicos, y repercuten en dos aplicaciones que hoy no es preciso justificar: la transmisión de información y la manipulación de esa información –cuyo caso más obvio es el cálculo numérico–. En cambio, el descubrimiento de ciertos mecanismos de conducción en sólidos y su uso en la invención del transistor, conforman un avance científico importante y, al mismo tiempo, un cambio tecnológico que permite abordar –con el transcurso del tiempo– mejoras significativas en las dos aplicaciones primero citadas.

4. DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Como ya se ha dicho, en Electrónica no es posible desvincular avance científico de logro tecnológico, ni mejora tecnológica con impacto en las aplicaciones. Por eso, la continua evolución del conocimiento en el núcleo científico de la Electrónica no puede separarse de los dispositivos y circuitos que gracias a ese núcleo se generan, ni tal evolución de los dispositivos se puede disociar de las mejoras que las aplicaciones van experimentando gracias al empleo de esos dispositivos.

Haciendo un resumen de la evolución de este núcleo científico-tecnológico, los dispositivos y circuitos tienden –por las razones ya expuestas de carácter militar– a ser

cada vez menores, más rápidos, más fiables, más predecibles, menos costosos y con un consumo de potencia menor. Tal evolución comenzó con el progresivo abandono de los tubos de vacío a favor de los transistores bipolares. A ello contribuyó decisivamente la liberalización de sus patentes por parte de ATT en 1955, lo que aceleró la sustitución de las válvulas, que quedaron progresivamente arrinconadas en aplicaciones de alta frecuencia y potencia elevada.

A lo largo de los cincuenta se perfecciona la tecnología de fabricación de transistores bipolares, desarrollándose técnicas que permitieron abaratar los costes de fabricación y extender los rangos de operación de estos componentes. La introducción del proceso planar y el progresivo abandono del germanio en favor del silicio, fueron elementos claves de este cambio. Asimismo, un viejo concepto es llevado a la práctica de manera eficiente; se trata del transistor de efecto de campo o FET (de Field Effect Transistor), en el que el flujo de portadores mayoritarios es el responsable de los procesos de conducción. Estos primeros transistores unipolares (en los que el transporte de carga se debe bien a electrones bien a huecos), son llamados de unión o JFET; a ellos pronto les siguen las estructuras MOST (Metal-Oxide-Semiconductor Transistor) o MOSFET. El tamaño de los FETs puede ser menor y sus necesidades energéticas más reducidas, lo que le hizo aparecer pronto como una alternativa de futuro frente al transistor bipolar. Sobre todo cuando se introdujeron las estructuras MOS complementarias (CMOS), basadas en el empleo simultáneo de un transistor de canal N y otro de canal P.

Otro hecho capital es el desarrollo del circuito integrado. La idea es muy simple, ¿por qué no usar los propios materiales semiconductores para construir, además de transistores, dispositivos pasivos e incluso los propios “cables” de conexión? Independientemente, Kilby y Noyce llevan a cabo la idea y patentan los dos primeros chips que se conocen. Jack Kilby (1958) consigue realizar un circuito en el que todos los componentes, activos y pasivos, han sido fabricados sobre una pieza única de silicio, si bien los interconecta con cables metálicos. Robert Noyce (1959) va más allá e incluye las conexiones en el propio sustrato, depositando líneas metálicas a partir de los mismos procesos de deposición que se utilizan para construir el circuito. Desde ese momento, la carrera está servida. Así, al borde de 1960 se llega al concepto de circuito monolítico o integrado, en el que todos los componentes están realizados sobre un mismo sustrato semiconductor.

Posteriormente, según avanza la década, los transistores unipolares (JFETs y MOSFETs) fueron mejorando las prestaciones en función de todas las coordenadas citadas y fueron sustituyendo gradualmente a los BJT en la mayoría de las aplicaciones. Se fueron comercializando diferentes tipos de circuitos integrados, fundamentalmente de índole digital (puertas lógicas y biestables) aunque también se desarrollaron amplificadores diferenciales integrados.

Todo esto hay que contemplarlo en las condiciones competitivas de los años sesenta y setenta: la guerra fría, la carrera espacial, el desarrollo armamentístico, el descubrimiento de las tecnologías reutilizables (uso civil de tecnologías militares), y el auge inesperado de una industria electrónica que abría constantemente nuevos mercados. Fundamentalmente, la sorpresa que significó para el Departamento de Defensa norte-

americano constatar que los soviéticos iban por delante en la exploración del espacio, se tradujo en un nuevo apoyo sin reservas a la investigación en Electrónica.

Hacer un resumen detallado requeriría mucho más espacio y tiempo del que disponemos, por lo que conviene limitarse a la evolución del más popular y utilizado de los dispositivos actuales: el transistor MOSFET (o, simplemente, MOS). Su gran atractivo es que combina unas características operativas muy ventajosas (bajo consumo, alta velocidad, pequeño tamaño, gran versatilidad, ...) con el hecho de que su fabricación a gran escala es muy barata, gracias a procesos físicos y químicos variados. Esto ha permitido llegar a densidades que parecen increíbles y que se han aprovechado para muy diversas aplicaciones.

Esta evolución del transistor MOS y su uso en chips más o menos complejos popularizó el término Microelectrónica, para referirse a aquella parte de la Electrónica que estudia los circuitos integrados.

5. APARECE EL MICROPROCESADOR

La evolución de los circuitos integrados, favorecida por continuos avances en los procesos de fabricación del transistor MOS a nivel industrial, condujo a principios de la década del 70 a la aparición del primer computador integrado. Se trataba de la familia INTEL 4000, constituida por un chip de procesamiento –el primer microprocesador, 4004–, y tres chips que soportaban las funciones de memoria y de entrada/salida. Este microprocesador, de 4 bits, estaba realizado por algo más de 2300 transistores MOS de canal P de 10 μm y un espesor de óxido de 150 nm (una tecnología hoy obsoleta) sobre un sustrato de silicio, y trabajaba a una frecuencia de reloj de 108 KHz, con una capacidad máxima de direccionamiento de memoria de 640 bytes.

Enseguida aparecen otros microprocesadores en el mercado (series 8000, 4040 y 8080 de INTEL, o 6800 de MOTOROLA), iniciándose una carrera que prosigue en nuestros días, en la que han ido apareciendo generaciones sucesivas, con precisiones cada vez mayores y tiempos de ciclo operativo cada vez menores. Su empleo en la construcción de ordenadores ha contribuido al abaratamiento de éstos y a un enorme incremento en sus prestaciones, así como al uso de microprocesadores, microcontroladores o microcomputadores en tareas que hubiera sido difícil imaginar en aquellos momentos iniciales.

Al gran desarrollo de los microprocesadores contribuye decisivamente la aparición de los circuitos de memoria empleando transistores –de nuevo la versatilidad de esos componentes–. Hasta prácticamente 1970, las memorias de ordenador empleaban matrices de núcleos de ferrita, de dimensiones relativamente grandes y con tiempos de acceso muy lentos. A partir de la introducción del 4004, las memorias integradas ocupan el mercado y desbancan a todas las demás tecnologías, relegando a los elementos magnéticos u ópticos a otras funciones en las que hoy día destacan los CDs, DVDs, cartuchos magnéticos, etc.

La evolución del microprocesador (o procesador-en-un-chip) y el progresivo abaratamiento de las memorias semiconductoras han sido los causantes de un continuo cambio en la industria de la computación. Para hacer breve una visión de esos cambios, baste señalar que las familias de INTEL posteriores a Itanium, actualmente en desarrollo, están realizadas en tecnología CMOS de 25 nm, con procesadores formados por más de 400 millones de transistores, pueden direccionar hasta 64 Gbytes de memoria física y 64 TBytes de memoria virtual, y funcionan con señales de reloj que se acercan progresivamente a los 10 GHz.

6. LA PARADOJA DIGITAL: SER O NO SER (DIGITAL)

No nos es posible detenernos en la evolución que ha experimentado el microprocesador desde sus orígenes hasta el presente, ni es ése el objetivo de esta charla. En cambio, sí es importante para nuestros propósitos hablar de las consecuencias de su evolución tecnológica en cuanto a su estructura y su uso. Concebido inicialmente como un procesador en un chip, su empleo estaba orientado a las tareas típicas de un computador, esto es, a la resolución de ecuaciones o a la simulación de problemas físicos, por ejemplo. Sin embargo, muy pronto comienza a comprenderse que se trata de un componente mucho más versátil, no sólo por su tamaño, sino por que puede adaptarse a problemas específicos para los que un computador de propósito general no es la elección más adecuada. De esta forma, tras sus comienzos como una ayuda para realizar cálculos complicados, el microprocesador se ha adaptado a cubrir muchas otras necesidades. Aparecen así, microprocesadores de propósito específico, orientados a la resolución de problemas concretos. Tienen una estructura y una funcionalidad dirigida a optimizar su operación en el contexto de determinadas aplicaciones. Con el tiempo, tiende a verse como un componente más de la Microelectrónica. Un componente muy complejo, desde luego, pero pieza al fin de sistemas de mayor complejidad aún.

Lo destacable es que el microprocesador abrió la puerta al uso intensivo del paradigma digital para resolver los problemas que la Electrónica tenía planteados. Basándose en la codificación binaria de la información, poco a poco el microprocesador fue haciéndose ubicuo en todos los ámbitos de aplicación en los que la Electrónica estaba presente.

La idea que comenzó a flotar en el ambiente era intentar hacer en digital todo lo que se pudiera, hecho motivado por una serie de ventajas innegables: procesamiento relativamente rápido y muy preciso, almacenamiento fácil, simplicidad de diseño, reuso eficiente del conocimiento, automatización del proceso, robustez frente a variaciones incontroladas (e incontrolables, como el ruido, la temperatura, la radiación), bajo costo (basado en grandes producciones), etc. En un cierto momento, hubo profetas que anunciaron la desaparición de la Electrónica Analógica y el progresivo paso a digital de todos los sistemas electrónicos.

Ciertamente, a las ventajas que se acaban de apuntar más arriba de los circuitos digitales, hay que añadir la mayor dificultad y diversificación que conlleva el diseño de

los circuitos analógicos. La consecuencia de este último hecho, unido a la euforia sobre “lo digital” fue un progresivo abandono de la disciplina de diseño de circuitos analógicos en el currículo académico de numerosas universidades nacionales y extranjeras.

Esto condujo, a principio de los años ochenta, a una carencia significativa de capacidades para desarrollar los circuitos analógicos que podían ser necesarios para extender el paradigma digital más allá del ámbito del computador (filtros, osciladores, muestreadores, convertidores de datos). Debido a la presión ambiental, el número de grupos de investigación con experiencia y conocimiento sobre las técnicas de diseño de estos circuitos continuos quedó muy mermado a escala mundial.

Para entender la situación desde nuestra perspectiva actual, el problema que se vivía en la primera mitad de la década de 1980 era tal que, de no haberse revertido, aplicaciones como la telefonía celular, las comunicaciones portables o la propia computación portátil no habrían podido desarrollarse.

Afortunadamente sin embargo, poco a poco se calma esa euforia inicial y se llega a la conclusión de que ambas vías (la analógica y la digital) deben coexistir de manera cooperativa. En primer lugar, porque la mayoría de las aplicaciones requieren extraer la información a tratar de procesos y mecanismos que provienen del mundo que nos rodea y que, por tanto, son intrínsecamente continuos. En segundo lugar, la información ya procesada debe habitualmente volver a transformarse en variables y señales continuas para que podamos aprovecharlas (por ejemplo, ni el ojo ve ni el oído oye ceros y unos). En tercer lugar, la eficacia de los sistemas digitales es cuestionable cuando se precisa procesar a muy alta velocidad y/o con una baja tasa de energía; sobre todo cuando no se necesita una alta precisión. En cuarto término, mantener velocidad y precisión en el marco digital exige un elevado número de cables de conexión, lo que es una desventaja significativa en sistemas integrados, mientras que las señales analógicas se transportan por medio de un único cable. Finalmente, las propias señales digitales, cuando los circuitos operan a su máxima velocidad, pierden las propiedades que las hacen tan atractivas y se precisa recurrir a métodos analógicos para poder modelarlos adecuadamente.

Lo que esto quiere decir es que, si bien es cierto que una mayoría de las aplicaciones admite una solución digital, no es posible eludir el uso de componentes analógicos de forma completa. Para usar técnicas digitales en circuitos que operen sobre señales continuas, se precisan convertidores que digitalicen la información, así como circuitos que acondicionen las señales –fundamentalmente que las limiten en banda– y que realicen el muestreo temporal imprescindible para poder transformar la información al ámbito digital.

7. CONEXIÓN CON EL UNIVERSO CONTINUO: LOS CIRCUITOS ANALÓGICOS

Como puede deducirse de lo dicho más arriba, una de las aplicaciones que ha actuado como motor para la microelectrónica la han conformado, sin lugar a dudas, las

comunicaciones. Su desarrollo a lo largo del siglo XX ha sido constante, comenzando con el tendido de las líneas de telefonía de corta y larga distancia, continuando con la popularización de la radio y la televisión, culminando con la integración de las comunicaciones inalámbricas y terminando por la explosión actual de la telefonía celular y la multi-conectividad de ordenadores y teléfonos móviles.

Esta evolución tuvo lugar, hasta la última década del siglo pasado, de forma independiente de la evolución de los computadores; aunque hay que decir que, desde que el microprocesador existe, hubo un interés creciente en usarlo para extender las funcionalidades de los sistemas comerciales de comunicación. Sólo a partir del inicio del fenómeno de las comunicaciones celulares y las necesidades de conectividad de los sistemas portátiles de cómputo, los dos mundos –computación y comunicaciones– han iniciado una convergencia que parece va a terminar integrando ambos ámbitos de aplicación en uno solo.

En cualquier caso, con independencia del protagonismo que el microprocesador pudiera o no tener en los sistemas de comunicación, un elemento clave de estos sistemas han sido –y siguen siendo– los circuitos de filtrado de señales eléctricas. No tenemos espacio aquí para justificar en detalle su importancia, pero basta ver el número de unidades que se fabrican anualmente –en el orden de los cientos de millones de unidades– para entender la importancia que hay que concederle.

Hasta bien avanzada la década de los sesenta del siglo pasado, los filtros eléctricos eran analógicos, pasivos, y estaban basados en la interconexión de resistencias, condensadores e inductores. Con la evolución de los circuitos integrados y la subsiguiente búsqueda de componentes adecuados para su implementación en un chip, se planteó realizar filtros monolíticos o integrados. Razones de coste, tamaño, fiabilidad, velocidad o potencia entre otras, avalaron la búsqueda de procedimientos que permitieran desarrollar filtros integrados. Se consiguieron pronto buenos resultados en lo que a amplificadores lineales se refiere (diferenciales o no), pero no se lograba evitar el uso de componentes pasivos no integrados.

Pronto se llegó a la conclusión de que (con la tecnología de los 70 y 80) no era viable la realización de inductores, por lo que se acuñó el concepto de filtro activo, basado en la interconexión de resistencias, condensadores y amplificadores operacionales. Este último componente estaba basado en circuitos con bastantes transistores y requería, por tanto, una disipación extra de energía para su funcionamiento.

Aunque el concepto se demostró ampliamente viable, no resultó adecuado desde el punto de vista industrial, ya que se necesitaba una gran precisión en los componentes pasivos (resistencias y condensadores) resultando una aproximación prohibitiva para muchas aplicaciones.

En efecto, las resistencias en un material semiconductor eran costosas, ocupaban una superficie muy grande –comparadas con los transistores– y eran altamente no-lineales con respecto a la tensión aplicada y a la temperatura. Por contra, se podían realizar condensadores con buenos coeficientes de apareamiento, aunque con un coste en área relativamente alto.

En la práctica, en esos años se usaron los filtros activos en un contexto híbrido. Es decir, sobre un sustrato común (normalmente de alúmina u otro material aislante) se realizaban estos filtros activos. Su implementación monolítica, aunque posible, no cumplía con los requerimientos de precisión y coste demandados por la industria¹.

Por otro lado, la conversión de analógico a digital (incluido el necesario muestreo) y de digital a analógico (incorporando la interpolación y el suavizado de la señal resultante), presentaban los mismos problemas. Sin estos circuitos, el desarrollo actual de los MODEMS tan utilizados en telefonía para voz y datos no existiría (sólo para ADSL se fabrican anualmente por millones). Se trataba también en este caso de resolver un problema similar al de los filtros: el uso de componentes pasivos. O, desde otra perspectiva, el desarrollo de componentes pasivos que fueran integrables de manera compatible con los transistores MOS.

Esta situación amenazaba con convertirse en un cuello de botella insalvable que, como ya hemos comentado, hizo que numerosos investigadores se plantearan la posibilidad de que el único camino que le quedaba a la Microelectrónica era el digital. Evidentemente, esto conducía al problema de que ciertos ámbitos de aplicación quedarían excluidos por precisar –cuando menos– de una conversión A/D que no podía llevarse a cabo únicamente con componentes digitales y, por tanto, en las mismas condiciones de integración que el resto del sistema.

Por fortuna, una idea genial vino a solucionar ese problema. Pero, antes de describirla en detalle, conviene repasar dos áreas en las que los ordenadores han jugado un papel fundamental, y que son importantes para entender esta idea que significó el resurgir de la Microelectrónica Analógica.

8. INCIDENCIA DEL COMPUTADOR EN EL MUNDO DEL CONTROL Y EN EL DEL CÁLCULO NUMÉRICO

Desde antes de 1950 se conocía y empleaba la teoría de muestreo en el contexto del control. En esencia, se trataba del empleo de componentes (computadores o simplemente conmutadores o alguna otra fuente de datos discretos) como parte de un bucle en el que se podían incluir sistemas diversos (plantas) que debían ser regulados, lo que dio lugar al estudio de un tipo particular de sistemas físicos, aquellos en los que coexisten

1. A finales de los 70 aparece el concepto de filtro digital como una alternativa interesante. En ese momento los computadores digitales y la tecnología microelectrónica habían llegado, como hemos visto, a un estado de madurez que permitió pensar en emular directamente en *hardware* lo que hasta entonces se había simulado en *software*. El concepto resultó de gran potencialidad, aunque en numerosas aplicaciones, se hace preciso emplear convertidores analógico-digital y, en su caso, digital-analógico. Una ventaja inherente a estos sistemas de procesamiento digital es su alta precisión y su capacidad de realizar funciones de filtrado mucho más complejas que las que tradicionalmente abordan los sistemas analógicos. Sin embargo no todo son ventajas: la potencia que disipan y el área de silicio que pueden llegar a ocupar impone límites a su uso. Sobre todo en aplicaciones donde la factura de potencia es crítica, como ocurre en los sistemas portátiles de comunicaciones (telefonía celular, por ejemplo). Pese a ello, estos filtros digitales se han popularizado mucho y son ampliamente empleados hoy día en algunos contextos.

elementos continuos (componentes habituales en cualquier sistema) con componentes discretos que manejan variables digitales (es decir, ceros y unos codificando cada valor de la variable).

Para trabajar con esa interacción entre el mundo físico –con señales continuas en valor y en tiempo– y el mundo digital –con señales de valores digitalizados– se demostró muy útil una herramienta desarrollada en conexión con las comunicaciones. Me refiero a la Teoría de Muestreo, que permite establecer un puente matemático entre ambos mundos y, con ello, dar soporte al análisis y al diseño de estos sistemas “híbridos” de los que estamos hablando.

Por otra parte, la popularización de los ordenadores significó la del cálculo numérico, con la implementación práctica y eficiente de muchos conceptos vinculados a aproximación, evaluación de integrales y áreas, resolución de ecuaciones diferenciales, y un largo etcétera.

En particular, la simulación estaba emergiendo en los años setenta como una herramienta muy potente para abordar numerosos problemas en todos los campos. Este auge de la simulación requirió el desarrollo de algoritmos numéricos de integración que facilitasen la resolución de ecuaciones diferenciales o de ecuaciones en diferencias finitas. En unos casos se trató de la adaptación de principios ampliamente conocidos; en otros casos se modificaron algoritmos existentes para hacerlos más eficientes; en muchos más se desarrollaron nuevas alternativas que resultaban más adecuadas a la propia evolución del mundo de los computadores.

No es objetivo de esta charla adentrarse en ese universo aledaño de la simulación por ordenador. Baste declarar aquí la importancia que tuvo –y continua teniendo– la simulación para el desarrollo de nuevos y complejos circuitos electrónicos, a través de los simuladores de nivel eléctrico –la familia SPICE, fundamentalmente–, de nivel lógico o de otros niveles en una jerarquía que hoy se considera imprescindible para abordar el diseño de cualquier chip complejo.

En el nivel eléctrico, en el que las entidades a simular, por medio de modelos adecuados, son transistores, diodos, condensadores, resistencias e inductores –simplificando los términos–, los elementos básicos resultaron ser dos: las rutinas de inversión de grandes matrices y las rutinas de integración. De ahí que, en el propio marco de la Electrónica, se dedicara mucha atención a investigar las propiedades y el rendimiento de algoritmos adecuados para ambos elementos. En particular, el conocimiento de los algoritmos de integración se convirtió en objeto de interés de la Teoría de Circuitos No-lineales.

9. SISTEMAS DISCRETOS LINEALES

La idea a la que nos hemos referido, que revolucionó los conceptos de circuitos analógicos estaba muy relacionada con esa problemática de la simulación y el cálculo numérico. Sus antecedentes hay que buscarlos en un texto de Maxwell de finales del siglo XIX y en el concepto de circuitos de transferencia resonante, introducido por Al-

fred Fettweis en 1959 y estudiado por él en solitario hasta mediados los años setenta. Si el condensador lineal no es sino un integrador ideal continuo y la bobina un diferenciador, ¿por qué no “discretizar” ambas entidades y “emularlas” de forma análoga a lo que hace un simulador? Pero, eso sí, hacerlo no en el contexto de un programa de ordenador sino por medio de un componente físico. Más aún, teniendo en cuenta la necesidad de invertir un tiempo no nulo en el procesamiento del modelo, ¿por qué no hacerlo basándonos en los principios y limitaciones de la Teoría de Muestreo?

Convergen así tres líneas de pensamiento; de una parte, el diseño de filtros activos –por extensión, de circuitos analógicos–, cuyo interés reside en el procesado eficaz y poco costoso (en términos económico, de balance energético...), de otra el procesamiento muestreando señales continuas y, finalmente, la simulación –en este caso en “hardware”– del comportamiento funcional de los propios componentes electrónicos. Al borde de los 80 todas estas líneas tienen una madurez suficiente como para que puedan emplearse conjuntamente de manera eficiente.

En efecto, en 1977 tiene lugar un descubrimiento que significa una de las propuestas más originales en cuanto a estructura y operación de un circuito se refiere. Investigadores de las universidades de California en Berkeley y de Ottawa proponen independientemente una nueva clase de filtro realizado exclusivamente con amplificadores, condensadores y transistores utilizados como conmutadores. Emplean tecnología MOS y presentan ventajas interesantes.

Una vez que se comprueba la viabilidad de esta técnica, su versatilidad y su potencial económico, son muchos los investigadores que se dedican a estudiarla y eso origina una multiplicidad de soluciones a diferentes problemas basándose en los principios de una técnica que ha dado en llamarse de condensadores conmutados debido a que emplea el transistor MOS como una llave o interruptor electrónico que permite conectar o desconectar, a voluntad, puntos de un circuito.

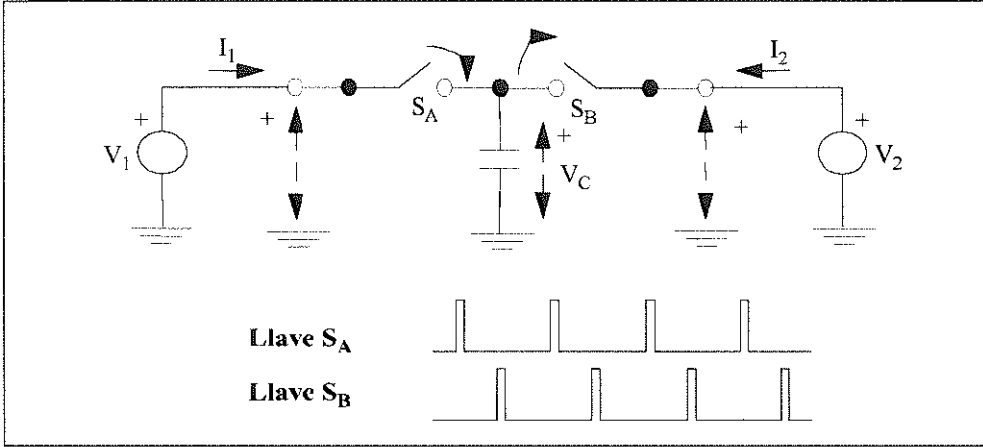
Esencialmente, la técnica está basada en el uso exclusivo de transistores (bien como amplificadores, bien como conmutadores) y de condensadores (habitualmente realizados con estructuras MOS). Las señales se muestrean de forma periódica, en sincronía con un reloj maestro, y se pretende tener filtros que se comporten –con buena aproximación– como filtros continuos, pero no tengan los problemas prácticos que tales circuitos conllevan.

En lo que sigue, veremos que aparecen una serie de consecuencias muy curiosas, muchas de ellas vinculadas al propio cálculo numérico y a características típicas de la simulación.

10. LOS CIRCUITOS DE CONDENSADORES CONMUTADOS

Para entender el funcionamiento de estos sistemas consideremos el caso simple –probablemente el más simple que puede concebirse– representado en la Figura 1. Vemos en ella un condensador lineal, C , dos fuentes ideales de tensión –la excitación de este circuito– y dos llaves también ideales –dos conmutadores– que se abren y cierran

FIGURA 1
CIRCUITO SIMPLE CON UN CONDENSADOR Y LLAVES



periódicamente de acuerdo con una señal de temporización de período T . Suponemos que, durante la primera mitad del periodo, la llave S_A conecta la fuente de la izquierda, V_1 , con el condensador, que puede por tanto adquirir carga bajo el comando de esa fuente; mientras tanto, la llave S_B permanece abierta y no ejerce ninguna acción sobre el condensador. Durante el otro semiperiodo la llave S_A queda abierta, aislando el condensador de la fuente V_1 ; pero la llave S_B se cierra, por lo que tiene lugar un proceso de intercambio de carga entre la fuente V_2 y el condensador².

El proceso es sencillo y aparece estudiado en numerosos libros de texto de pregrado. Conociendo la forma de onda –la variación temporal– de la variable de entrada, V_i , es inmediato el cálculo de la diferencia de potencial entre los terminales del condensador.

Entonces, ¿por qué nos interesa este circuito? Nos interesa porque permite ilustrar los conceptos básicos del procesamiento discreto y buena parte de sus problemas.

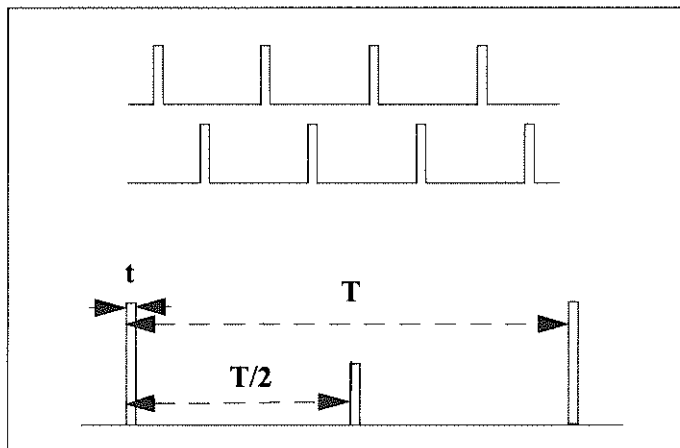
Sin duda, el circuito de la Figura 1 es un circuito dinámico de primer orden, en el que el condensador actúa como elemento inercial eléctrico o, dicho en otros términos, como elemento que “recuerda” lo que ha ocurrido en cualquier instante anterior a aquel en el que iniciamos un experimento. Es decir, su comportamiento viene regido por la conocida ecuación:

$$(1) \quad v_C = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t I_C dt = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t I_C dt + v_C(t_0)$$

2. Cualquier intercambio de carga es instantánea, porque estamos suponiendo que la llave es ideal y, por tanto, su resistencia eléctrica es nula.

La condición inicial, $v_c(t_0)$ es un “resumen” de la historia pasada del dispositivo hasta el instante t_0 en el que comenzamos a observar el dispositivo en nuestro experimento; es la única información que precisamos –una vez resuelta la integral– para calcular el valor de la tensión v_c en el condensador. Esta visión “microscópica” es la visión habitual que nos proporciona la Física.

FIGURA 2
TEMPORIZACIÓN DEL PERÍODO DE MUESTREO



Pero consideremos por un momento otra visión –“macroscópica”, podemos llamarla– que nos lleve a estar interesados sólo en lo que ocurre en un infinitésimo de tiempo al comienzo o al final de cada período. Es decir, dejamos que transcurra el experimento pero únicamente observamos lo que está pasando una vez en cada período y durante un tiempo muy corto. Y esto lo hacemos repetidamente cada T segundos. Supongamos para ello que se divide el período de muestreo según se indica en la Figura 2.

Consideremos lo que ocurre en los diferentes sub-intervalos de operación del circuito. Entre t_0 y $T/2$, la carga total adquirida por C es:

$$(2) \quad Q(t) = C(V_1 - V_0); 0 < t < T/2$$

donde $V_0 = V(t_0)$ es la diferencia de potencial entre las placas del condensador en el instante inicial. Por otra parte, entre $T/2$ y T , la carga que ha fluido en el condensador puede estimarse como:

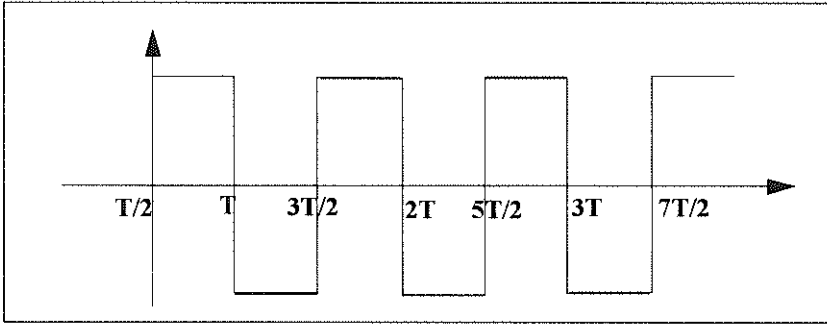
$$(3) \quad Q(t) = C(V_2 - V_1); T/2 < t < T$$

Finalmente, en el siguiente semiperíodo, el intercambio de carga puede calcularse

$$(4) \quad Q(t) = C(V_1 - V_2); T < t < 3T/2$$

A partir de aquí, la situación se repite y todos los semiperíodos pares entre sí y los impares entre ellos presentan el mismo flujo de carga. En la Figura 3 se representa la carga almacenada en cada semiperíodo. Obsérvese que, bajo la hipótesis de fuentes y llaves ideales, esta carga es transferida instantáneamente al comenzar cada semiperíodo y se mantiene constante mientras dura éste.

FIGURA 3
CARGA ALMACENADA EN C



Podemos establecer el valor promedio, en un período, de las variables eléctricas implicadas. La intensidad media en un período puede calcularse como la carga circulante por unidad de tiempo:

$$(5) \quad I_1 = \frac{C}{T} (V_1 - V_2)$$

$$(6) \quad I_2 = \frac{C}{T} (V_2 - V_1)$$

O, lo que es lo mismo,

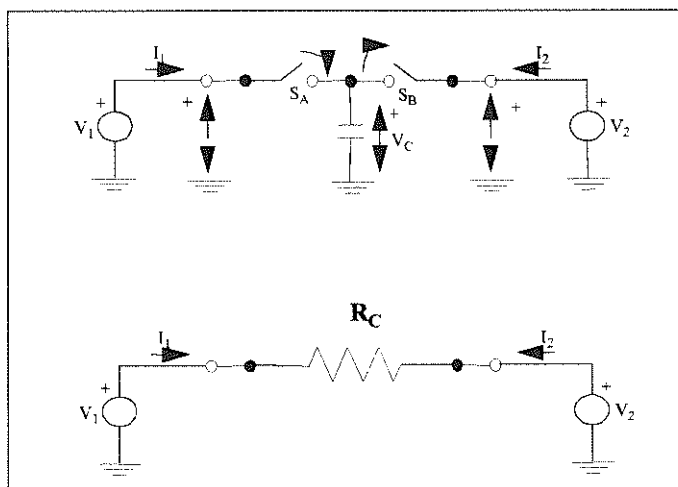
$$(7) \quad I_1 = -I_2 = \frac{C}{T} (V_1 - V_2)$$

Lo que equivale a decir que, desde esta perspectiva “macroscópica” en la que sólo estamos interesados en los valores medios de la intensidad, el condensador y las llaves equivalen a una resistencia

$$RC = \frac{T}{C}$$

tal y como se representa en la parte inferior de la Figura 4.

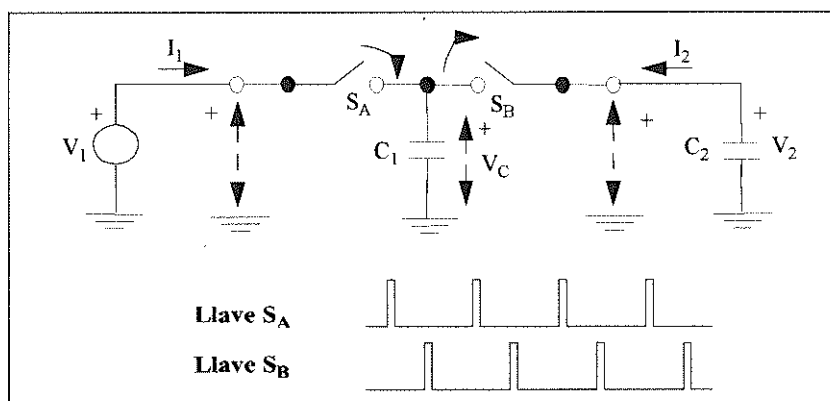
FIGURA 4
EQUIVALENTE PROMEDIO



Es interesante destacar que, en tanto estemos considerando valores *promedio* y observando lo que ocurre al final de cada semiperíodo, las conclusiones anteriores son correctas aunque los transitorios –debido a efectos resistivos no despreciables– no sean instantáneos. En realidad, basta con que los transitorios sean tales que, en cada semiperíodo transcurra un tiempo suficiente como para que se alcance el estado estacionario.

Aceptando este modelo aproximado, podemos extenderlo para realizar circuitos “dinámicos”. Así, por ejemplo, el circuito de la Figura 5 contiene dos condensadores, C_2 que actúa como tal condensador, y C_1 que está conmutado y, por tanto, simula una resistencia en los términos que acabamos de ver.

FIGURA 5
CIRCUITO SIMPLE CON UN CONDENSADOR Y LLAVES



Si suponemos que observamos el circuito cuando han transcurrido suficientes períodos de conmutación desde el momento inicial, podemos evaluar V_2 a partir de V_1 y del valor que tenía V_2 en el periodo anterior. Por simplicidad, llamemos fase impar al semiperíodo durante el cual V_1 está conectada a C_1 y fase par al otro semiperíodo. Es decir, la fase impar, ϕ^i , corresponde a

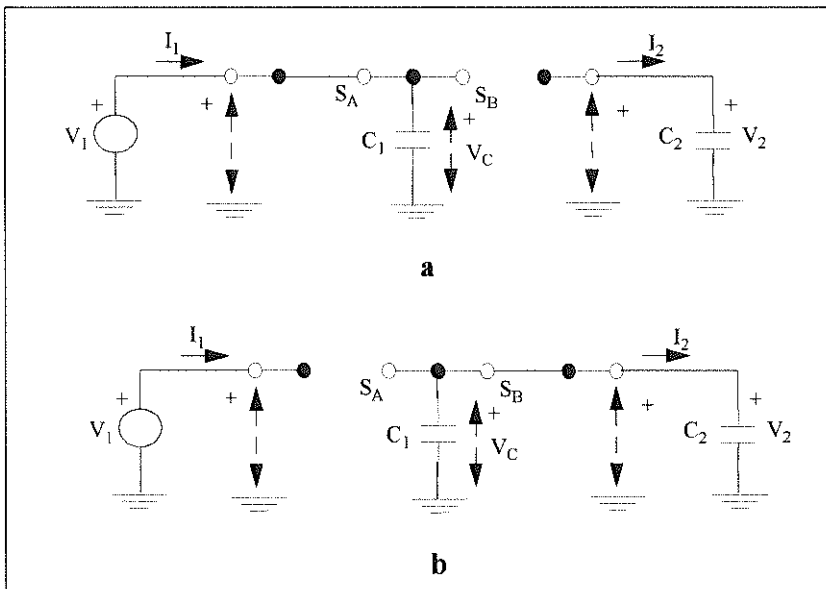
$$(n-1)T \leq t < \left(n - \frac{1}{2}\right)T$$

y la fase par, ϕ^p , a³.

$$\left(n - \frac{1}{2}\right)T \leq t < nT$$

Consideremos cada uno de estos dos intervalos. Comenzando por la fase impar, el circuito que estudiamos es equivalente al circuito a) de la Figura 6.

FIGURA 6
MODELO DEL CIRCUITO DE LA FIGURA 5 EN CADA FASE



Suponiendo componentes ideales, la tensión en los condensadores vendrá dada por:

$$(8) \quad V_{C1}^j(t) = V_1^j[(n-1)T] = V_1^j(n-1)$$

3. Obsérvese el uso de los símbolos $>$ y $<$ para evitar que un mismo instante temporal pertenezca a ambas fases.

$$(9) \quad V_{C2}^j(t) = V_2^j(t) = V_2^j[(n-1)T] = V_2^j(n-1)$$

En la siguiente fase par (parte b de la Figura 6) estas tensiones serán:

$$(10) \quad V_{C1}^p(t) = V_1^p\left(n - \frac{1}{2}\right)$$

$$(11) \quad V_{C2}^p(t) = V_2^p\left(n - \frac{1}{2}\right) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1^i(n-1) + \frac{C_2}{C_1 + C_2} V_2^i(n-1)$$

Adicionalmente, como la carga se conserva, debe cumplirse:

$$(12) \quad V_2^j(n) = V_2^p\left(n - \frac{1}{2}\right)$$

lo que da lugar a una expresión en diferencias finitas que permite calcular la tensión en C2 en las fases pares:

$$(13) \quad V_2^j(n) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1^i(n-1) + \frac{C_2}{C_1 + C_2} V_2^i(n-1)$$

ó, lo que es lo mismo, nos permite expresar el “presente” de V_2 en función del “pasado” de ambas tensiones.

Consideremos ahora el comportamiento del circuito continuo que estamos “emulando” –una resistencia en serie con un condensador–. Este vendrá dado por:

$$(14) \quad R_1 C_2 \dot{v}_2 = v_1(t) - v_2(t)$$

donde R_1 tendrá un valor $R_1 = T/C_1$. Si usamos la aproximación conocida como *forward Euler* para aproximar la eq (14) tendremos, para la solución de dicha ecuación:

$$(15) \quad V_2(n) = V_2(n-1) + h \left[\frac{d}{dt} v_2(t) \right] \Big|_{t=(n-1)T}$$

$$(16) \quad V_2(n) = V_2(n-1) + h [V_1(n-1) - V_2(n-1)]$$

que coincide con (13) si

$$h = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Vemos, pues, que hay una analogía entre el circuito que hemos descrito y una fórmula sencilla de integración numérica. Insistiremos más adelante en este punto.

Una consecuencia interesante es que podemos construir cualquier tipo de filtro con esta técnica. Empleando sólo condensadores y combinándolos con llaves y amplificadores, es posible colocar los polos de una red en cualquier posición del semiplano izquierdo, lo que significa un procedimiento universal para construir filtros. El interés de esta técnica radica en que la construcción de un condensador en silicio es similar a la de un transistor MOS, lo que implica un coste reducido. Por otra parte, es posible lograr unos niveles de precisión muy altos, sobre todo si se consideran los cocientes entre condensadores como parámetros del filtro. Estos niveles no sólo son altos sino que presentan una gran insensibilidad a cambios ambientales. De ahí que la alternativa llamada de circuitos de condensadores conmutados se haya popularizado mucho. Sus prestaciones son altas, su diseño es relativamente simple y su coste y disipación de potencia bajos.

Pero nuestro interés aquí no es prestar atención a los filtros SC, sino a las interesantes propiedades que exhiben estos circuitos y, sobre todo, a su carácter discreto. En cierta forma son la consecuencia de que los sistemas digitales nos hayan familiarizado con la idea de discretizar el mundo que nos rodea y aprovecharlo eficazmente.

Puede parecer que nuestro análisis es excesivamente simplista y que la realidad es diferente. Sin embargo, en tanto sean ciertas las hipótesis de partida⁴, el error puede considerarse mínimo.

La primera cuestión de interés es que si cambiamos la disposición de las llaves en el circuito de la Figura 5, es posible implementar cualquier otra fórmula de integración conocida. En particular son muy fácilmente realizables los algoritmos *backward Euler*, trapezoidal o del punto medio. Tenemos así con estos circuitos la posibilidad de “emular” sistemas discretos del tipo de los que empleamos en simulación, siendo por tanto una manera fácil de experimentar con las propiedades físicas que cada método de integración induce.

Otro aspecto de gran interés práctico es que podemos construir filtros de cualquier orden o con cualquier estructura, siempre que se respeten todas nuestras hipótesis, simplemente sustituyendo cada resistencia en un prototipo continuo por un condensador conmutado.

II. LA LABOR COLECTIVA EN EL IMSE-CNM

Me he permitido prestar atención a esta técnica de circuito por tres razones. En primer lugar, por tratarse de un principio conceptual de gran originalidad, que abrió un amplio campo de trabajo para el especialista y es muy poco conocido por el no especialista. En segundo lugar, por que vino a permitir que la Microelectrónica Analógica despegara, resolviendo un problema práctico fundamental que, en su momento, parecía que iba a dejar reducida la Microelectrónica al ámbito digital. Finalmente, esta técnica

4. Y esto no es difícil, para el caso sinusoidal basta con que la frecuencia de muestreo de las llaves sean un orden de magnitud más rápida que las señales que estemos manejando para que el error sea despreciable.

significó un camino de avance para los grupos que, a comienzos de la década de los 80, confiábamos en la viabilidad del campo analógico. En particular, fue una vía que explotamos con entusiasmo y éxito un grupo de personas que trabajábamos juntos en el Departamento de Electrónica y Electromagnetismo de esta Universidad, y del que surgió más tarde el Instituto de Microelectrónica de Sevilla, integrado en el Centro Nacional de Microelectrónica.

Me permitirán ahora un poco de historia local, en buena parte focalizada en el trabajo que aquí hemos venido realizando.

En la primera mitad de los setenta, habíamos empezado a reflexionar respecto a la orientación que podría tener la investigación en circuitos integrados en el marco particular de esta Universidad y en el general del país. Independientemente de la inexistencia de un entorno industrial próximo y de la falta de tradición, comenzamos con entusiasmo a estructurar un grupo de investigación que, falto de otras directrices, abordó inicialmente tanto problemas analógicos como digitales.

Aunque nuestras primeras publicaciones internacionales fueron precisamente enfocadas a circuitos digitales, pronto comprendimos la importancia que podía tener no sólo no abandonar, sino potenciar nuestro conocimiento analógico, inicialmente asociado a problemas de instrumentación. Así, a contracorriente de lo que se pensaba en nuestro entorno próximo y de lo que era moda a nivel internacional, establecimos las bases para el desarrollo posterior de nuestro trabajo, potenciando el estudio de métodos analógicos de procesamiento electrónico.

A finales de los setenta, nos habíamos centrado en la implementación de circuitos analógicos no-lineales. Nuestro trabajo consistió en demostrar que se podían realizar componentes como los propuestos por el Prof. Leon Chua, de la UCB y estudiar las limitaciones de esos componentes. De esa actividad nacieron varios trabajos in extenso en revistas norteamericanas de gran prestigio. La realización en forma "integrable" de amplificadores, multiplicadores y componentes pasivos nos permitió verificar la viabilidad y propiedades de mutadores, rodadores y reflectores y de sus interconexiones. Asimismo, consideramos técnicas eficientes para aproximar comportamientos no-lineales complejos por medio de funciones lineales o polinómicas a tramos.

Justo en ese momento estaban apareciendo las primeras publicaciones sobre circuitos SC lineales, y nos propusimos demostrar que ese concepto era extensible al caso no-lineal. Generamos, en efecto, toda una sistemática de síntesis y modelado para estos circuitos, probando que el paradigma era utilizable para realizar complejas transformaciones no-lineales en una o varias dimensiones.

Como consecuencia de esa experiencia, nos tropezamos con la existencia de situaciones caóticas en ese tipo de circuitos bajo algunas condiciones de operación. Estudiadas esas situaciones, llegamos a la conclusión de que se podían predecir, pero que también podían inducirse a voluntad. Ello nos llevó a proponer una técnica de síntesis de mapas discretos empleando esos componentes SC lineales y no-lineales que habíamos desarrollado y a considerar sus posibles aplicaciones a la generación de ruido con propiedades pre-determinadas.

Posteriormente, esa experiencia fue cristalizando en la síntesis de otros circuitos y sistemas basados en ese paradigma, fundamentalmente filtros, osciladores, convertidores de datos y una clase de sistemas formados de manera agregada a los que se dio en llamar Redes Celulares Neuronales, inspirados en la computación cooperativa que se da en los seres vivos. Consecuencia de posteriores elaboraciones en esta línea han sido los trabajos de otras personas de nuestro Instituto orientados a los sistemas de visión integrados en silicio y a las estrategias para industrializar esos sistemas.

Más tarde, enfocados en temas a caballo entre el diseño y el testado de circuitos integrados analógicos, se desarrollaron filtros y convertidores de datos autotestables también basados en técnicas SC.

No fueron esos las únicas líneas de trabajo cultivadas por un grupo que crecía regular y continuamente. La lógica binaria nos dio pie para sintetizar circuitos en lógicas multi-valuadas; y de ahí pasamos a los circuitos de lógica difusa, para los que también recurrimos, aunque no de manera exclusiva, al concepto de circuito SC.

En lógica puramente binaria nos planteamos problemas derivados del error en el sincronismo. Todos los sistemas digitales están basados en la suposición de sincronismo perfecto. Esta hipótesis se sostiene bien en muchas situaciones prácticas, pero no es válida cuando tienen lugar interacciones provocadas por agentes externos al sistema o cuando los retardos se convierten en críticos (como es el caso en circuitos digitales complejos). En esas situaciones es esencial establecer un modelo –generalmente estático– de la operación y desarrollar mecanismos que eviten que se propaguen errores que pueden resultar catastróficos para la operación del sistema global.

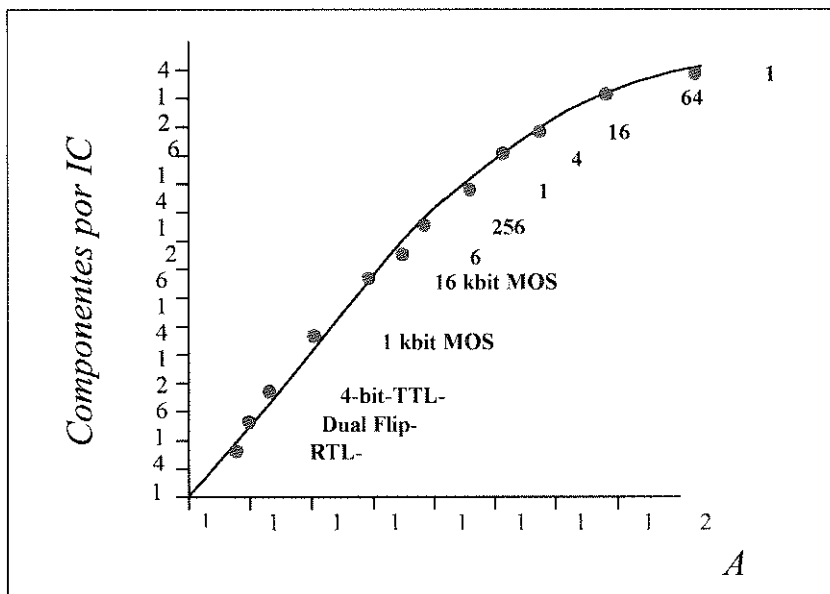
A esto hay que añadir un largo etcétera, a medida que el grupo crecía y se diversificaba y mi protagonismo iba cediendo lugar al de otros que hoy todavía nos acompañan. No voy a hacer una glosa detallada de lo que hemos ido colectivamente generando a lo largo de una actividad que, para mí, supera ya los treinta años de profesión. Las publicaciones, las patentes y, sobre todo, el trabajo del centenar de personas que hoy están integradas en el IMSE-CNM sirven mejor que mis palabras para hablar de ello.

12. A MODO DE COROLARIO: DEL PRESENTE AL FUTURO

Desde que aparece el microprocesador hay un cambio constante en las coordenadas de tamaño, potencia, fiabilidad, velocidad, etc, que ya hemos mencionado. Está admitida la llamada ley de Moore, una predicción empírica que asegura que la densidad de integración –esto es, el número de dispositivos por unidad de superficie– se duplica cada 18 meses. Con muy buena aproximación se ha venido cumpliendo desde hace ya casi cuarenta años –¡fue enunciada en 1965!–, por lo que está asumida como un elemento de referencia. Puede verse en la Figura 7 esta evolución en el número de dispositivos.

A esto hay que añadir otras consideraciones complementarias. Por ejemplo, en los últimos treinta años la capacidad de memoria de un chip se ha multiplicado por un millón, estando actualmente en el orden de 4Gb comerciales. Otra dato interesante es

FIGURA 7
LEY DE MOORE



que la velocidad de procesamiento de los microprocesadores se ha venido doblando cada dos años. Esto sólo son detalles del ritmo evolutivo de esta ciencia, detalles que nos muestran cómo son necesarios continuos replanteamientos de sus principios y de sus técnicas.

Por otra parte, el desarrollo de los circuitos integrados de señal mixta, en los que coexisten componentes analógicos y digitales, está impulsando el concepto de sistemas en un chip, que parece que puede permitir el aprovechamiento de lo mejor de ambos mundos, y ofrecer un universo de nuevas aplicaciones y productos que están todavía por aparecer.

Hablando del futuro en sentido estricto, desde hace varios años funciona el llamado SIA (Semiconductor Industry Association), que establece periódicamente una *hoja de ruta* en la que resume las predicciones y expectativas que la industria tiene de la evolución tecnológica de la Electrónica –realmente de la Microelectrónica– para los próximos años. Hasta ahora tales predicciones se han ido cumpliendo al alza, por lo que la hoja de ruta es considerada como un elemento importante para “predecir” el futuro. Para hacernos una idea, analicemos la Tabla I, en la que aparece un resumen de esa hoja de ruta para el período 1997-2012.

Vemos que se prevé llegar a dimensiones de 50 nm en procesos comerciales, con espesores de óxido menores a 1,5 nm (compárese con los datos dados para el 4004). En cuanto a la frecuencia de operación, se espera alcanzar el rango de los 100 GHz. Las densidades de dispositivos se incrementarán más de un orden de magnitud en lo que se refiere al número de transistores por unidad de área, y en tres órdenes de magnitud en

TABLE 1
PREDICCIONES DEL SIA

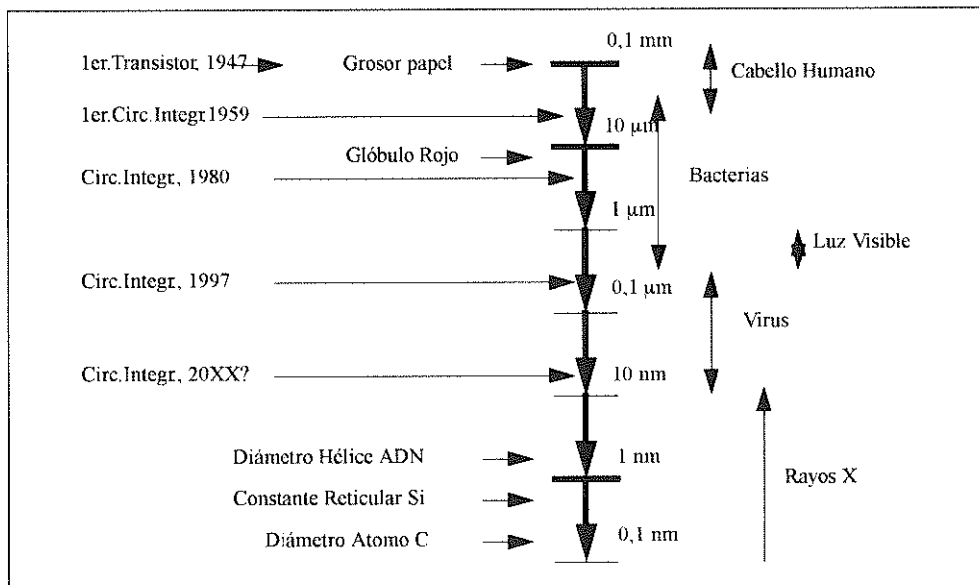
Año	1997	1999	2001	2003	2006	2009	2012
Dimensión Min. (µm)	0.25	0.18	0.15	0.13	0.1	0.07	0.05
Puerta ef. (µm)	0.2	0.14	0.12	0.1	0.07	0.05	0.035
Oxido (nm)	4-5	3-4	2-3	2-3	1.5-2	<1.5	<1.5
Memoria	256M	1G	2G	4G	16G	64G	256G
Trans/cm2	8M	14M	16M	24M	40M	64M	100M
fT/fmax (GHz)	20/25	30/35	35/40	40/50	55/65	75/90	100/120
Area dado (cm2)	4.8	8	8.5	9	10	11	13
Voltaje (V)	1.8-2.5	1.5-1.8	1.2-1.5	1.2-1.5	0.9-1.2	0.6-0.9	0.5-0.6
#Transist./pin	<103	>103	>2x104	>5x104	>105	>2x105	>106

lo que se refiere al número de dispositivos por “terminal” de entrada/salida. Eso pone de manifiesto dos factores peligrosos: el incremento en la densidad de potencia disipada y el aumento en la dificultad de acceder a las funcionalidades del chip. Lo primero plantea problemas de temperatura y de fiabilidad, lo segundo una dificultad creciente para verificar estos circuitos.

Quizá la pregunta que cualquiera puede hacerse es: ¿hasta cuándo va a durar esta carrera? De momento no se tiene una respuesta. En realidad habría que matizar más la cuestión, ya que la inmensa mayoría de los avances hechos en estos años y de los que se prevén por el SIA descansan en el silicio. Existen otros materiales semiconductores menos explotados –aunque no tan versátiles– que quizás puedan tomar el relevo del silicio en el futuro. Por otra parte, empiezan a aparecer una gran diversidad de nano-dispositivos, es decir, dispositivos construidos con dimensiones abiertamente sub-micrométricas –en el rango de 50 nm para abajo–, cuyos principios de operación son muy diferentes del de los transistores “convencionales”. La conclusión es que parece que, hasta finales de la próxima década, habrá una evolución cuyos protagonistas seguirán siendo el transistor MOS y el silicio. Más allá sólo queda claro que estaremos acercándonos a dimensiones en las que los modelos clásicos pierden su validez y, por tanto, parece que se abre una nueva revolución en la Electrónica. La Figura 8 pretende dar una idea de ese escalado dimensional del que estamos hablando, intentando ayudar a comprender el camino recorrido y los desafíos que están por venir.

Así, el primer transistor estaba en las dimensiones del grosor de una hoja de papel; los circuitos integrados significaron entrar en el tamaño de las bacterias, llegando al de los virus en la actualidad. Pero los nuevos dispositivos bajo estudio se acercan en dimensiones a valores tan pequeños como el diámetro de la hélice de ADN o las constantes reticulares de los propios materiales semiconductores. ¿Estará ahí el límite, se habrá llegado al final de la historia de la Electrónica? Quién sabe... Lo que sí sabemos es que el futuro inmediato nos depara una ubicuidad extrema basada en la convergencia

FIGURA 8
DIMENSIONES COMPARATIVAS



de comunicaciones portátiles y ordenadores de bolsillo, y que eso puede que se extienda al uso de dispositivos implantables en el cuerpo humano. Luego, ya se verá.

Para completar nuestra rápida visión del presente y del futuro de la ciencia/tecnología que llamamos Electrónica, quiero dar unas figuras numéricas que demuestran el impacto económico, social e incluso antropológico que esta ciencia ha llegado a tener. De la celda de memoria basada en un único transistor (patente de INTEL, inventada por Dennard en 1967), se han fabricado 10^{20} unidades, lo que equivale al número de neuronas de mil millones de cerebros humanos. Se trata del objeto manufacturado del que más copias se hayan realizado. Actualmente se calcula que hay en funcionamiento algo más de $2 \cdot 10^{17}$ transistores formando parte de productos electrónicos en todo el mundo y el ritmo de producción de la industria microelectrónica es de tres mil millones de transistores por segundo. No hace falta comentar estas cifras.

13. CONCLUSIÓN

En definitiva, con esta presentación he tratado de hacerles llegar una visión de la evolución histórica de la Electrónica, complementada con uno de sus logros más significados y que, con seguridad, es muy poco conocido, probablemente porque la sombra del microprocesador es alargada y oculta muchos otros aspectos importantes de la Microelectrónica. Como hemos visto, la idea de emplear una copia discreta de

las señales a procesar permite que el tratamiento de información en forma analógica sea posible y pueda llevarse a cabo en condiciones eficientes dentro de un chip. Más aún, eso posibilita la cooperación de los dominios digital y analógico en numerosos campos de aplicación.

Y esta presentación en sociedad de una idea tan sencilla como brillante, la he pretendido hacer simplificando al máximo la expresión del concepto, pero sin renunciar al rigor. Sin duda se trata de una estructura de circuito aparentemente simple; pero, gracias al concepto básico subyacente, se ha podido desarrollar todo un cuerpo de doctrina que ha permitido encontrar su lugar a la Microelectrónica Analógica. Las comunicaciones, por ejemplo, se benefician todavía de ese concepto, aunque otras técnicas analógicas han ido añadiéndose al acervo de conocimiento que configura hoy día este complejo ámbito de los circuitos integrados.

He intentado también, resumir las contribuciones que en el grupo al que pertenezco se han hecho en este campo concreto, haciendo hincapié en mostrar con ello la versatilidad y potencialidad de esta técnica de circuito. Finalmente, me he permitido añadir algunas pinceladas sobre lo que está por llegar en un futuro próximo.

Espero que esta presentación, aunque ajustada en tiempo y limitada en contenido, les motive para bucear con más detalle y tiempo en las profundidades de una ciencia apasionante: la Electrónica.

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL EXCMO. SR. D. RAFAEL MÁRQUEZ DELGADO

*Académico Numerario,
en contestación al leído por el
Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas Díaz
en el Acto de su recepción como Académico Numerario
celebrado el día 27 de noviembre de 2006*

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, Excmos. e Ilmos. Señores Vicerrector de Investigación, Presidentes y Representaciones de otras Academias, Decano de la Facultad de Física, Compañeros de la Academia y del Profesorado, Alumnos, Señoras y Señores.

Como es sabido, la historia de la humanidad en los últimos siglos no ha avanzado de forma monótona sino que en ocasiones ha visto cambiado su rumbo mediante grandes revoluciones científicas y tecnológicas. Estos cambios han afectado no sólo a nuestros conocimientos científicos y técnicos, sino también a nuestro espíritu, a nuestras formas de pensar y de actuar, a nuestra forma de vivir, en definitiva. Así, los últimos avances científicos y tecnológicos han hecho que el mundo se nos haya hecho de pronto infinitamente abierto, se han suprimido las distancias en el espacio y en el tiempo; las informaciones nos llegan desde los lugares más remotos en tiempo presente; y en tiempo presente también se mezclan todas las civilizaciones y todas las culturas.

La Revolución Industrial, durante el siglo XIX y principios del XX, se caracterizó por las nuevas tecnologías que trataban sobre todo de sustituir el trabajo manual por el de las máquinas. En la primera revolución fue principalmente la máquina de vapor la que permitió aligerar el trabajo humano, y en la segunda fase fue la electricidad la energía central, además de otros avances en química, comunicaciones, transportes, etc.

Pero ha sido en el último cuarto del siglo XX, cuando se ha originado una nueva revolución, que algunos denominan postindustrial, la denominada Revolución Tecnológica, o tal vez mejor Revolución Científico-Tecnológica. Esta revolución está organizada principalmente en torno a las tecnologías de la información y de la comunicación, en la que convergen un gran número de otras tecnologías, como telecomunicaciones, microelectrónica, informática, ciencia de materiales, etc., etc.

Estas tecnologías de la información y la comunicación, las denominadas TIC, han tenido un impacto determinante sobre nuestras actuales formas de vida y maneras de trabajar. El desarrollo de los circuitos integrados, en que se basan, ha revolucionado el campo de las comunicaciones, de la gestión de la información y de la informática. La

investigación actual dirigida a aumentar la velocidad y capacidad de las computadoras se centra sobre todo en la mejora de los circuitos integrados y en el desarrollo de componentes de conmutación cada vez más rápidos. Se construyen circuitos integrados a gran escala que contienen varios centenares de miles de componentes en un sólo chip. El paso de la microelectrónica a la nanoelectrónica no sólo hará que disminuya considerablemente el tamaño de los dispositivos sino que al mismo tiempo aumentará también considerablemente la velocidad de procesamiento.

Y, por último, de la unión de la informática con las comunicaciones ha surgido Internet, esa enorme máquina digital que abarca el mundo, y que, como alguien dijo, constituye el mayor avance para la difusión y almacenamiento de la información que ha creado el hombre desde la propia escritura.

Es evidente, por todo lo anterior, que nuestra Academia sintiera la necesidad, desde hace años, de cubrir, o mejor de reforzar en nuestra Corporación, este amplio campo de la nueva Electrónica, y propusiera para ello como Académico electo a un especialista de la talla del Prof. Huertas Díaz, quien por diversas razones, unas más justificadas que otras, ha retrasado su discurso de ingreso hasta el día de hoy. Y en el día de hoy, y por designación de nuestro Presidente, me cabe el honor, y al mismo tiempo la satisfacción, de contestar a su Discurso de Ingreso en esta Real Academia Sevillana de Ciencias.

D. José Luis Huertas, compañero desde hoy en la Academia, ha sido desde hace ya muchos años, compañero también en nuestra Sección de Físicas de la antigua Facultad de Ciencias primero y en nuestra Facultad de Física después. Recién terminada su licenciatura en Ciencias Físicas en 1969, al poco tiempo de mi incorporación a esta Universidad de Sevilla, me lo presentaron como quien había sido uno de los mejores alumnos de aquella brillante promoción. A esa excelente promoción de físicos pertenecen hoy dos miembros numerarios de nuestra Academia, contando entre ellos al Prof. Huertas, y un académico electo que posiblemente se incorporará a la Academia este mismo curso. Todos ellos pertenecen a esa generación de científicos que ha conocido la transición desde aquella universidad de grandes carencias de medios materiales y personales a la universidad actual. A ellos se debe en gran parte el resurgir de nuestra investigación, justificando con creces la apuesta que por ellos hicimos los que les hemos precedido y hoy estamos jubilados de la universidad y algunos desgraciadamente de la vida.

Dije anteriormente que me cabía el honor, y al mismo tiempo la satisfacción, de contestar a este discurso de ingreso del Prof. Huertas Díaz. Pero esto no es del todo cierto. Es verdad que es para mí un honor el que nuestro Presidente me encomendara en la Academia la contestación al mismo, pero no es para mí una satisfacción, o es sólo una satisfacción a medias, ya que al que le hubiese correspondido responder a este discurso, y por supuesto lo hubiese hecho con más autoridad que yo en la especialidad de que se trata y poniendo en el empeño todo su talento y también todo su afecto, hubiese sido a nuestro malogrado compañero de la Academia y de la Facultad, D. Antón Civit Breu, pionero y promotor de los estudios de Electrónica en nuestra Universidad y creador del correspondiente Departamento; maestro del Prof. Huertas y de otros muchos profesores de esa especialidad que, no sólo en Sevilla, sino también en otras

universidades españolas han sabido formar equipos de investigación, desarrollando y ampliando las enseñanzas que iniciaron en Sevilla.

Pero hablemos del nuevo Académico. Es cierto que todos los miembros que ingresan en la Academia no necesitan de presentación alguna, ya que es debido a esto, a su conocida trayectoria científica y humana por lo que han sido cuidadosamente elegidos. Pero esta contestación a su discurso permite glosar ante un público general, y no sólo constituido por miembros de la Academia, los méritos científicos del nuevo Académico, al mismo tiempo que dar una visión más personal y humana del mismo.

D. José Luis Huertas Díaz nace en Sevilla, en 1947. Termina su licenciatura en Física en el año 1969, y después de un breve período de iniciación a la investigación en Electrónica, que empieza ya durante su último curso de licenciatura, se incorpora a los laboratorios de la Casa Phillips, en Eindhoven, Holanda, donde se inicia en temas de diseño de circuitos integrados digitales y perfecciona sus conocimientos sobre circuitos analógicos. A finales de 1971 regresa a Sevilla, integrándose en el Departamento de Electricidad y Electrónica donde defiende su tesis doctoral en 1973. Comienza entonces una temática de investigación en la que combina problemas digitales con analógicos y lleva a cabo sus primeras publicaciones internacionales en revistas de prestigio a lo largo de los años 1975 y 76. Consolida así una línea de diseño de circuitos de conversión de impedancias (lineales y no lineales), estableciendo sus primeros contactos y colaboraciones internacionales. El grupo de investigación que dirige se convierte desde entonces en el primer grupo español que publica regularmente en las revistas internacionales de mayor prestigio en el campo del diseño de circuitos integrados, actividad que se mantiene desde entonces.

José Luis Huertas había entrado desde el principio en ese período de prueba para un futuro profesor de universidad en el que se alterna la docencia con la investigación, y en el que se va forjando esa síntesis que le llevará a la Adjuntía de Universidad en 1978, que desempeña hasta 1981, en que obtiene plaza de profesor agregado, y un año después, en 1982, la de catedrático en el área de Electrónica, todas ellas en la Universidad de Sevilla.

En 1981 realiza una estancia de varios meses en la Universidad de Berkeley, contratado como investigador senior por el Electronics Research Laboratory. Aquí abre una puerta de cooperación, que ha dado lugar a nuevas colaboraciones suyas y de otros miembros del Departamento de Electrónica y Electromagnetismo.

Entre 1983 y 1988 dirige el Centro de Cálculo de la Universidad de Sevilla, que simultanea con la dirección del Departamento de Electrónica y Electromagnetismo. En el Centro de Cálculo gestiona la transición entre el UNIVAC con acceso remoto de que se disponía en la década anterior y el primer VAX local. Pero su gestión no es sólo de tipo científico sino que también desempeña un importante papel en la obtención de recursos de fuentes muy diversas para la adquisición de equipos y para estructurar la primera red regional de cómputo que funciona en España.

En 1988 cesa en este puesto para hacerse cargo de la dirección del Plan Andaluz de Investigación, cargo que ocupa hasta 1996, siendo responsable de la redacción, puesta en funcionamiento y gestión de dicho Plan, cuya estructura organiza. Define

un sistema de financiación basado en ayudas periódicas a los grupos de investigación de Andalucía, que todavía perdura, al mismo tiempo que lleva a cabo la catalogación e incentivación de esos grupos a través de un conjunto de acciones. Como en alguna ocasión he dicho, esto es importante no sólo porque permitió ordenar y estructurar en cierto modo la investigación en nuestra Comunidad Andaluza, sino también porque ha permitido que nos diésemos cuenta, a la vista del conjunto, de la potencialidad de dicha investigación, donde existen grupos sumamente competitivos no sólo a nivel nacional sino incluso internacional. Y, aunque no podemos, ni debemos, sentirnos satisfechos por ello, cuando queda tanto por hacer, sí que debemos ser conscientes de lo que se está haciendo, y sentirnos moderadamente optimistas y animados a seguir por ese camino. En particular, a los universitarios de mi edad nos hubiesen parecido unos logros inalcanzables hace treinta o cuarenta años.

Nuestro nuevo Académico contribuye y desempeña además un papel fundamental en la creación, en 1966, del Instituto de Microelectrónica de Sevilla, del CSIC, siendo su director desde ese año hasta la actualidad. También se le nombra coordinador del área de Físicas y Tecnologías Físicas del CSIC, ocupando ese cargo entre 1996 y 2004, y coordinando la actividad de los 22 centros de investigación adscritos a este área.

Actualmente es representante de España en el Comité Científico de la OTAN y gestor del Programa Nacional de Seguridad Informática. Es miembro del Comité Científico Asesor de Telefónica I+D y del Comité Externo de Evaluación del INAOE (Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica) de Méjico. Asimismo es evaluador habitual de la Comisión Europea, la ESF (Fundación Europea de la Ciencia), la NSF (Fundación Nacional de la Ciencia de Holanda), así como de las agencias nacionales de Inglaterra, Irlanda, Francia y Bélgica. Igualmente es o ha sido Editor Asociado o Invitado de varias de las revistas de mayor prestigio de la especialidad. Ha sido Presidente General o Presidente del Comité de Programa y organizador de nueve conferencias internacionales, entre ellas la Conferencia Europea de Circuitos de Estado Sólido, celebrada en Sevilla en 1993.

Sus principales campos de investigación son los circuitos integrados de señal mixta, fundamentalmente la conexión entre diseño y testado de tales circuitos. Ha trabajado también en temas relacionados con circuitos y redes no lineales, en automatización de diseño, en circuitos de lógica no-binaria, redes neurales y celulares, circuitos de lógica difusa, y en circuitos tolerantes a fallos, entre otros temas.

El Prof. Huertas es creador de una importante escuela de microelectrónica relacionada con el diseño de circuitos integrados, habiendo sido responsable de la formación de un núcleo de investigadores en ese área muy prestigiado a nivel internacional. Entre sus discípulos directos hay 4 catedráticos de Universidad y 1 profesor de investigación del CSIC, aparte de varios profesores titulares de universidad y científicos titulares del CSIC.

Ha recibido numerosas distinciones, entre las que podemos destacar el Guillemín-Cauer del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de EE.UU, en 1995; el Premio Kelvin del Instituto de Ingeniería Eléctrica del Reino Unido, en 1996; el Premio Nacional de Investigación Técnica Leonardo Torres Quevedo, en 1998, y la Medalla

ALOCUCIÓN DEL EXCMO. SR. D. BENITO VALDÉS CASTRILLÓN

Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Física, Ilmo. Sr. Representante de la Real Academia de Medicina y Cirugía de Sevilla, Ilmo. Sr. Delegado Provincial de Cultura, Excmos. e Ilmos. Sres Académicos, Sras y Sres.

Quizá les haya sorprendido el que el Ilmo. Sr. Académico Secretario les haya dado a conocer que el Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas Díaz había sido propuesto para ocupar una plaza de Académico Numerario de esta Real Academia Sevillana de Ciencias el 20 de octubre de 1998.

Diversas circunstancias, ajenas al interés del nuevo Académico por tomar posesión de su plaza, han condicionado este retraso. D. José Luis Huertas entregó a la Academia el magnífico y muy bien ilustrado discurso que hemos tenido hoy el placer de escuchar hace más de tres años. Pero el discurso de un nuevo Académico ha de ser contestado por un Numerario lo que ha hecho el Excmo. Sr. D. Rafael Márquez Delgado con la brillantez que le caracteriza. La Academia había acordado que la contestación a su discurso debería hacerla su maestro, el Excmo. Sr. D. Antón Civit Breu, recientemente fallecido. Se fue postponiendo la fecha de lectura esperando que el estado de salud de D. Antón, que se deterioraba gradualmente, permitiese la realización del acto que hoy estamos celebrando. Pero nunca llegó la deseada ocasión, por lo que la Academia pidió ya más recientemente al Excmo. Sr. D. Rafael Márquez que cumpliera con este cometido.

La incorporación del nuevo Académico cuyo magnífico curriculum ha sido resumido por el Excmo. Sr. D. Rafael Márquez Delgado refuerza notablemente la Sección de Física, que es la que más incidencias ha sufrido desde la creación de la Academia. Se constituyó la Academia en 1985 con el nombramiento por la Junta de Andalucía de los primeros 12 Académicos. Por decisión de la Junta Rectora nombrada al efecto, formaron parte de este núcleo inicial por la Sección de Física, los Excmos. Sres, D. Antón Civil Breu y D. Rafael Márquez Delgado y el Ilmo. Sr. D. Gonzalo Madurga Lacalle. En 1989 se incorporó a la Sección el Ilmo. Sr. D. Pablo Hervás Burgos, y en 1991 el Ilmo. Sr. D. Manuel Zamora Carranza. Pero ese mismo año falleció D. Pablo Hervás y en 1998 D. Gonzalo Madurga, que se había trasladado a Zaragoza en 1990. Delicado de salud D. Antón Civit, sólo dos Académicos, D. Rafael Márquez y D. Manuel Zamora debían ocuparse de las obligaciones que periódicamente recaen en esta Sección. Afortunadamente, en 1997 se incorporó como Académico Numerario el Ilmo. Sr. D.

Javier Brey Ábalo y los tres se ocuparon durante casi 10 años de mantener las tareas académicas de la Sección, entre las que se encuentran el tomar parte de los jurados para asignación de los Premios para Investigadores Jóvenes de la Academia y de la Real Maestranza de Caballería de Sevilla, intervenir en las series de conferencias de divulgación de “Los Martes de la Academia” y proponer nuevos académicos, conferenciantes, ciclos de conferencias, etc. Además, durante ocho años recayó la responsabilidad de la Presidencia de la Academia en el Excmo. Sr. D. Rafael Márquez Delgado, y en el Ilmo. Sr. D. Manuel Zamora Carranza la tesorería de la Academia durante ocho años y la Vicepresidencia durante los cuatro últimos años.

La situación de la Sección de Física es hoy muy diferente. En 2004 se incorporó como Académico Numerario el Ilmo. Sr. D. Alejandro Conde Amiano. Hoy lo hace el Ilmo. Sr. D. José Luis Huertas Díaz, y en la próxima primavera, Dios mediante, se incorporará como Numerario el Académico Electo D. Arturo Domínguez Rodríguez. Constituye así la Sección de Física, aunque esta aún pendiente de completar, un núcleo sólido dentro de la Academia, que espera de ella grandes logros.

Ilmo. Sr. Huertas, la Academia lo recibe con los brazos abiertos, satisfecha de que podamos contar con Vd. para el desarrollo de nuestras tareas y actividades. En nombre de la Institución y en el mío propio, le doy la más calurosa bienvenida, con la seguridad de que su incorporación redundará en beneficio de la Academia, que espera mucho de Vd. pues es mucho lo que puede ofrecer.

Quiero terminar estas breves palabras para, en nombre de la Institución, agradecer muy encarecidamente al Excmo. Sr. D. Rafael Márquez Delgado por haber aceptado la petición de la Academia para contestar al nuevo Académico. Al Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Física, por haber puesto, una vez más, a disposición de la Academia esta Aula Magna para poder desarrollar esta Sección Pública. A las Excmas. e Ilmas. Autoridades que nos acompañan, y a todos Vds., Sras. y Sres. que con su presencia han contribuido a aumentar la solemnidad de este Acto. Muchísimas gracias.