

ACADEMIA ASTURIANA DE CIENCIA E INGENIERÍA

LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA: UNA DE LAS TECNOLOGÍAS QUE HARÁ POSIBLE LA DESCARBONIZACIÓN

DISCURSO PRESENTADO EN EL ACTO DE SU INCORPORACIÓN COMO
ACADÉMICO DE NÚMERO POR EL

PROF. FRANCISCO JAVIER SEBASTIÁN ZÚÑIGA

Y CONTESTACIÓN DEL

ILMO. SR. JOSÉ MARIO DÍAZ FERNÁNDEZ

Presidente de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

EL DÍA 18 DE ABRIL DE 2023



AACI

**ACADEMIA ASTURIANA
DE CIENCIA E INGENIERIA**

c/ San Francisco. Edificio Histórico - Universidad de Oviedo
OVIEDO

ISBN
D.L.

Imprime: Cízero Digital

LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA: UNA DE LAS TECNOLOGÍAS QUE HARÁ POSIBLE LA DESCARBONIZACIÓN

DISCURSO DE INGRESO DEL
PROF. FRANCISCO JAVIER SEBASTIÁN ZÚÑIGA



AACI

ACADEMIA ASTURIANA
DE CIENCIA E INGENIERIA

Agradecimientos

Según va transcurriendo el tiempo, creo que todos vamos siendo más conscientes de lo mucho que debemos a los que nos precedieron y a los que nos han ayudado a empezar y a seguir el camino.

Yo quiero empezar esta larga lista de agradecimientos por los que fueron mis profesores, desde el colegio hasta la universidad. En mis años de colegio tuve la suerte de ser alumno de profesores que me transmitieron conocimientos que siempre he tenido presentes. Tuve la fortuna de ser alumno de excelentes profesores de ciencias naturales, matemáticas, física y química, que despertaron en mí la misma curiosidad que yo ahora intento despertar en mis alumnos. Después llegó la Escuela, con planteamientos cartesianos y rigurosos, donde también pude disfrutar de excelentes profesores de matemáticas, de física y de materias técnicas. Por la importancia que para mi vida profesional tuvieron los conocimientos que me transmitieron, quiero recordar aquí a Ángel Pérez Coyto, con quien aprendí teoría de circuitos, y a mis profesores de electrónica, empezando por los ya fallecidos Pedro María Martínez Martínez y José María Ferrero Corral, y continuando por Fernando Aldana Mayor (que me reclutó para la profesión universitaria) y por Javier Uceda Antolín. Javier Uceda no sólo fue un profesor, sino que también ha sido un maestro, del que aprendí ingeniería y universidad, y al que considero un amigo.

He tenido la suerte también de tener excelentes compañeros de trabajo, tanto en la Universidad Politécnica de Madrid, como en la Universidad de Oviedo, mis dos universidades. Desde ellas he podido colaborar con otras universidades, como las de Cantabria, Valencia, Zaragoza, Carlos III, Rovira, y Politécnicas de Cartagena y Cataluña, donde siempre he encontrado grandísimos profesionales. También en el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona pude aprender de grandes colegas, que acabaron siendo grandes amigos; aquí mi recuerdo a Pepe Millán.

Entre los colegas de nuestra universidad asturiana, mi agradecimiento a los de aquella pequeña ETSII de Gijón, que fue creciendo hasta la actual EPI Gijón. Con muchos de los compañeros del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Comunicaciones y de Sistemas he colaborado en temas docentes y de investigación, más allá de los límites que delimitan las áreas de conocimiento. Además de haber trabajado con profesores de mi propia área, afortunadamente lo he hecho con excelentes profesionales (y amigos) de las otras tres.

De manera muy singular, mi trabajo en los últimos quince años ha estado completamente unido a los compañeros del grupo de investigación en Sistemas Electrónicos de Alimentación (SEA). Con bastantes penurias iniciales, gracias a la abnegación de Marta y de Diego inicialmente, y después de Manu, Alberto, Pablo, Aitor y Juan, hemos construido un grupo de investigación cohesionado y generoso, del que estoy orgulloso. Muchas gracias a ellos y a otros muchos que han pasado por el SEA y que ahora siguen su camino en otros lugares, casi todos lejos de su Asturias (Arturo, Miguel, Marcos, Nacho, Kevin, María y Dani).

Y como no, yo no estaría hoy aquí si Mario Díaz no me hubiera pedido “tomar un café” en Gijón un día de febrero del año 2021. Ese día me propuso formar parte de esta aventura. Yo le propuse ayudar desde fuera, pero él no me dejó y finalmente acepté entrar en este proyecto. Seguramente porque no soy capaz de rechazar una propuesta de Mario Díaz o de Javier Uceda, quizás porque ambos tienen una visión de la universidad que me seduce, y que se resume en una sincera y callada voluntad de servicio a la institución, edificada en la objetividad y el altruismo. Los estudios de Ingeniería de Telecomunicación en la Universidad de Oviedo, lejanos a sus intereses particulares, no serían lo que son sin Mario Díaz; pero ésta no es una historia para contar hoy y aquí. Ya en la Academia, he tenido la fortuna de compartir tareas con Ángeles, Cristina y Antonio, siempre combinando trabajo duro con bromas y muy buen humor. Aliado con Ángeles y con la complicidad de Cristina, a veces boicoteamos el recto proceder de Mario, que nos soporta con la indulgencia de un padre cariñoso.

No todo es trabajo en la vida. Mi agradecimiento también a mis amigos de toda la vida, de la escuela y del atletismo, Emilio, Candi, Ricardo, Javier, José Ramón y, sobre todo, Lalo. También para mis nuevos amigos montañeros, Julián y Conchi.

Finalmente, he llegado aquí porque tuve la inmensa suerte de tener por padres a Francisco y a Julia, ambos ya fallecidos. Ellos crearon un hogar sin lujos y con disciplina, en el que siempre el estudio de sus dos hijos era la máxima prioridad, con “barra libre” para cualquier gasto que significara mejorar su formación. Ellos serían felices al verme hoy ante ustedes. Sin ellos ya, mi agradecimiento a mi hermano José María, con el que he compartido aficiones y estudios, a mis hijos Fernando, Cecilia y Julia (mi compañera de cordada) y, cómo no, a Susana.

ÍNDICE

1- Electricidad y comunicaciones	1
1.1 – Pioneros	1
1.2 – Emprendedores	3
1.3 – El sencillo mecanismo del timbre eléctrico	7
1.4 – La importancia de estar enterado a tiempo	9
2- Electrónica y electrónica de potencia	13
2.1 – Nace la electrónica	13
2.2 – La electrónica va a la guerra	15
2.3 – Llamadas a larga distancia: nace el transistor	16
2.4 – El Rectificador Controlado de Silicio	18
2.5 – Reflexionando sobre la electrónica de potencia	20
2.6 – La primera revolución en la electrónica de potencia: aparece el MOSFET de potencia	23
2.7 – La segunda revolución en la electrónica de potencia: aparece el IGBT	28
2.8 – La tercera revolución en la electrónica de potencia: cambiando de material	30
3- Mi papel en la electrónica de potencia	34
3.1 – Dos por el precio de una	34
3.2 – Que la electrónica solucione los problemas que la electrónica crea	35
3.3 – Tensiones de alimentación muy bajas para velocidades muy altas	40
3.4 – Electrónica de potencia para ayudar a generar luz	43
3.5 – Electrónica de potencia para las telecomunicaciones	46
4- Epílogo: Electrónica de potencia y descarbonización	50
5- Referencias	54

1. Electricidad y comunicaciones

Mi trayectoria en la universidad está unida a la electrónica y, singularmente, a la electrónica de potencia, que ha sido mi campo de especialización desde los años en los que empecé mi Proyecto Fin de Carrera. Antes de hablar de electrónica de potencia, tengo que contextualizar la electrónica dentro del conjunto de disciplinas que se pueden englobar con el término "ingeniería eléctrica". Desde un punto de vista histórico, se puede considerar que la electrónica nace con el siglo XX, y nace unívocamente unida a las comunicaciones. Los circuitos eléctricos hicieron posible las comunicaciones alámbricas y permitieron alumbrar las inalámbricas, siendo la electrónica la que permitió su completo desarrollo durante el siglo XX. Gracias a la electrónica pudimos ver, casi en directo, cómo Neil Alden Armstrong posaba su pie sobre la luna el 21 de julio de 1969.

Voy a comenzar este discurso relatando brevemente la historia del nacimiento de la electrónica, fundamentalmente como consecuencia de la conjunción del conocimiento de los fenómenos eléctricos y de la necesidad de establecer comunicaciones a grandes distancias.

1.1 – Pioneros

Aunque los fenómenos de electrización por frotamiento eran conocidos desde la antigüedad, fue en el Siglo de las Luces cuando su estudio experimentó un apreciable interés. Se desarrollaron máquinas con las que generar altas tensiones eléctricas y se descubrió que era posible almacenar carga eléctrica en esferas de materiales metálicos convenientemente aisladas. El descubrimiento de la Botella de Leyden, el primer condensador, permitió mejorar el almacenamiento de carga eléctrica. En ese siglo, Benjamin Franklin desarrolló las ideas y la terminología básica de los



Figura 1. Alessandro Volta expone a Napoleón Bonaparte sus experiencias con las "columnas de Volta", las primeras pilas eléctricas. Cuadro de Giuseppe Bertini.

fenómenos electrostáticos. Sin embargo, la electricidad no dejaba de ser un fenómeno “curioso”, que se prestaba a su exposición en actos públicos, a medio camino entre la ciencia y el espectáculo.

A finales del siglo XVIII, los experimentos de Luigi Galvani [1] con las ancas de rana establecieron conexión entre los fenómenos eléctricos y los neurológicos. Galvani dedujo correctamente que era la circulación de cargas eléctricas, lo que llamamos “corriente eléctrica”, la causa de los movimientos del miembro del animal muerto. Surgió entonces una controversia sobre el origen de la corriente eléctrica, controversia que resolvió Alessandro Volta (Figura 1). Lo importante es que, como consecuencia de sus investigaciones, Volta diseñó la primera “pila eléctrica”, el primer artilugio que era capaz de establecer circulación de corriente eléctrica durante largos periodos de tiempo.

La posibilidad de generar corriente eléctrica en estas condiciones favoreció el estudio de sus efectos. Un momento trascendente en este estudio fue el experimento de Hans Christian Oersted, quien demostró en 1820 que la circulación de corriente eléctrica por un conductor desviaba la indicación de una brújula, lo que significaba que la corriente eléctrica generaba un campo magnético [2]. Sin embargo, el campo magnético generado por un imán no generaba corriente eléctrica en un conductor próximo que formara, lo que hoy llamamos, un circuito eléctrico cerrado. Parecía, por tanto, que la relación entre electricidad y magnetismo tenía una cierta asimetría. Sin embargo, tal asimetría no existe en la realidad, ya que sí es posible hacer circular corriente eléctrica por el conductor que acabo de citar si el campo magnético es variable. Esto fue descubierto por Michael Faraday en 1831.

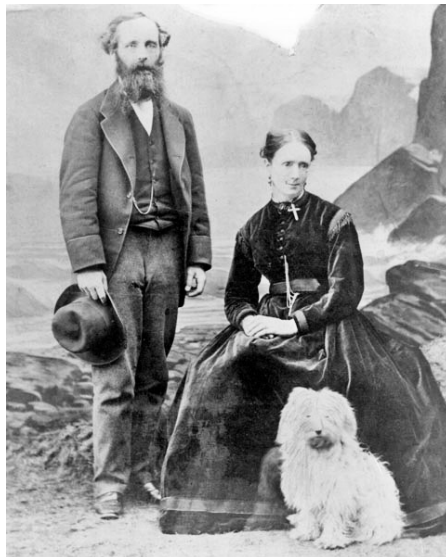


Figura 2. Fotografía de James Clerk Maxwell, su esposa Katherine y su perro. Maxwell frecuentemente explicaba sus desarrollos teóricos a su fiel terrier irlandés, Toby.

Todo el conjunto de relaciones matemáticas entre los campos magnéticos y eléctricos se fueron estableciendo y culminaron con el planteamiento por James Maxwell (Figura 2) de sus famosas 4 ecuaciones [3]. Es muy importante señalar que, desde sus ecuaciones, Maxwell predijo que deberían existir ondas electromagnéticas. Desgraciadamente, su prematura muerte con 49 años no le permitió demostrar empíricamente su existencia, lo que sí logró hacer Heinrich Rudolf Hertz, veinte años más tarde de la formulación de Maxwell. Enfatizo este hecho porque el uso de las ondas electromagnéticas en las bandas de “radio” es esencial en el desarrollo inicial de la electrónica.

1.2 – Emprendedores

En paralelo con el desarrollo del conocimiento de los fenómenos eléctricos como un campo fundamental de la Física, muchos investigadores se plantearon el aprovechamiento de estos fenómenos para la construcción de máquinas o artilugios de uso práctico. El campo magnético provocado por la corriente eléctrica produce fuerzas de atracción o repulsión sobre imanes o sobre otros conductores de corriente eléctrica, y esto fue aprovechado para la construcción de los primeros motores eléctricos y para intentar utilizar tendidos de cables eléctricos para la transmisión de información a distancia. Quizás por menos conocido, quisiera hacer mención aquí a los experimentos del gran matemático Johann Carl Friedrich Gauss y del físico Wilhelm Eduard Weber en la universidad de Gotinga en este campo. Sin embargo, fue un pintor, Samuel Morse (Figura 3), el que diseñó un artilugio para la transmisión de información a distancia por cables utilizando el código que también él ideó y que lleva su nombre: el código Morse. Con la tecnología de la transmisión de señales telegráficas en código Morse ya madura, fue posible conectar por telégrafo Europa y América [4]. Por primera vez, la noticia de un acontecimiento acaecido en uno de los continentes no llegaba tras semanas de travesía en un barco, sino que era conocida casi instantáneamente. Quizás no sea fácil darse cuenta de la



Figura 3. Daguerrotipo de Samuel Morse tomado en París en 1840.

trascendencia de este hecho en estos tiempos en los que vivimos, de conexión continua. Si nos planteamos en qué parcela de la vida de un ser humano de la segunda mitad del siglo XIX intervenía la electricidad, la respuesta sería que casi exclusivamente en la comunicación de noticias a distancia por el telégrafo. La iluminación se realizaba por combustión de aceites, petróleo o gas, el calentamiento por combustión de madera o carbón y la fuerza motriz se obtenía de los animales o de las máquinas, que la obtenían de la combustión, especialmente de carbón.

El desarrollo de los primeros motores eléctricos data de 1834. En su historia hay varios nombres que merecen especial mención, como Moritz Hermann von Jacobi, Zénobe Théophile Gramme (Figura 4), Ernst Werner Siemens y Galileo Ferraris. Una característica casi universal de los motores eléctricos es su reversibilidad, es decir, su capacidad de no sólo transformar energía eléctrica en energía mecánica, sino de realizar también la transformación inversa, actuando de esta manera como generadores. Partiendo de la energía mecánica obtenida por máquinas de vapor o por corrientes de agua controladas, los generadores eléctricos posibilitaron la transformación de esta energía mecánica en energía eléctrica que, a distancias muy grandes, era transformada de nuevo de energía eléctrica a energía mecánica por un motor eléctrico. En resumen, las transformaciones de generadores y motores permitían un transporte cómodo de la energía mecánica, convertida a un “formato” intermedio de energía eléctrica. Este asunto es de suma importancia, ya que el transporte de la energía mecánica a distancia presenta graves problemas. En el caso de intentar trasladar un par de rotación a distancias de unas pocas decenas de metros, ya sea por un eje, o por un sistema de poleas, o por un sistema de engranajes, el sistema final es muy ineficiente, complejo, ruidoso y estaría necesitado de enormes esfuerzos de mantenimiento; el transporte a distancias mayores es, sencillamente, inimaginable. Se podría intentar imaginar el transporte de la energía



Figura 4. Generador de corriente continua de Gramme que se exhibió en la Exposición Mundial de 1873 en Viena.

mecánica en forma de presión en un fluido, como se realiza en multitud de accionamientos hidráulicos, pero las distancias de transporte también son pequeñas, debido a varias limitaciones prácticas. De hecho, la sustitución de accionamientos hidráulicos por accionamientos eléctricos es una tendencia en la aeronáutica actual.

Como se ha comentado, los generadores de energía eléctrica transforman energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Esta energía mecánica de rotación procedía inicialmente de una “máquina térmica de combustión externa”, que es como se califica a una máquina de vapor, o de una turbina hidráulica. Posteriormente, además de ir evolucionando y mejorando las turbinas hidráulicas, se desarrollaron turbinas de vapor para este fin. En el caso de generadores de baja potencia, es más fácil utilizar motores de combustión interna (como son los motores de explosión de gasolina o de gasoil) con el mismo propósito. Cualquiera que sea el origen de la energía mecánica de rotación, el generador eléctrico puede entregar a su salida o bien tensiones eléctricas continuas o bien tensiones eléctricas alternas. Para el transporte eficiente de la energía eléctrica a largas distancias es fundamental que las pérdidas en los conductores eléctricos sean bajas, lo que se consigue elevando la tensión eléctrica y, por tanto, reduciendo en la misma proporción los valores de corriente eléctrica. Para la elevación de la tensión de una manera cómoda, el elemento fundamental es el transformador [5], que se basa en la llamada Ley de Faraday. Un transformador es una versión eléctrica de la caja de cambios de un vehículo o del conjunto de “piñones” y de “platos” de una bicicleta. En este ejemplo mecánico, la potencia es producto del par (fuerza de rotación) y de la velocidad, lo que implica que, para una potencia dada, tendremos que supeditar las posibles velocidades a las necesidades de par (todo el que utiliza una bicicleta con “cambios”



Figura 5. Fotografía tomada en 1878 de Thomas Alva Edison junto a un fonógrafo, otra de sus invenciones.

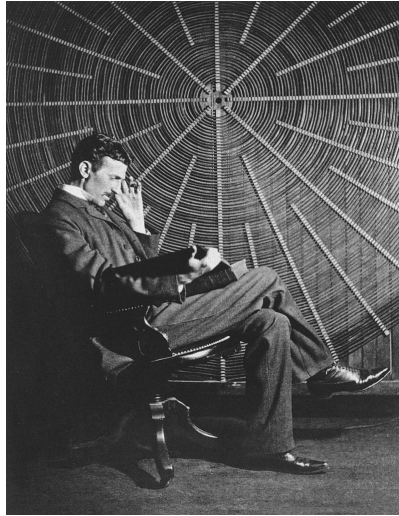


Figura 6. Fotografía de Nikola Tesla sentado junto a una bobina espiral que usaba para sus experimentos de transmisión inalámbrica de energía eléctrica. Esta fotografía fue publicada en 1896, en la revista *Electrical Review*.

entiende esto fácilmente). En el ejemplo eléctrico, la potencia es producto de la tensión por la intensidad de corriente eléctrica. Para un consumo dado de potencia eléctrica, la intensidad de corriente va a ser tanto menor cuanto mayor sea la tensión. El transformador se encarga de la elevación de la tensión, de tal manera que el transporte se realiza en alta tensión. Para el consumo de la energía eléctrica sin grandes peligros, otro transformador realiza la transformación inversa.

La facilidad en la elevación y reducción de la tensión con transformadores fue fundamental para la decisión del tipo de tensión eléctrica a utilizar y a distribuir. Esta decisión puso fin a la llamada “guerra de las corrientes” (llamarla “guerra de las tensiones” creo que sería más correcto) entre Thomas Alva Edison (Figura 5) y Nikola Tesla (Figura 6), con la victoria de este último. La generación de tensiones alternas es más fácil que la generación de tensiones continuas y, además, es más fácil realizar su transporte a grandes distancias. Por estas razones, la energía eléctrica llega al consumidor como tensión alterna. Sin embargo, hay razones que podrían revertir esta decisión en el futuro.

A finales del siglo XIX estaba claro que la energía eléctrica, fácilmente transportable, tenía un gran potencial de uso como medio de transporte de la energía mecánica, permitiendo separar a los productores y usuarios de la misma. Sin embargo, este uso no justificaba por sí mismo el despliegue de una red que la llevara a las ciudades. El detonante de ese despliegue fue el desarrollo de una bombilla realmente fiable y duradera por Thomas Alva Edison en 1879. Las ventajas de la iluminación con bombillas de energía eléctrica sobre el uso del llamado “gas de

alumbrado” (gas de hulla) eran muy claras: mejor calidad luminosa, inexistencia de consumo de oxígeno y de generación de malos olores, mejor transporte, etc. La iluminación con energía eléctrica llevó este tipo de energía a las ciudades y a las fábricas; todavía hoy asociamos electricidad a luz inconscientemente cuando hablamos de la factura de la luz, cuando sólo una parte muy pequeña de la energía eléctrica que consumimos está destinada a la iluminación.

El despliegue de la red de energía eléctrica cambió la vida de las personas y el aspecto de las ciudades. Los electrodomésticos (planchas, frigoríficos, lavadoras, aspiradoras, etc.) facilitaron la vida de las personas y los ascensores eléctricos permitieron el crecimiento de la altura de los edificios. Muchos de los electrodomésticos habituales usan motores eléctricos que transforman la energía eléctrica en mecánica, además de distintos tipos de automatismos, cuya complejidad ha crecido muchísimo en los últimos 40 años. Los mayores de entre nosotros hemos vivido en primera persona los cambios que ha significado la irrupción de estos electrodomésticos en las vidas de los que nos rodeaban. Tenemos que reconocer que hemos tenido un servicio de energía eléctrica escalable a nuestras necesidades, fiable, continuo y a un coste perfectamente asequible.

1.3 – El sencillo mecanismo del timbre eléctrico

Quizás sea el timbre eléctrico uno de los mecanismos eléctricos más simples que desde hace mucho tiempo está en nuestros hogares. Seguramente también es de los más prescindibles.

El timbre eléctrico, alimentado desde tensión continua, consiste en un electroimán por cuya bobina circula corriente eléctrica cuando se pulsa el timbre. Este electroimán atrae a una pequeña plaquita de hierro, cuyo desplazamiento interrumpe bruscamente la circulación de corriente eléctrica por el electroimán. En cuanto se interrumpe dicha circulación, la plaquita de hierro vuelve a su posición original, de tal forma que también vuelve a establecerse circulación de corriente eléctrica por el electroimán, comenzando de nuevo el ciclo descrito. El resultado es que, mientras tenemos el timbre pulsado, la corriente eléctrica está constantemente estableciéndose e interrumpiéndose bruscamente, produciéndose un movimiento continuo de vaivén de la citada plaquita de hierro. Si esta plaquita golpea una campanilla, tenemos ya finalizado nuestro timbre.

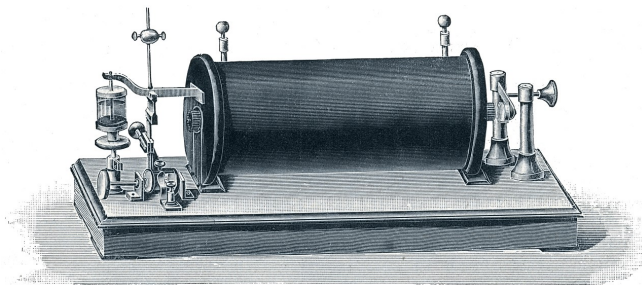


Figura 7. Grabado que muestra un carrete de Ruhmkorff.

El mecanismo del timbre, pero sin necesidad de que exista la campanilla, es un sistema sencillo de conseguir, desde una batería o generador de tensión constante, una corriente que varía constantemente. Una corriente que varía constantemente genera un campo magnético que también varía constantemente. Si sobre la bobina del electroimán se coloca otra bobina con un número de espiras muy superior al de la primera bobina, en los momentos de decrecimiento brusco de la corriente (por el movimiento de la plaquita de hierro), se inducen tensiones enormemente grandes en la segunda bobina. Tenemos así un sistema para generar altas tensiones variables desde un generador de bajas tensiones constantes. Este artificio fue desarrollado por Heinrich Daniel Ruhmkorff, siendo conocido como "carrete de Ruhmkorff" o "bobina de Ruhmkorff" (Figura 7).

El carrete de Ruhmkorff propició tres hechos importantísimos:

- El descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Conrad Röntgen.
- La demostración por Heinrich Rudolf Hertz de la existencia de ondas electromagnéticas (Figura 8), que había predicho James Maxwell.
- Y el desarrollo del primer transmisor de radio efectivo por Guglielmo Marconi.

La importancia de los rayos X en la medicina, la exploración de la materia y la ingeniería es inmensa, pero no me voy a ocupar de ella hoy. Por supuesto, sin la verificación experimental de Hertz, Marconi no habría tenido la idea desarrollar su transmisor de "Telegrafía Sin Hilos", pero ahora quiero centrar la atención del oyente en la trascendencia de la invención de Marconi y de todos los que, en

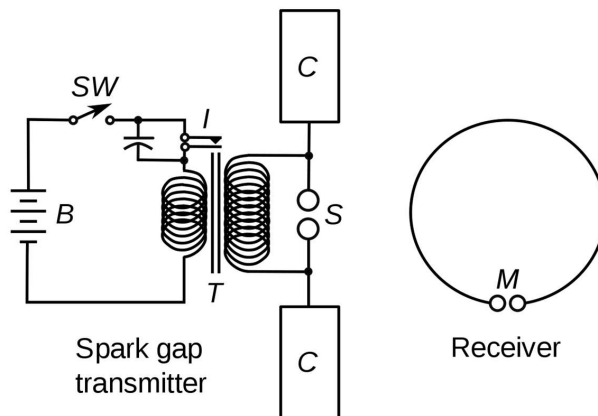


Figura 8. Esquema que describe el equipo usado por Heinrich Rudolf Hertz para demostrar la existencia de ondas electromagnéticas. En la parte de la izquierda del esquema aparece el transmisor, compuesto por un carrete de Ruhmkorff y una antena dipolo con "sombbrero capacitivo" (las placas que en el esquema aparecen con la letra C). El receptor consta de una antena de lazo, en la que la recepción de ondas electromagnéticas se visualizaba por la presencia de chispas en los terminales señalados con la letra M.

competencia o en colaboración, ayudaron al desarrollo de las comunicaciones por radio, ya que sin ellas no se hubiera desarrollado la electrónica.

1.4 – La importancia de estar enterado a tiempo

La batalla de Hastings es un hecho muy singular en la historia de Inglaterra, ya que marca el comienzo de la dominación normanda y, por tanto, de la influencia de “lo francés” en dicho reino. Tras la muerte sin hijos del rey Eduardo el Confesor, fue coronado rey Haroldo II, que no fue reconocido como tal por Guillermo II de Normandía, que reclamaba sus derechos a dicho título. Un ejército vikingo, aliado de Guillermo y comandado por el rey de Noruega Harald Hardrada, invadió el norte de Inglaterra y, tras una victoria inicial, fue derrotado por el rey inglés en la batalla de Stamford Bridge (a los aficionados al fútbol les sonará este nombre). Mientras sus soldados victoriosos se recuperaban de la batalla, Guillermo desembarcó al sur de Inglaterra un 28 de septiembre. Cuando se enteró de ello Haroldo el 2 de octubre, se vio forzado a marchar veloz hacia el sur, teniendo que improvisar una leva de combatientes por el camino. Estos 4 días de retraso en conocer la noticia del desembarco de Guillermo, junto a los 11 días que tardó Haroldo en reunir un ejército y trasladarlo al sur, permitieron a Guillermo fortificarse tras el desembarco y preparar las tretas que le acarrearón su victoria en la batalla de Hastings (Figura 9), cambiando muy notablemente el futuro de Inglaterra, unida desde entonces a intereses en territorio francés.



Figura 9. Fotografía de una parte del Tapiz de Bayeux, bordado en el siglo XI por la reina Matilde, esposa de Guillermo el Conquistador. En esta fotografía se muestra la parte del tapiz en la que se describe la muerte del rey Haroldo II.

Evidentemente, éste es sólo un ejemplo y resulta fácil comprender la importancia de conocer los acontecimientos ocurridos en un conflicto lo antes posible, para poder responder a ellos de la mejor manera posible. A medio camino entre la historia y la leyenda está la carrera de Filípides, inspiración para la carrera de Maratón.

La importancia de la rapidez en la transmisión de la información dio origen a multitud de artilugios y de códigos, frecuentemente basados en la observación a distancia de eventos que codificaban mensajes. Quizás el más famoso de ellos sea el telégrafo óptico de los hermanos Claude e Ignace Chappe (Figura 10), que llegó a utilizarse en España. Sin embargo, desde comienzos del siglo XIX se empezó a experimentar con la posibilidad de enviar información codificada mediante efectos eléctricos. Antes de que Oersted descubriera la creación de un campo magnético por una corriente eléctrica, se experimentó con la posibilidad de detectar la presencia de tensión y corriente eléctrica en un conductor por otros medios, siendo muy interesante en este punto la aportación del barcelonés Francisco Salvá Campillo (Figura 11), que en 1795 presentó su “Memoria sobre la electricidad aplicada a la telegrafía” en la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona. El descubrimiento de Oersted abrió el camino a una forma muy sencilla de detección de la existencia de corriente eléctrica: la detección del campo magnético que genera. Con este principio experimentaron Gauss y Weber, pero fue Morse el primero que llegó a desarrollar un sistema realmente fiable y útil. En 1844, Morse transmitió un mensaje desde Washington a Baltimore, separadas 60 km. Para hacernos una idea del éxito del telégrafo, comentar que en 1858 se tendió un cable telegráfico submarino entre



Figura 10. Ilustración que recrea una torre del sistema telegráfico óptico desarrollado por Claude Chappe a finales del siglo XVIII.



Figura 11. Francisco Salvá, según el pintor José María Marqués y García. Este cuadro fue pintado 72 años después de la muerte de Francisco Salvá.

América y Europa, que sólo llegó a funcionar 3 semanas. En 1866 ya había mejorado la tecnología de los cables lo suficiente como para conseguir un cable submarino fiable y duradero.

El siguiente gran paso en las comunicaciones fue el teléfono, cuya paternidad fue objeto de muchas disputas. Los cables telegráficos y telefónicos cambiaron el aspecto de muchas ciudades a finales del siglo XIX. Ambas eran comunicaciones alámbricas, es decir, debidas a la conducción de corriente eléctrica por largos hilos de material conductor. En el caso de las señales telegráficas, era posible tender largas líneas, ya que se podía regenerar la señal a lo largo de estas líneas mediante sistemas de relés y baterías. Esto no era posible hacerlo con las señales telefónicas, lo que complicaba el establecimiento de conversaciones a largas distancias. La resolución de este problema está intrínsecamente ligado al desarrollo, en el siglo XX, hace ahora 75 años, del dispositivo electrónico que ha propiciado muchos de los avances tecnológicos que hoy disfrutamos: el transistor.

Aunque la telegrafía y la telefonía resolvían la comunicación entre puntos fijos, no eran aplicables a los barcos. La posibilidad de comunicación en situación de grave peligro o de naufragio no era entonces posible. La superación de este problema vino de la mano de Marconi, quien conocía el experimento realizado por Hertz y los avances de otros científicos que habían trabajado investigando las ondas "hercianas" (es decir, electromagnéticas), muy especialmente Aleksandr Stepánovich Popov (el inventor de la radio para los rusos) y Oliver Joseph Lodge. Popov había inventado la antena y Lodge un artilugio, al que llamó "cohesor", con el que era capaz de detectar las ondas electromagnéticas con mayor sensibilidad que con el método que usó Hertz. Lo cierto es que Marconi experimentó con el carrete

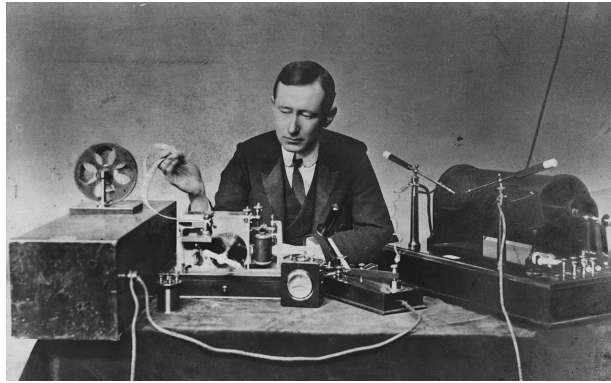


Figura 12. Fotografía de Guglielmo Marconi tomada en 1901. A la izquierda se aprecia el receptor telegráfico, con los mecanismos propios del telégrafo de Morse para dejar el mensaje impreso en una cinta de papel. A la derecha se aprecia un carrete de Ruhmkorff, que es el encargado de generar las descargas eléctricas (chispas) propias de este tipo de transmisores.

de Ruhmkorff, la antena de Popov y el cohesor de Lodge y fue construyendo rudimentarios transmisores y receptores. Marconi tuvo la habilidad de ver el aspecto más práctico de lo que estaba desarrollando, buscando su uso para conseguir la llamada “Telegrafía Sin Hilos”. Es de destacar que la madre de Marconi era de origen irlandés y su padre era un terrateniente italiano. Como consecuencia de ello, Marconi gozó de cierta facilidad para acceder a las autoridades italianas, inglesas y francesas, que rápidamente quedaron encantadas con las posibilidades que abría la Telegrafía Sin Hilos (Figura 12), tanto desde el punto de vista militar, como comercial y de rescate de víctimas de naufragios. En el caso del *Titanic*, en 1912, la Telegrafía Sin Hilos (es decir, la radio de entonces) ayudó al salvamento de muchas vidas, aunque se hubieran podido salvar muchas más si no hubiera habido un incidente entre los radiotelegrafistas del *Titanic* y del barco mercantil *Californian*. Pero, ¿cómo era la radio del *Titanic*?

Cuando comienzo mis clases de la asignatura “Electrónica de Comunicaciones” suelo comentar a mis alumnos que la radio del *Titanic* era una radio sin electrónica, al menos en la parte de transmisión. Había alternadores, circuitos sintonizados y en el receptor un detector magnético (apodado el “*Maggie*”) que operaba como una especie de “diodo magnético”. Una versión alternativa del sistema detector usaba dos primitivas “válvulas Fleming” (diodos termoiónicos) actuando como rectificadores en configuración onda completa. Ésta era la única electrónica en un sistema de comunicaciones en el que el transmisor tenía una potencia de 5kW. Cuando el sistema funcionaba usando el “*Maggie*” en vez de los diodos, era éste un transceptor de radio sin electrónica. La electrónica surge en paralelo a la radio y se desarrolla gracias a la radio [6].

2. Electrónica y electrónica de potencia

La electrónica de potencia es una hija relativamente tardía de la electrónica. Aunque podemos encontrar algunos dispositivos electrónicos de potencia en la “era termoiónica”, anterior a la de los semiconductores, su implicación en la vida de los seres humanos está completamente ligada a la gran expansión de los dispositivos electrónicos de estado sólido en el último cuarto del siglo XX. Partiendo del nacimiento de la electrónica, voy a relatar brevemente el comienzo de la “electrónica de los transistores” y cómo ésta fue alumbrando la posibilidad de usar estos dispositivos en la conversión de las “características” (el formato) con el que la energía eléctrica se nos presenta.

2.1 – Nace la electrónica

En el contexto de la experimentación que Edison realizó en 1880 para superar los problemas que presentaban algunos de los prototipos de bombillas que iba desarrollando, colocó una placa metálica en las cercanías del filamento incandescente de la bombilla. Observó que, si a la placa se le aplicaba tensión positiva con respecto al filamento, se producía conducción de corriente eléctrica, mientras que si la polaridad de la tensión colocada era la inversa la conducción no ocurría. También observó otro fenómeno distinto al que buscó una aplicación práctica (realizando una patente), pero no prestó mayor interés a la propiedad que acabo de citar.

En los primeros experimentos de Marconi, la detección de las pequeñas corrientes que circulaban por la antena receptora como consecuencia de la llegada de la onda electromagnética se realizaba con el “cohesor” de Lodge. El anteriormente citado “*Maggie*” presentaba mejores características que el cohesor de Lodge, pero surgió un nuevo artilugio que superaba sin duda a los dos anteriores: el

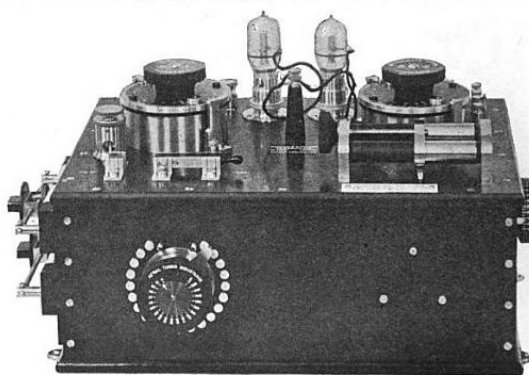


Figura 13. Receptor de radio de la Compañía Marconi que incorpora un detector basado en un diodo termoiónico de los inventados por John Ambrose Fleming. En el equipo aparecen dos diodos pese a que sólo operaba uno de ellos, siendo el otro un diodo de reserva por si el primero fallaba.

diodo de vacío o diodo termoiónico (Figura 13). La invención del diodo marca el nacimiento de la electrónica. Fue idea de John Ambrose Fleming, que basó su diodo en el efecto de conducción de corriente unidireccional que había descubierto Edison. El diodo de Fleming constaba de un filamento incandescente (como el de una bombilla de Edison) y una placa metálica cercana al filamento, ambos elementos introducidos dentro de una ampolla de cristal en la que se había realizado el vacío. Aunque el dispositivo tenía tres conexiones al exterior, realmente eran dos las que formaba parte de los circuitos de uso del dispositivo (el otro servía exclusivamente para llevar a incandescencia el filamento), lo que justifica el nombre de “diodo”. El diodo operaba en los circuitos como “rectificador”, es decir, como elemento que sólo permite corriente eléctrica en un sentido. Con un diodo no era posible amplificar las señales eléctricas, ni generarlas. Alternadores y chispas propiciaban la descarga de condensadores en circuitos con bobinas, que eran los elementos encargados de generar corrientes de radiofrecuencia en el transmisor del *Titanic*, corrientes que generaban ondas electromagnéticas en una gigantesca antena.

La invención del diodo por Fleming marca el comienzo de la electrónica, definida como la parte de la ingeniería eléctrica que estudia circuitos en los que la corriente eléctrica circula por “componentes electrónicos”, que son claramente distintos a los componentes básicos de la teoría de circuitos, y que se distinguen de ellos por presentar, en general, dependencias no lineales entre tensión y corriente eléctrica. Sin embargo, el primer gran hito en la historia de la electrónica es la invención del “triodo de vacío” o “triodo termoiónico” por Lee de Forest (Figura 14) en 1906. La inserción de una malla metálica entre el filamento y la placa de un diodo convertía a éste en un “triodo” (un dispositivo con tres terminales con funciones en el circuito).

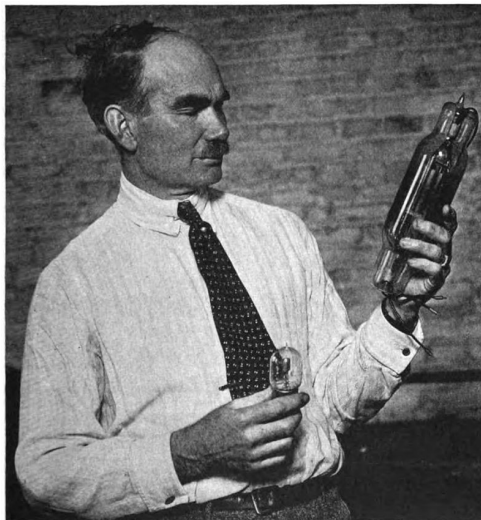


Figura 14. Fotografía de principios del siglo XX mostrando a Lee de Forest, que sostiene en sus manos dos triodos termoiónicos. El de su mano derecha es un triodo de 1 W para recepción y el de su mano izquierda es un triodo de 250 W para transmisión.

Las tensiones eléctricas conectadas entre este nuevo terminal (al que se llamó “rejilla”) y el filamento eran capaces de controlar el flujo de electrones emitidos por el filamento y que viajaban por el vacío en dirección a la placa, conectada a tensión positiva con respecto al filamento. Esta capacidad de control era tal que permitía que pequeñas señales en la rejilla permitieran versiones amplificadas de dichas señales en el circuito de placa del triodo. Por tanto, el triodo permitía la amplificación de señales.

El triodo propició el desarrollo de la radiodifusión y de la televisión. Versiones mejoradas del triodo para operación en radiofrecuencia (especialmente el “pentodo”) hicieron posible la construcción de receptores de radio a costes asequibles a la población, a la par que se desarrollaban transmisores de grandes potencias (decenas y hasta centenas de kilovatios) que extendían la cobertura de los programas de radio. Hasta el final de la Segunda Guerra Mundial, electrónica era sinónimo de radio, de amplificación de señales de audio y de una incipiente televisión, todo ello basado en el uso de diodos, triodos y pentodos termoiónicos.

2.2 – La electrónica va a la guerra

El primer gran conflicto bélico en el que la aviación jugó un papel importante fue la Primera Guerra Mundial. Además de las posibilidades de bombardeo desde el aire, el uso conjunto de la aviación y de la radio permitía enviar información a los artilleros de tierra de las posiciones y movimientos del enemigo. En el periodo de entreguerras, el gobierno británico creó el llamado “Comité para el Examen Científico de la Defensa Aérea”. Este comité se planteó la posibilidad de derribar aviones enemigos con la ayuda de emisiones de radio, el llamado “rayo mortal”. Entre los científicos que trataron de estudiar esta posibilidad, estaba el físico Robert Alexander Watson-Watt, quien concluyó que la potencia a radiar para este fin era inalcanzable en la práctica. Sin embargo, también concluyó que la transmisión de ondas electromagnéticas y su posterior captación tras rebotar en las partes metálicas de un avión podían servir para detectar su presencia. Esto ocurrió en el año 1935. Los alemanes, de la mano de Heinrich Rudolph Kühnhold, habían comenzado a realizar experimentos en 1933, pero en su caso con el objetivo de detectar barcos enemigos. Los alemanes realizaron experimentos reales en la bahía de Kiel en 1934, mientras que los británicos los realizaron detectando la aproximación de un bombardero en 1935. Estaba naciendo el radar.

En el desarrollo del radar jugó un papel fundamental el descubrimiento de que era mucho mejor emitir pulsos de radiación de gran potencia que emitir radiación de forma continua, y en este descubrimiento los británicos se adelantaron a los alemanes. También era fundamental que la longitud de onda de la señal usada para la detección fuera muy pequeña, mucho más pequeña que la correspondiente a las comunicaciones vía radio de la época. En la carrera por conseguir un sistema de generación de señales eléctricas de longitudes de onda centimétricas (la longitud de onda de una transmisión en Onda Media es de hectómetros), el dispositivo clave fue el “magnetron” (Figura 15). La versión realmente operativa del magnetron fue desarrollada por un británico, el físico John Turton Randall en 1940, que consiguió

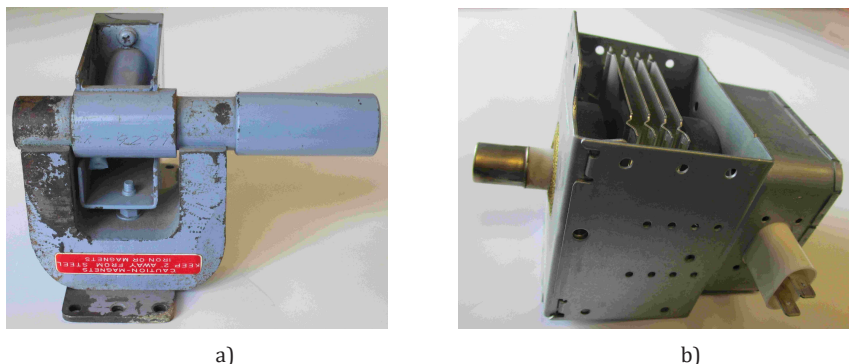


Figura 15. El último vestigio de la era termoiónica de la electrónica es el magnetrón. a): Magnetón 2J42 usado en RADAR pulsado. b): Magnetrón de horno de microondas doméstico.

generar señales de 10 centímetros de longitud de onda y de potencias de cientos de vatios. En unas pocas semanas, los ingenieros de la empresa para la que trabajaba Randall superaron la potencia de un kilovatio, y en unos meses superaron los 25 kilovatios; en 1941 llegaron a obtener pulsos de potencias mayores de 100 kilovatios. Es de destacar que, con potencias más moderadas, el magnetrón es el último dispositivo termoiónico con el que habitualmente convivimos, ya que es elemento clave en los hornos de microondas de nuestros hogares. En los últimos 20 años hemos visto la desaparición por completo de los tubos de rayos catódicos de nuestras televisiones y pantallas de ordenador, que han sido víctima del progreso de otras tecnologías, edificadas sobre el uso de dispositivos electrónicos basados en semiconductores.

Volviendo al radar, el magnetrón solucionaba el problema de la generación de las señales eléctricas (de gran potencia) que la antena de radar radiaba, pero no el de la detección del eco reflejado por el objeto a detectar. Las válvulas termoiónicas no eran capaces de trabajar de forma eficiente a las frecuencias correspondientes a longitudes de onda de 10 centímetros (3 GHz). Para su detección, se empezó a experimentar con “diodos de estado sólido”, basados en uniones entre materiales semiconductores. Los primeros diodos de estado sólido presentaban características muy cambiantes en función de la calidad (de la pureza) del material semiconductor, pero la urgencia en la mejora de los radares impulsó su estudio, lo que a su vez llevó a una mejor comprensión de sus principios de funcionamiento y a la mejora de sus características. Curiosamente, los alemanes no se plantearon el uso de dispositivos electrónicos basados en semiconductores, pese a que científicos del mundo germánico habían sido los pioneros en su estudio. Así, Karl Ferdinand Braun fue el inventor del “detector de cristal”, precursor de los diodos semiconductores, mientras que Julius Edgar Lilienfeld fue el primero en patentar, sin llegar a construir, un dispositivo que podía realizar las funciones de un triodo, pero basado en semiconductores.

2.3 – Llamadas a larga distancia: nace el transistor

La invención del triodo hizo posible las llamadas telefónicas a larga distancias. Sin embargo, los amplificadores de audio basados en triodos que hacían posibles

estas llamadas fallaban frecuentemente, con la consiguiente interrupción de la llamada. Este problema preocupaba a la empresa norteamericana *Bell Telephone Company*, que tras haber comprado la patente del triodo a de Forest había establecido líneas telefónicas transcontinentales en 1914 [7]. En 1925, esta compañía creó un centro de investigación, al que llamó los “*Bell Telephone Laboratories*”, entre cuyas actividades estaba la investigación en dispositivos que pudieran remediar las limitaciones de los triodos, tanto en respuesta en frecuencia como en fiabilidad. Con este propósito, el director del departamento de investigación, Mervin Kelly, contrató en 1936 a dos de los tres científicos clave para la invención del transistor: a William Bradford Shockley y a Walter Houser Brattain. Su labor en la búsqueda del sustituto del triodo en esos años se basó en la experimentación con contactos de cobre y de óxido de cobre, sin ningún éxito. Al entrar EEUU en la Segunda Guerra Mundial, los científicos de los “*Bell Labs*” fueron movilizados para trabajar para el ejército, hasta que acabada ésta volvieron a reunirse en los “*Bell Labs*”. A Shockley y Brattain se unió John Bardeen (Figura 16). A finales de 1947 y tras múltiples fracasos y casualidades [7], Brattain y Bardeen consiguieron un dispositivo de estado sólido que era capaz de amplificar señales, aunque a frecuencias bastante bajas [8]. En el intento que culminó con el citado éxito no intervino Shockley, quien rápidamente planteó un dispositivo alternativo. Ambos son “transistores”, el de Brattain y Bardeen de “puntas de contacto” y el de Shockley es el transistor de “unión”; el segundo es el que realmente se impuso. Los problemas personales entre Shockley, por un lado, y Brattain y Bardeen, por el otro, fueron profundos y acabaron con ellos siguiendo caminos distintos [7].

Las invenciones del transistor bipolar y, posteriormente, del transistor de efecto de campo de puerta aislada, el MOSFET (del inglés, *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*), inauguraron la era de la electrónica, tal y como la conocemos. Su tamaño, fiabilidad y respuesta en frecuencia abrieron el camino a las



Figura 16. Los inventores del transistor (de izquierda a derecha): John Bardeen, William Shockley y Walter Brattain. Esta fotografía fue tomada en 1948 en los Laboratorios Bell. La relación entre ellos no siempre fue fácil.

telecomunicaciones en frecuencias muy altas, a la miniaturización, a la computación y a un sinnúmero de automatismos que han formado parte de la vida de los seres humanos de los últimos 60 años.

2.4 – El Rectificador Controlado de Silicio

Los primeros transistores se construyeron usando el germanio como material base, esencialmente porque se conseguía mayor pureza en los cristales de este elemento que en los de silicio. Sin embargo, el silicio presenta mejores propiedades para construir transistores que el germanio, además de ser uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, al contrario que el germanio. Cuando la calidad del silicio fue suficientemente alta, el material para la realización de transistores y de circuitos integrados con transistores pasó a ser el silicio.

Con el silicio es posible construir otros dispositivos electrónicos diferentes a los transistores y, en particular, es posible construir un dispositivo que se llama “Rectificador Controlado de Silicio” (Figura 17), que se conoce con las siglas de su nombre en lengua inglesa: SCR (del inglés, *Silicon Controlled Rectifier*). El SCR fue un producto de los “Bell Labs” que se desarrolló a finales de la década de los 50. Se trata de un dispositivo con unas funciones distintas a las que puede realizar un transistor. Un transistor puede operar, fundamentalmente, de dos maneras distintas: como una fuente de corriente controlada o como un interruptor. La primera de estas dos maneras de operar recibe el nombre de “operación en zona activa”, mientras de la segunda recibe el nombre de “operación en conmutación”. Los triodos termoiónicos estaban pensados para trabajar en el equivalente a “zona activa”, mientras que su operación “en conmutación” era bastante deficiente. En cambio, los transistores funcionan bien en ambos modos, comportándose como buenos circuitos abiertos y como buenos circuitos cerrados cuando trabajan en conmutación. Los SCRs son dispositivos semiconductores que sólo pueden trabajar en conmutación, lo que les distingue de forma radical de los transistores. El SCR es el primer miembro de una



Figura 17. Antiguo tiristor SCR de alta potencia. En el ejemplar disponible, no se aprecian sus referencias. Este dispositivo probablemente data de principios de los años 80.

categoría de dispositivos semiconductores que reciben el nombre de “tiristores”. En el lenguaje habitual de la electrónica, muchas veces se confunden ambos términos.

Volviendo a los transistores, su trabajo en conmutación abrió dos puertas de aplicación importantísima de la electrónica: la electrónica digital, que da nombre a la era que vivimos, y la electrónica de potencia, que va a ser absolutamente fundamental en la era que tiene que hacer posible la descarbonización.

El uso del transistor (y los diodos de semiconductor) y su continua y creciente capacidad de integración en superficies muy pequeñas ha hecho posible el “mundo digital e interconectado” en el que vivimos. Mucho se podría hablar de la evolución de los computadores digitales desde el famoso ENIAC, basado aún en dispositivos termoiónicos, hasta nuestros días. Sin embargo, éste no es el tema elegido para este acto. Por el contrario, sí lo es la electrónica de potencia.

La electrónica de potencia es la parte de la electrónica que estudia los circuitos y los dispositivos electrónicos que tienen como objetivo cambiar las características de la energía eléctrica. A mí me gusta decir que tienen como misión cambiar “el formato” de la energía eléctrica, término que creo que se entiende muy bien en la era digital. Al decir formato me estoy refiriendo, fundamentalmente, a los valores de tensión y corriente (inversamente proporcionales para una potencia dada), por un lado, y de frecuencia, por otro. Por ejemplo, la batería de nuestro automóvil puede estar suministrando un par de kilovatios de potencia eléctrica a su motor de arranque, la misma potencia eléctrica que la cocina eléctrica está obteniendo de la red eléctrica de nuestro domicilio para calentar un recipiente, pero el formato de la energía eléctrica en el primer caso es de 12 voltios de tensión continua (corriente continua, decimos) y en el segundo es de 230 voltios eficaces de tensión alterna (corriente alterna, similarmente decimos) a una frecuencia de 50 hercios.

El cambio del formato de la energía eléctrica hay que realizarlo con el máximo rendimiento posible, es decir, con las mínimas pérdidas. Para ello, los circuitos eléctricos que se encarguen de hacerlo no deben incluir componentes en los que se disipe energía eléctrica, lo que excluye dispositivos electrónicos que operen en “zona activa”, ya que en este caso en el dispositivo conviven tensiones y corrientes eléctricas al mismo tiempo, lo que implica disipación de potencia en ellos. Lo deseable es que toda la potencia eléctrica presente a la entrada del circuito que realiza el cambio de formato (al que llamaremos a partir de ahora “convertidor”) acabe llegando a su salida; una pérdida intermedia de potencia es un derroche. Por tanto, en los circuitos electrónicos de potencia sólo debe haber elementos almacenadores de energía eléctrica (bobinas y condensadores), transformadores e interruptores. En los interruptores ideales nunca se disipa potencia, ya que, o bien vale cero la tensión sobre ellos (cuando están cerrados), o bien vale cero la corriente (cuando están abiertos). Como los transistores en conmutación se comportan como interruptores, pueden formar parte de los convertidores electrónicos de potencia. Sin embargo, los dispositivos de germanio se comportaban en la práctica como interruptores con características muy limitadas. Existían unos dispositivos termoiónicos para su uso en convertidores de potencia, los tiratrones, que adolecían

de las mismas limitaciones que el resto de los dispositivos termoiónicos. No es difícil, por tanto, comprender el interés en encontrar un dispositivo electrónico muy robusto, que fuera capaz de sustituir a los tiratrones. Ese dispositivo acabó siendo el tiristor SCR.

El SCR es un dispositivo que ha de fabricarse en silicio, ya que las características del germanio (en concreto, el alto valor relativamente de las corrientes inversas en este material) hacen imposible su construcción. Es un dispositivo fácil de fabricar y muy robusto. Con él se desarrollaron numerosos convertidores, cuyas denominaciones atendían a la frecuencia de las magnitudes eléctricas en la entrada y en la salida del convertidor. Así, si la entrada era de tensión alterna y la salida de tensión continua, el convertidor se denomina “rectificador”. La transformación inversa (entrada en continua y salida en alterna) se realiza con un “inversor” (término derivado de la palabra que describe este convertidor en inglés) u “ondulador” (derivado del francés). La conversión con entrada en tensión continua y salida en tensión continua se realiza con un “convertidor continua-continua” (a día de hoy no se suele usar un nombre más específico para este tipo de convertidores, aunque en algunas ocasiones antiguamente se utilizaba el de “troceador”). Si la entrada es de tensión alterna y la salida es también de tensión alterna, entonces tampoco existe un nombre específico para este tipo de convertidores, si bien los llamados “cicloconvertidores” corresponden a esta categoría, siendo en este caso la frecuencia de las tensiones alternas de salida claramente menores que las de entrada. Cuando ambas frecuencias tienen que coincidir, uno de los convertidores más comunes que realizan esta transformación es el llamado “controlador de fase”.

Como se ha comentado, los tiristores SCR eran (y son) dispositivos muy robustos. Se pueden diseñar para conducir corrientes muy grandes y para soportar tensiones también extremadamente altas. Sin embargo, presentan dos serias limitaciones. La primera de ellas es que su velocidad de conmutación es bastante lenta. La segunda es que, si bien el proceso de encendido es especialmente sencillo, el de apagado es muy complejo, ya que el terminal eléctrico por el que el dispositivo se enciende no sirve para apagarlo. Esto no es un inconveniente en algunos convertidores (en especial en los que reciben el nombre de “rectificadores controlados”), pero sí lo es en el resto. Los circuitos de apagado de los SCRs usados en convertidores continua-continua hacían que estos convertidores tuvieran una estructura muy compleja. Ambas limitaciones relegaban a los convertidores de potencia al ámbito casi exclusivamente industrial, hasta finales de los años 70. La electrónica de potencia era una parte de la electrónica industrial, sin interacción prácticamente sobre el ámbito doméstico, y con una presencia muy reducida en la electrónica de consumo y en el incipiente despegue de los ordenadores personales.

2.5 – Reflexionando sobre la electrónica de potencia

He comentado que la electrónica de potencia se ocupa del estudio de los dispositivos y circuitos que se encargan de cambiar el formato de la energía eléctrica. Esto es así, pero conviene reflexionar un poco sobre esta afirmación.

La electrónica surgió inicialmente para construir detectores (que son circuitos rectificadores) de las transmisiones de telegrafía sin hilos de principios del siglo XX. En cuanto de Forest inventó el triodo, la electrónica se volcó en el proceso de la amplificación. Todo el mundo comprende fácilmente lo que es un amplificador: un circuito que convierte las señales eléctricas débiles, que están presentes en su entrada, en señales eléctricas “mayores” (técnicamente hablando, con capacidad de entregar más potencia eléctrica a una carga que las de entrada), y que además evolucionan en el tiempo de forma idéntica a las de su entrada. Por supuesto, un amplificador no puede violar los principios básicos de la física, y si la potencia de salida es mayor que la de entrada es porque existe una fuente de alimentación de tensión continua (por ejemplo, una pila) que se encarga de paliar ese déficit de potencia eléctrica. Es obvio que cuando la pila se agota, el amplificador deja de funcionar.

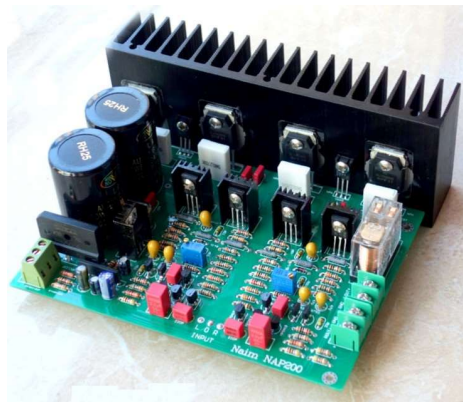
Desde el punto de vista energético, un amplificador también está realizando un cambio en el formato de la energía eléctrica. La energía eléctrica “sin información” presente en la pila es cambiada de formato a energía eléctrica “con información” en la salida del amplificador. Y lo mismo podríamos decir de lo que ocurre en un ordenador, que tampoco va a funcionar si no tiene una fuente suministradora de energía eléctrica “sin información” y que después nos entrega energía eléctrica “con información”, finalmente convertida en luz en la pantalla del ordenador. Obviamente, estas transformaciones no forman parte de las que tradicionalmente estudia la electrónica de potencia y la idea de modificar el formato de la energía eléctrica que está detrás de la definición que he propuesto no encaja con estos supuestos. Para que encaje, hay que añadir alguna otra idea, pero que, como vamos a ver, tampoco consigue acotar unívocamente el campo de la electrónica de potencia.

En muchas ocasiones, el cambio de formato de la energía que define la electrónica de potencia no tiene un objetivo finalista, sino genérico. Por ejemplo, el inversor que, ante un corte del suministro eléctrico, genera tensiones alternas desde unas baterías para mantener operativos los equipos de un quirófano, o de la torre de control de un aeropuerto, o de un centro de proceso de datos, no está pensado para unos equipos específicos. Pero, por el contrario, el inversor que genera corrientes alternas para crear el campo magnético variable que se encarga de calentar un recipiente férreo en una cocina de inducción, es un equipo diseñado con un objetivo completamente finalista. Por tanto, el uso no finalista de la transformación del formato de la energía eléctrica no es una característica intrínseca a la electrónica de potencia.

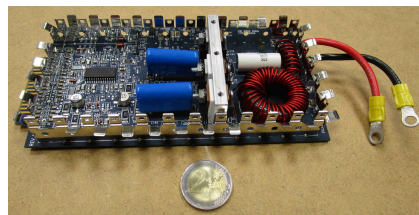
También se podría poner como condición para acotar el campo de la electrónica de potencia algo que aparentemente parece muy lógico: el nivel de potencia. Sin embargo, hay aplicaciones electrónicas que manejan grandes potencias y que no entran dentro del campo de la electrónica de potencia. Por ejemplo, un transmisor de radiodifusión en Onda Media puede generar una potencia de 100 kW, pero jamás sería calificado como un convertidor electrónico de potencia, pese a que cumple la condición de cambiar el formato de la energía eléctrica y de manejar grandes potencias. Por el contrario, el cargador del nuestro teléfono móvil puede procesar

sólo unos 10 W y, sin embargo, su circuitería es sin duda clasificable dentro de la electrónica de potencia.

Quizás la característica más acertada sea que, en la transformación energética, la obtención de un alto rendimiento juegue un papel crucial, lo que implica que los semiconductores trabajen en conmutación. Es decir, que se conjugue cambio de formato de la energía eléctrica con operación de los semiconductores en conmutación, esto último con el objetivo claro de que la operación en conmutación sea para conseguir un alto rendimiento energético en la transformación. Sin embargo, esta característica claramente positiva, distintiva de la electrónica de potencia, se intenta exportar a otras partes de la electrónica, sobre todo en las últimas décadas, volviendo a diluir las fronteras de la electrónica de potencia. El interés por los amplificadores conmutados es un claro ejemplo (Figura 18). Los amplificadores de potencia conmutados son una realidad desde hace varias décadas



a)



b)

Figura 18. a) Amplificador de audio realizado con transistores trabajando en zona lineal. Las dimensiones del circuito impreso son 15,5 cm x 10,6 cm, y la altura total, incluyendo todos los componentes, es aproximadamente 6,5 cm, por lo que ocupa un volumen aproximado de 1070 cm³. El amplificador es capaz de suministrar hasta 140 W en dos canales de 70 W. Su densidad volumétrica de potencia es de 0,13 W/cm³. b) Amplificador de audio realizado con transistores trabajando en conmutación. Sus dimensiones horizontales son de 16 cm x 7,5 cm, y su altura de 3 cm, por lo que ocupa un volumen aproximado de 360 cm³. Es capaz de suministrar 220 W en un único canal. Su densidad volumétrica de potencia es de 0,61 W/cm³, casi 5 veces mayor que la del amplificador anterior.

en el campo de la audiofrecuencia y se investigan técnicas para conseguir extender su uso hasta las comunicaciones en microondas, para llegar a compatibilizar la linealidad que estos amplificadores requieren cuando trabajan con señales moduladas de envolvente no constante, con un alto rendimiento energético. En este campo, las fronteras entre la electrónica de comunicaciones y la electrónica de potencia acaban siendo difusas.

Mi conclusión es que tratar de definir qué es la electrónica de potencia y cuáles son sus fronteras con otras partes de la electrónica no es una tarea sencilla, ya que estas fronteras no son muy claras y que, además, se está produciendo una exportación de soluciones tecnológicas desde la electrónica de potencia a otros campos, que dificulta, aún más, definir unas fronteras claras.

2.6 – La primera revolución en la electrónica de potencia: aparece el MOSFET de potencia

Voy a utilizar el ejemplo de la casa en la que me criaron mis padres como ejemplo de hogar de clase media durante los años 60 y 70. Cuando yo nací en el año 1958, me imagino que la única electrónica que había en el hogar de mis padres era un receptor de radio basado en válvulas termoiónicas. Tendría yo unos 6 o 7 años cuando llegó a casa una televisión *Telefunken*, también con válvulas termoiónicas casi exclusivamente (conservo su esquema eléctrico y he podido verificar que llevaba un rectificador de selenio y algunos diodos de germanio en los demoduladores de audio y vídeo). Poco después, mi padre compró un receptor de radio con transistores, de la marca *Vanguard* (el "*Ranger Transoceanic*"). En nuestra casa, para mi padre era el "transistor", acentuado como en inglés. Era la primera vez que entraban transistores en mi casa. Aún no había entrado la electrónica de potencia. A principio de los 70, se compró un nuevo receptor de televisión, del que no recuerdo la marca, ya con el canal en UHF incorporado. Era fácil averiguar que este receptor usaba una tecnología mixta de válvulas termoiónicas y transistores, ya que, nada más darle orden de encendido, el sonido del canal sintonizado aparecía en el altavoz, mientras que la imagen tardaba aún bastante en aparecer (un minuto, más o menos). Estaba claro que toda la parte de radiofrecuencia y de audio del receptor estaba realizada con transistores, pero también que una parte de la circuitería de vídeo estaba realizada con válvulas termoiónicas. Es posible que aquel receptor incorporara ya algún circuito electrónico de potencia, con algún transistor bipolar de potencia.

Los primeros circuitos electrónicos de potencia que yo conocí aparecían en una revista sobre montajes electrónicos que, de adolescente, yo compraba cada mes (la revista "Radiorama"). Se trataba de circuitos con un tipo de semiconductor de potencia que se llama "Triac" y que sigue utilizándose hoy en día en aplicaciones domésticas. Eran circuitos destinados a poder regular la velocidad de giro de taladradores o a cambiar la intensidad luminosa de las bombillas incandescentes que se utilizaban para iluminar. Algunos montajes usaban el reclamo de tratarse de

“luces psicodélicas”, ya que se podía acompañar la citada intensidad lumínica con la intensidad o el tono de la música, generando así un ambiente que podríamos calificar de “discotequero”. También aparecía de vez en cuando algún circuito de inversor, esencialmente destinado a poder utilizar aparatos que necesitaban 220 voltios de tensión alterna en el contexto de un automóvil, que sólo tenía disponibles tensiones continuas de 12 V (por ejemplo, aspiradoras de potencia reducida). En general, podríamos decir que, en la década de los años 70, la electrónica de potencia era ajena a la electrónica de consumo, tanto la que se encontraba en los hogares como en las oficinas de muchas empresas. La electrónica de potencia estaba presente casi exclusivamente en el mundo industrial, en el que las conversiones del formato de la energía eléctrica se realizaban casi únicamente con diodos y con tiristores SCR. Pese a que desde los 14 años yo “cacharreaba” con la electrónica, no tuve contacto con la electrónica de potencia hasta finales del cuarto curso de carrera, cuando se me adjudicó mi “Proyecto Fin de Carrera”. Esto fue un hito muy importante en mi vida, ya que a partir de entonces mi actividad profesional en electrónica quedó unida a esta materia.

Aunque no calificables estrictamente como circuitos electrónicos de potencia, en los años 70 y 80 fueron proliferando los sistemas de alimentación de muchos pequeños equipos de electrónica de consumo. Se trataba, esencialmente, de no depender de pilas para alimentarlos (fundamentalmente por razones de coste). En cierta medida, era recorrer el camino contrario al que ahora seguimos, pasando de “lo inalámbrico” (la alimentación con pilas), a “lo alámbrico” (depender de un pequeño equipo adicional, un enchufe y un cable); de baterías, casi no podemos ni hablar, ya que las únicas accesibles eran las de níquel-cadmio, y a un precio muchas veces prohibitivo. Los sistemas de alimentación se basaban en transformadores que trabajaban a 50 hercios y en circuitería con transistores bipolares operando en zona activa, que se encargaban de garantizar una tensión continua y de bajo rizado en la salida del alimentador. Sin embargo, a nivel de electrónica profesional, un cambio muy importante se estaba produciendo: el desarrollo de los sistemas de alimentación conmutados (las “fuentes conmutadas”). Yo era completamente ajeno a estos cambios, pero uno de los profesores de electrónica de la ETSII de Madrid, D. Javier Uceda Antolín (Figura 19), no lo era. Es justo rendir homenaje a nuestros maestros, y en este caso quiero volverlo a hacer a Javier Uceda, que tuvo la idea de empezar a explorar este terreno en mi Proyecto Fin de Carrera. La información que él recopiló de una publicación española (“Mundo Electrónico”), en la que se trataba de familiarizar al lector con las llamadas “fuentes conmutadas”, fue mi primera guía sobre el tema. Además, otro profesor, D. Fernando Aldana Mayor, se había ocupado de conseguir las actas de varias ediciones del congreso más importante en el mundo sobre electrónica de potencia: el “*IEEE Power Electronics Specialists Conference*”. Estas actas fueron la clave para estar en contacto con los avances en la electrónica de potencia. Entonces aún no había ninguna revista especializada en esta materia en el “*Institute of Electrical and Electronics Engineers*”, el famoso *IEEE*, aunque temas de electrónica de potencia aparecían con cierta frecuencia en otras publicaciones del contexto de la electrónica industrial y aeroespacial.



Figura 19. Cena de Navidad de la Cátedra de Electrónica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, en diciembre del año 1981. De derecha a izquierda aparecen los profesores Javier Uceda Antolín, Salvador Martínez García, Fernando Aldana Mayor y Pedro Martínez Martínez (que ha fallecido este año).

En todos los sistemas aeroespaciales, el peso es un parámetro a intentar minimizar. En los aviones, la distribución de energía eléctrica se realiza a 400 Hz (en vez de a 50 o 60 Hz, como en tierra) para aligerar el peso de los transformadores, bobinas y condensadores. En general, el tamaño y el peso de estos componentes disminuyen al aumentar su frecuencia de operación (esta afirmación también merecería algunos matices, que ahora voy a omitir). En el caso de los satélites y de las naves espaciales, la generación de energía eléctrica se realizaba frecuentemente en forma de tensiones continuas y había que desarrollar circuitería para su transformación. Eran los convertidores continua-continua, que como tenían que ser ligeros y eficientes (ser ineficientes también penalizaba su peso, debido a la inclusión de sistemas de refrigeración), debían trabajar en conmutación, operando a una frecuencia “razonable” en función de la tecnología de semiconductores del momento. Estos convertidores continua-continua conmutados, estudiados y desarrollados en el mundo aeroespacial, encontraron un par de importantísimos nichos de utilización en los años 70: los monitores de televisión y los ordenadores de sobremesa, los que pasaron a llamarse “los ordenadores personales”. Con sus consumos y sus necesidades energéticas, estos equipos necesitaban alimentarse desde la red eléctrica a través de un rectificador en puente de diodos que convirtiera la tensión alterna en tensión continua de alta tensión, que posteriormente se reducía y aislaba galvánicamente con uno o varios convertidores continua-continua conmutados. El transformador que proporcionaba el aislamiento galvánico en estos convertidores operaba a su frecuencia de conmutación, y ésta debía ser tan alta como permitieran los semiconductores de potencia del momento, siempre buscando una solución de compromiso entre el tamaño, por una parte, y el rendimiento energético por otra, ya que tanto el tamaño como el rendimiento disminuyen al aumentar la frecuencia de conmutación.

Para realizar los convertidores continua-continua conmutados de los años 70 se utilizaban transistores bipolares de silicio. Con ellos, las frecuencias de conmutación alcanzadas estaban en el entorno de los 20 kHz, cumpliendo la condición de que el ruido acústico debido a la magnetostricción de los transformadores y bobinas no fuera audible al ser humano. A esta frecuencia y con este tipo de transistores, las fuentes de alimentación todavía eran demasiado grandes y poco fiables, esto último debido esencialmente al mal comportamiento de los transistores bipolares de silicio de alta tensión trabajando en conmutación con cargas inductivas. En el caso de mi Proyecto Fin de Carrera, yo usaba 4 transistores bipolares en montaje “*Darlington*” (tipo MJ10009, de Motorola) en un convertidor en “Puente Completo”. Recuerdo lo complicado que era conseguir aquellos transistores, siempre a través de un importador, y lo fácilmente que eran dañados irreversiblemente en las pruebas. Los monitores de TV incorporaban transistores bipolares de silicio de alta tensión bastante robustos, como el BU208, pero que tenían ganancias de corriente tan bajas como casi 2 (un transistor de baja tensión tiene ganancias de corriente frecuentemente comprendidas entre 50 y 200). Cuando yo acabé mi titulación de Ingeniero Industrial y los transistores bipolares de potencia eran los masivamente utilizados, creo que en la casa de mis padres (en la que yo vivía) sólo había un convertidor continua-continua conmutado.

Unos pocos años antes, empezaron a aparecer los transistores MOSFET de potencia. Estos dispositivos desplazaron casi completamente a los transistores bipolares de potencia en una década. Ya a mediados de los años 80, nadie se planteaba el diseño de una fuente conmutada con bipolares (aunque en los prototipos de mi tesis, leída en 1985, aún usaba transistores bipolares, por la dificultad de obtención de MOSFETs de potencia en mi entorno). Sin embargo, en los proyectos que en breve empezamos a realizar con empresas del mundo de la aeronáutica (INISEL, hoy INDRA) y del mundo de las telecomunicaciones (*Alcatel*), todos los convertidores continua-continua conmutados que diseñamos usaban MOSFETs de potencia.

El MOSFET de potencia presenta importantes ventajas frente al transistor bipolar. La primera es su facilidad de control. La segunda es su mayor rapidez. En tercer lugar, no presenta la llamada “avalancha secundaria” en su proceso de apagado, lo que facilita un apagado más seguro cuando se conmuta una carga con comportamiento inductivo. En la práctica, con MOSFETs conmutando a frecuencias de 100 a 200 kHz se obtenían rendimientos semejantes a los obtenidos con transistores bipolares conmutando a frecuencias entre 15 y 20 kHz, y con una circuitería de control muchísimo más simple. Esto desató una sustitución progresiva de todas las fuentes de alimentación con transformadores de 50-60 Hz y con reguladores lineales, por fuentes conmutadas, claramente mucho más ligeras y pequeñas, que acabaron siendo tan fiables como las anteriores, y finalmente más baratas que ellas. Esto también coincidió con la proliferación de equipos de electrónica de consumo que se produjo en los años 80 (reproductores de cintas de vídeo, de CDs de audio y vídeo, etc.) y, sobre todo en los años 90, de ordenadores y sus periféricos (monitores, escáneres, impresoras, etc.) y la generalización de la telefonía móvil, con la necesidad de la carga de las baterías de los teléfonos. Todos podemos recordar equipos “pesados”, esencialmente por serlo su fuente de



Figura 20. Cargadores de batería de teléfonos móviles. El de la izquierda es un cargador con regulador lineal, que se alimenta de una red europea (exclusivamente) de entre 230 y 240 V de tensión alterna, siendo capaz de manejar a su salida una potencia de 4,8 W y pesando 252 gramos, lo que significa una densidad gravimétrica de potencia de 19 mW/g. El cargador de la derecha es un cargador con convertidor conmutado, que puede alimentarse con tensiones alternas comprendidas entre 100 y 240 V (tensión universal) y entrega 5 W a la salida, pesando 34 gramos, lo que significa una densidad gravimétrica de potencia de 147 mW/g (más de 7 veces mayor que en el caso anterior). El cargador de la izquierda no podría usarse en países como Estados Unidos, Canadá, México, Colombia, Venezuela, Japón o Taiwán, mientras que el de la derecha se puede utilizar en todo el mundo.

alimentación basada en un transformador de 50 Hz, sustituidos por otros mucho más ligeros, al ser alimentados desde una fuente conmutada; quizás la comparación de los primeros cargadores de las baterías de los teléfonos móviles y los actuales, camuflados en el enchufe, sea un buen ejemplo de lo que digo (Figura 20).

En resumen, si a principios de los años 80 lo más probable es que en la casa de una familia de clase media hubiera sólo un convertidor conmutado (dentro del monitor de TV), seguramente a principios de los 90 habría 4 o 5 (sumemos ahora a los anteriores los reproductores de vídeo, los equipos de audio, etc.), a principios de este siglo habría unos 10 (añadamos a los anteriores ahora ordenadores, sus monitores y periféricos, reproductores de nuevos formatos de audio y vídeo, etc.), para llegar a la actualidad, cuando encontramos en uno de nuestros domicilios fácilmente unos 50 o 60 convertidores conmutados, si sumamos a los anteriores la existencia de varios ordenadores fijos y portátiles (que además de sus "adaptadores", poseen otros convertidores conmutados internos), varios teléfonos móviles (con sus cargadores de baterías, Figura 21, y también otros convertidores conmutados internos), los teléfonos inalámbricos, los enrutadores que nos proveen de Wi-Fi, las consolas y demás artilugios para el juego electrónico, los elementos de limpieza y de bricolaje inalámbricos (que necesitan cargar sus baterías) y, finalmente, todas las "bombillas LED", que también incorporan en el casquillo un pequeño convertidor conmutado. Toda esta explosión de la electrónica de potencia en el entorno doméstico (un análisis semejante sería posible en el entorno profesional) ha sido posible por la aparición del MOSFET de potencia.

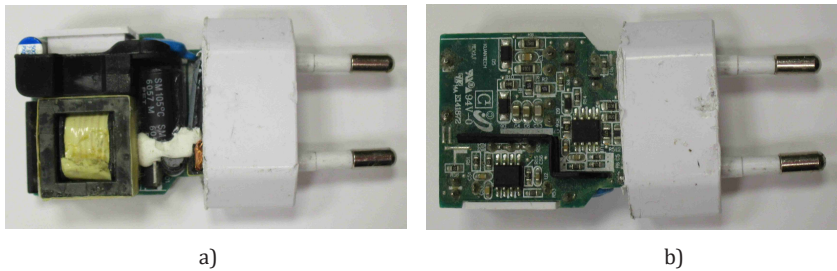


Figura 21. Cargador de batería de teléfono móvil realizado con convertidor conmutado. a) Cara del circuito impreso en la que aparecen los elementos reactivos del convertidor. b) Cara del circuito impreso en la que aparece la circuitería electrónica de control y de potencia.

2.7 – La segunda revolución en la electrónica de potencia: aparece el IGBT

En la década de los 80, el MOSFET se impuso al transistor bipolar por sus grandes ventajas frente a él. Algunas de estas ventajas están unidas intrínsecamente al hecho de que se trata de un dispositivo “unipolar”, lo que significa que es siempre el mismo portador de carga el responsable de la conducción de la corriente eléctrica (si el dispositivo es de “canal N”, son los electrones los responsables de la conducción de corriente, mientras que si es de “canal P” son los “huecos” los responsables de dicha conducción). Pese a sus ventajas en rapidez y facilidad de control, en los dispositivos unipolares no se produce un efecto claramente deseable para conseguir dispositivos que compatibilicen altas conducciones de corriente (cuando se comportan como interruptores cerrados) con capacidad de soportar grandes tensiones (cuando se comportan como interruptores abiertos): la modulación de la conductividad. Conviene aclarar que la modulación de la conductividad sí es posible en los transistores bipolares de potencia, siendo ésta casi la única ventaja que estos transistores presentan frente a los MOSFETs. Por esa razón, las características de los MOSFETs de potencia se deterioran cuando se diseñan para las condiciones extremas que acabo de citar. Debido a la imposibilidad de que se produzca modulación de la conductividad, los MOSFETs de potencia sólo dominaban el terreno de las aplicaciones ligadas a hogares y oficinas, pero no el terreno de las aplicaciones industriales.

Los motores eléctricos más atractivos desde el punto de vista de la robustez y la falta de mantenimiento son aquellos a los que no hay que hacer llegar corriente eléctrica a la parte móvil de los mismos (el rotor), como son los motores asíncronos de “jaula de ardilla”, los motores de reluctancia variable y, en general, los motores sin escobillas. Aunque los motores de jaula de ardilla se pueden usar sin la ayuda de convertidores electrónicos de potencia, es necesario su uso si su velocidad de giro necesita ser controlada con precisión; en el caso de otros motores sin escobillas, su uso es imprescindible. Para motores de potencias relativamente pequeñas (hasta cientos de vatios), los convertidores realizados con MOSFETs de potencia eran adecuados. Si nos enfrentamos a aplicaciones industriales y de movilidad eléctrica, los MOSFETs de potencia no presentaban las características idóneas, especialmente por el aumento de sus pérdidas en conducción cuando se diseñan para tensiones

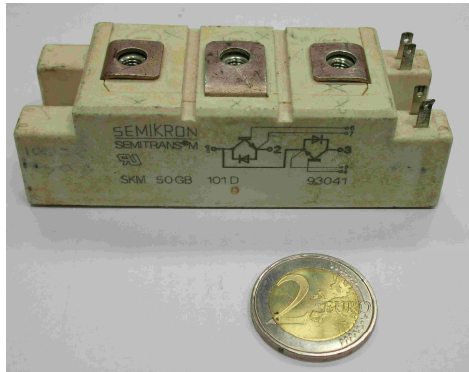


Figura 22. Módulo en el que se comercializan 2 IGBTs en configuración en medio puente. Se trata de un componente de principios de los años 90.

superiores a los 400 voltios. Debido a ello, a finales de los años 80 se fueron investigando nuevos dispositivos de potencia que pudieran compatibilizar la facilidad de control de los MOSFETs con la posibilidad de presentar la modulación de la conductividad propia de los transistores bipolares de potencia. El dispositivo que finalmente fue desarrollado por Bantval Jayant Baliga fue el que ha supuesto una segunda gran revolución en la electrónica de potencia: el transistor bipolar de puerta aislada (Figura 22), conocido por sus siglas como IGBT (del inglés, *Insulated-Gate Bipolar Transistor*) [9]. El IGBT es un dispositivo que podríamos calificar como híbrido entre un MOSFET y un transistor bipolar, y que compatibiliza la facilidad de control de un MOSFET con la modulación de la conductividad de un bipolar, sacrificando parte de la rapidez de un MOSFET, pero sin llegar a la lentitud de un bipolar. Existen en la actualidad IGBTs que pueden llegar a soportar, en estado de bloqueo, tensiones tan altas como 6.500 voltios y de conducir hasta 750 amperios. Verdaderos titanes de la electrónica de potencia.

Los IGBTs son los dispositivos de potencia que integran los convertidores electrónicos de potencia que son imprescindibles en la movilidad eléctrica y el aprovechamiento eficiente de las energías solar y eólica. Aunque en todos los casos hay elementos críticos en estas aplicaciones (motores de imanes de “tierras raras”, como el Neodimio, baterías, células fotovoltaicas, etc.), los convertidores electrónicos de potencia son imprescindibles y, al manejar toda la potencia demandada o generada, su rendimiento energético es absolutamente crucial para la competitividad del sistema completo. Las características de los IGBTs siguen mejorando, incrementando sus capacidades de manejo de potencia y su rapidez, siempre por debajo de la de los MOSFETs debido a la llamada “cola de corriente” que aparece en el proceso de apagado. Pese a sus innegables ventajas sobre los MOSFETs, las limitaciones en rapidez y las limitaciones propias del material en el que se construyen, que es silicio, hacen que la investigación en nuevos dispositivos electrónicos de potencia siga avanzando, aunque por otro camino ahora.

2.8 – La tercera revolución en la electrónica de potencia: cambiando de material

Los primeros transistores se construyeron en germanio. Los transistores que se usaban en la electrónica convencional de los años 60 eran de este material, incluidos algunos transistores de potencia pensados para la realización de amplificadores de audio. En los años 70 se produjo el gran cambio del germanio al silicio por muchas razones, una de las cuales es la limitada capacidad del germanio para trabajar correctamente cuando el material está caliente. Éste es un problema intrínseco del funcionamiento de los dispositivos electrónicos basados en semiconductores. En todos ellos debe haber zonas del material ricas en electrones con capacidad de conducir corriente eléctrica y otras zonas donde no sólo existen pocos de estos electrones, sino que se han perdido electrones menos energéticos, de los que eran compartidos entre átomos vecinos formando enlaces covalentes. A los primeros se les denomina “electrones” sin más, mientras que a las ausencias de electrones anclados al átomo (ausencias de electrones compartidos en enlaces covalentes, que son los llamados “electrones de valencia”) se les denomina “huecos”. El desequilibrio entre electrones y huecos se consigue dopando (es decir, contaminando) de manera controlada el material base con sustancias que reciben el nombre de donador (si generan zonas de alta concentración de electrones) o aceptador (si generan zonas de alta concentración de huecos). Además, en todas las partes del material existen algunos electrones y algunos huecos, que se han generado, en igual número, porque los electrones tienen tendencia creciente a liberarse de la atracción del núcleo del átomo (a romper los enlaces covalentes) al aumentar la temperatura. Si la temperatura es suficientemente alta, las idénticas cantidades de electrones y huecos generados por este proceso enmascararían a las desequilibradas cantidades de los mismos generadas por el dopado. El resultado es que el dispositivo no va a funcionar como estaba previsto.

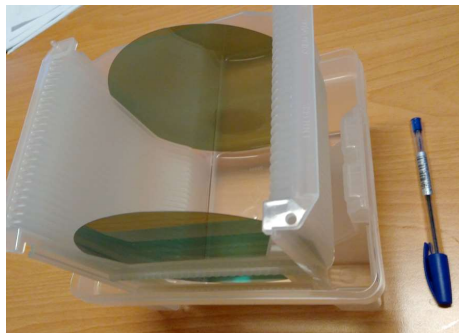


Figura 23. Caja de transporte de obleas de 6 pulgadas de diámetro de material semiconductor, conteniendo 2 obleas de carburo de silicio usadas para construir transistores de potencia. Al tratarse de un semiconductor de banda prohibida ancha, los fotones de la luz visible atraviesan el material sin ser absorbidos por él, por lo que las obleas se muestran con gran transparencia. Fotografía tomada por Filip Dominec.

La energía que un electrón necesita para escaparse del enlace covalente y vagar libremente por la estructura cristalina depende del material. En teoría de bandas de energía, esta energía es la energía de la llamada “banda prohibida” del semiconductor, que en inglés es conocida como “*gap*”. Cuanto mayor sea la energía que define la banda prohibida del semiconductor, menos enlaces covalentes se romperán a una temperatura dada. Por tanto, los semiconductores de gran energía de la banda prohibida (gran anchura de la misma) pueden trabajar a mayor temperatura sin que la generación de pares electrón-hueco enmascare y uniformice las concentraciones de electrones y huecos en las distintas partes del dispositivo. Por ejemplo, el germanio tiene una anchura de banda prohibida de sólo 0,66 eV, mientras que el silicio la tiene de 1,12 eV, el arseniuro de galio de 1,42 eV, el carburo de silicio de 2,86 eV (Figura 23) y el nitruro de galio de 3,4 eV (Figura 24). Estos materiales son sólo unos ejemplos de todos los adecuados para realizar dispositivos electrónicos, pero he nombrado el carburo de silicio y el nitruro de galio porque ellos son los protagonistas de esta tercera revolución que estamos viviendo en la electrónica de potencia. No es sólo la gran anchura de la banda prohibida lo que hace a estos materiales semiconductores atractivos para la realización de dispositivos electrónicos de potencia, sino que además presentan otras características deseables para esta aplicación, que otros materiales semiconductores no presentan. Quizás la más importante es que el campo eléctrico de ruptura es en ambos materiales claramente más alto que en el silicio (en el caso del nitruro de galio, más de 10 veces mayor que en el silicio y más de 30 veces mayor que en el germanio). Otra característica muy deseable es poseer una alta conductividad térmica, propiedad en la que destaca el carburo de silicio (3 veces mayor conductividad térmica que el silicio), mientras que el nitruro de galio presenta una conductividad térmica ligeramente menor que la del silicio.

Si prescindimos de un montón de consideraciones tecnológicas, que son importantísimas, y analizamos los límites del carburo de silicio en comparación con los del silicio, obtendremos que con carburo de silicio podemos realizar dispositivos

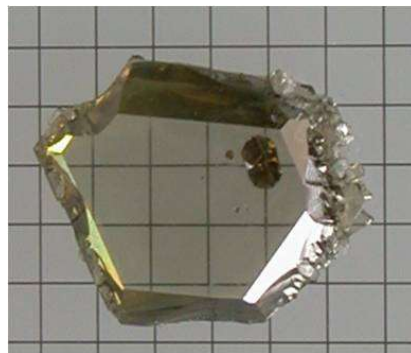


Figura 24. Cristal de nitruro de galio. Por las mismas razones que las obleas de carburo de silicio, este cristal es prácticamente transparente.

que, soportando la misma tensión de bloqueo, van a ser 90 veces menos resistivos en conducción. Si los diseñamos para tener la misma resistencia en conducción, los de carburo de silicio serán capaces de bloquear tensiones 9 veces mayores. Pero, ¿a qué distancia estamos de alcanzar estos límites? Voy a referirme en este caso a los MOSFETs de potencia. En silicio se comercializan dispositivos capaces de soportar hasta 1000 voltios. En carburo de silicio los encontramos de hasta 3.300 voltios ya comercializados (y un fabricante afirma tenerlos de 6.500 voltios). A nivel de investigación, se presentan dispositivos de 10.000 voltios.

Los MOSFETs de potencia de carburo de silicio están intentando competir con los IGBTs de silicio. Sin duda, los mejoran en rapidez y pérdidas, pero su mayor precio limita la extensión de su uso. Por otra parte, la consecución de IGBTs de carburo de silicio es un objetivo en el que se lleva mucho tiempo trabajando, sin todavía dispositivos disponibles en el mercado. Los prototipos de laboratorio llegan a bloquear 15.000 voltios. ¿Llegaremos a ver IGBTs capaces de bloquear 60.000 voltios, dado que se comercializan IGBTs de silicio que llegan a bloquear 6.500 voltios? Aún estamos lejos de ello.

El carburo de silicio se postula como el material para dispositivos de muy altas tensiones y potencias. En contraposición, el nitruro de galio se postula para otro importante nicho: el de los convertidores en los que la frecuencia de conmutación tiene que ser especialmente alta. Con nitruro de galio no se construyen MOSFETs de potencia, sino otro tipo de transistor, los HEMTs (del inglés, *High-Electron-Mobility Transistor*), que son transistores de alta movilidad de electrones, cuyo principio de funcionamiento es distinto. Son transistores de lo que se denomina “heterounión”, lo que significa que existen en su estructura uniones entre materiales semiconductores distintos, en concreto entre nitruro de galio y nitruro de galio aluminio. Los HEMTs se construían en arseniuro de galio (es decir, heterouniones de arseniuro de galio y arseniuro de galio aluminio) para aplicaciones de amplificación de microondas, mejorando la capacidad de evacuar el calor generado al construirse en nitruro de galio (Figura 25), en vez de en arseniuro de galio. La tecnología de dispositivos de microondas ha sido exportada a la electrónica de potencia, aunque comportamientos de los HEMTs que no generan problemas en la tecnología de microondas sí los generan en electrónica de potencia. En particular, los dispositivos HEMT son, de natural, dispositivos “normalmente cerrados”, lo que significa que se comportan como cortocircuitos (en vez de como circuitos abiertos) cuando no tienen señal de control. Su uso requiere, o cambios sustanciales en el diseño de los convertidores, o modificaciones en el diseño interno de los propios HEMTs, o su uso asociado a otros dispositivos electrónicos de potencia en lo que se denomina “configuración cascodo”. Las tensiones máximas que pueden bloquear estos dispositivos son más bajas que las que pueden bloquear los MOSFETs de carburo de silicio (las más altas son de 900 voltios, aunque la mayoría de los dispositivos comerciales se quedan en 650 voltios).

Los HEMTs de nitruro de galio encuentran su nicho de uso en competición con los MOSFETs de silicio. Al igual que la competición entre MOSFETs de carburo de silicio e IGBTs de silicio, los dispositivos de nitruro de galio superan a los de silicio

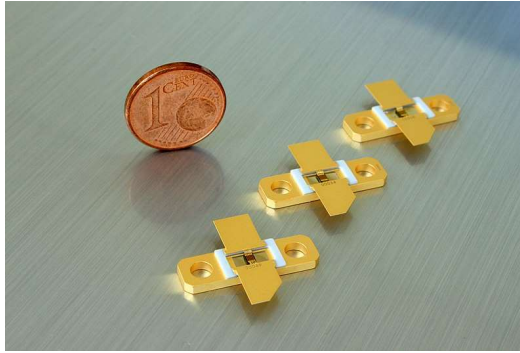


Figura 25. Transistores de alta movilidad de electrones (HEMTs) de nitruro de galio, diseñados para amplificadores de potencia de radiofrecuencia. Han sido fabricados por el *Ferdinand-Braun-Institut*.

en rapidez, pero también en coste. Se acabarán imponiendo en aplicaciones en las que el balance entre ambas características sea favorable a los primeros.

Las tecnologías de los dispositivos de carburo de silicio y de nitruro de galio no están todavía completamente maduras. Se han ido superando importantes retos, especialmente los referentes a cómo debe ser una parte muy crítica de estos dispositivos (el aislante a colocar entre su “puerta” y su “canal”), pero aún quedan otros por superar. Pese a ello, otros materiales de banda prohibida ancha se están estudiando también para realizar dispositivos electrónicos de potencia. Mención especial merecen el diamante, el nitruro de aluminio y el óxido de galio. Aquí el camino hasta tener dispositivos comercializados es aún muy largo y quizás nunca sea recorrido. Sin embargo, también es posible que alguno de ellos protagonice una cuarta revolución en la electrónica de potencia.

3. Mi papel en la electrónica de potencia

Antes de comenzar a describir mis aportaciones en el campo de la electrónica de potencia, debo aclarar que todas ellas se centran en el estudio de convertidores electrónicos de potencia que trabajan como núcleo de sistemas de alimentación de cargas que requieren tensión continua para su operación. Estas cargas son, en la mayoría de los casos, otros equipos electrónicos, que van desde ordenadores, sistemas de comunicación y equipos de electrónica de consumo, hasta focos de luz. Todos estos equipos consumen potencias relativamente bajas (por debajo de 10 kW) y son una versión escalada de los convertidores electrónicos de potencia que integran los equipos que están adquiriendo un papel fundamental en la descarbonización, como son los que se encargan de gestionar la carga y descarga de baterías, de controlar el par y la velocidad de los motores eléctricos en aplicaciones industriales y de movilidad, o de compatibilizar la generación eólica y solar con la red de distribución de energía eléctrica. En resumen, mi trabajo en electrónica de potencia ha estado centrado en los convertidores que han tenido un crecimiento continuado desde los años 70 y que son anteriores a la necesidad actual de un mundo descarbonizado. Estos últimos van a experimentar un crecimiento exponencial en los próximos años. Pese a que existen diferencias entre ellos, la base conceptual de todos ellos es la misma, y los conocimientos acumulados sobre unos están haciendo posible el crecimiento exponencial de los otros.

3.1 – Dos por el precio de una

A principios de los años 80, las fuentes de alimentación conmutadas eran aún subsistemas relativamente caros en comparación con las fuentes lineales. Entre sus componentes, eran los dispositivos semiconductores los que podían considerarse más costosos. También se daba la circunstancia de que muchos equipos necesitaban varias tensiones de alimentación. Debido a ambos factores, resultaba atractivo conseguir que, desde una única fuente conmutada, se pudieran obtener varias tensiones de salida, configurando las llamadas fuentes conmutadas multisalida. Sin embargo, en los convertidores continua-continua que forman el núcleo de las fuentes conmutadas se emplea un único parámetro para controlar la tensión de salida (el llamado “ciclo de trabajo”). Con un único parámetro de control, sólo se puede controlar completamente una salida. De hecho, las fuentes conmutadas multisalida sólo garantizaban una tensión de salida perfectamente controlada, mientras que las tensiones en las otras salidas no quedaban completamente reguladas. El término usado para describir la situación en la que quedaban las otras salidas es “regulación cruzada”, y viene a significar que las tensiones en las otras salidas quedan pobremente reguladas. Pese a ello, para algunos tipos de cargas, esta regulación, relativamente pobre, era (y es) suficiente. En esta situación, mi director de tesis doctoral (el profesor Javier Uceda Antolín) me planteó el estudio de la regulación cruzada como tema central de mi trabajo. Es de destacar que la regulación cruzada se puede mejorar eligiendo determinadas topologías de convertidores continua-continua y, sobre todo, con un diseño adecuado del elemento magnético (transformador o bobina de múltiples devanados secundarios)



Figura 26. Fotografía tomada en el congreso *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, celebrado el año 1985 en Toulouse (Francia). De izquierda a derecha aparecen Piero Maranesi, Robert David Middlebrook y su esposa. El profesor Middlebrook ha sido, probablemente, la persona más significativa en el estudio de los convertidores CC/CC. Falleció el año 2010.

que se encarga de hacer posible la presencia de varias tensiones de salida. El diseño optimizado del elemento magnético es extremadamente complejo y sólo se puede abordar con garantías si se utilizan programas adecuados basados en “elementos finitos”, que sean capaces de resolver con precisión el problema electromagnético. Estos programas no estaban disponibles en aquellos años, y mi tesis se dirigió hacia la posibilidad de controlar con precisión dos salidas. Significaba renunciar a mejorar el control de más de dos salidas (sin conseguir un control completo más que en una), para buscar el control completo de sólo dos.

Afortunadamente dimos con varias formas de conseguirlo, siempre usando dos parámetros de control: el tradicional ciclo de trabajo y la frecuencia de conmutación. Los resultados tuvieron una amplia difusión. Por primera vez, un grupo de investigadores españoles publicamos un artículo en el “*IEEE Power Electronics Specialists Conference*” [10], el congreso que tanto me había ayudado a comprender los avances que en este campo se estaban produciendo. Esto ocurría en 1985 (Figura 26), y en las siguientes ediciones de este congreso seguimos publicando algunas de las ideas desarrolladas en mi tesis (y algunas otras que surgieron después sobre el mismo tema). También este trabajo dio origen a la primera publicación de españoles (al menos de españoles trabajando en España) en la revista del *IEEE* especializada en electrónica de potencia (la “*IEEE Transactions on Power Electronics*”) en 1987 [10].

3.2 – Que la electrónica solucione los problemas que la electrónica crea

La proliferación de fuentes conmutadas conectadas a la red de distribución de corriente alterna empezó a generar un problema grave a finales de los años 80. La gran ventaja en peso y volumen de las fuentes conmutadas, frente a las fuentes lineales, radica en el menor tamaño de los elementos magnéticos, esencialmente del

elemento que confiere al sistema aislamiento galvánico. Para evitar el uso de un transformador trabajando a 50 Hz, en una fuente conmutada la tensión de red es rectificadas con un puente de diodos y posteriormente filtrada con un filtro sin elementos magnéticos, compuesto exclusivamente por un condensador electrolítico. Posteriormente aparece, conectado en cascada, un convertidor continua-continua, en el que un elemento magnético que trabaja a la frecuencia de conmutación confiere al sistema el necesario aislamiento galvánico (Figura 27a).

El problema de esta estructura está en la combinación “puente de diodos”-“condensador electrolítico”, ya que genera una forma de onda de corriente por la red eléctrica muy distinta a la senoidal. En tiempos anteriores, en los que la mayoría de las cargas conectadas a la red eléctrica generaban un consumo senoidal, la presencia de unas pocas fuentes conmutadas no había supuesto un problema grave. Sin embargo, cuando se empezaban a acumular fuentes conmutadas con la citada estructura, el problema era patente. Esto sucedía en lugares en los que existían, por ejemplo, muchos ordenadores personales trabajando simultáneamente. La acumulación de “cargas electrónicas” generaba un problema de “calidad de red” que era preciso atajar. Aunque el problema era realmente debido a la gran cantidad de armónicos que poseía la corriente de red cuando se usaban las fuentes conmutadas, el problema fue descrito con el paraguas conceptual del “bajo factor de potencia” que se medía. Para atajar el problema de bajo factor de potencia que generaba la electrónica, había que usar más electrónica, y usarla sabiamente para “corregir el factor de potencia”.

Por aquellos años, establecimos relaciones con la empresa *Alcatel*, que tenía un centro de I+D corporativo en Madrid para trabajar en los temas ligados a la alimentación de los sistemas de telecomunicación (sobre todo, de las centrales

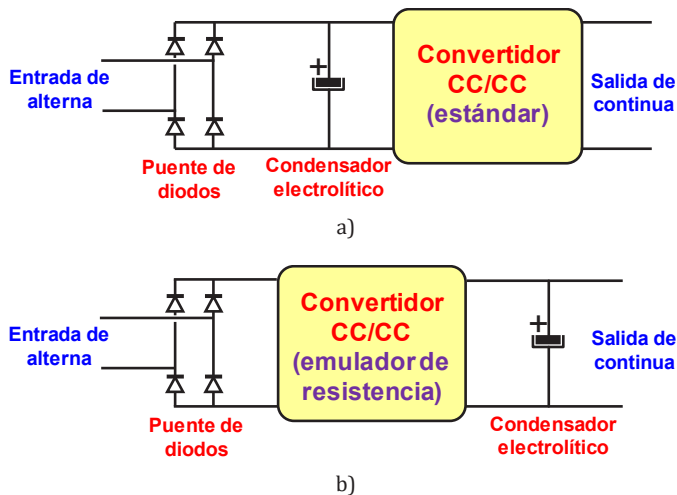


Figura 27. Esquema de convertidores CA/CC usados como fuentes de alimentación conmutadas. a) Estructura sin corrección del factor de potencia. b) Estructura con corrección del factor de potencia. En este último caso, el convertidor CC/CC debe trabajar como "emulador de resistencia", es decir, con el sistema de control adecuado que permita proporcionalidad entre tensión y corriente en su entrada.

telefónicas). Ellos estaban interesados en evaluar las soluciones que iban surgiendo para mitigar el problema descrito. He de enfatizar que la relación que establecimos con *Alcatel* fue extraordinariamente creativa y provechosa para ambas partes, abordando varios temas que entonces eran de especial interés para todas las empresas que desarrollaban sistemas de alimentación para sus equipos o para comercializarlos para su uso en otros equipos.

El interés de *Alcatel* en la exploración de circuitos simples y eficientes en la corrección del factor de potencia en sus sistemas de alimentación nos llevó a explorar soluciones alternativas a la estructura habitualmente propuesta. Ésta se basaba (y se basa) en colocar en la entrada, tras el puente de diodos, un primer convertidor continua-continua, llamado “emulador de resistencia” (Figura 27b), que es el encargado de conseguir proporcionalidad entre la tensión senoidal y la corriente en la entrada. En este contexto, estudiamos el uso del convertidor *SEPIC* como emulador de resistencia. En 1991, un grupo brasileño publicó un primer estudio del uso de este convertidor en un congreso anterior en unos cuatro meses al “*IEEE Power Electronics Specialists Conference*”, que fue donde nosotros lo publicamos ese mismo año [11]. Su estudio era más restringido, ya que sólo abordaba el trabajo de este convertidor en el llamado “modo continuo de conducción”. Nuestro estudio, enviado a publicación antes de ser público el suyo, abordaba no sólo el modo continuo de conducción, sino también el llamado “modo discontinuo de conducción”, además de también abordar el uso de un interruptor de potencia “cuasirresonante”, en vez de un interruptor de potencia convencional. El estudio del modo discontinuo de conducción en el convertidor *SEPIC* operando como corrector del factor de potencia fue especialmente importante, ya que por primera vez se establecía que este convertidor puede trabajar como emulador de resistencia automático cuando opera en este modo de conducción. Otros investigadores descubrieron posteriormente que tanto el convertidor de Cuk como el convertidor Zeta poseían esta misma propiedad. Nuestro trabajo en esta línea continuó con varios artículos posteriores, uno de los cuales (publicado en 1997) ha tenido una gran repercusión [12]. También es reseñable que el método seguido para estudiar el modo discontinuo de conducción en el *SEPIC* dio origen a una generalización del estudio de las fronteras de los modos de conducción en los convertidores continua-continua usados como emuladores de resistencia, también ampliamente referenciada [13].

Los convertidores CA/CC con corrección del factor de potencia basados en la colocación de un emulador de resistencia entre el puente de diodos y el condensador electrolítico de salida (Figura 27b), necesitan que el convertidor CC/CC que actúa como emulador de resistencia posea aislamiento galvánico. Esto penaliza su rendimiento, en gran medida por el hecho de que este convertidor trabaja con enormes variaciones en su tensión de entrada. La alternativa más habitual es realizar la conversión en dos etapas (Figura 28a). La primera etapa de conversión consiste en un convertidor llamado “convertidor elevador”, que consigue muy altos rendimientos (pese a trabajar con tensión de entrada muy variable), pero que no posee aislamiento galvánico. Esta primera etapa es seguida habitualmente por un segundo convertidor continua-continua, que trabaja con tensiones de entrada casi

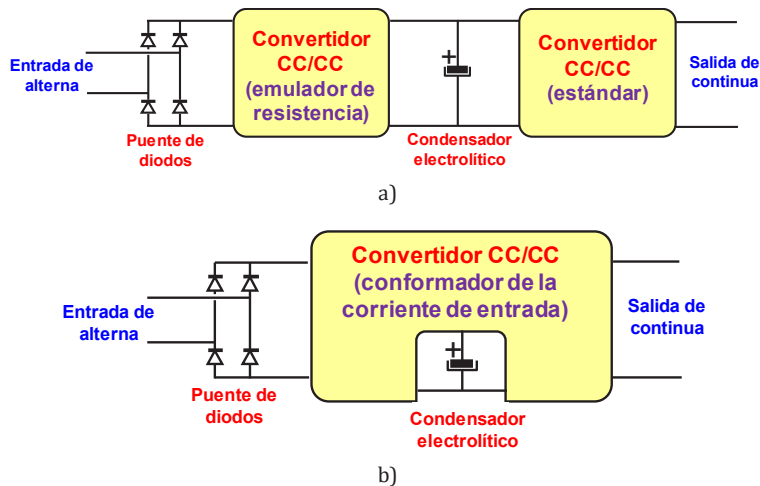


Figura 28. El esquema de la figura 27b presenta problemas de respuesta dinámica cuando se diseña para alto factor de potencia en la entrada. a) Alternativa basada en dos etapas de conversión; una de ellas debe poseer aislamiento galvánico. b) Convertidor CA/CC con conformación de la corriente de entrada, en el que se comparten componentes de las dos etapas de conversión y se sacrifica calidad en la corriente de entrada para conseguir buena respuesta dinámica en la salida.

constantes, por lo que consigue altos rendimientos, pese a poseer aislamiento galvánico. Esta segunda etapa también se encarga de dotar al conjunto de la rapidez de respuesta dinámica que la primera etapa no puede suministrar. En este contexto, nos planteamos la posibilidad de explorar segundas etapas con un rendimiento extremadamente alto (del orden del 98%), acudiendo a ideas originales nuestras (posteriormente patentadas), si bien los convertidores que conseguían estos extraordinarios rendimientos no podían poseer aislamiento galvánico. Esto implicaba que esta característica tenía que recaer en la primera etapa. Nosotros desarrollamos dos soluciones originales que fueron patentadas por *Alcatel* [14] y [15] (una de ellas en los principales países del mundo) y ampliamente publicadas [16]-[18]. La basada en el convertidor que bautizamos como “*TIBuck*” [17], es presentada a día de hoy como ejemplo de convertidor con procesado parcial de la energía. Nosotros mismos hemos propuesto versiones modificadas de este convertidor, que hemos utilizado en otras aplicaciones que serán descritas posteriormente.

La estructura de dos etapas de conversión, emulador de resistencia más segundo convertidor de respuesta dinámica rápida, es una solución relativamente cara. Desde los primeros años 90 surgió la idea de intentar conseguir fundir las dos etapas en una única (Figura 28b), sacrificando calidad en la reproducción de la forma de onda de corriente de entrada, si fuera preciso. En esta línea, desarrollamos una idea distinta a las planteadas hasta ese momento, basada en uno de los circuitos propuestos en mi tesis doctoral para controlar dos salidas. Pertenece a la categoría de los convertidores alterna-continua con “conformación de la corriente de entrada” y consistía en generar una salida adicional en un convertidor continua-continua que

presentara alta impedancia de salida y muy baja tensión a plena carga. De hecho, esta salida adicional se comportaba como una fuente de tensión con una resistencia “sin pérdidas” en serie, y con ella era posible llegar a una solución de compromiso entre simplicidad, alto rendimiento, bajo coste y buena respuesta dinámica, por un lado, y contenido armónico acotado en la corriente de entrada, por otro, siempre cumpliendo las normas sobre baja inyección de armónicos en la red eléctrica. Como en los otros casos, los artículos publicados, primero en congresos del *IEEE* y posteriormente en las revistas de esta institución, alcanzaron una importante repercusión [19]-[22]. Los circuitos planeados resultan muy interesantes para aplicaciones en las que la tensión de entrada sea o bien la europea, o bien la americana, pero no para los casos en los que el equipo tenga que operar con ambas tensiones indistintamente, lo que recibe el nombre de “tensión universal”.

La idea de llegar a soluciones de compromiso para simplificar la estructura de dos etapas en los convertidores alterna-continua siguió siendo importante en el contexto de proyectos con otras empresas. A principios del presente siglo establecimos contacto con una importante firma del mundo de los amplificadores de audio, la empresa alemana *Behringer*. Esta empresa estaba desarrollando amplificadores conmutados y era preciso que estos amplificadores conmutados se alimentaran desde fuentes conmutadas, para así conseguir una reducción realmente significativa de peso y volumen (Figura 29). Con restricciones de coste, la estructura de dos etapas no era la más adecuada, y tampoco lo era la de “conformación de la corriente de entrada”, por la necesidad de que el equipo pudiera trabajar con tensión

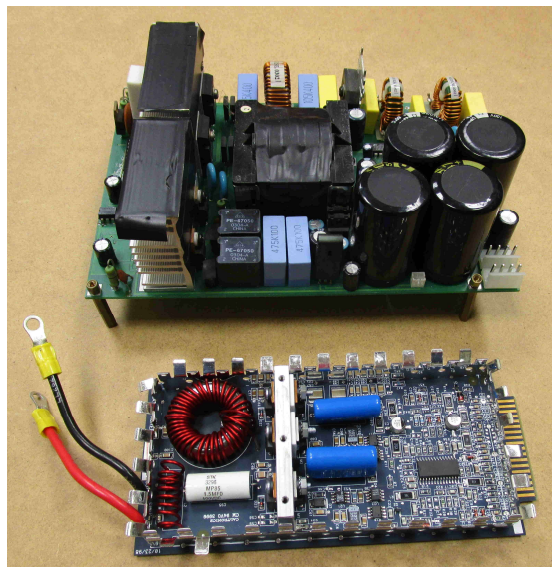


Figura 29. Fuente de alimentación con corrección del factor de potencia (arriba) desarrollada por el grupo de investigación SEA, de la Universidad de Oviedo, para alimentar el amplificador de audio conmutado (abajo) desarrollado por la empresa alemana *Behringer*.

universal. Por tanto, había que explorar nuevas opciones. Era bien conocido que usar una estructura de puente de diodos seguido de un convertidor continua-continua con aislamiento galvánico trabajando como emulador de resistencia (Figura 27b) podía generar las tensiones de alimentación del amplificador de audio, pero con una respuesta dinámica inaceptablemente lenta para la aplicación. Esta deficiencia en la respuesta dinámica es consecuencia del tipo de control necesario para obtener una corriente muy senoidal en la entrada de alterna. La idea en este caso fue explorar una solución de compromiso entre respuesta dinámica y contenido armónico indeseado en la corriente de entrada. El estudio, además de satisfacer las necesidades del proyecto en el que surgió, dio origen a diversos artículos, en los que se establecían los límites dinámicos alcanzables en función de la norma sobre contenido armónico aplicable a cada tipo de equipo [23]-[26].

La limitación de armónicos en la corriente de entrada en convertidores CA/CC monofásicos es un tema en el que hemos desarrollado numerosas soluciones alternativas, que tienen especial interés en determinados casos particulares. Algunos de ellos fueron surgiendo posteriormente al planteamiento inicial de estas soluciones, como veremos en breve al hablar de la alimentación de los LEDs (del inglés, *Light-Emitting Diodes*) destinados a iluminación [27] y [28]. Cualquiera de ellas puede encontrar uso en aplicaciones futuras.

3.3 – Tensiones de alimentación muy bajas para velocidades muy altas

A comienzos de los años 90, yo había dejado mi puesto de Profesor Titular en la Universidad de Oviedo y era Profesor Titular en la Universidad Politécnica de Madrid. En aquellos tiempos, la digitalización de los sistemas telefónicos originó un cambio sustancial en las necesidades de alimentación de las centrales telefónicas. Eran los años de intensísima colaboración con *Alcatel*, en los que esta empresa necesitaba desarrollar sistemas de alimentación con tensiones de salida más bajas que las que habían sido hasta entonces habituales. La generación masiva de tensiones de 5 V y de 3,3 V debía sustituir a la de 48 V. Además, las tensiones de alimentación de todos los circuitos digitales tenían que ir disminuyendo para conseguir que dichos circuitos trabajaran con pérdidas de conmutación razonables cuando se quería aumentar la velocidad de conmutación. Recuerdo perfectamente que la CPU (del inglés *Central Processing Unit*, traducido como Unidad Central de Procesos) del primer ordenador personal que tuve (año 1995), poseía un reloj que conmutaba normalmente a 50 MHz (y excepcionalmente a 66 MHz), mientras que la CPU de un ordenador actual puede superar los 4 GHz. Las CPUs de los ordenadores actuales se alimentan a tensiones menores de 1 V. En resumen, en electrónica digital la alta velocidad de conmutación sólo es posible en la práctica a bajas tensiones de alimentación.

La generación de tensiones de 5 o 3,3 V se realizaba con menor rendimiento que la generación de 48 V, debido a la caída de tensión en los diodos rectificadores de salida de los convertidores CC/CC, que resulta ser proporcionalmente mucho más significativa cuando se pretenden obtener bajas tensiones de salida. Se había

desarrollado la idea de usar transistores bipolares para sustituir a los diodos de salida, realizando lo que ya se conocía como “rectificación síncrona”. La rectificación síncrona con transistores bipolares imponía limitaciones importantes en la frecuencia de conmutación del convertidor continua-continua. Sin embargo, en la década anterior había comenzado una sustitución masiva de los transistores bipolares por los MOSFETs, y era necesario explorar su uso como rectificadores síncronos. Al contrario que los diodos, que no poseen terminal de control, todos los transistores lo poseen, y cuando son usados como rectificadores síncronos deben recibir las señales adecuadas en dichos terminales. En aquellos años, y para obtener tensiones de salida de 5 o 3,3 V, las señales de control adecuadas de los rectificadores síncronos no podían obtenerse desde circuitos integrados específicos, por la dificultad de su sincronización con los circuitos integrados que controlaban los transistores principales del convertidor. Como en todos estos casos los convertidores debían poseer un transformador que les dotara de aislamiento galvánico, era posible utilizar las señales eléctricas presentes en el transformador para gobernar los rectificadores síncronos, técnica que recibía el nombre de rectificación síncrona autoexcitada. Sin embargo, en aquellos momentos existían dos dificultades clave a superar:

- La falta de MOSFETs adecuados para la aplicación, ya que sus resistencias de canal en conducción eran excesivamente altas para las necesidades reales.
- La necesidad de explorar (y encontrar) topologías de convertidores continua-continua adecuadas para la rectificación síncrona autoexcitada, especialmente por no existir “tiempos muertos” en las tensiones en los devanados del transformador.

La necesidad de diseñar MOSFETs de potencia específicos para su uso como rectificadores síncronos llevó a *Alcatel* a entrar en contacto con el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona, lo que también supuso que nosotros entráramos en contacto con ellos. Este contacto también ha sido especialmente útil para nosotros, y yo he aprendido mucho de algunos de sus investigadores (aquí quisiera recordar a Pepe Millán, Figura 30, desgraciadamente ya fallecido). Con la tecnología existente entonces, para conseguir bajas resistencias de canal en conducción no había otra posibilidad que la de colocar muchas celdas unitarias en paralelo, lo que aumentaba las capacidades parásitas del dispositivo. Para que las altas capacidades parásitas resultantes no fueran un problema, había que explorar la posibilidad de que el convertidor tuviera una estructura resonante compatible con la rectificación síncrona, lo que no se había estudiado hasta ese momento [29]. También resultaba importante que las capacidades parásitas tuvieran bajas resistencias en serie, por lo que las puertas de los MOSFETs debían realizarse en aluminio, en vez de en polisilicio.

Por otra parte, la exploración de convertidores sin tiempos muertos en el transformador llevó al que entonces era nuestro doctorando, el hoy Catedrático de Universidad José Antonio Cobos Márquez, a proponer y experimentar varias topologías de convertidores continua-continua que exhibieran esta propiedad. Además de varias versiones del convertidor denominado “directo” (una de ellas



Figura 30. Fotografía tomada en Toledo el año 2014, en el transcurso de una reunión del Proyecto “*Silicon carbide power electronics technology for efficient devices (SPEED)*”, codificado como FP7-NMP3-LA-2013-604057. En este proyecto se trataba de desarrollar dispositivos de carburo de silicio para tensiones por encima de 3,3 kV (entre ellos MOSFETs), participando investigadores de 17 centros y 8 países. En la fotografía aparecen investigadores del Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona y de la Universidad de Oviedo. El tercero empezando por la izquierda es José (Pepe) Millán Gómez, líder tecnológico del proyecto. Pepe Millán falleció el año 2016. Paradójicamente, mi primer proyecto con Pepe Millán se centró en el desarrollo de MOSFETs en silicio de muy baja tensión, mientras que los MOSFETs de carburo de silicio de muy alta tensión estaban entre los objetivos del último.

patentada por *Alcatel* posteriormente) [30]-[33], se desarrolló el estudio del Convertidor en Medio Puente con Control Complementario [34]. De nuevo incorporado a la Universidad de Oviedo en 1992, seguimos colaborando con los colegas de la Universidad Politécnica de Madrid en el estudio del Convertidor en Medio Puente con Control Complementario, consiguiendo realizar su modelado dinámico de pequeña señal [35]. De este trabajo, únicamente publicado en congresos internacionales, estoy especialmente orgulloso, ya que el estudio realizado demostraba que en la función de transferencia de pequeña señal entre la variable de control y la tensión de salida existía un par de polos y un par de ceros adicionales a los del filtro de salida. La existencia de este doble par de polos y de ceros no había sido detectada ni prevista por los estudios previos realizados por otros investigadores y tiene importantes connotaciones en el diseño del convertidor y en el cálculo del regulador de su lazo de realimentación.

La realización de convertidores continua-continua que mantengan alto rendimiento cuando tienen que generar tensiones de salida bajas también ha seguido siendo un tema de estudio recurrente en mi trayectoria. Otros proyectos y publicaciones relacionadas con este asunto, ligadas tanto a los convertidores

alterna-continua con limitación de armónicos en la entrada, como a la iluminación con LEDs, han ido apareciendo en los sucesivos años, tanto incidiendo en el control de los rectificadores síncronos de forma autoexcitada como con excitación independiente [36]-[38].

3.4 – Electrónica de potencia para ayudar a generar luz

No cabe duda que el despliegue de la red eléctrica al final del siglo XIX y al comienzo del siglo XX se debe al uso de la electricidad para la iluminación. Durante mucho tiempo han convivido las bombillas incandescentes y los tubos fluorescentes en los entornos domésticos y profesionales, mientras que las lámparas de vapor de mercurio y de haluros metálicos dominaban el alumbrado público de exteriores. Las bombillas incandescentes operan con similares características cuando son recorridas por corriente continua y por corriente alterna, pero el resto de focos luminosos operan necesaria o preferentemente con corriente alterna, en algunos casos con ciertas ventajas si la frecuencia de la corriente alterna es claramente mayor que 50 o 60 Hz. Precisamente para generar tensiones alternas de frecuencias en el margen de las decenas de kilohercios y siguiendo la evolución de los dispositivos de potencia (esencialmente la popularización de los MOSFETs de potencia), entra la electrónica en el mundo de la iluminación. Aún todos los presentes recordaremos las “bombillas ahorradoras de energía” (algunas de ellas realizadas con transistores bipolares de potencia por razones de coste), alternativa electrónica a las bombillas incandescentes en la persecución de altos rendimientos en la conversión de la energía eléctrica en luz. Sin embargo, en poco menos de una decena de años, la electrónica y la iluminación han acabado unidas por los LEDs.

Los LEDs se venían utilizando de forma generalizada para la señalización desde los años 70. Los colores de los LEDs estaban restringidos al rojo, naranja, amarillo y verde. La comercialización a precios razonables de LEDs azules y violetas no fue posible hasta finales del siglo XX. Una vez que esto se produjo, quedó abierta la puerta a la comercialización de los llamados “LEDs blancos”. Es preciso hacer notar que un LED es un emisor de luz esencialmente monocromática, por lo que no puede emitir directamente luz blanca. Sin embargo, la emisión de luz blanca se puede forzar desde la luz azul si ésta incide en sustancias que a su vez emiten por fluorescencia luz de distintas longitudes de onda (la más característica es la del amarillo), que finalmente es apreciada por el ojo humano como luz blanca. El rendimiento de la transformación de energía eléctrica en luz es del orden de 10 veces superior al de una bombilla incandescente, por lo que la irrupción de la iluminación basada en LEDs blancos ha sido auténticamente rupturista.

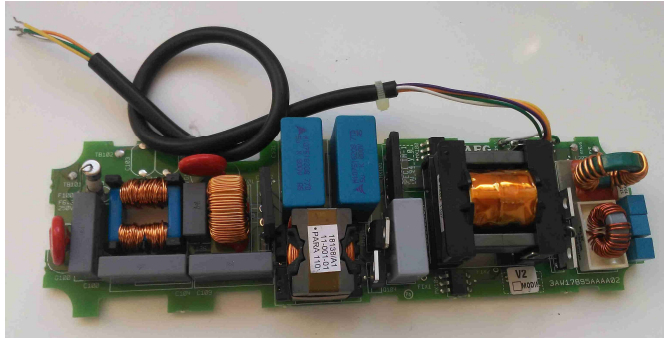
Como consecuencia de su mayor rendimiento energético en comparación con las bombillas incandescentes, las lámparas o bombillas LEDs se calientan mucho menos. En un diodo LED, el proceso físico por el que se produce la radiación luminosa no está unido a la alta temperatura, sino que es un proceso de emisión de energía cuando se producen recombinaciones de electrones y huecos en un semiconductor. Estas recombinaciones se producen aplicando tensiones que polarizan “directamente” “la unión PN” que configura el LED, lo que implica que la

alimentación tiene que realizarse con corriente continua. Cuando conectamos un conjunto de LEDs (normalmente en serie) a la red de distribución de energía eléctrica, que es de tensión alterna, es preciso interponer entre ella y el conjunto de LEDs un convertidor electrónico alterna-continua de bajo coste, buen rendimiento, compatible con las normas de contaminación de armónicos de corriente en la red, que no permita parpadeo en los LEDs y que además tenga una larga esperanza de vida. Es de destacar que, al trabajar a menores temperaturas, la duración de los LEDs es muy larga (del orden de 40.000 horas de vida útil), por lo que la duración de la bombilla LED no debería estar limitada por la duración del convertidor alterna-continua que incorpora. En éste, siempre es necesario que exista un condensador encargado de garantizar que la tensión de salida sea suficientemente constante como para que no se aprecie parpadeo. Para mantenerlo en límites razonables de tamaño y coste, este condensador es normalmente un condensador electrolítico; es éste el elemento limitante de la vida del convertidor. Por tanto, los objetivos de bajo precio, pequeño volumen, bajo parpadeo y alta duración acaban siendo contrapuestos.

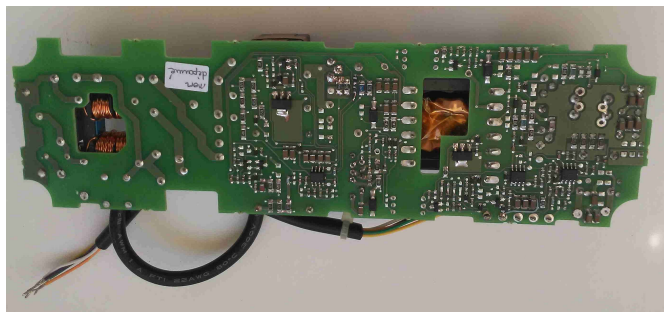
A principios de la década de 2010, ingenieros que habían estado trabajando para *Alcatel* y que en aquellos momentos trabajaban para la empresa "*Harmer and Simmons France*" (posteriormente "*AEG Power Solutions*"), entraron en contacto con nosotros para desarrollar convertidores alterna-continua de alta calidad, que compatibilizaran los objetivos contrapuestos antes citados. Se trataba de generar un producto con el que se pudiera garantizar una duración del foco luminoso extremadamente larga, del orden de 20 años, producto que se juzgaba competitivo para ser usado en instalaciones en las que el acceso a una reparación o sustitución resultara ser especialmente problemático. Un ejemplo de ello eran los túneles de autopista. El trabajo incluía el desarrollo de diferentes productos, siempre con un amplísimo margen de tensiones de entrada y con varias opciones de tensiones de salida. El trabajo fue extraordinariamente fructífero, con una excelente compenetración con los ingenieros franceses. Hubo que utilizar varias de las técnicas propuestas en los proyectos previos realizados con *Alcatel*, sobre todo las referentes al uso del *TIBuck* y del convertidor en Medio Puente con Control Complementario (Figura 31), dando origen a varios artículos, siempre realizados en colaboración con los ingenieros de la empresa, y que han tenido una amplia repercusión [38]-[40]. Desgraciadamente, la crisis que sobrevino en años posteriores modificó la actividad de la empresa y su interés por el producto desarrollado, ya que la necesidad de productos de alta calidad y larga duración quedó desplazada por la satisfacción de necesidades mucho más modestas.

La actividad comenzada con *Harmer and Simmons* alrededor del desarrollo de convertidores para alimentar LEDs para iluminación ha continuado durante muchos años más, ya sin el concurso de esta empresa, con numerosos artículos en los que se han abordado temas como:

- El uso de conformadores de corriente de entrada en bombillas de LEDs [21].
- Los convertidores para la alimentación de un único LED (que requiere baja tensión) [41].



a)



b)

Figura 31. Fotografía de uno de los prototipos de convertidores CA/CC con corrección del factor de potencia realizados por *AEG Power Solutions* en base al diseño realizado por el grupo SEA de la Universidad de Oviedo. a) Cara del circuito impreso en la que aparecen los dispositivos de potencia y los elementos reactivos del convertidor. b) Cara del circuito impreso en la que aparece la circuitería electrónica de control.

- Los convertidores para la alimentación de LEDs desde redes trifásicas, eludiendo el uso de condensadores electrolíticos [42] y [43].
- Los límites teóricos en el diseño de convertidores para compatibilizar las normativas de armónicos de corriente en la red y de parpadeo en los LEDs, usando para ello condensadores de capacidades tan bajas como para que no sea preciso que sean condensadores electrolíticos [28] y [44].

Además de estos temas, hay otro que merece un tratamiento singular, por la intensidad en la que hemos trabajado en él en los últimos años. Se trata del diseño de convertidores para que los LEDs puedan realizar dos funciones distintas:

- La función primaria de iluminación.
- La función adicional de servir como medio de comunicación.

Este tema, que recibe el nombre de “comunicaciones por luz visible”, requiere un tratamiento específico que se abordará enseguida.

3.5 – Electrónica de potencia para las telecomunicaciones

En los tiempos en los que yo estudiaba mis primeras asignaturas de electrónica en la ETSII de la UPM, la electrónica de potencia se veía como una parte de la electrónica casi exclusivamente focalizada en el mundo industrial, sin incidencia en el mundo de las telecomunicaciones. Sin embargo, esa situación ha ido cambiando notablemente a lo largo de estos últimos 45 años, de tal forma que la electrónica de potencia que realizábamos para *Alcatel* en los años 90 ya tenía el claro objetivo de alimentar equipos de telecomunicación. Además de esta tendencia, el despliegue de las redes de telefonía móvil ha generado otro punto singular de incidencia de la electrónica de potencia en el mundo de las telecomunicaciones, en este caso ligado a los graves problemas de rendimiento energético que se producen en las estaciones de repetición de telefonía móvil.

En un repetidor de telefonía móvil, el amplificador de potencia de RF (Radio Frecuencia) es uno de los elementos críticos. Esto se debe a que debe trabajar con una gran linealidad en el proceso de amplificación de las señales a transmitir. Estas señales, de frecuencias muy altas (hasta varios gigahercios), son las que han sido moduladas con la información que se desea transmitir. Las modulaciones modernas, que son capaces de transportar una elevada tasa de bits por segundo, determinan que las señales que procesa el amplificador de potencia de RF posean una envolvente muy cambiante. El valor medio de la potencia correspondiente a estas señales es relativamente pequeño, pero existen instantes en los que la potencia alcanza valores muy superiores a ese valor medio. Se dice que la relación entre la potencia de pico y la potencia media es muy alta. En estas condiciones, el amplificador de potencia de RF trabaja con un rendimiento medio bajísimo (por ejemplo, cercano al 5%). Aunque las razones que explican este hecho requerirían un análisis en profundidad de cómo se calcula el rendimiento de un amplificador, lo cierto es que parece bastante intuitivo que un sistema que debe trabajar correctamente en condiciones muy exigentes, no trabaje de manera tan eficiente cuando opera en condiciones muy alejadas a las de diseño. Un ejemplo fácil de imaginar sería plantearnos cómo de eficiente energéticamente sería utilizar un bólido de Fórmula 1 para circular por las calles de una ciudad a 30 km/h. Algo similar ocurre en el caso de los amplificadores de potencia de RF a los que acabo de hacer mención.

Las soluciones a este problema se han planteado desde varios puntos de vista, en algunos casos rescatando del olvido soluciones propuestas en los años 30 y 50 del siglo pasado. De entre ellas, hay dos tipos de soluciones que plantean el cambio rápido de la tensión de alimentación del amplificador de potencia de RF, de tal manera que esta tensión de alimentación siga el mismo ritmo de variación que sigue la envolvente de las señales que se están amplificando. Estas dos técnicas reciben los nombres de “Técnica de Seguimiento de Envolvente” y de “Técnica de Eliminación y Restauración de Envolvente” y la diferencia entre ambas radica en cómo opera el amplificador de potencia de RF, en modo lineal en el primer caso y en modo no lineal (lo más próximo posible a conmutado) en el segundo. Como se ha comentado, en ambos casos es preciso alimentar el amplificador desde un

convertidor continua-continua conmutado de respuesta muchísimo más rápida que la necesaria en los convertidores estándar. Así, anchos de banda de unos pocos kilohercios son suficientes en la mayor parte de las aplicaciones que podríamos denominar como “estándar”, pero en este caso son necesarios anchos de banda de varios megahercios. Este hecho acarrea la necesidad de utilizar frecuencias de conmutación mucho más altas que las habituales cuando se pretenden aplicar estas técnicas, lo que se puede realizar con relativa facilidad cuando se trata de manejar las tensiones y potencias propias de un terminal de telefonía móvil, pero que presenta gran complejidad cuando se trata de manejar las potencias propias de una estación de repetición.

Nuestra actividad en este tema comenzó en el año 2007 y para sortear las dificultades mencionadas se han explorado soluciones muy distintas, como son:

- El uso de convertidores multientrada [45].
- El uso de filtros de salida de orden superior al segundo, lo que no es útil en convertidores continua-continua estándar, pero sí lo es en este caso, al presentar los amplificadores comportamientos de cociente constante entre tensión y corriente de alimentación [46].
- El uso de estructuras multifase, combinadas con el uso de filtros de salida de orden superior al segundo [47].
- El desarrollo de nuevos métodos de combinar el uso de convertidores conmutados y lineales para obtener amplios anchos de banda [48] y [49].
- El uso de dispositivos de nitruro de galio en los convertidores destinados a esta aplicación [50].

En este campo de investigación se ha venido colaborando con profesores de las universidades Politécnica de Madrid y de Cantabria. Se han publicado numerosos artículos en revistas y congresos, algunos de los cuales han sido ampliamente referenciados. En la actualidad seguimos trabajando en este tema, ahora de la mano de la compañía norteamericana “*Collins Aerospace*”, en la integración de la técnica de seguimiento de envolvente en transmisores de RF de aeronaves.

El conocimiento adquirido en el diseño y construcción de convertidores continua-continua de respuesta muy rápida, combinado con la experiencia en el desarrollo de convertidores para alimentar LEDs, nos ha llevado a introducirnos en un nuevo tema de investigación: el de las comunicaciones por luz visible. Se trata de aprovechar las características propias de los LEDs blancos usados en iluminación para realizar transmisión de información. La idea es tener una alternativa a las comunicaciones inalámbricas basadas en el uso del espectro radioeléctrico habitual, que pueda ser usada en circunstancias en las que éstas no deban o no puedan ser usadas.

Al contrario de lo que ocurre en una lámpara incandescente o fluorescente, la intensidad luminosa emitida por un LED cambia rápidamente si también cambia rápidamente la corriente que circula por él. Este hecho es un problema desde el punto de vista del parpadeo, pero en cambio abre la oportunidad de usar los focos

luminosos para una función adicional a su función principal (que es la iluminación). Esta segunda función es transmitir información.

Pero, ¿a qué frecuencia puede cambiar la luz que emite un LED? Evidentemente, la respuesta a esta pregunta depende del tipo de LED. En los LEDs que generan luz “muy infrarroja” (como la que pasa por las fibras ópticas usadas en las comunicaciones, de 1.550 nm de longitud de onda), la luz puede cambiar a frecuencias de centenares de megahercios. Sin embargo, la situación es muy distinta en los LEDs blancos de alta intensidad luminosa que se usan en iluminación. En este caso, las frecuencias máximas están restringidas a unos pocos megahercios, esencialmente porque la frecuencia máxima de operación acaba estando acotada por la del recubrimiento que, por fluorescencia, complementa la radiación azul del LED, para conseguir finalmente la luz blanca. Por tanto, la transmisión de información desde la luz (la “Li-Fi”), no puede competir en rapidez con la “Wi-Fi”, pero puede complementarla y suplirla parcialmente en lugares en los que la radiación de 2,4 GHz (frecuencia a la que opera la Wi-Fi) no esté permitida o aconsejada. Además de la limitación en rapidez, la comunicación por luz visible resulta sencilla si se establece desde el foco luminoso hacia el receptor (que puede ser muy simple), pero no lo es en sentido inverso. Es decir, tiene sentido si se trata de lo que podríamos calificar como “radiodifusión” (comunicación unidireccional) y no realmente de una comunicación bidireccional. Sin embargo, en el caso de que los dos agentes de la comunicación posean focos luminosos, este inconveniente desaparece. Un ejemplo de ello sería la comunicación entre vehículos que se cruzan en entornos oscuros y que podrían transmitirse señales de alarma sobre los problemas que cada uno de ellos ya se ha encontrado en la vía por la que circulan, problemas que el otro vehículo encontrará. Por otra parte, el uso de la luz para la comunicación en interiores tiene la característica, inherente a la luz, de su confinamiento por las paredes opacas que delimitan ese interior, lo que puede ser una ventaja en ciertas ocasiones y ser un inconveniente en otras.

Está claro que el conjunto de inconvenientes, ventajas y dudas sobre posibles nichos de aplicación de las comunicaciones por luz visible hace que esta tecnología no esté aún asentada y que, quizás, no lo llegue a estar nunca. Sin embargo, nuestra visión es que desde los conocimientos existentes en electrónica de potencia y en electrónica de comunicaciones, podemos, en la actualidad, dar soluciones para tener transmisores eficientes para esta técnica. Si la técnica finalmente se impone, nosotros ya tenemos un conjunto de soluciones que intentan compatibilizar la consecución de altas tasas de transmisión de información (dentro de las limitaciones inherentes antes comentadas) con alto rendimiento energético.

De forma casi natural, varias de las soluciones planteadas para mejorar el rendimiento de los amplificadores de RF han podido ser trasladadas a este contexto [51] y [52]. Al final, en ambos casos se trata de tener variaciones de tensión de salida que sean muy rápidas y que estén perfectamente sincronizadas con alguna característica de la señal a transmitir. Sin embargo, también hemos desarrollado soluciones completamente originales y que están siendo exportadas a otros contextos tecnológicos [53] y [54].

Finalmente, para enfatizar la repercusión del trabajo que en este tema estamos realizando, una anécdota. Si en la actualidad se consulta en “*Wikipedia*” información sobre “*Visible Light Communication*”:

(https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_light_communication),

el texto obtenido hace mención a 31 referencias, 3 de las cuales corresponden a trabajos realizados por nuestro grupo de investigación. En este campo, creemos que estamos siendo realmente pioneros.

4. Epílogo:

Electrónica de potencia y descarbonización

En el siglo XIX se establecieron las bases teóricas de los fenómenos eléctricos, y la electricidad se comenzó a utilizar para desarrollar fuerza mecánica, para iluminar, para calentar y para establecer comunicaciones. A comienzos del siglo XX nació la electrónica para facilitar las comunicaciones eléctricas y la invención del transistor, hace 75 años, significó el pistoletazo de salida de la era digital en la que vivimos. En paralelo con el desarrollo de la electrónica, distintos tipos de equipos conectados a la red eléctrica se fueron haciendo cotidianos en la vida de los seres humanos, de tal forma que se produjo un aumento continuo de la necesidad de generación de energía eléctrica. Durante gran parte del siglo XX, la electrónica se asociaba a términos como radio, televisión, amplificación, vídeo, ordenadores y automatismos, con una incidencia creciente en los equipos que se conectaban a la red eléctrica, pero con escasa relación con la generación de la energía eléctrica. Esta relación se establecía, casi exclusivamente, para el control de los generadores, de tal forma que quedara garantizado el correcto funcionamiento de la red. La operación de estos generadores estaba respaldada por la energía procedente de los grandes saltos de agua, de la quema de combustibles fósiles o de la generación de reacciones nucleares de fisión. En todos estos casos, la energía que estaba detrás de los generadores era suficientemente alta como para garantizar el correcto funcionamiento del sistema ante situaciones de consumo muy variables. Por otro lado, una gran parte de las necesidades de energía mecánica (para el transporte) y térmica (para calefacción) se satisfacían desde la quema de combustibles fósiles.

Sin embargo, este panorama ha empezado a cambiar radicalmente en el siglo XXI. Hoy en día es una certeza que la temperatura media del planeta está creciendo como consecuencia del aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Este aumento se debe a la combustión de sustancias fósiles ricas en carbono. El carbono de estas sustancias había pasado de la atmósfera a la corteza terrestre en épocas geológicas muy lejanas, y desde hace unos pocos siglos lleva siguiendo el camino inverso, de la mano de las combustiones provocadas por el ser humano. Para detener el aumento de la temperatura media de la Tierra y evitar los desastres naturales que acarrea, el ser humano debe detener la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, la certeza de esta necesidad choca de pleno con la dificultad de remplazar el déficit de energía que acarrea la renuncia a la combustión de sustancias fósiles. No se encuentran sustancias que puedan competir con los combustibles fósiles en precio, abundancia y densidad energética. Sin embargo, la energía que poseen los combustibles fósiles es síntesis de la recibida por seres vivos que habitaban la Tierra en épocas geológicas pasadas, energía que también venía del Sol. El Sol nos sigue enviando ingentes cantidades de energía, y la energía que necesitamos tenemos que obtenerla de él. Las otras alternativas realistas o están explotadas casi al máximo de su potencialidad (recursos hidráulicos) o generan problemas que ocasionan rechazo social, además de ser finitas (energía nuclear de fisión).



Figura 32. Fotografía de un equipo de Dynapower, concebido para almacenar en baterías la energía eléctrica excedente de una planta fotovoltaica y volcarla a la red eléctrica en momentos en los que la generación fotovoltaica directa sea baja. El equipo incorpora convertidores CC/CC e inversores (convertidores CC/CA).

Sabemos aprovechar directamente la energía que nos envía el Sol y sabemos aprovechar la energía que adquieren los fluidos al ser calentados por el Sol. Desde la radiación solar directamente (energía fotovoltaica, Figura 32) o desde las corrientes de aire (energía eólica, Figura 33) podemos generar energía eléctrica suficiente para satisfacer las necesidades energéticas humanas. Sin embargo, hay dos consideraciones muy importantes a realizar en el uso de estas energías:

- Son fuentes energéticas discontinuas, es decir, sujetas a ciclos temporales.
- Los generadores eléctricos a los que dan lugar son “generadores débiles”, entendiendo por tales aquellos que no está respaldados por una cantidad de energía primaria suficiente como para garantizar que la energía eléctrica generada presenta las características técnicas demandadas por el usuario.

Ambas razones conducen al mismo hecho: si queremos que las energías procedentes de la radiación solar cubran las necesidades energéticas del ser humano, la energía eléctrica que de ellas se obtiene tiene que sufrir diversas transformaciones en el formato de la dupla tensión - frecuencia. La necesidad de estas transformaciones se debe a que este formato cambia en función del sistema de generación, almacenamiento y transporte, y de las necesidades del consumidor. Por ejemplo, la generación fotovoltaica se realiza en tensión continua (y variable en función de la intensidad solar), el almacenamiento se realiza en tensión continua y constante, el transporte frecuentemente en tensión alterna y su uso final tanto en tensión alterna (calentamiento) como continua (sistemas electrónicos domésticos, de ocio, computación e iluminación). Por tanto, la conversión eficiente del formato de la energía eléctrica es indispensable en el panorama energético del siglo XXI. Lo más probable es que, en pocos años, la mayor parte de la energía que el ser humano



a)



b)

Figura 33. Información suministrada por la empresa ABB sobre su convertidor PCS6000 MV. Este convertidor puede manejar hasta 12 MW de potencia, con tensiones de entrada y salida de hasta 3,4 kV. Su rendimiento alcanza el 98%, lo que da una idea de lo madura que está esta tecnología. Los semiconductores de potencia usados en este caso son IGCTs (*Integrated Gate-Commutated Thyristors*), una versión evolucionada de tiristor de alta potencia que se puede apagar por su terminal de puerta. a) Fotografía del equipo suministrada por el fabricante. b) Instalación del mismo en un generador eólico marino.

consume, en alguna fase de su ciclo de transformaciones, por ser energía eléctrica. Incluso la utilización generalizada del vector hidrógeno no se escapa a esta afirmación, ya que su obtención de forma eficiente se ha de realizar desde la energía eléctrica y, como en otros casos, adaptando el formato de esta energía a un fin específico (en este caso, la hidrólisis).

En el panorama de un futuro sin quema de combustibles fósiles, la energía eléctrica es clave, usada directamente o a través del vector hidrógeno. El principal reto pendiente no está en las tecnologías necesarias para el cambio de su formato

(el tema en el que yo trabajo), sino en los mecanismos para su almacenamiento en volúmenes y pesos comparables a los de los combustibles fósiles. El día en que este reto se supere, tendremos instalaciones para almacenamiento masivo de electricidad, de forma semejante a como tenemos ahora grandes depósitos de combustibles. En todas estas instalaciones, la conversión del formato de la energía eléctrica será fundamental.

En paralelo al desarrollo de los equipos electrónicos, fue surgiendo durante el siglo XX la electrónica de potencia, cuyo objetivo es, precisamente, el cambio del formato de la energía eléctrica. Con el desarrollo de los diodos de potencia y de los tiristores tipo SCR, esta disciplina comenzó a caminar, unida a determinadas aplicaciones industriales. Sin embargo, el desarrollo de dos dispositivos electrónicos de potencia, el MOSFET y el IGBT, extendieron su uso a los sistemas de alimentación y al gobierno de los motores eléctricos. A día de hoy, los circuitos electrónicos de potencia son omnipresentes en la electrónica de consumo, en la movilidad eléctrica, en los sistemas de generación de energía eléctrica y en la electrónica industrial. Los dispositivos de potencia, sus circuitos de mando y control, y los componentes reactivos necesarios para su funcionamiento, han alcanzado un alto grado de madurez. El conocimiento de electrónica de potencia está ya listo para jugar un papel absolutamente fundamental en el panorama energético del mundo descarbonizado. Como se ha comentado anteriormente, las perspectivas actuales son que la mayor parte de la energía que la humanidad va a manejar en los próximos años va a ser “eléctrica” en alguna de las fases de su ciclo de transformaciones, y en estas transformaciones la electrónica de potencia es la pieza clave. Nos urge comunicar este mensaje: para que el mundo siga progresando, necesitamos mantener una generación estable, limpia y barata de energía, en la que la electrónica de potencia juega un papel fundamental. Es importantísimo que haya jóvenes ingenieros que adquieran una sólida formación en esta materia, ya no sólo para avanzar, sino para mantener los estándares de vida que hemos tenido antes de la hoy necesaria descarbonización. No olvidemos que debajo de los deslumbrantes avances en las comunicaciones, la domótica, la computación, la ingeniería biomédica, etc., siempre hay circuitos electrónicos que no funcionan si falta la energía eléctrica. Afortunadamente, la electrónica de potencia va a contribuir a que estos avances no cesen.

Finalmente, muchísimas gracias por su atención.

5. Referencias

- [1] Massimo Guarnieri, "The big jump from the legs of a frog". *IEEE Industrial Electronics Magazine*, diciembre de 2014, pp. 59-69.
- [2] Hans Christian Oersted, "Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam". Impreso privadamente por el autor y enviado a diversas sociedades científicas de su tiempo en 1820.
- [3] James Clerk Maxwell, "A treatise on electricity and magnetism". Editado por Clarendon para Oxford, 1892.
- [4] Massimo Guarnieri, "The conquest of the atlantic". *IEEE Industrial Electronics Magazine*, marzo de 2014, pp. 53-67.
- [5] Massimo Guarnieri, "Who invented the transformer?" *IEEE Industrial Electronics Magazine*, diciembre de 2013, pp. 56-59.
- [6] Massimo Guarnieri, "The age of vacuum tubes: early devices and the rise of radio communications". *IEEE Industrial Electronics Magazine*, marzo de 2012, pp. 41-43.
- [7] Ignacio Mártil, "Microelectrónica: La historia de la mayor revolución silenciosa del siglo XX". *Ediciones Complutense*, 2018.
- [8] John Bardeen y Walter Houser Brattain, "The transistor, a semiconductor triode". *Physical Review*, Vol. 74, nº 2, julio de 1948, pp. 230-231.
- [9] B. Jayant Baliga, "The future of power semiconductor device technology". *Proceedings of the IEEE*, Vol. 89, nº 6, junio de 2001, pp. 822-832.
- [10] Javier Sebastián y Javier Uceda, "The double converter: A fully regulated two output dc to dc converter". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Toulouse (Francia), junio 1985, pp. 117-126. También, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 2, nº 3, julio de 1987, pp. 239-246.
- [11] Javier Sebastián, Javier Uceda, José Antonio Cobos, Jaime Arau y Fernando Aldana, "Improving power factor correction in distributed power supply systems using PWM and ZCS-QR SEPIC topologies". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Cambridge (Estados Unidos de Norteamérica), junio de 1991, pp. 780-791.
- [12] Domingos Savio Lirio Simonetti, Javier Sebastián y Javier Uceda, "The discontinuous conduction mode SEPIC and Cuk power factor preregulators: Analysis and design". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, nº 5, octubre de 1997, pp. 630-637.
- [13] Javier Sebastián, José Antonio Cobos, Juan Manuel Lopera y Javier Uceda, "The determination of the boundaries between continuous and discontinuous conduction modes in PWM dc-to-dc converters used as power factor preregulators". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 10, nº 5, septiembre de 1995, pp. 574-582.
- [14] Patente ES 2117946 B1, Dispositivo convertidor de corriente alterna/continua.
- [15] Patente EP 0907236 A3 y patente JP H11178338 A, Switched series regulator.
- [16] Javier Sebastián, Pedro Villegas, Fernando Nuño, Oscar García y Jaime Arau, "Improving dynamic response of power factor preregulators by using two-input high-efficient post-regulators". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 12, nº 6, noviembre de 1997, pp. 1007-1016.
- [17] Javier Sebastián, Pedro Villegas, Fernando Nuño y Marta María Hernando, "High-efficiency and wide-bandwidth performance obtainable from a two-input buck converter". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 13 nº 4, julio de 1998, pp. 706-717.
- [18] Marta María Hernando, Javier Sebastián, Pedro Villegas y Salvador Ollero, "Improving dynamic response of power factor correctors by using Series-Switching post-regulators". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 46, nº 3, junio de 1999, pp. 563-568.

- [19] Javier Sebastián, Marta María Hernando, Arturo Fernández, Pedro Villegas y Juan Díaz, "Input current shaper based on the series connection of a voltage source and a loss-free resistor". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, nº 2, marzo/abril de 2001, pp. 583-591.
- [20] Javier Sebastián, Arturo Fernández, Pedro Villegas, Marta María Hernando y Juan Manuel Lopera, "Improved active input current shapers for converters with symmetrically driven transformer". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, nº 2, marzo/abril de 2001, pp. 592-600.
- [21] Javier Sebastián, Arturo Fernández, Pedro Villegas, Marta María Hernando y Miguel Ángel José-Prieto, "New active input current shapers to allow ac-to-dc converters with asymmetrically driven transformers to comply with the IEC-1000-3-2". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, nº 4, julio de 2002, pp. 493-501.
- [22] José Antonio Villarejo, Javier Sebastián, Fulgencio Soto y Esther de Jódar, "Optimizing the design of single-stage power-factor correctors". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, nº 3, junio de 2007, pp. 1472-1482.
- [23] Arturo Fernández, Javier Sebastián, Pedro Villegas, Marta María Hernando y Diego González-Lamar, "Dynamic limits of a power-factor preregulator". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 52, nº 1, febrero de 2005, pp. 77-87.
- [24] Javier Sebastián, Diego González-Lamar, Marta María Hernando, Alberto Rodríguez y Arturo Fernández, "Steady-state analysis and modelling of power factor correctors with appreciable voltage ripple in the output-voltage feedback loop to achieve fast transient response". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, nº 11, noviembre de 2009, pp. 2555-2566.
- [25] Javier Sebastián, Diego González-Lamar, Alberto Rodríguez, Manuel Arias y Arturo Fernández, "On the maximum bandwidth attainable by power factor correctors with a standard compensator". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 46, nº 4, julio/agosto de 2010, pp. 1485-1497.
- [26] Diego González-Lamar, Arturo Fernández, Manuel Arias, Miguel Rodríguez, Javier Sebastián y Marta María Hernando, "A unity power factor correction preregulator with fast dynamic response based on a low-cost microcontroller". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, nº 2, marzo de 2008, pp. 635-642.
- [27] Diego González-Lamar, Manuel Arias, Marta María Hernando y Javier Sebastián, "Using the loss-free resistor concept to design a simple AC-DC HB-LED driver for retrofit lamp applications". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, nº 3, mayo/junio de 2015, pp. 2300-2311.
- [28] Diego González-Lamar, Javier Sebastián, Manuel Arias y Arturo Fernández, "On the limit of the output capacitor reduction in power factor correctors by distorting the line input current". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, nº 3, marzo de 2012, pp. 1168-1176.
- [29] José Antonio Cobos, Javier Sebastián, Javier Uceda, Enrique de la Cruz y José María Gras, "Study of the applicability of self-driven synchronous rectification to resonant topologies". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Toledo (España), junio/julio 1992, pp. 933-940.
- [30] José Antonio Cobos, Oscar García, Javier Sebastián y Javier Uceda, "Low voltage power electronics". *Journal of Circuits, Systems and Computers*, Vol. 5, nº 4, diciembre de 1995, pp. 575-588.
- [31] José Antonio Cobos, Óscar García, Javier Sebastián y Javier Uceda, "Resonant reset forward topologies for low output voltage on board converters". *IEEE Applied Power Electronics Conference*, Orlando, (Estados Unidos de Norteamérica), febrero de 1994, pp. 703-708.
- [32] José Antonio Cobos, Óscar García, Javier Sebastián, Javier Uceda y Fernando Aldana, "Optimized synchronous rectification stage for low output voltage (3.3V) dc/dc conversion". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Taipei (Taiwan), junio 1994, pp. 902-908.

- [33] Patente EP 0687058 A1, DC/DC power converter for low output voltages.
- [34] Oscar García, José Antonio Cobos, Javier Uceda y Javier Sebastián, "Zero voltage switching in the PWM half bridge topology with complementary control and synchronous rectification". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta (Estados Unidos de Norteamérica), junio de 1995, pp. 286-291.
- [35] Javier Sebastián, José Antonio Cobos, Oscar García y Javier Uceda, "An overall study of the half-bridge complementary-control DC-to-DC converter". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta (Estados Unidos de Norteamérica), junio de 1995, pp. 1229-1235.
- [36] Arturo Fernández, Javier Sebastián, Marta María Hernando, Pedro Villegas y Jorge García, "New self-driven synchronous rectification system for converters with a symmetrically driven transformer". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, nº 5, septiembre/octubre de 2005, pp. 1307-1315.
- [37] Miguel Rodríguez, Diego González-Lamar, Manuel Arias, Javier Sebastián y Roberto Prieto, "A novel adaptive synchronous rectification system for low output voltage isolated converters". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, nº 8, agosto de 2011, pp. 3511-3520.
- [38] Manuel Arias, Marcos Fernández, Diego González-Lamar, Didier Balocco, Almadidi Diallo y Javier Sebastián, "High-efficiency asymmetrical half-bridge converter without electrolytic capacitor for low-output-voltage AC-DC LED drivers". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, nº 5, mayo de 2013, pp. 2539-2550.
- [39] Manuel Arias, Diego González-Lamar, Francisco Fernández-Linera, Didier Balocco, Almadidi Diallo y Javier Sebastián, "Design of a soft-switching asymmetrical half-bridge converter as second stage of a LED driver for street-lighting application". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, nº 3, marzo de 2012, pp. 1608-1621.
- [40] Manuel Arias, Diego González-Lamar, Javier Sebastián, Didier Balocco y Almadidi Diallo, "High-efficiency LED driver without electrolytic capacitor for street lighting". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, nº 1, enero/febrero de 2013, pp. 127-137.
- [41] Ignacio Castro, Aitor Vázquez, Daniel García-Aller, Manuel Arias, Diego González-Lamar y Javier Sebastián, "On supplying LEDs from very low dc voltages with high frequency AC-LED drivers". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, nº 6, junio de 2019, pp. 5711-5719.
- [42] Ignacio Castro, Diego González-Lamar, Manuel Arias, Marta María Hernando y Javier Sebastián, "Multi-cell three phase ac-dc driver for HB-LED lighting applications". *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 53, nº 4, julio/agosto de 2017, pp. 3803-3813.
- [43] Ignacio Castro, Aitor Vázquez, Diego González-Lamar, Manuel Arias, Marta María Hernando y Javier Sebastián, "An electrolytic capacitorless modular three phase ac-dc LED driver based on summing the light output of each phase". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 7, nº 4, diciembre de 2019, pp. 2255-2270.
- [44] Ignacio Castro, Aitor Vázquez, Manuel Arias, Diego González-Lamar, Marta María Hernando y Javier Sebastián, "A review on flicker-free ac-dc LED drivers for single-phase and three-phase ac power grids". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, nº 10, octubre de 2019, pp. 10035-10057.
- [45] Miguel Rodríguez, Pablo Fernández-Miaja, Alberto Rodríguez y Javier Sebastián, "A multiple-input digitally-controlled buck converter for envelope tracking applications in radiofrequency power amplifiers". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, nº 2, febrero de 2010, pp. 369-381.
- [46] Javier Sebastián, Pablo Fernández-Miaja, Alberto Rodríguez y Miguel Rodríguez, "Analysis and design of the output filter for buck envelope amplifiers". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, nº 1, enero de 2014, pp. 213-233.

- [47] Javier Sebastián, Pablo Fernández-Miaja, Francisco Javier Ortega, Moisés Patiño y Miguel Rodríguez, "Design of a two-phase buck converter with fourth-order output filter for envelope amplifiers of limited bandwidth". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, n° 11, noviembre de 2014, pp. 5933-5948.
- [48] Pablo Fernández-Miaja, Miguel Rodríguez, Alberto Rodríguez y Javier Sebastián, "A linear assisted DC/DC converter for envelope tracking and envelope elimination and restoration applications". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, n° 7, julio de 2012, pp. 3302-3309.
- [49] Pablo Fernández-Miaja, Javier Sebastián, Reinel Marante y José Ángel García, "A linear assisted switching envelope amplifier for a UHF polar transmitter". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, n° 4, abril de 2014, pp. 1850-1861.
- [50] Pablo Fernández-Miaja, Alberto Rodríguez y Javier Sebastián, "Buck derived converters based on gallium nitride devices for envelope tracking applications". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, n° 4, abril de 2015, pp. 2084-2095.
- [51] Javier Sebastián, Diego González-Lamar, Daniel García-Aller, Juan Rodríguez y Pablo Fernández-Miaja, "On the role of power electronics in Visible Light Communication". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 6, n° 3, septiembre de 2018, pp. 1210-1223.
- [52] Juan Rodríguez, Diego González-Lamar, Pablo Fernández-Miaja, Daniel García-Aller y Javier Sebastián, "Power efficient VLC transmitter based on pulse-width modulated DC-DC converters and the split of the power". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, n° 2, febrero de 2019, pp. 1726-1743.
- [53] Juan Rodríguez, Pablo Fernández-Miaja, Diego González-Lamar y Javier Sebastián, "Reproducing single-carrier digital modulation schemes for VLC by controlling the first switching harmonic of the dc-dc power converter output voltage ripple". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, n° 9, septiembre de 2018, pp. 7994-8010.
- [54] Juan Rodríguez, Diego González-Lamar, Daniel García-Aller, Pablo Fernández-Miaja y Javier Sebastián, "Reproducing multi-carrier modulation schemes for Visible Light Communication with the ripple modulation technique". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 67, n° 2, febrero de 2020, pp. 1532-1543.