



RASC

Real Academia
Sevillana de Ciencias

Matemática aplicada e ingeniería eléctrica:
150 años de simbiosis

discurso pronunciado por el

Ilmo. Sr. D.

Antonio Gómez Expósito

en el acto de recepción como académico numerario
el día 2 de junio de 2014

y

contestación del académico numerario

Excmo. Sr. D.

Javier Aracil Santonja

MATEMÁTICA APLICADA E INGENIERÍA ELÉCTRICA: 150 AÑOS DE SIMBIOSIS

*Discurso pronunciado por el
Ilmo. Sr. D. Antonio Gómez Exposito,
en el Acto de Toma de Posesión como Académica Numerario,
celebrado el día 2 de Junio de 2014.*

Excelentísimo Sr. Presidente, Excelentísimos e Ilustrísimos Sres. Académicos, Amigos, familiares:

El novelista y ensayista Marcel Proust decía que “debemos agradecer a los hombres y mujeres que nos hacen felices, pues ellos son los encantadores jardineros que hacen florecer a nuestro espíritu”. Si la gran satisfacción que siento en este momento constituye, como creo, una de las múltiples formas en que cristaliza la escurridiza felicidad, no puedo empezar mi discurso sino agradeciendo a los miembros de esta egregia institución, en particular a los que han propuesto mi candidatura, por haber buscado, y parece que hallado, en mi trayectoria profesional cualidades suficientes para merecer este reconocimiento. Muy especialmente, agradezco al Profesor Aracil la lectura crítica de este discurso, sus comentarios y el honor que me brinda con su contestación.

Mi agradecimiento también a la abultada nómina de colaboradores, esforzados labradores más que jardineros, con quienes he roturado en los últimos 30 años para ensanchar la frontera de lo que empezó siendo un pequeño huerto, casi un erial, que ha dado frutos acaso inesperados. El singular equipo que hemos construido entre todos constituye, sin duda, uno de los activos más importantes de los que puedo presumir.

Pero también presumo de mi coqueto jardín familiar, donde hace tiempo brotaron dos vigorosas plantas de una misma semilla. A las flores que engalanan mi jardín, y a la incansable jardinera que aún lo cuida con idéntico mimo que antaño, les dedico estas palabras.

Como Machado, mi infancia son recuerdos de un patio al abrigo de una familia numerosa, un oasis de macetas en un mar de olivos, hoy abandonado y marchito. Es sobre todo en ocasiones como ésta cuando más siento en mi alma el aguijón de la saudade por los que, habiendo hecho ya su último viaje, no pueden estar aquí con nosotros.

1. INTRODUCCIÓN

En 1864, con solo 34 años, James Clerk Maxwell publicó “*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*”¹, que englobaba y sintetizaba en sus famosas ecuaciones

todos los trabajos experimentales y leyes cuantitativas obtenidas hasta la fecha, a la vez que introducía la corriente de desplazamiento en la ley de Ampère y predecía la existencia de ondas electromagnéticas, unificando así no solo la electricidad y el magnetismo sino también la óptica, al identificar la luz como una onda electromagnética.

Exceptuando la modificación a la ley de Ampère, ninguna de las otras ecuaciones era realmente original. Lo que hizo Maxwell fue reobtenerlas a partir de modelos mecánicos e hidrodinámicos, usando su modelo de vórtices basado en las líneas de fuerza de Faraday, cuyo origen se remonta hasta los *Principia Philosophiae* de Descartes.

El trabajo de Maxwell, que constituyó la segunda gran unificación de la Física tras la realizada por Newton exactamente dos siglos antes, fue esencialmente de naturaleza matemática, y no hubiera sido posible sin la invención del cálculo por parte del propio Newton y Leibniz. Por ello, si bien Maxwell publicó versiones preliminares durante el bienio 1861-62, e incluso a pesar de los trabajos teóricos realizados por Kirchhoff dos décadas antes, me parece acertado tomar el año 1864 como hito que marca realmente el comienzo de la fecunda relación entre las matemáticas y la ingeniería eléctrica.

La nómina de físicos, matemáticos o ingenieros que durante los 150 años siguientes han establecido sólidos puentes entre las matemáticas y la ingeniería eléctrica es bastante extensa, e incluye a personajes de la talla de Oliver Heaviside, Claude Shannon o el propio Paul Dirac. Pero sus historias son bien conocidas, y los anaqueles están repletos de libros que glosan sus importantes contribuciones. Por ello, me propongo dedicar este discurso a otros actores, acaso secundarios para algunos, pero igualmente protagonistas de este siglo y medio de vertiginoso desarrollo científico y tecnológico.

En su libro *“El carácter de la ley física”*, el premio Nobel Richard Feynman afirma que la naturaleza es simple y que “es posible reconocer la verdad por su belleza y simplicidad”. Aunque él se refería principalmente a las leyes de la Física, creo que la simplicidad es también el objetivo que debería guiar a todo científico o investigador que aspire a sintetizar las principales leyes de una determinada disciplina en formulaciones o procedimientos matemáticos. Los tres ejemplos de fructífera simbiosis entre las matemáticas y la ingeniería, a los que me referiré a continuación siguiendo un orden cronológico, responden fielmente a este principio. Los tres casos tienen en común el hecho de que sus contribuciones matemáticas han trascendido la ingeniería eléctrica, encontrando aplicaciones en otros campos de la ciencia y la tecnología.

2. LA SIMPLICIDAD DE LOS COMPLEJOS

A finales del siglo XIX, el propio éxito de las primeras instalaciones de corriente continua, desplegadas ya con profusión en Europa y Norteamérica, empezó a constituir paradójicamente su principal peligro, ante la imposibilidad de transportar las cada vez mayores cantidades de energía, demandada desde lugares necesariamente más lejanos,

1. La publicación en los *Philosophical Transactions* de la Royal Society realmente se produjo en 1865, pero el manuscrito se envió en 1864, fecha que algunas fuentes asocian a las leyes de Maxwell.

manteniendo constante el voltaje. En este contexto, la conocida como guerra de las corrientes entre General Electric y Westinghouse, es decir, entre Edison y Tesla, por hacerse con un mercado cuyo potencial era inmenso, se acabó decantando rápidamente por la corriente alterna, especialmente tras la adjudicación en 1895 de la central hidroeléctrica de Niagara a Westinghouse, sin duda la más determinante batalla de esta guerra pero desde luego no la última.

Aunque Tesla, que descubrió el campo magnético giratorio e introdujo numerosas mejoras en los sistemas trifásicos, fue el actor principal en el desarrollo del sistema de corriente alterna que utilizamos en la actualidad, mi objetivo en este primer punto es referirme a la contribución de un personaje no menos importante, aunque no tan reconocido.

2.1. Charles Proteus Steinmetz

Charles Steinmetz nació en Breslau, ciudad de la Baja Salesia en la por entonces conflictiva región fronteriza entre Alemania y Polonia, a la que pertenece desde la segunda guerra mundial. En Breslau y Berlín estudió diversas disciplinas científicas, incluyendo Matemáticas y Física, pero tuvo que exiliarse a Suiza por motivos políticos. Allí cursó Ingeniería Mecánica en el Politécnico de Zurich antes de emigrar con 24 años a los Estados Unidos, en 1889, donde adaptó su nombre original alemán (Karl August Rudolf Steinmetz) a la nueva nacionalidad. Hasta 1892 trabajó en un taller eléctrico en Nueva York, periodo en el que realizó sus primeras contribuciones en el campo de la ingeniería eléctrica. Formalizó matemáticamente y comprobó experimentalmente las

STEINMETZ CON ILUSTRES PERSONAJES DE LA ÉPOCA: EDISON (IZQUIERDA) Y EINSTEIN (DERECHA)



hasta entonces completamente desconocidas leyes que gobiernan las pérdidas por histéresis magnética en las incipientes máquinas de corriente alterna. Cuando la empresa fue vendida a General Electric (GE), recién fundada por Edison, Steinmetz pasó como ingeniero a la nueva compañía, donde permaneció el resto de su vida. En 1900 fundó el Laboratorio de Investigación de la GE y más tarde crearía y dirigiría el Departamento de Ingeniería y Consultoría. Al final de su carrera también realizó importantes contribuciones en el campo de las descargas eléctricas atmosféricas, que llegó a recrear en el laboratorio. Cuando murió, en 1923, tenía más de 200 patentes.

Durante la preparación de este discurso encontré casualmente uno de sus últimos trabajos, fechado en marzo de 1920, dedicado al diseño de un vehículo eléctrico. La peculiar propuesta se basaba en un motor de corriente continua con frenado regenerativo, en el que ambos devanados (de campo y armadura) eran giratorios, cada uno actuando sobre una rueda, con lo que el propio motor actuaba de diferencial. Y nosotros pensando, en pleno siglo XXI, que hemos alumbrado la era “smart” simplemente por comprar unos cuantos vehículos híbridos a los japoneses.

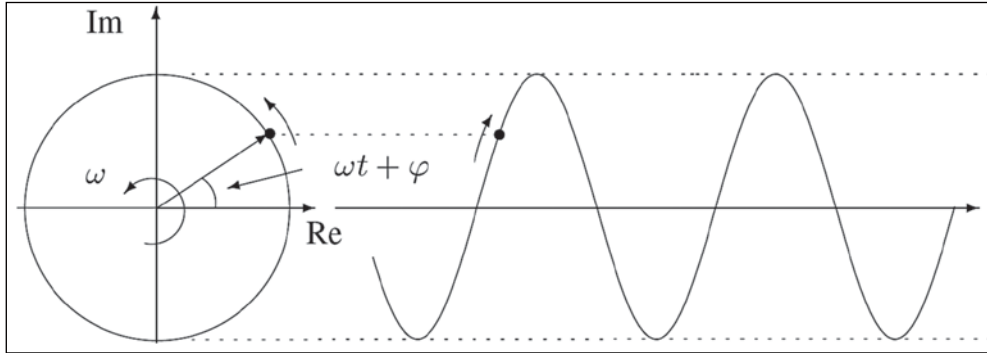
2.2. El método de los fasores

Pero si traemos a colación a Steinmetz en este contexto es por su tercera y más importante contribución personal, relacionada con el análisis de circuitos en corriente alterna mediante el método de los llamados “fasores”, que reduce el problema a la solución de sistemas puramente algebraicos con coeficientes complejos.

Hasta entonces, frente a la extrema simplicidad de los circuitos de corriente continua, que conducen de forma natural a un sistema algebraico de coeficientes reales, el cálculo y análisis de los circuitos de corriente alterna, incluso de los más triviales, se tornaba una ardua y farragosa tarea, debido a la aparición de derivadas e integrales, tantas como componentes dinámicos tuviese el circuito. Los métodos al uso, basados en una combinación de intuición, habilidad para transformar ecuaciones y eliminar incógnitas, experiencia previa y diagramas vectoriales ad hoc, eran difícilmente extrapolables a circuitos de tamaño y estructura arbitrarios.

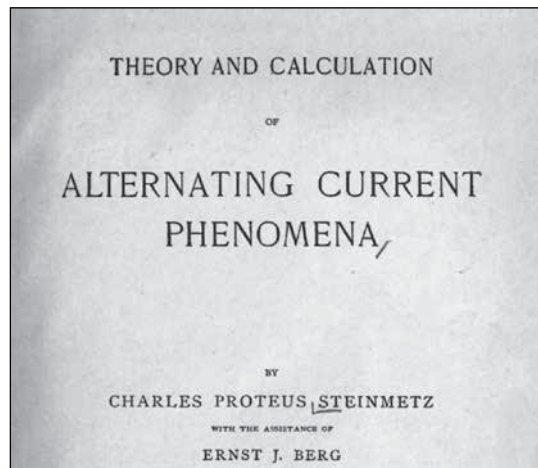
Steinmetz presentó su método en el International Electrical Congress de Chicago, en 1893, pero como ocurre todavía hoy día, cuando los alumnos de Teoría de Circuitos en las escuelas de ingeniería se enfrentan por primera vez al método de los fasores, prácticamente nadie logró entenderlo ni sacar provecho del mismo en ese primer intento. Fue posteriormente, con la publicación de sus libros de texto, que durante las siguientes décadas fueron referencia obligada en todo el mundo, cuando el método simbólico de análisis de circuitos en régimen permanente sinusoidal ganó rápidamente popularidad, hasta convertirse en la herramienta imprescindible que es hoy. El concepto de impedancia compleja, o la posibilidad de calcular circuitos equivalentes en el dominio de los fasores, por citar solo dos ejemplos relevantes, pertenecen hoy día al acervo de prácticamente cualquier ingeniero, con independencia de su especialización. Pero los libros de Steinmetz van mucho más allá, y se adentran en territorios que incluso muchos pro-

ROTACIÓN DE UN VECTOR EN EL PLANO COMPLEJO Y ONDA SINUSOIDAL ASOCIADA. EL FASOR ES EL VECTOR ESTACIONARIO QUE SE OBTIENE AL ELIMINAR LA ROTACIÓN, COMÚN A TODAS LAS ONDAS



gramas de postgrado, hoy día, exploran solo superficialmente. Su tratamiento de temas como las corrientes parásitas de Foucault, las líneas de parámetros distribuidos, cuando la longitud de las mismas aún no era un problema, o la distorsión armónica, apenas ha sido superado, más de un siglo después, en el superespecializado panorama actual.

PORTADA DEL LIBRO “THEORY AND CALCULATION OF ALTERNATING CURRENT PHENOMENA”, 3ª EDICIÓN, 1900

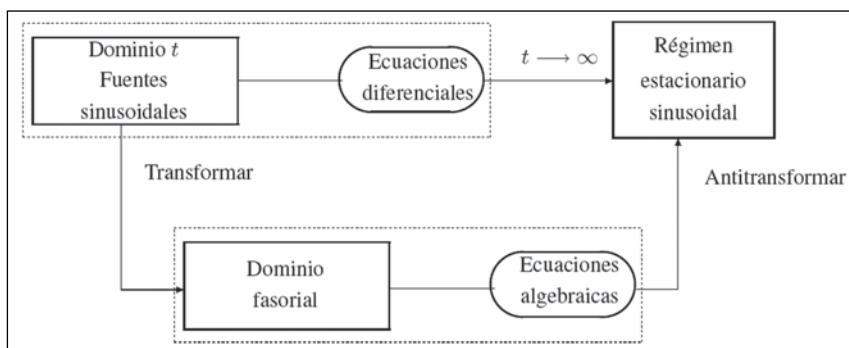


En la era de los computadores, todas las herramientas comerciales de análisis de sistemas eléctricos y circuitos electrónicos analógicos, capaces de resolver en escasos segundos sistemas con decenas o centenares de miles de componentes, se basan en el método de Steinmetz, que salvo pequeños retoques de notación permanece inalterado

desde su publicación. Pero el método simbólico para el cálculo de circuitos eléctricos en corriente alterna ha trascendido también a todos los ámbitos de la ingeniería en los que se aborda el cálculo o diseño de sistemas lineales e invariantes en el tiempo, sometidos a excitaciones de tipo sinusoidal. Incluso se enseña en los cursos básicos de cálculo como forma de obtener soluciones particulares de ecuaciones diferenciales ordinarias no homogéneas cuando intervienen combinaciones lineales de senos y cosenos.

Me interesa insistir aquí en que el propio Steinmetz bautizó a su método de análisis, basado en el álgebra de números complejos, como el “método simbólico” porque trabaja con circuitos transformados, aunque conserven la topología de los circuitos primitivos. En efecto, el método de Steinmetz transforma funciones sinusoidales del tiempo en fasores y reemplaza los componentes físicos por impedancias complejas, por lo que debe considerarse desde una concepción moderna como una transformada más, similar a las de Fourier o Laplace, aunque las transformaciones involucradas sean triviales una vez conocida la mecánica y casi nunca sea preciso realizar la transformación inversa. Es tal la simplicidad resultante al aplicar el método simbólico, que los ingenieros eléctricos olvidamos a menudo que los circuitos transformados con los que trabajamos rutinariamente no son más que un modelo de la realidad, que sólo es válido a una frecuencia determinada.

SOLUCIÓN DE CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y EN EL DOMINIO DE LOS FASORES



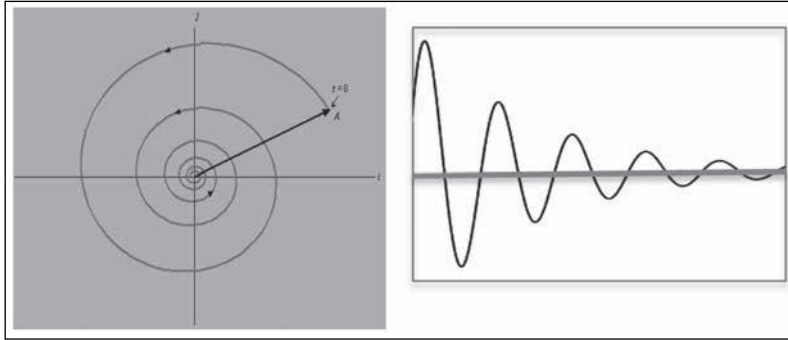
2.3. Fasores generalizados

Teniendo en cuenta los más de cien años de historia del concepto de fasor, llama poderosamente la atención el que su casi trivial generalización a problemas donde intervienen frecuencias complejas haya pasado prácticamente desapercibida hasta hace escasos años. No fue hasta 1989 en que el japonés Yamamura, en una breve comunicación de cuatro páginas, introdujo el concepto de “vector espiral” o fasor generalizado, que se obtiene reemplazando simplemente la frecuencia ordinaria ω por la frecuencia compleja $\sigma + j\omega$. Ello permite modelar como caso particular todas las funciones que aparecen en la

respuesta natural de circuitos lineales e invariantes en el tiempo, incluyendo exponenciales, oscilaciones amortiguadas y señales constantes.

De su propia definición se deduce que las propiedades teóricas de los fasores generalizados son exactamente las mismas que las de los fasores ordinarios, incluyendo el cumplimiento de las leyes de Kirchhoff y la ley de Ohm, previa generalización del concepto de impedancia para frecuencias complejas.

ONDA SINUSOIDAL AMORTIGUADA Y FASOR GENERALIZADO



Conviene resaltar que ambos tipos de fasores guardan cierto paralelismo con las transformadas de Fourier y Laplace, en el sentido de que transforman el dominio temporal, es decir, el mundo real en otro dominio virtual, pero conceptual y metodológicamente son mucho más simples. Mientras que en el caso de ambas transformadas la frecuencia, real o compleja, permanece como variable explícita, ésta constituye un dato conocido del problema para los fasores. Desde este punto de vista, los fasores generalizados son a la Transformada de Laplace lo que los fasores ordinarios a la Transformada de Fourier. Pero el concepto de fasor generalizado al que me estoy refiriendo no debe confundirse tampoco con el más común de fasor dinámico, utilizado en el modelado y control de máquinas eléctricas.

En nuestro grupo de investigación desarrollamos hace pocos años una novedosa metodología para determinar el modo en que cualquier respuesta natural se propaga en un circuito, con un coste computacional muy inferior al de los métodos existentes, basados en las ecuaciones en variables de estado. La originalidad del procedimiento radica en la utilización sistemática de las ecuaciones de nudos, restringidas hasta entonces al cálculo de respuestas forzadas mediante fasores ordinarios y mucho más simples de formular que la matriz de transición de estados, para obtener respuestas naturales en el dominio de los fasores generalizados, donde la frecuencia compleja se corresponde con el autovalor correspondiente. Con ello se generaliza y extiende el método de obtención de respuestas forzadas ante excitaciones sinusoidales, propuesto por Steinmetz hace más de un siglo, al cálculo de las respuestas naturales, sin tener que recurrir al dominio temporal.

Más recientemente hemos mostrado que la misma idea se puede emplear, en combinación con el método de la potencia inversa, para obtener con un coste muy reducido los autovalores y autovectores dominantes, es decir los más determinantes de la respuesta dinámica del circuito, utilizando exclusivamente las ecuaciones de nudos, lo cual resulta especialmente ventajoso en circuitos de gran dimensión.

Estoy convencido de que, al igual que el método de Steinmetz, estas recientes aportaciones podrán encontrar aplicación así mismo en otras áreas, como la ingeniería mecánica y la automática.

3. *DIVIDE Y VENCERÁS*

El aforismo “divide y vencerás”², en sus diferentes interpretaciones, forma parte tanto del legado cultural occidental como de la tradición oriental. Hay constancia de que los militares chinos ya usaban esta estrategia al menos 500 años antes de Cristo, y como es bien sabido fue pieza clave en la campaña de Julio César en las Galias, donde sus legiones, que sumaban unos 50.000 soldados, derrotaron a más de tres millones de enemigos. A la postre, el propio método cartesiano, al proponer “dividir un problema en tantas partes como sea posible para obtener una mejor solución”, no es más que una ordenada aplicación de esta misma idea.

En ingeniería, el término “divide y vencerás” hace referencia a una de las más importantes estrategias de diseño existentes, muy en particular en la creación de algoritmos en el campo de la informática. El método está basado en la división recursiva de un problema en dos o más subproblemas de igual tipo, hasta que éstos llegan a ser lo suficientemente sencillos como para que se resuelvan directamente. Finalmente, las soluciones de los subproblemas se combinan para dar una solución al problema original.

Quizá el ejemplo más antiguo de esta estrategia sea la búsqueda binaria, utilizada ya en Babilonia, cuya versión algorítmica para ordenadores fue publicada en 1946 por John Mauchly, uno de los dos creadores de ENIAC, la primera computadora digital programable de propósito general. El algoritmo de Euclides para calcular el máximo común divisor de dos números es otro ejemplo ancestral de algoritmo “divide y vencerás”.

3.1. *La transformada de Fourier*

La idea básica de lo que conocemos como transformada de Fourier es que cualquier función periódica se puede expresar como suma ponderada de una serie de senos y cosenos con un periodo común. En la práctica no se trabaja con funciones continuas sino con funciones muestreadas, que dan lugar a la versión discreta de la transformada. En esta variante, denominada transformada discreta de Fourier, los coeficientes de los diferentes armónicos se obtienen mediante sumas, en lugar de integrales.

2. “Divide et impera” en latín; “divide and conquer” en inglés.

La historia de esta transformada, que encuentra aplicación en numerosas disciplinas, desde la estadística o la astronomía hasta la medicina, y por supuesto en todas las ramas de la ingeniería, es intrincada y a la vez fascinante, porque muchos grandes matemáticos, sobre todo a partir del siglo XVIII, han tenido relación con los desarrollos en serie mediante funciones trigonométricas, antes y después de Fourier. Por ejemplo, d'Alembert y Euler, entre otros, estudiaron matemáticamente las vibraciones de las cuerdas de un violín. En 1777, basándose en la ortogonalidad de las funciones trigonométricas, Euler descubrió una forma simple de obtener los coeficientes de una serie de cosenos, que hoy denominamos coeficientes de Fourier. Este y otros trabajos constituyen claros precursores del método propuesto por Joseph Fourier en 1807, que no fue publicado hasta 1822 por las objeciones de Lagrange y Laplace. Algunos consideran incluso que los métodos empíricos usados por los babilonios para predecir las fases lunares, sólo parcialmente descifrados, constituyen una forma primitiva de transformada de Fourier.

Durante el siglo XIX, otros ilustres matemáticos, como Dirichlet, Riemann y Lebesgue, se afanaron también en generalizar y dotar de cuerpo teórico los trabajos de Fourier y sus predecesores.

3.2. La transformada rápida de Fourier

La transformada discreta de Fourier aplicada a N muestras de datos requiere un número de operaciones aritméticas que crece con N^2 , lo cual supone un hándicap importante cuando los cálculos se deben realizar en tiempo real o el número de muestras es muy elevado. El advenimiento de los computadores digitales en los años sesenta, con su escasa potencia de cálculo y su limitada memoria, trajo consigo la imperiosa necesidad de reducir dicho coste cuadrático, dando lugar a una nutrida y variada familia de algoritmos conocidos en la literatura como “transformada rápida de Fourier”, o simplemente por su acrónimo inglés FFT (*Fast Fourier Transform*). Precisamente lo que caracteriza a todos los procedimientos FFT es su habilidosa utilización de la estrategia “divide y vencerás”. Sutiles modificaciones en la forma en que dicho principio se aplica originan notables diferencias en el coste computacional resultante.

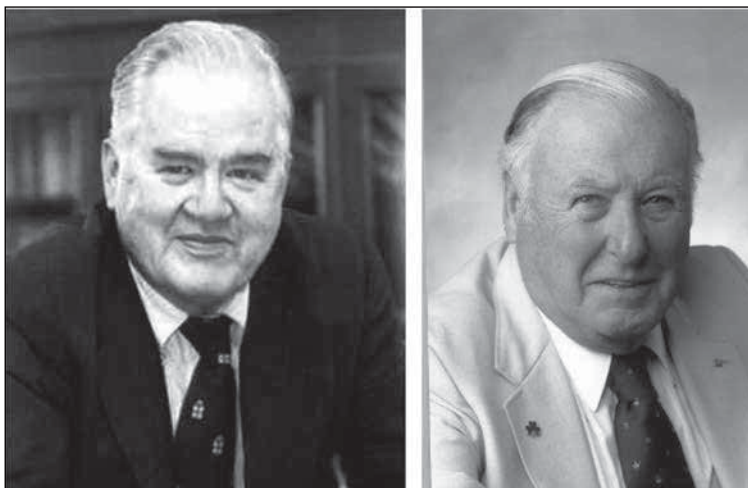
Estudios históricos recientes demuestran que el primer algoritmo exitoso de este tipo se debe a Gauss, quien no lo publicó en vida. El correspondiente manuscrito, fechado en 1805, antes incluso que el trabajo del propio Fourier, apareció sesenta años más tarde en una compilación de sus obras completas, pero prácticamente pasó desapercibido. El descubrimiento de estos trabajos ha hecho que algunos propongan, con escaso éxito, que la transformada de Fourier se conozca como transformada de Gauss-Fourier.

El procedimiento de Gauss fue redescubierto, siglo y medio después, por James Cooley y John Tukey, quienes en 1965 publicaron su seminal trabajo “*An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*”, el cual ha recibido desde entonces más de 10.000 citas³.

3. El lector interesado puede profundizar en este tema con la entrevista realizada por el IEEE a J.

James Cooley es un investigador estadounidense de 88 años, que se doctoró en matemáticas aplicadas en 1961 por la Universidad de Columbia y desarrolló prácticamente toda su carrera en IBM. John Tukey, fallecido en el año 2000, se graduó en química y obtuvo un doctorado en matemáticas por la Universidad de Princeton, donde compaginó la docencia con su trabajo en los prestigiosos laboratorios Bell de AT&T. Aunque su aportación más celebrada es sin duda la FFT, se le atribuye también la introducción de términos hoy día tan cotidianos como “bit” y “software”.

JOHN TUKEY (IZQUIERDA) Y JAMES COOLEY (DERECHA)



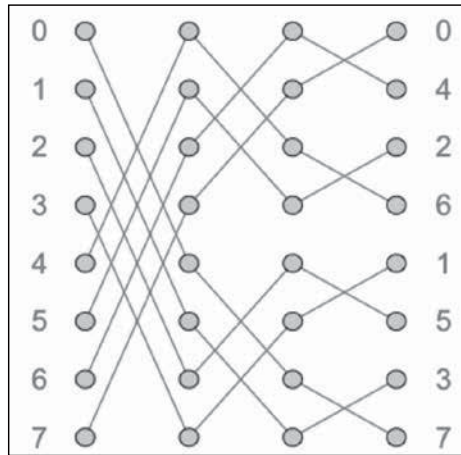
El procedimiento ideado por Cooley-Tukey, como el de Gauss más de 150 años antes, descompone el cálculo de la transformada de N muestras en dos transformadas de N_1 y N_2 muestras respectivamente, tales que $N = N_1 \cdot N_2$. Si se aplica la idea recursivamente, para valores de N que sean una potencia de 2, se llega finalmente a $N/2$ transformadas elementales de 2 muestras cada una, que se combinan linealmente para obtener la transformada completa deseada. La principal ventaja de esta forma de organizar las operaciones, amén de otras relacionadas con su implantación modular en chips de silicio, es que el número total de operaciones se reduce a $N \cdot \log N$.

La transformada rápida de Fourier, y sus derivadas como la transformada de Hartley o la transformada coseno, alteraron definitivamente el equilibrio entre el tratamiento analógico y digital de la información, a favor de este último. Cuando hablamos por teléfono, oímos música, vemos la televisión, tomamos fotos, almacenamos datos en un disco duro, o simplemente especulamos en los mercados financieros, por referirme solo a ejemplos cotidianos, estamos utilizando sin saberlo alguno de los muchos procesos de tratamiento de datos derivados del trabajo de Cooley-Tukey, acompañado segura-

Cooley en 1997, en la que se aportan interesantísimos detalles sobre la gestación de este trabajo (http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/Oral-History:James_W_Cooley)

mente de otros algoritmos relacionados con la corrección de errores, la encriptación, etc. ¿Cuántos niños de 10 años no saben hoy, por ejemplo, qué son los archivos JPEG o MP3? Definitivamente, la codificación de la información mediante bits domina el mundo.

APLICACIÓN DE LA FFT A UN CONJUNTO DE 8 MUESTRAS, ORIGINANDO 3 CAPAS O NIVELES DE ANIDAMIENTO. CADA CAPA CONTIENE 4 UNIDADES ELEMENTALES DE PROCESAMIENTO, DENOMINADAS “MARIPOSAS”, LAS CUALES PROCESAN DOS MUESTRAS DE LA CAPA ANTERIOR



Incluso me atrevería a asegurar que las técnicas de procesado digital de imágenes, derivadas del algoritmo de Cooley-Tukey o sus secuelas, actualmente desplegadas en numerosos sistemas de diagnóstico médico, salvan cada año muchas más vidas que, por ejemplo, el empleo de células madre o los tratamientos individualizados basados en terapia génica. No pretendo con esta afirmación, en absoluto, cuestionar la necesidad e importancia de hacer investigación científica básica, sino resaltar cómo un avance tecnológico, en este caso la combinación de un algoritmo matemático con la potencia de los actuales computadores, puede ser tan beneficioso para la humanidad como un descubrimiento científico.

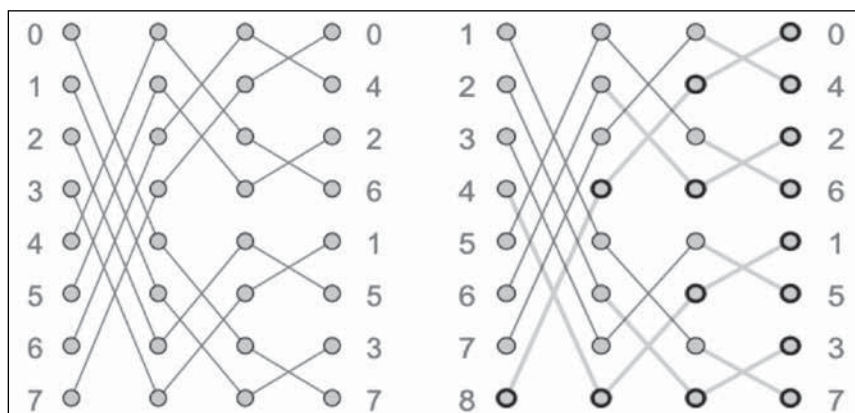
3.3. La transformada rápida de Fourier de ventana móvil

En numerosas aplicaciones, como en el tratamiento estadístico de series de datos o el procesado de señales en ingeniería eléctrica, la información a tratar adopta la forma de una secuencia temporal indefinida, de la que solo nos interesa una ventana de anchura determinada, que se desliza en el tiempo conforme llegan nuevas muestras de datos, al tiempo que se descartan las más antiguas. Esta variante, conocida como transforma-

da de Fourier de ventana móvil⁴, supone un avance conceptual notable respecto a la transformada convencional, toda vez que aporta información tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En efecto, adaptando a cada caso concreto tanto la velocidad de muestreo como la anchura temporal y forma de la ventana deslizante, se puede capturar la evolución en el tiempo de las componentes espectrales de interés. A su vez, esta transformada ha dado paso a partir de los años 90 al vertiginoso desarrollo de las transformadas Wavelet, que permiten analizar series de datos manteniendo una adecuada resolución tanto en el tiempo (fenómenos rápidos) como en la frecuencia (fenómenos lentos).

En un trabajo de 1991, que también pasó casi desapercibido, Covell y Richardson mostraron que la transformada completa de Fourier de ventana móvil se puede obtener con un coste computacional de orden N . Para ello basta con observar que, entre dos transformadas consecutivas, solo cambia una mariposa de la primera capa, dos en la segunda, y así sucesivamente. Almacenando los resultados intermedios necesarios, cada vez que llega una nueva muestra de datos únicamente es preciso calcular las $N-1$ mariposas que realmente han cambiado desde la ejecución anterior. Con esta técnica igualaron el coste del método de Goertzel, de 1958, que aplica un filtro recursivo a cada armónico individual, pero mejorando notablemente la estabilidad numérica del proceso.

MARIPOSAS PREVIAMENTE CALCULADAS (IZQUIERDA) Y LAS QUE DEBEN SER ESTRUCTAMENTE ACTUALIZADAS CUANDO LLEGA UNA NUEVA MUESTRA (EN NEGRITA, A LA DERECHA)



Nuestros trabajos en este campo comenzaron en los años 90, motivados por la necesidad de calcular en tiempo real un elevado número de armónicos para el desarrollo de un relé diferencial de transformadores de 3 devanados, cuya implantación en los microprocesadores de 16 bits de la época era problemática y novedosa, dada la todavía

4. En la literatura inglesa se conoce también como "Short-Time Fourier Transform".

tímida implantación de los procesadores diseñados específicamente para el tratamiento digital de señales.

Entre otras aportaciones, extendimos el método de Covell-Richardson a otras transformadas trigonométricas de gran interés, como la de Hartley y la del coseno; propusimos un algoritmo que reduce de forma notable el número de operaciones aritméticas involucradas en transformadas de ventana móvil, basado en una nueva expresión que obtiene la componente real de cada armónico a partir de dos valores consecutivos de la componente imaginaria; y, en fin, desarrollamos fórmulas de mínimo coste para el cálculo directo del módulo de los armónicos, de especial interés en sistemas eléctricos.

FÓRMULA RECURSIVA DE MÍNIMO COSTE (DOS SUMAS Y UN PRODUCTO) PARA EL CÁLCULO DIRECTO DEL MÓDULO DE UN ARMÓNICO A PARTIR DE SU PARTE REAL (ARRIBA) Y EXPRESIÓN ORIGINAL QUE PERMITE OBTENER LA PARTE REAL DE UN ARMÓNICO A PARTIR DE DOS VALORES CONSECUTIVOS DE SU PARTE IMAGINARIA MEDIANTE UNA SUMA Y UN PRODUCTO (ABAJO)

$$F_n^2(k) = F_{n-1}^2(k) + \Delta x(n)[2C_{n-1}(k) + \Delta x(n)]$$

$$C_n(k) = S'_n(k) \cos \theta_k - S'_{n-1}(k)$$

Posteriormente, explotando una propiedad bien conocida de la transformada de Fourier, hemos desarrollado un procedimiento para calcular cualquier armónico de una secuencia de datos a partir de la componente continua de otra secuencia que se obtiene simplemente rotando en el tiempo los datos originales, lo que reduce el número de multiplicaciones al mínimo. Esta metodología, imbatida hasta la fecha, se ha aplicado con éxito, por ejemplo, al cálculo de medias y medias cuadráticas móviles, de gran interés no solo en ingeniería eléctrica.

4. CON ORDEN Y CONCIERTO

Proceder sin orden ni concierto, es decir, sin una planificación previa, suele conducir a resultados desastrosos, como bien saben los militares, los músicos o simplemente quienes tienen que organizar un sistema relativamente complejo en el que intervienen un elevado número de componentes o actores. Pero el orden es también un concepto importante en matemáticas, que caracteriza por ejemplo a los números reales frente a los complejos. Más allá de la teoría de números, la ordenación eficiente de una lista de elementos son el clásico y a menudo primer ejemplo de algoritmo con el que se familiarizan los estudiantes de informática⁵.

5. No es casual que en español sea todavía más común el uso de la palabra “ordenador”, derivada del francés “ordinateur”, que “computadora”, derivada del inglés “computer”.

Desde tiempos inmemoriales muchas batallas se han ganado, o perdido, por la forma y momento en que se ha pasado del orden de marcha al orden de combate, por utilizar durante el ataque un orden abierto o un orden cerrado, o por la secuencia de intervención de la infantería, caballería y, en su caso, artillería.

La batalla de Trafalgar, por ejemplo, cuyas consecuencias aún estamos sufriendo estos días, se perdió, entre otros motivos, por la adopción de un inadecuado orden de combate, impuesto por el almirante francés Villeneuve contra el criterio de los más avezados oficiales españoles.

El tercer y último caso al que me quiero referir es también el de una feroz pero incruenta batalla contra las limitaciones (capacidad de memoria y potencia de cálculo) de los primitivos ordenadores con los que tenían que lidiar los ingenieros de los años 60, ganada simple y llanamente por organizar la secuencia de cálculos en un determinado orden. Del éxito de dicha victoria se benefician hoy día incontables aplicaciones, generalmente sin que los propios especialistas se percaten de ello, desde las predicciones meteorológicas o el diseño asistido por ordenador de complejas estructuras tridimensionales hasta la simulación de procesos químicos, la solución de problemas de investigación operativa o la reconstrucción de imágenes obtenidas mediante resonancia magnética (a veces, como en este último ejemplo, en combinación con el uso de algoritmos FFT, discutidos en el epígrafe anterior).

4.1. Solución de sistemas de ecuaciones con matrices dispersas

Todo problema, científico o técnico, que involucre cualquier tipo de cálculo, estático o dinámico, para el análisis o diseño de un determinado sistema físico, lineal o no, termina finalmente en la solución de un sistema lineal de ecuaciones, piedra angular de cualquier herramienta de simulación mediante ordenador. En efecto, si el sistema es no lineal, el método iterativo correspondiente resolverá en cada iteración un sistema lineal, y si el problema involucra ecuaciones diferenciales su solución en el dominio del tiempo discreto conduce así mismo a un sistema algebraico de ecuaciones.

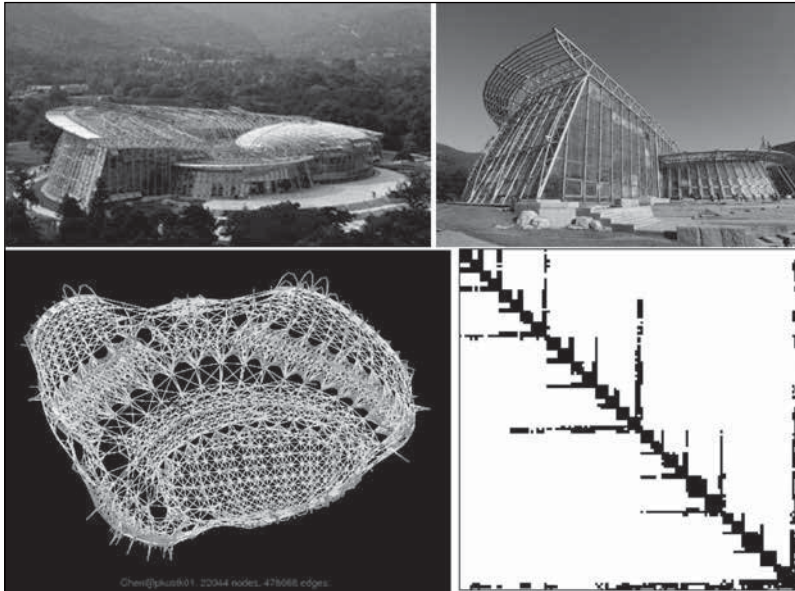
En la mayoría de aplicaciones de interés práctico, como las ya mencionadas, los sistemas a resolver tienen un tamaño muy considerable, y comparten una peculiar característica: cada variable del problema está ligada directamente solo a unas cuantas variables vecinas (rara vez superan la decena), lo cual se traduce en que el sistema de ecuaciones correspondiente tiene un porcentaje elevadísimo de ceros. Las matrices cuyos elementos representan los coeficientes de estos sistemas de ecuaciones lineales de gran dimensión se denominan matrices dispersas⁶, las cuales, dependiendo de la aplicación, suelen tener más de un 98% de elementos nulos a partir de 200 o más ecuaciones.

Como es bien sabido, los sistemas lineales pueden ser resueltos de forma directa, es decir, sin tener que iterar, mediante el conocido método de eliminación de Gauss, o su

6. No existe una denominación en español unánimemente aceptada para la expresión inglesa original “*sparse matrix*”. Las denominaciones “matriz rala” o “matriz cuasi vacía” también aparecen en la literatura.

equivalente algebraico consistente en realizar la factorización LU de la matriz respectiva. El gran escollo con el que se encontraron los pioneros en el uso de los computadores digitales para estos menesteres, a finales de los años 50, fue que las combinaciones lineales de filas inicialmente dispersas (rutina esencial del proceso de eliminación gaussiana) conducen a filas cada vez más densas, debido a los nuevos elementos que aparecen. Durante este proceso la matriz deja de ser dispersa para convertirse en una matriz esencialmente densa. El problema radica en que la solución de sistemas densos requiere un almacenamiento de datos proporcional a N^2 e involucra un coste computacional de orden N^3 , lo cual resultaba intratable para los primitivos ordenadores⁷ e incluso lo es hoy día, habida cuenta de las cada vez mayores dimensiones de los problemas que se abordan. Hasta mediados de los 60 la solución adoptada consistió en utilizar procedimientos iterativos para resolver ecuaciones lineales, cuyos requerimientos de memoria eran muy inferiores si bien los tiempos de ejecución seguían siendo deficientes, a pesar de las elaboradas estrategias utilizadas para acelerar su convergencia.

INVERNADERO DEL JARDÍN BOTÁNICO DE PEKÍN (ARRIBA), Y GRAFO Y MATRIZ RESULTANTES DE SU ANÁLISIS ESTRUCTURAL (ABAJO). EL GRAFO ESTÁ COMPUESTO POR MÁS DE 22,000 NUDOS Y CASI 500,000 RAMAS, CORRESPONDIENTES A OTRAS TANTAS ECUACIONES Y ELEMENTOS NO NULOS, RESPECTIVAMENTE, EN LA MATRIZ. [FUENTE: THE UNIVERSITY OF FLORIDA SPARSE MATRIX COLLECTION]

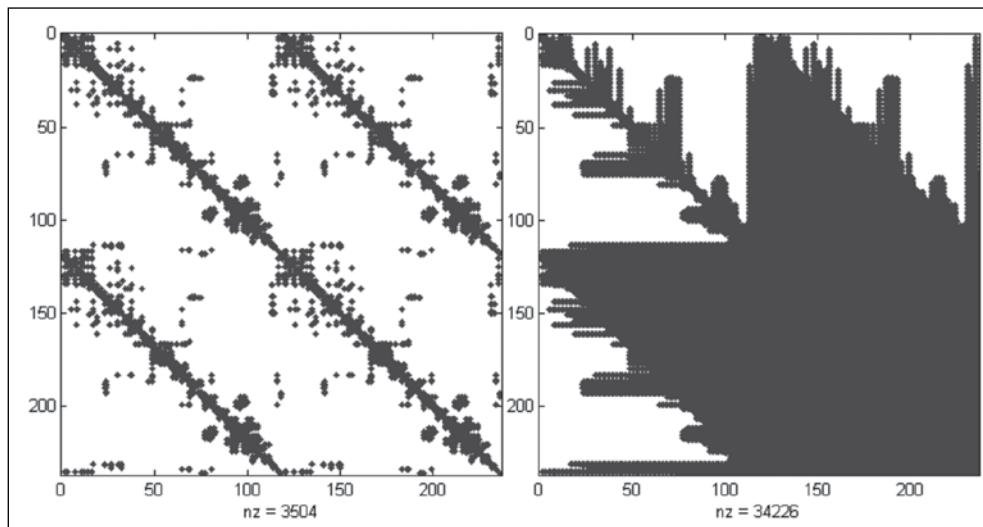


7. El IBM 360, comercializado en el año 1964 y considerado el primero de la tercera generación, donde los circuitos integrados ya habían reemplazado a los transistores de la segunda generación, contaba por ejemplo con una capacidad de memoria de entre 8 kB a 8 MB, y una velocidad de proceso de entre 0,034 MIPS a 1,7 MIPS, según la gama. Compárense estas cifras simplemente con los procesadores incorporados en nuestros teléfonos móviles hoy día.

4.2. El método de ordenación de grado mínimo

En este estado de cosas, Harry Markowitz, por entonces profesor de la prestigiosa Escuela de Economía de Chicago⁸ y pionero en la incorporación de la noción del riesgo en la gestión de carteras, principal contribución por la que en 1990 recibió el premio Nobel de Economía, publicó en 1957 un trabajo en el que proponía una estrategia para elegir el pivote del conocido algoritmo Simplex utilizado en problemas de programación lineal. El objetivo inicial de este método, conocido como criterio de Markowitz, era realmente minimizar el número de operaciones aritméticas en cada pivotación, aunque indirectamente reducía también el llenado de las matrices involucradas, que en el algoritmo Simplex son rectangulares y asimétricas. En 1969, Cuthill y McKee publicaron un algoritmo para agrupar los elementos no nulos de matrices simétricas en una banda diagonal lo más estrecha posible. Este procedimiento, muy apropiado para determinados tipos de problemas, por ejemplo en diseño mecánico estructural, resulta ser sin embargo de escasa o nula utilidad en aplicaciones donde el sistema modelado es muy irregular, como ocurre con las redes eléctricas, porque produce una banda demasiado ancha.

MATRIZ DISPERSA DE 236 FILAS CON 3504 ELEMENTOS NO NULOS, CORRESPONDIENTE A UN PROBLEMA DE ESTIMACIÓN DE ESTADO EN REDES ELÉCTRICAS (IZQUIERDA) Y LA MISMA MATRIZ FACTORIZADA SIN REALIZAR UNA ORDENACIÓN PREVIA DE VARIABLES (DERECHA), DONDE SE PUEDE OBSERVAR EL ELEVADO NÚMERO DE ELEMENTOS NO NULOS EN SU PARTE INFERIOR DERECHA (CASI DIEZ VECES MÁS QUE EN LA MATRIZ ORIGINAL), LOS CUALES IMPIDEN BENEFICIARSE DE LAS TÉCNICAS DE MATRICES DISPERSAS



8. En la actualidad, con casi 87 años, es profesor de finanzas en la Rady School of Management en la Universidad de California, San Diego (UCSD).

William F. Tinney es un ingeniero eléctrico de potencia que aún hoy, a sus 93 años, trabaja como consultor. Con un máster de la Universidad de Stanford en el bolsillo, comenzó su carrera en la compañía eléctrica federal Bonneville Power Administration (BPA), la más importante de las que operan en el noroeste de los EEUU, donde permaneció hasta su jubilación en 1979. Tinney llegó a BPA justo cuando se estaba produciendo la transición entre los computadores analógicos, denominados analizadores de red, y los digitales. Estos últimos ofrecían la ventaja de ser programables fácilmente, mediante software, lo que les dotaba de la máxima generalidad posible, pero no existía todavía un procedimiento que les permitiera simular redes de cierta complejidad de forma eficiente. Por el contrario, los computadores analógicos, que no eran sino modelos físicos a escala de la propia red, daban resultados rápidos y precisos, pero su reprogramación implicaba cambios en el cableado o los valores de sus componentes, lo cual les restaba versatilidad. Ambos tipos de computadores convivieron durante muchos años, e incluso se comercializaron modelos híbridos hasta los años 90, como el Anacom de Westinghouse, introducido en 1946, que estuvo operativo nada menos que hasta 1991.

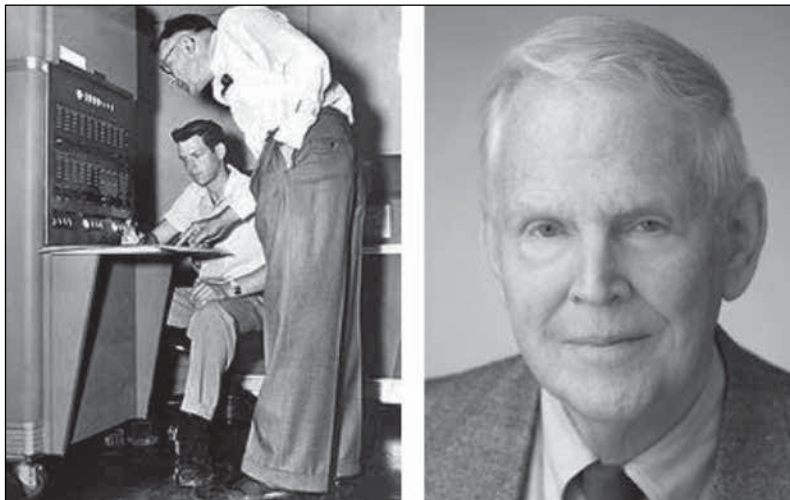
Basado seguramente en su conocimiento del criterio de Markowitz, Tinney propuso en varias publicaciones, realizadas entre 1963 y 1967 junto a otros colegas, tres algoritmos heurísticos de ordenación de ecuaciones que, en lugar de trabajar al vuelo con la propia matriz, se basaban en el grafo asociado⁹. El segundo de dichos métodos, que realiza simbólicamente la eliminación gaussiana en el grafo y elige en cada paso el nudo con menores interconexiones, se convirtió rápidamente en un estándar en todo tipo de aplicaciones donde hubiese que resolver matrices dispersas genéricas, debido a que producía resultados casi óptimos con un coste razonable. Los matemáticos formalizaron estas ideas y bautizaron al segundo esquema de Tinney como el “método de ordenación de grado mínimo”, nombre con el que generalmente se le conoce fuera del ámbito de los sistemas eléctricos. También aportaron diversas mejoras a la propia implantación algorítmica del método, todas ellas incorporadas en herramientas como Matlab, hoy ya imprescindibles en ingeniería.

La razón del tremendo éxito de este esquema de ordenación es bien sencilla: la matriz factorizada sigue siendo casi tan dispersa como la matriz inicial, y si se explotan los elementos nulos el coste asociado a la solución del sistema de ecuaciones respectivo es típicamente del orden $N^{1.4}$ (es decir, crece poco más que linealmente con el número de ecuaciones) en lugar de N^3 . Para valores muy elevados de N las diferencias entre emplear o no este sencillo algoritmo de ordenación son tan abismales que los tiempos de cálculo pueden pasar del rango de segundos a horas o incluso días.

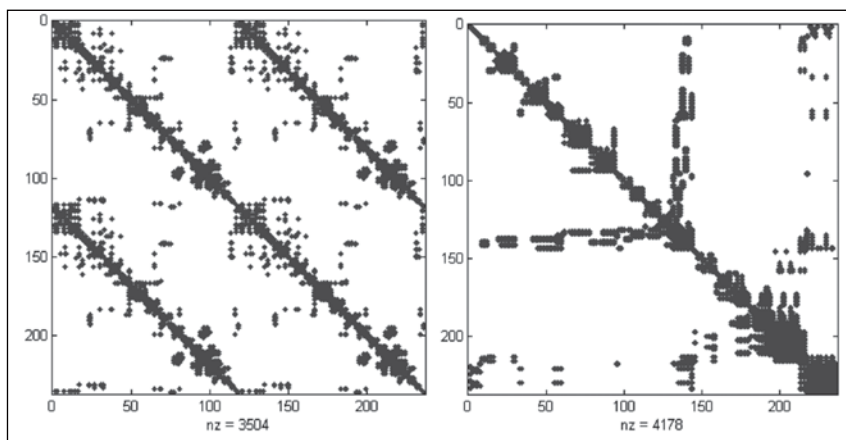
En este punto conviene hacer notar que la motivación de Tinney para resolver de forma rápida los sistemas de ecuaciones con matrices dispersas no era de índole matemá-

9. A toda matriz estructuralmente simétrica se le puede asociar un grafo no dirigido, con tantos nudos como filas/columnas y tantas ramas como elementos no nulos existan fuera de la diagonal. Realizar permutaciones simétricas en la matriz equivale simplemente a reordenar los nudos del grafo, de ahí la ventaja de trabajar con grafos en este tipo de aplicaciones. El grado de un nudo es el número de interconexiones del mismo en el grafo.

WILLIAM TINNEY TRABAJANDO CON UN ANALIZADOR DE REDES EN LOS AÑOS 60 (IZQUIERDA) Y EN UNA FOTO MÁS RECIENTE (DERECHA)



LA MISMA MATRIZ DESCRITA ANTERIORMENTE (IZQUIERDA) Y LA MATRIZ RESULTANTE DE LA FACTORIZACIÓN (DERECHA) TRAS HABERLE APLICADO EL ALGORITMO DE ORDENACIÓN DE MÍNIMO GRADO IDEADO POR TINNEY. PUEDE APRECIARSE LA SIGNIFICATIVA REDUCCIÓN DE ELEMENTOS NO NULOS RESPECTO AL CASO EN QUE NO SE UTILIZABA ORDENACIÓN ALGUNA



tica, sino que su gran interés por estos temas se debía simplemente a que había recibido el encargo, como flamante ingeniero eléctrico en BPA, de desarrollar un procedimiento eficiente para resolver el problema del flujo de cargas en redes eléctricas, de naturaleza no lineal, mediante computadoras digitales. La convergencia cuadrática del método de Newton-Raphson (NR) para resolver sistemas no lineales era bien conocida, pero

frente a otros esquemas iterativos presentaba el gran escollo de que obligaba a resolver grandes sistemas de ecuaciones en cada iteración, realmente una tarea titánica para los ordenadores de los años 60 por las razones mencionadas. ¡Voilà!, el algoritmo de ordenación de mínimo grado llegó en el momento preciso para solventar definitivamente esta cuestión, convirtiendo desde entonces al método de NR en el procedimiento por antonomasia para resolver problemas no lineales de cualquier naturaleza.

La primera publicación de Tinney en los *Transactions of the IEEE*, sobre la aplicación de métodos iterativos simples (del tipo Gauss-Seidel) al problema del flujo de cargas tuvo lugar en 1957, mientras que la última apareció en 2005. En reconocimiento a sus importantes aportaciones durante este medio siglo, que trascienden el campo de la operación y control de redes eléctricas, imposibles de resumir aquí, Tinney recibió en 2011 la medalla del IEEE.

4.3. Árbol de la factorización y vectores dispersos

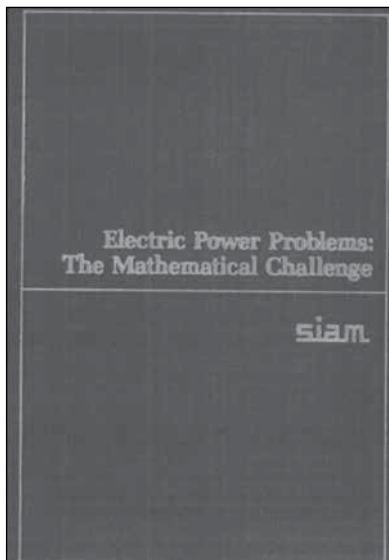
En uno de los cursos a los que asistí durante mi etapa doctoral, en la década de los ochenta, el profesor Aracil hizo una afirmación que a mí personalmente me dejó marcado. Más o menos venía a decir: os recomiendo que enfoquéis vuestra línea de investigación en el ámbito de los sistemas no lineales, porque los sistemas lineales están bastante agotados a estas alturas. Realmente, viendo todo lo que ya había llovido en los siglos XIX y XX, no le faltaba razón, puesto que desde un punto de vista formal o conceptual, tanto en sus aspectos estáticos como dinámicos, los sistemas lineales ya tenían un cuerpo de doctrina consolidado y cerrado, al menos aparentemente. En cambio, los trabajos de Lyapunov, Hopf y otros sobre bifurcaciones, estabilidad estructural, caos, control borroso, etc., entonces en pleno apogeo, dejaban todavía abiertos muchos frentes en el campo de los sistemas no lineales, que es también el de los sistemas eléctricos donde he desarrollado toda mi actividad.

Sin embargo, esta percepción acaso ignoraba la existencia de una disciplina todavía joven, a medio camino entre las matemáticas (más concretamente los métodos numéricos) y la informática: la ingeniería del software matemático, término acuñado en 1969 por John Rice, quien posteriormente (1975) fundó los *Transactions on Mathematical Software* de la prestigiosa sociedad ACM.

Lo cierto es que, casi por casualidad, coincidiendo en el tiempo con las primeras actividades de transferencia tecnológica a la industria de la joven Escuela de Industriales de Sevilla, me vi abocado a tener que resolver en tiempo real grandes sistemas de ecuaciones en los todavía limitados microprocesadores de mediados de los ochenta, como le había ocurrido a Tinney quince años antes con los voluminosos y lentos computadores mainframe de los sesenta. Entré así, apenas sin darme cuenta, en el fascinante mundo de los algoritmos computacionales, que desde entonces he cultivado con pasión.

Un hecho providencial en este devenir fue el que cayera en mis manos el volumen “Electric Power Problems: The Mathematical Challenge”, que contiene las ponencias de un congreso organizado en Seattle por la sociedad matemática SIAM, en 1980.

**PORTADA DE PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE “ELECTRIC POWER PROBLEMS:
THE MATHEMATICAL CHALLENGE” (1980)**



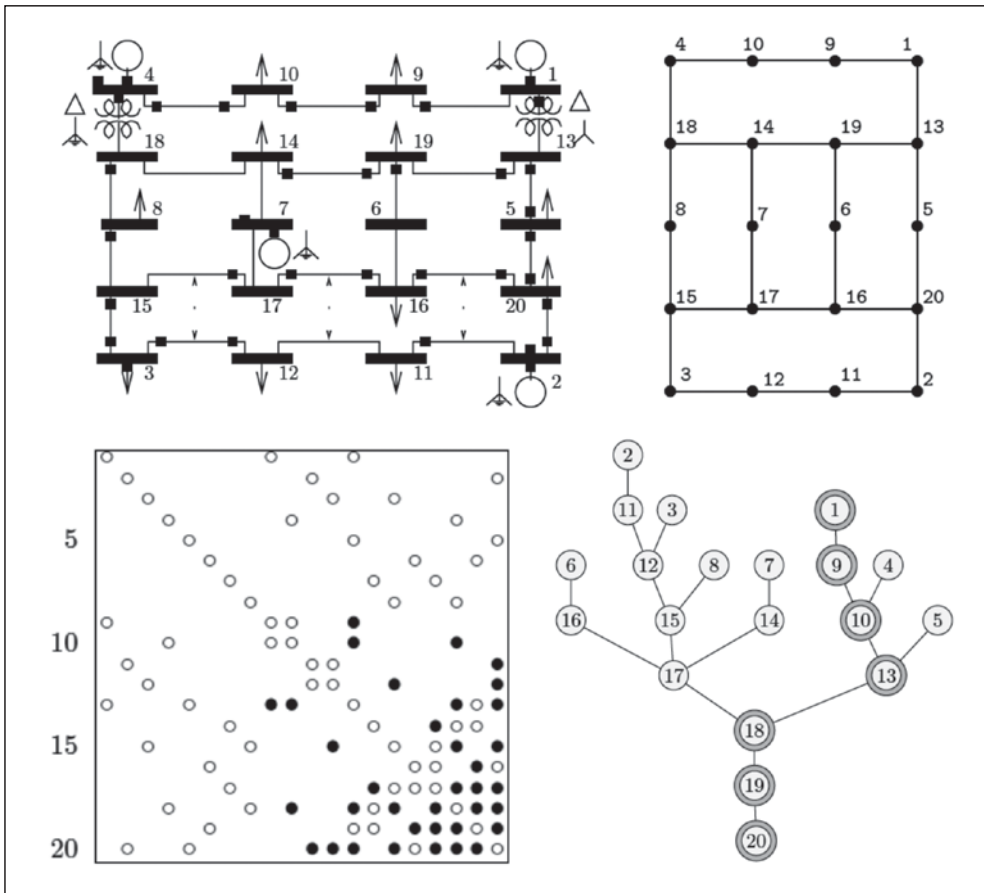
En dicho volumen, que fue mi biblia particular durante unos cuantos años, y que aún conservo en lugar prominente de mi biblioteca, encontré no solo los algoritmos de Tinney, sino también la recopilación de contribuciones fundamentales realizadas por otros ingenieros de potencia, como B. Stott o P. Anderson, y las de prestigiosos especialistas en métodos numéricos, como A. Erisman o el trío Gill-Murray-Wright, autores del conocidísimo manual sobre problemas de optimización no lineal.

Pero volvamos a la línea argumental de mi discurso. En 1985, precisamente el año en que me doctoré, Tinney y sus colegas dieron una nueva vuelta de tuerca a las técnicas de tratamiento de matrices dispersas con la publicación del artículo “*Sparse vector methods*”, un título verdaderamente corto para un trabajo preñado de nuevos conceptos. Amén de introducir la noción de vector disperso, de aplicación directa cuando el vector de datos tiene muchos elementos nulos o solo se desean unos pocos elementos del vector de incógnitas, se sugerían un buen número de aplicaciones adicionales donde este nuevo concepto podría reducir el esfuerzo computacional drásticamente, tales como cálculos de sensibilidades, solución secuencial o repetitiva de problemas que difieren poco entre sí, o incluso la explotación del paralelismo inherente a la solución de todo sistema disperso, particularmente si es de gran dimensión.

La piedra angular de todas estas aplicaciones es lo que se denomina árbol de la factorización o de la eliminación, que como su propio nombre indica representa en una estructura arborescente las precedencias y dependencias que surgen entre las filas de una matriz, o los nudos del grafo asociado, conforme progresa la eliminación gaussiana. La influencia de una fila dada sobre el resto de filas, no importa cuan grande sea el sistema

de ecuaciones, se limita a aquellas que se encuentren bajo ella en el árbol (el resto no se verá afectado). Por dicho motivo, conviene minimizar la altura o profundidad del árbol al máximo, para reducir en lo posible las dependencias entre filas.

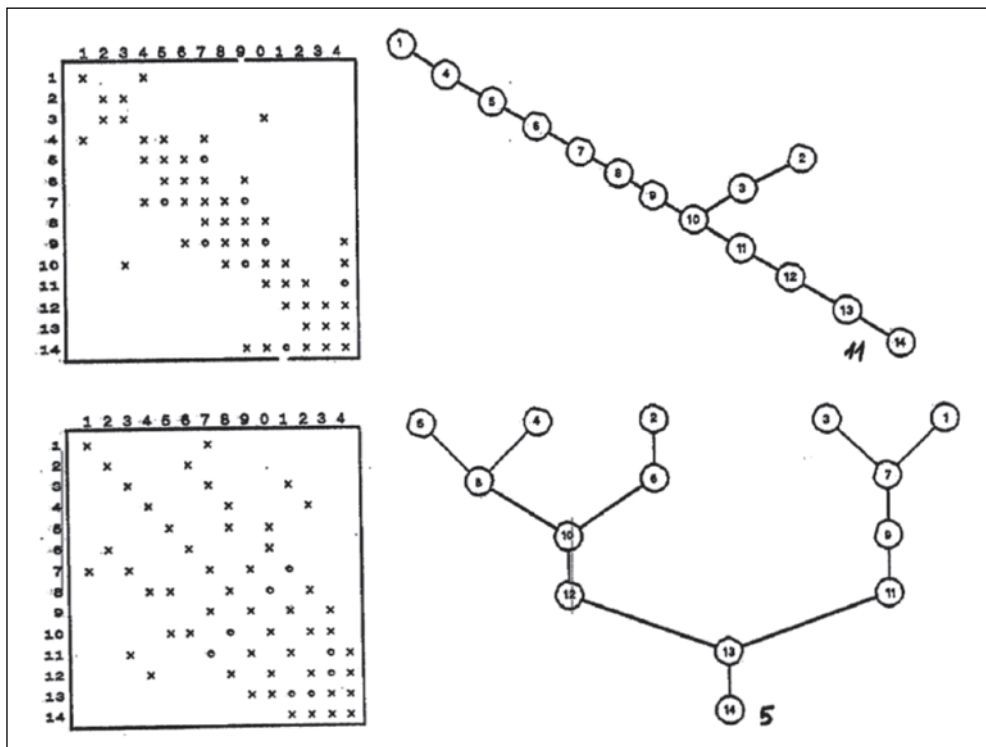
ESQUEMA UNIFILAR DE UNA RED ELÉCTRICA DE 20 NUDOS ELÉCTRICOS (SUBESTACIONES) Y GRAFO ASOCIADO A SU MATRIZ DE ADMITANCIAS (ARRIBA). EN LA PARTE INFERIOR SE MUESTRA LA CORRESPONDIENTE MATRIZ DISPERSA DE 20 FILAS, ESTRUCTURALMENTE SIMÉTRICA, FACTORIZADA DE ACUERDO A LA SECUENCIA INDICADA POR EL ALGORITMO DE MÍNIMO GRADO (IZQUIERDA), ASÍ COMO EL ÁRBOL DE LA FACTORIZACIÓN RESULTANTE (DERECHA), DONDE SE RESALTA EL CAMINO DE LA FACTORIZACIÓN DEL NUDO 1, ES DECIR, LAS FILAS/COLUMNAS CUYO CONTENIDO DEPENDE DEL DE LA FILA/COLUMNA 1



Tinney y otros se dieron cuenta de que, como subproducto, el algoritmo de mínimo grado generalmente daba lugar a árboles de la factorización relativamente cortos, pero también constataron que en ocasiones el resultado era manifiestamente mejorable. En 1987, junto a quien había sido mi director de tesis, el Prof. García Franquelo, presen-

té en la reunión anual de la sociedad de potencia del IEEE mi primer trabajo en una revista internacional, donde proponíamos nuevos algoritmos de ordenación de nudos orientados a reducir la longitud de los árboles de la eliminación, sin por ello deteriorar el desempeño del algoritmo de mínimo grado. Nuestra idea, considerada pionera, fue tan simple como añadir al método de mínimo grado un segundo criterio de selección del pivote, y utilizarlo para deshacer los numerosos empates que surgen cuando más de un nudo resulta ser de grado mínimo. Con un par de líneas de código adicionales en el algoritmo estándar de mínimo grado se logró mejorar notablemente su desempeño en este tipo de aplicaciones.

ÁRBOL DE LA FACTORIZACIÓN RESULTANTE TRAS LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE MÍNIMO GRADO CONVENCIONAL PARA UNA RED DE 14 NUDOS (ARRIBA) Y ÁRBOL DE MENOR PROFUNDIDAD Y MAYOR NÚMERO DE RAMAS OBTENIDO CUANDO SE INTRODUCE UN CRITERIO SIMPLE DE DESEMPATE EN EL ALGORITMO DE MÍNIMO GRADO (ABAJO). LA PROFUNDIDAD DEL ÁRBOL SE HA REDUCIDO DE 11 A 5, MIENTRAS QUE EL NÚMERO DE ELEMENTOS NO NULOS DE LA MATRIZ ES EL MISMO EN AMBOS CASOS



5. EPÍLOGO

Llego a la parte final de mi discurso trayendo de nuevo a colación a Richard Feynman y su teoría de que lo simple es bello, principio filosófico que he intentado aplicar en mi propio trabajo. Steinmetz se dio cuenta de que introducir el álgebra de los números complejos en el análisis de circuitos simplificaba enormemente su solución; Cooley y Tukey soslayaron el coste cuadrático asociado a la transformada de Fourier aplicando la vieja y simple idea del divide y vencerás, dando origen sin pretenderlo a una de las áreas más importantes y fructíferas en las ciencias de la computación: el tratamiento digital de señales e imágenes; finalmente, Tinney soslayó el coste cúbico involucrado en la solución de sistemas lineales de gran dimensión introduciendo una estrategia extraordinariamente simple de ordenación de las ecuaciones.

Son solo tres ejemplos, no siempre bien conocidos en el ámbito de la ciencia y la ingeniería, que muestran los múltiples vasos comunicantes existentes entre ambas. Como perspicazmente argumenta el profesor Aracil en sus ensayos, cuando un ingeniero se enfrenta a un problema antiguo, cuya solución establecida no es satisfactoria en el contexto actual, o aparece un nuevo problema para el que no existe siquiera solución conocida, éste se ve forzado a investigar alternativas novedosas, transitando entonces por la misma senda que los científicos en la búsqueda del conocimiento, aunque la motivación sea casi siempre diferente.

No me resisto a hacer una última reflexión. Los prominentes personajes cuyas contribuciones he glosado en este discurso comparten el carácter generalista e interdisciplinar de su formación. Mirándonos al espejo, o mejor aún, examinando la “sábana de titulaciones”, si me permiten la expresión, del distrito universitario andaluz, la heterogeneidad de los lugares donde éstas titulaciones se imparten y la trayectoria provinciana de buena parte del profesorado, quizá entendamos mejor por qué salimos siempre mal parados en los rankings internacionales. Los discursos oficiales están trufados de buenas intenciones y ensalzan continuamente la excelencia, pero a la hora de la verdad, cuando se trata por ejemplo de reclutar profesorado o confeccionar planes de estudio, lo que prima realmente es la endogamia, consecuencia en mi opinión de una autonomía universitaria mal entendida o ejecutada. En este aspecto, comparto en gran medida el pesimismo de nuestro querido y malogrado amigo Antonio Barrero Ripoll, que no perdía ocasión para criticar las deficiencias del sistema educativo español, en particular el universitario.

Y puesto que la palabra “simplicidad” ha sido en gran medida el pivote de mi intervención, termino con la famosa identidad de Euler, cuya belleza ha cautivado a matemáticos desde el siglo XVIII. Esta ecuación, calificada por Feynman como “la fórmula más notable de la matemática”, conjuga en la expresión más simple posible sus cinco números fundamentales (1, 0, π , i y e) con las tres operaciones elementales (suma, producto y exponenciación).

Este hilo conductor me ha servido como excusa para hablarles, siquiera sea superficialmente, de mis propios trabajos en el campo de los sistemas lineales, en los que he invertido aproximadamente la mitad de mis esfuerzos durante más de 30 años. La otra mitad de mi carrera profesional, siguiendo el buen consejo que recibí del profesor Aracil

EJEMPLO DE SIMPLICIDAD Y BELLEZA: IDENTIDAD DE EULER.



en mi etapa de doctorando, la he dedicado a los sistemas no lineales, pero esa es otra historia que espero algún día poder contarles.

Muchas gracias por su paciencia y atención.

BIBLIOGRAFÍA

- JESÚS FRAILE MORA, “*Genios de la Ingeniería Eléctrica: De la A a la Z*”, Fundación Iberdrola, 2006.
- GENERAL ELECTRIC, “The story of Steinmetz”, 1940.
- C. P. STEINMETZ, “*Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena*”, Electrical World and Engineer Inc., New York, 3ª edición, 1900.
- J. B. WHITEHEAD, Review of the book by C. P. Steinmetz “*Alternating Current Phenomena*”, *Bull. Amer. Math. Soc.*, Vol. 7, No. 2, pp-399-408, 1901.
- A. GÓMEZ EXPÓSITO, et. al., “*Fundamentos de Teoría de Circuitos*”, Thomson, 2007.
- S. YAMAMURA, “Spiral vector theory of AC circuits and machines”, *Proc. Japan Acad.*, Vol. 65B, pp. 142-145, 1989.
- A. GÓMEZ-EXPÓSITO, A. BACHILLER-SOLER, J. A. ROSENDO-MACÍAS, “Application of Generalized Phasors to Eigenvector and Natural Response Computation of LTI Circuits”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, Vol. 53, No. 7, pp. 1533-1543, Julio 2006.
- A. GÓMEZ-EXPÓSITO, A. BACHILLER-SOLER, J. A. ROSENDO-MACÍAS, “Efficient Dominant Eigensystem Computation Using Nodal Equations”, *Int. J. Circuit Theory Applications*, Vol. 37, No. 1, pp. 137-158, Febrero 2009.
- R. X. GAO, R. YAN, “From Fourier Transform to Wavelet Transform: A Historical Perspective”, capítulo 2 del libro “*Wavelets: Theory and Applications for Manufacturing*”, Springer, 2011.
- M. HEIDEMAN, D. JOHNSON, C. BURRUS, “Gauss and the History of the Fast Fourier Transform”, *IEEE ASSP Magazine*, Vol. 1, No. 4, pp. 14-21, Octubre 1984.
- PETER McCULLAGH, “John Wilder Tukey. 16 June 1915 . 26 July 2000”, *Biogr. Mem. Fellows Royal Soc.*, Vol. 49, pp. 537-555, Diciembre 2003.

- JAMES W. COOLEY and JOHN W. TUKEY, "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series", *Mathematics of Computation*, Vol. 19, No. 90, pp. 297-301, Abril 1965.
- M. COVELL, J. RICHARDSON, "A new, efficient structure for the short-time Fourier transform, with an application in code-division sonar imaging", International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-91), Vol. 3, pp. 2041-2044 vol.3, 14-17 Apr 1991
- A. GÓMEZ-EXPÓSITO, et. al., "Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica", McGraw-Hill, 2002.
- H. M. MARKOWITZ, "The elimination form of the inverse and its application to linear programming", *Management Science*, Vol. 3, pp. 255-269, 1957.
- E. CUTHILL, J. MCKEE, "Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices", *Proc. of the 24th National Conf. ACM*, pp. 157-172, 1969.
- W. ASPRAY, "Edwin L. Harder and the Anacom: analog computing at Westinghouse", *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 15, No. 2, pp. 35-52, 1993.
- W. F. TINNEY, J. W. WALKER, "Direct solution of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 55, No. 11, pp. 1801-1809, 1967.
- W. F. TINNEY, C. E. HART, "Power Flow Solution by Newton's Method", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 86, No. 11, pp.1449-1460, Nov. 1967.
- A. GEORGE, W. LIU, "The Evolution of the Minimum Degree Ordering Algorithm", *SIAM Review*, Vol. 31, No. 1 pp. 1-19, Marzo 1989.
- W. F. TINNEY, V. BRANDWAJN, S. M. CHAN, "Sparse Vector Methods", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 104, No. 2, pp. 295-301, Febrero 1985.
- F. L. ALVARADO, W. F. TINNEY, M. K. ENNS, "Sparsity in Large-Scale Network Computation", capítulo del libro "Advances in electric Power and Energy Conversion System Dynamics and Control", Academic Press, 1991 (Ed. C. T. Leondes).
- A. GÓMEZ-EXPÓSITO, L. G. FRANQUELO, "Node ordering algorithms for sparse vector method improvement", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3 No. 1, pp. 73-79, Febrero 1988.
- A. GÓMEZ-EXPÓSITO, L. G. FRANQUELO, "An efficient ordering algorithm to improve sparse vector methods", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3 No. 4, pp. 1538-1544, Noviembre 1988.

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL EXCMO. SR. D. JAVIER ARACIL SANTONJA

*Académico Numerario,
en contestación al leído por el
Ilmo. Sr. D. Antonio Gómez Expósito,
en el Acto de su recepción como Académico Numerario,
celebrado el día 2 de junio de 2014.*

La recepción de un nuevo académico es un día festivo para toda Academia, y así sucede hoy con el ingreso del profesor Antonio Gómez Expósito en la Real Academia Sevillana de Ciencias. A mi me ha correspondido el honor de responderle en su admisión, lo que hago con sumo gusto. Es una de las numerosas figuras que ha producido la Escuela de Ingenieros de Sevilla, algunas de las cuales merecerían también pertenecer a esa institución. Dejemos al tiempo que haga su labor. Hoy nos cabe la alegría de acoger a Antonio Gómez, un claro exponente de ese amplio conjunto.

El nuevo Académico procede de la Andalucía profunda. Nació en Andújar, en el año 1957, y sus primeros años de vida se desenvuelven en un medio rural en el que, conviene no olvidarlo, entonces los hijos eran un factor de producción muy apreciado y la escuela un lujo un tanto lejano. Sin embargo, sus padres decidieron aprovechar la magnífica oportunidad que representaban las entonces llamadas Universidades Laborales (imperdonablemente desaparecidas). En aquellos tiempos, estos centros docentes resultaron decisivos para muchos hijos de familias alejadas de zonas urbanas y con sobrios recursos económicos. Recuerda el nuevo académico que esos centros disponían de medios pedagógicos inusitadamente modernos para la época y estaban equipados con instalaciones desacostumbradas en el resto del país. Nuestro hombre obtuvo una beca que mantendría hasta obtener un título universitario muchos años después.

La siguiente decisión importante que tuvo que tomar surgió cuando dio el salto a los estudios superiores, lo que sucedió en 1976. Tras algunas dudas iniciales, pues le atraían los estudios de física y de matemáticas, finalmente optó por una Escuela de Ingenieros Industriales. Esto se debió, por un lado, a una temprana experiencia que tuvo como electricista en un modesto negocio familiar, y por otro a que en esos momentos no le seducía demasiado pasar el resto de su vida profesional dando clases (como se decía entonces de los que sentían la vocación universitaria), aunque eso sería lo que al final acabaría sucediendo.

Puede resultar curioso que personas inclinadas inicialmente por las ciencias acaben estudiando para ingeniero. Sin embargo, ello no es inusual y si volvemos nuestra mirada a la historia veremos que no debe extrañarnos. En efecto, aunque a veces resulte contro-

vertido, hay que recordar que las Escuelas de ingenieros, lo mismo que las instituciones similares de tipo militar, tienen un papel decisivo en la introducción de la ciencia moderna en España. Corrobora este hecho que al fundarse la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales a mediados del XIX la minoría mayoritaria fuera la de ingenieros, que sumados a los militares, a su vez ingenieros o asimilados, eran mayoría absoluta. Además, durante su primer siglo de existencia exactamente la mitad de los presidentes de esa Academia nacional de ciencias fueron ingenieros.

Reconoce Antonio Gómez que, al fin, lo más importante en su carrera universitaria fue estudiar para Ingeniero Industrial, título que consiguió en 1982. Pero, también dice que tan fundamental o más que la carrera en sí fue la elección del Centro, aunque en su momento le pareció una decisión menor. Pronto se dio cuenta de que al venir a la Escuela de Ingenieros de Sevilla había entrado en un centro muy singular, que se encontraba en aquellos momentos en plena ebullición, tanto en la estructura de los planes de estudios como en la plantilla del profesorado. Además, resultó deslumbrado por la calidad de sus profesores, a pesar del elevado nivel de exigencia que los estudios tenían aquellos años.

Y por fin, al terminar la carrera, el entonces entusiasta recién titulado, tuvo que enfrentarse a la tercera encrucijada de su trayectoria profesional, puesto que a pesar de su determinación inicial de eludir la dedicación a la Escuela y preferir ejercer como un ingeniero convencional, trabajando en una empresa productiva, se encontró, mientras realizaba el proyecto fin de carrera, con la posibilidad de ocupar una plaza de Ayudante que acababa de quedar vacante en la Cátedra de Electrónica. Esta plaza llevaba asociada la participación en la ejecución de un simulador informático de redes eléctricas, en el marco de lo que fue el primer trabajo de I+D que la Compañía Sevillana de Electricidad (ahora Endesa) había encargado a lo que fue el hoy desglosado Departamento de Automática y Electrónica. Aquel proyecto despertó en el nuevo Académico el gusanillo de la investigación ingenieril y decidió que, como poco, debería quedarse unos años más en la Escuela para realizar la tesis doctoral, y de paso dar tiempo a que mejorase el mercado laboral, que en aquellos años estaba también muy alicaído (las crisis, como las plagas periódicas del antiguo Egipto, no se distinguen por su originalidad; aunque haya crisis y crisis).

Cuando el nuevo Académico empezó su andadura como investigador y docente, la ingeniería eléctrica se percibía como un área vetusta y casi pasada de moda, sin aparentes posibilidades de encontrar nada nuevo ni atrayente en ella y, por tanto, era desdeñada por los investigadores que buscaban campos más prometedores en los que obtener resultados que condujesen a las ansiadas y promocionadoras publicaciones. Aunque se admita que la ciencia física había puesto la electricidad sobre la mesa, pronto los físicos se desentendieron del exuberante mundo de sus aplicaciones, mientras los más capacitados de ellos se ocupaban intensamente de especular sobre el misterioso éter y en buscar el grupo de transformaciones que mantuviesen invariantes las ecuaciones de Maxwell en dos sistemas inerciales, lo que condujo a las transformaciones de Lorentz y posteriormente a la teoría de la relatividad, al proponer el joven Albert Einstein una interpretación física a esas transformaciones, lo que constituyó una de las más prodi-

giosas proezas de la historia de la ciencia. Pero, por otra parte, fueron los ingenieros los que desarrollaron autónomamente tanto los múltiples artefactos eléctricos que forman el electrificado mundo artificial en el que vivimos, como los conocimientos necesarios para concebirlos y elaborarlos, en particular el prolífico e insólito mundo de la corriente alterna. Entre ellos destaca el genio del croata Nikola Tesla, uno de los más portentosos ingenieros que han conocido los tiempos, el cual fue capaz de concebir máquinas con las que nos encontramos todos los días en nuestro mundo artificial, con el añadido adicional de que esos artefactos los concebía en su mente sin recurrir al papel. Además, en sus escritos (que hoy acaso clasificaríamos como científicos) no he visto ni una sola expresión matemática y pese a ello sus máquinas revolucionaron la vida moderna. En todo caso, los ingenieros no se limitaron a “aplicar” los limitados conocimientos sobre la electricidad que había desvelado la ciencia física, sino que se auxiliaron de ellos, en su caso, para generar otros nuevos y producir los asombrosos, originales e ingeniosos artificios de orden utilitario que han delimitado el correspondiente ámbito de actividad de la ingeniería eléctrica. Pues esto es precisamente lo que caracteriza la actuación de los ingenieros, cuya labor se juzga por su capacidad para hacer cosas bien definidas, que no existían en el mundo natural, en busca de lo útil, ventajoso y económico. En este contexto procede recordar lo dicho por Edison con respecto al largo proceso por el que llegó al descubrimiento del filamento de bambú carbonado: “No es que fracasase, sino que encontré 10.000 maneras que no funcionaban”. Por eso cuando se afirma con ligereza que la iluminación es una aplicación trivial de la electricidad, esa declaración hay que tomarla con obvias reservas.

Embebido de todo ello, sobre todo tras el doctorado que leyó en 1985, los intereses del Académico que hoy acogemos fueron acercándose paulatinamente al fascinante mundo de las redes eléctricas, con el atractivo adicional de que esa aproximación le permitió satisfacer su gran atracción por la matemática, por lo que voy a dedicar un momento a esta rama de la ciencia de tanto interés para la ingeniería.

De hecho, la técnica y la ingeniería modernas, lo mismo que la ciencia física, son inconcebibles sin el concurso de las matemáticas; que surgieron en la antigüedad para facilitar determinadas actividades utilitarias, como la contabilidad o la delimitación de superficies, para lo que se concibieron los números y las figuras geométricas, respectivamente; los cuales se convirtieron posteriormente en objetos abstractos cuyas fascinantes propiedades generales dieron lugar a lo que hoy conocemos como matemáticas. En efecto, los matemáticos de la antigüedad, una emergente clase de sabios, pronto se dedicaron a estudiar esos entes inmateriales fuera del contexto meramente utilitario, con el objetivo principal de saciar el especial placer que producía el conocimiento de las maravillosas e inmaculadas propiedades de esos objetos, a los que incluso se asociaron cualidades espirituales y religiosas.

Al considerar las matemáticas como una rama de la ciencia se produce una inevitable ambigüedad, pues a las matemáticas no cabe considerarlas propiamente como saberes depurados del mundo natural. En realidad, las ciencias de ese mundo y las matemáticas son bastante diferentes. Las ciencias de lo natural describen el universo tal como lo percibimos y están basadas, en último extremo, en la observación y la experi-

mentación. Las leyes naturales que rigen nuestro universo se determinan empíricamente y se las enuncia como principios que no son susceptibles de demostración lógica, sino exclusivamente de verificación experimental. Por su parte, las matemáticas, aunque en el mundo antiguo hubiesen pretendido describir también la propia naturaleza, en tiempos modernos se ha comprendido que son independientes del mundo físico en el que nos desenvolvemos. Sus teoremas, como las propiedades de los números enteros o de las figuras geométricas, no dependen de la naturaleza particular de los objetos que pueblan el mundo natural, sino que aspiran a ser verdaderas en cualquier universo concebible. El teorema de Pitágoras tiene más de 2.500 años de existencia y seguirá verificándose con exactitud en cualquier tiempo o lugar (siempre que se cumplan los axiomas de la geometría euclidiana).

Las matemáticas no sólo están detrás de muchos procedimientos para resolver problemas de ingeniería, sino también para la misma concepción de lo que proyectan los ingenieros. El mundo de las matemáticas es un mundo ideal de formas dotadas de una exclusiva perfección, que las distingue del mundo físico; pero que por un inescrutable misterio, en términos de esas formas puede entenderse y representarse ese mundo, ya que permiten construir imágenes idealizadas de él. Cuando se consigue un modelo matemático efectivo, acaso podríamos decir un retrato depurado y abstracto, de algo existente en el mundo o que se pretende producir, lo que se hace es beneficiarse de la fructífera comprensión que podemos alcanzar los humanos mediante las formalizaciones matemáticas, y de su poderoso uso posterior para hacer predicciones y cálculos. Estos modelos se han convertido en la forma que toma en nuestros días la tradicional representación por los ingenieros de lo que proyectan, lo que hasta el advenimiento de la informática se hacía fundamentalmente mediante planos, empleando recursos geométricos. Las limitaciones de esas prácticas gráficas eran patentes, pues se restringían a lo bidimensional y a lo estático, lo que obligaba a los ingenieros a desplegar un desbordante ingenio para sus propósitos representativos. Con los modelos matemáticos simulados en un ordenador el ingeniero pretende representar aquello que está estudiando, bien sea porque esté aún en fase de proyecto, o bien porque se trate de algo ya construido y pendiente de análisis, y cuyo comportamiento se quiere examinar. De este modo se dispone de un instrumento que permite “re-presentar” el objeto de estudio; es decir, que permite hacer presente, generar su comportamiento, tantas veces como se requiera, lo que se hace normalmente con la ayuda de la informática, en una especie de experimentación virtual.

Pero pese a lo anterior, no debe olvidarse que aunque las matemáticas deben estar disponibles (siempre están ahí), sin embargo, no deben dominar o absorber los problemas ingenieriles en cuestión. El ingeniero no puede sustraerse al hecho de que la belleza y simplicidad en la aplicación de una teoría científica (en particular, matemática) puede desviarle de sus genuinos propósitos. Viene aquí a colación la precoz, y con frecuencia recordaba, afirmación de Thomas Telford (1757-1834), primer presidente de la Sociedad de Ingenieros Civiles británicos (recuérdese, los promotores de la Revolución industrial), que en época tan temprana como 1828 puso en duda que los politécnicos franceses fuesen buenos ingenieros, pues sabían demasiadas matemáticas (algo análogo se puede decir de la ciencia en general).

En el proyecto del simulador de redes para la compañía Sevillana de Electricidad, asociado al proyecto con el que inició Antonio Gómez su vida de investigador y al que me he referido antes, se presentaron considerables problemas de cálculo debido a la enorme dimensión del sistema considerado. Para resolverlos hubo que recurrir a aplicar técnicas de paralelismo para la solución de grandes sistemas de ecuaciones. Para ello se montó en la Escuela, casi artesanalmente, un sistema de multiprocesadores compuesto por micros de 16 bits con memoria compartida, con el que se pretendía mejorar sustancialmente la velocidad de simulación de las redes eléctricas, para lo que los miniordenadores PDP-11, con los que entonces se trabajaba, resultaban demasiado lentos.

Para resolver esos problemas la mejor solución era recurrir a los entonces recién aparecidos supercomputadores, pero en esa época no se disponía de ninguno de ellos en España (hasta bien entrados los 90 no adquirió uno Iberdrola, en tanto que el Centro Europeo de Paralelismo de Barcelona (CEPBA), precursor del Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona (BSCNS) no se creó hasta 1991). En consecuencia, en aquellos momentos, la única forma de poder acceder a estos codiciados y elitistas recursos informáticos era irse a donde los hubiera. Y eso fue lo que hizo Antonio Gómez, que se fue al San Diego Supercomputer Center, que se acababa de crear en el campus de la Universidad de California en San Diego, y que disponía del equipo informático adecuado. Posiblemente debió ser uno de los primeros españoles en utilizar estos mastodónticos artefactos.

El principal objetivo de la investigación que llevó a cabo el profesor Gómez Expósito era reestructurar por completo la forma de resolver sistemas de ecuaciones muy dispersos, como los que aparecen en la simulación de redes eléctricas de potencia, que por su propia naturaleza (vectores cortos) se resistían a la implantación vectorizada que requerían estas máquinas. El venturoso hallazgo fue que los algoritmos de ordenación en los que estaba trabajando previamente nuestro hombre, antes de ir a San Diego, reducían significativamente el número de niveles del árbol; es decir, el número de factores dispersos de la matriz inversa y por tanto el coste computacional. La publicación de los resultados de su estancia en California levantaron gran expectación cuando se presentaron en el congreso anual de la sociedad de sistemas de potencia del IEEE, debido a que se podían resolver redes de casi 18000 ecuaciones en menos de medio segundo, algo inaudito para la época y que aún constituye un hito de referencia.

A partir de todo ello, nuestro nuevo Académico, que obtuvo su cátedra a finales de 1991 y tomó posesión a principios del año siguiente, ha desarrollado importantes aplicaciones de las matemáticas al campo específico de la ingeniería que él cultiva: las redes eléctricas. De esas aportaciones ha dado cuenta en la brillante disertación que acabamos de escuchar. Se pone así de manifiesto cómo los ingenieros (y por tanto, la técnica) recurren a las matemáticas, dejando así en entredicho la conocida y desacertada afirmación de que la técnica se reduce a dedos inteligentes, como si se limitase exclusivamente a una actividad manual. Esa tergiversación no es ajena a la infravaloración de la técnica. Conviene recordar ahora que uno de los centros de formación de ingenieros más renombrados del mundo, el MIT, tiene como lema *Mens et manus* (mente y mano).

La obra de Antonio Gómez es una muestra palpable de la utilización por los ingenieros de elaborados conocimientos matemáticos para sus objetivos genuinamente ingenieriles. Pero se trata no sólo de la explotación de conocimientos preexistentes sino, y sobre todo, de la elaboración de herramientas insólitas que, con el concurso de recursos matemáticos tanto convencionales como específicamente desarrollados por los mismos ingenieros, permiten aportar soluciones originales a los problemas propios de cada una de sus diferentes especialidades. De este modo, como es bien patente, los ingenieros aplican a la resolución de sus problemas un rigor que en nada desmerece del de los matemáticos puros, si se me permite decirlo, aunque sus resultados no alcancen la generalidad y la belleza de los de estos últimos.

En cualquier caso, trabajos de investigación como los de Antonio Gómez están otorgando un renovado protagonismo al estudio de las redes eléctricas, sin duda el medio más eficaz, limpio y rápido de transmitir inmensas cantidades de energía a enormes distancias. De este modo, la ingeniería eléctrica lleva a cabo programas de investigación autónomos que están en la base de la implantación y desarrollo deslumbrantes que ha logrado la electricidad tanto en las aplicaciones al transporte y transformación de energía como, por otra parte y en otro contexto, a la transmisión de información, hasta convertirse en un componente esencial del mundo artificial (la “sobrenaturaleza” de la que hablaba Ortega) en el que se desenvuelve nuestra vida de forma que percibimos como más acogedora y confortable que en el natural.

Un hito fundamental para la eclosión de los grupos de investigación nacionales, en áreas relacionadas con el sector eléctrico, fue la puesta en marcha, a mediados de los ochenta, del Programa de Investigación y Desarrollo Electrotécnico (que se conoció con las siglas P.I.E.). Al calor de este Programa el grupo de investigación que dirige el profesor Gómez Expósito tuvo la enorme fortuna de poder colaborar, en mayor o menor medida, con casi todas las empresas eléctricas españolas; pero fue sobre todo Sevillana-Endesa la que les confió la ejecución de numerosos proyectos de gran envergadura. Más de la mitad de las tesis doctorales de los miembros del grupo, y otro tanto cabe decir de sus publicaciones académicas, están directamente relacionadas con proyectos realizados para esa Compañía eléctrica. Se tiene así una muestra palmaria de las fructíferas conexiones que se pueden establecer entre el medio universitario y el mundo empresarial, al que a veces se acusa, con un asomo de información incompleta, de desinteresarse por la investigación. Lo que sucede es que las empresas financian, como es natural, aquello que les resulta útil, lo cual rara vez se corresponde con la investigación libremente decidida por el propio investigador, que para algunos es la única investigación merecedora de tal nombre. A partir de lo que acabo de apuntar se aclaran algunas cifras, siempre discutibles, que circulan sobre la investigación desarrollada por el mundo empresarial con relación a la que se lleva a cabo con financiación pública.

Los trabajos de nuestro hombre han obtenido múltiples reconocimientos. Entre ellos cabe citar, como más destacados, el Premio “Ciudad de Sevilla” a proyectos de investigación sobre temas energéticos, en 2005; el Premio de Investigación Javier Benjumea Puigserver, en 2011; el mismo año, el Premio Andalucía de Investigación “Juan López Peñalver” y también el Premio FAMA de la Universidad de Sevilla; y, por último, la

Insignia de Oro de la Asociación Española para el Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (AEDIE) en 2013. Además, desde 2005, pertenece al restrictivo club de los Fellows del IEEE.

En fin, esto es lo que quería decirles respecto a nuestro flamante Académico, al que ahora damos la bienvenida y del que esperamos una brillante participación en las actividades de la Academia, al tiempo que confío en que para él también resulte enriquecedora su presencia entre nosotros.

Muchas gracias.