



CAMPUS
DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL

Lección inaugural

Panorámica Histórica de la Ingeniería Eléctrica. El Sistema Eléctrico de Potencia

Por Jesús Fraile Mora, profesor emérito de la UPM

Apertura del Curso Académico 2016-17

16 de septiembre de 2016

Magnífico y Excelentísimo Señor Rector,
Excmo Sr. Director General de Universidades de la Comunidad de Madrid,
Excmo. Sr. Presidente del Consejo Social de la Universidad Politécnica de Madrid,
Autoridades civiles y académicas,
Profesores, alumnos, y personal de la administración y servicios,
Señoras y señores:

Me cabe el honor de presentarme ante este distinguido y entrañable auditorio, para pronunciar la lección inaugural del curso académico 2016-17 de nuestra universidad. La justificación de ello, es que a mitad del mes de julio y con mi jubilación inminente como catedrático de Electrotecnia de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, recibí una llamada del Excmo. y Magfco. Sr. Rector de esta universidad, para invitarme a impartir la lección inaugural de este curso.

Ante esta inesperada demanda del Rector, le manifesté enseguida mi sorpresa, que desde luego suponía un gran halago a mi persona, pero que también representaba una enorme responsabilidad ante la comunidad universitaria. Sin embargo reconocía que era un deber para mí, aceptar este encargo, ya que tenía una inmensa deuda de gratitud con esta universidad, en la que he disfrutado plenamente enseñando durante casi 49 años y además en cuatro Escuelas distintas, impartiendo en todas ellas, diversas asignaturas que se pueden englobar en lo que actualmente se denomina área de conocimiento de ingeniería eléctrica.

Al meditar poco días después, sobre el argumento que debía tener esta lección, consideré que lo más lógico era desarrollar un tema que tuviera relación con las materias, que han servido de ocupación a mi tiempo y de sustento a mi actividad en las aulas, pero que se complementara con mis aficiones al estudio de la historia de la ciencia y de la técnica. Es por ello que tras unos días de reflexión, me pareció que podía ser de interés para este auditorio, explicar la evolución histórica de los sistemas eléctricos de potencia, por representar una de las contribuciones más extraordinarias realizadas por la ingeniería y que tanto influyen en la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos y en el desarrollo industrial de los países. Y de ahí que llegara al título específico de esta lección: *Panorámica histórica de la Ingeniería Eléctrica. El Sistema Eléctrico de Potencia.*

Y con este breve preámbulo comenzamos la lección.

1.- La electricidad muestra sus músculos. La dinamo y las primeras centrales de corriente continua

De todos los hallazgos científicos de la ciencia eléctrica que surgieron en el siglo XIX, se debe destacar de un modo especial, la ley de inducción de Faraday de 1831, ya que este descubrimiento fue el detonador para que muchos científicos e ingenieros buscaran una máquina eléctrica rotativa que generase electricidad en forma de corriente continua como lo hacían, de forma química, las pilas de Volta descubiertas en 1800.

En una primera fase de desarrollo, que comprende el periodo entre los años 1831 y 1850, se diseñaron máquinas eléctricas con imanes permanentes; de hecho el mismo Faraday construyó en noviembre de 1831, un generador eléctrico que era un disco de cobre que giraba sobre un eje horizontal, dentro del campo magnético de un potente electroimán. Al colocar una banda conductora rozando la periferia del disco y otra sobre el eje, comprobó con un galvanómetro unido a estas bandas que se obtenía una desviación del mismo.

Pixii en 1832 construyó la primera máquina magnetoeléctrica generadora que producía corriente alterna (había nacido el alternador), sin embargo a esta señal alterna no se le veían aplicaciones prácticas porque tenía una forma de onda diferente, a la que se conocían de las pilas de Volta, es por ello que Pixii, asesorado por Ampère mejoró más tarde esta máquina y diseñó un primitivo conmutador para rectificar la onda resultante y convertirla de este modo en una onda unidireccional.

A partir de 1850 sigue una segunda fase de desarrollo que abarca el periodo 1850-1867, en que se abandonan los imanes permanentes y la excitación se hace con electroimanes. Alrededor de 1850, Wheatstone y otros científicos patentaron el uso de electroimanes en vez de imanes permanentes para excitar las nuevas máquinas eléctricas. Los electroimanes se alimentaban inicialmente mediante pilas de Volta. Henry Wilde construyó entre 1861 y 1867 diferentes modelos de generadores de corriente continua en los que utilizaba una pequeña dinamo dotada de imanes permanentes para excitar otra de mayor potencia. En estos años aparece la invención por parte de Pacinotti del inducido en anillo.

La tercera fase del desarrollo se caracteriza por el descubrimiento del principio de autoexcitación y abarca el periodo comprendido entre los años 1867 y 1870. La idea de la autoexcitación era aprovechar parte de la corriente de la propia máquina para reforzar el campo magnético de los polos. En 1867, Werner von Siemens patentó esta idea y en su propia fábrica construyó diversos tipos de dinamos, contribuyendo al impetuoso

desarrollo de la máquina eléctrica y se le considera con merecimiento como el inventor de la autoexcitación.

La cuarta fase de desarrollo, abarca los años 1870 a 1886. Durante este período de tiempo, la máquina de corriente continua adquirió los rasgos fundamentales de la forma moderna. El inventor Zénobe Gramme, sin conocer los trabajos de Pacinotti, propuso en 1870 una máquina con inducido en anillo, dando lugar al primer generador de corriente continua comercial y es por ello que a Gramme se le considera el inventor de la dinamo.

Poco a poco, se fueron haciendo mejoras constructivas en los diseños de Gramme, la más importante de ellas, se debe a Hefner-Alteneck, director de ingeniería de la casa Siemens, que en 1873, modificó el inducido en anillo y propuso el devanado en tambor que mejoraba el rendimiento y construcción de la dinamo, siendo este tipo de inducido el que se impuso en los nuevos diseños de las máquinas de c.c.

En la Exposición Universal de Viena de 1873, Gramme y su socio Fontaine, prepararon una dinamo movida por una máquina de vapor y transportaron la energía eléctrica generada hasta una segunda máquina similar distante unos 500 metros, que trabajaba como motor y que accionaba una bomba de agua. De esta manera se pudo comprobar de un modo real el principio de reversibilidad de las máquinas eléctricas, formulado por Lenz en 1833.

Es interesante advertir que a la Exposición de Viena, acudió como experto científico, el Director de la Escuela de Ingenieros Industriales de Barcelona, D. Ramón de Manjarrés y Bofarull, que maravillado por el funcionamiento de la dinamo Gramme informó de ello al Claustro de la Escuela, acordándose comprar el modelo más perfeccionado para su uso en la Cátedra de Física Industrial, que dirigía el patriarca de la Electrotecnia española, D. Francisco de Paula Rojas. La importación la realizó en el año 1874 el industrial catalán D. Tomás Dalmau, que más tarde contrató al ingeniero Narciso Xifrá, para hacer diversas demostraciones prácticas de alumbrado.

Mientras tanto en Estados Unidos, también se fueron haciendo mejoras de la dinamo de Gramme y el ingeniero e inventor Charles Brush patentó en 1878 diversas dinamos, algunas específicas para instalaciones de alumbrado por arco y otras para equipos de soldadura. En 1880, Edison, el gran inventor americano, diseñó una dinamo, que la bautizó con el nombre de Jumbo, que tenía una potencia de 100 kW y de 110 V y que sería el modelo que utilizaría más tarde en el montaje de las primeras centrales eléctricas de su empresa.

En 1881 se celebró en el Palacio de la Industria de París la Primera Exposición Internacional de Electricidad, dedicada específicamente a este tema y que tuvo un impacto considerable, ya que el público pudo admirar grandes novedades de los principales fabricantes del mundo, entre los que se encontraban diversos modelos de dinamos de Gramme, otros de la empresa Siemens, y también de Brush y Edison.

Había un coche eléctrico desarrollado por Trouvé, que se puede considerar como una versión primitiva de los actuales y también un tranvía eléctrico de Siemens. Muchas zonas del Palacio de la Industria estaban alumbradas con distintos tipos de lámparas incandescentes de Edison, Maxim y Swan. También existían varias salas dedicadas a los nuevos desarrollos del telégrafo y el teléfono.

A partir del descubrimiento de la dinamo, comienza la construcción de centrales eléctricas, moviendo inicialmente las dinamos con máquinas de vapor. Se considera que la primera central eléctrica comercial del mundo en corriente continua se debe a Edison, y entró en servicio el 4 de Septiembre de 1882 en Pearl Street, en Manhattan, Nueva York. Era una central que tenía 6 dinamos Jumbo de 100 kW a 110 V. Inicialmente alimentó 400 lámparas de 82 clientes, pero dos años más tarde la central servía a 508 clientes con un total de 10.164 lámparas.

La importancia de esta instalación no solamente fue su elevada potencia, sino porque Edison diseñó todo el sistema eléctrico de distribución, conectando las lámparas en paralelo, y dotando a la instalación de fusibles de protección. La tensión de suministro elegida de 110 V sería un patrón para los diseños futuros y este valor de la tensión se utiliza todavía en los Estados Unidos.

En el otoño de 1882, en que se celebraba la Exposición Internacional de Electricidad de Munich, el ingeniero francés Marcel Deprez, construyó una línea de corriente continua entre Miesbach y Munich con una potencia de 400W y a una tensión de 1350 V y que tuvo un rendimiento del orden del 30%. La experiencia tenía por objetivo, comprobar la posibilidad técnica y económica del transporte de energía eléctrica a gran distancia. En los tres años siguientes, Deprez siguió haciendo pruebas de líneas de transporte en c.c. aumentando cada vez más la tensión; el último ensayo fue una línea entre Creil y París de 58 km de longitud, con una potencia de 30 kW y una tensión de 6000 V y que fue subvencionada totalmente por el banquero Rothschild con la suma de 800.000 francos.

Estas experiencias demostraron claramente que para hacer posible el transporte de energía eléctrica a gran distancia, era preciso recurrir al

empleo de altas tensiones, pero la realidad revelaba que la máquina de corriente continua, tenía una serie de dificultades técnicas para conseguir grandes potencias unitarias y con altas tensiones entre sus terminales y que en la práctica estaba limitada a unos 7000 V. La solución al problema del transporte de energía eléctrica iba a ser la utilización de las corrientes alternas y la invención afortunada en aquellos momentos del transformador.

2.- La invención del transformador. El impulso de la corriente alterna

Aunque la primera bobina de inducción fue empleada por Faraday en sus famosos experimentos de 1831, hubo otros investigadores que hicieron mejoras sucesivas de esta bobina hasta que en 1855, Ruhmkorff, le dio sus proporciones y dimensiones clásicas. En 1877, Jablochhoff obtuvo una patente en la que utilizaba bobinas de inducción para la distribución de corrientes en la iluminación eléctrica por arco y en la que por primera vez se alimentaban estas bobinas con corriente alterna.

En el año 1882, la sociedad de ingeniería formada por Gaulard y Gibbs, patentó en Londres un sistema para resolver los problemas de distribución por corrientes alternas, que ensayaron en el Metro londinense y posteriormente en Febrero de 1884, obtuvieron una segunda patente de lo que ellos denominaron *generador secundario*, que era una especie de transformador primitivo. Dos meses más tarde, en mayo de 1884, se iba a inaugurar la Exposición Universal de Turín y con motivo de ello el gobierno italiano había convocado un premio de 10.000 francos para aquel inventor que ofreciera el mejor procedimiento para transmitir la energía eléctrica a gran distancia, como fuerza y como luz.

A esta convocatoria se presentaron Gaulard y Gibbs con el invento del generador secundario y realizaron experimentos de transporte de energía entre las estaciones de Turín, Venaria y Lanzo. La red primaria era de 40 km y la potencia de la instalación era de unos 20 kW y con una tensión alterna monofásica de 2000 V. Hubo un jurado internacional para ensayar la instalación que emitió un informe favorable, por lo que se decidió conceder el premio del Gobierno itaiano, a los inventores Gaulard y Gibbs.

A la Exposición Eléctrica de Turín, acudieron muchos científicos de todo el mundo para ver los últimos avances de la ciencia eléctrica; entre ellos había tres ingenieros de la factoría Ganz de Budapest: Deri, Bláthy y Zipernowsky, y cuando regresaron a Budapest, prepararon diversos prototipos de generadores secundarios, con los cuales registraron diversas patentes en Austria. El 16 de Septiembre de 1884 se construyó en esta

fábrica el primer *generador secundario*, al que bautizaron con el nombre de *transformador* y que tenía modificaciones sustanciales respecto de los generadores secundarios de Gaulard y Gibbs.

Al mismo tiempo, el empresario estadounidense Westinghouse había comprado las patentes americanas que protegían el sistema de transporte de corriente alterna desarrollado por Gaulard y Gibbs en Europa. Y poco tiempo después, Stanley que era colaborador de Westinghouse, llegó a unas conclusiones similares a las conseguidas por los ingenieros húngaros. Ensayó también varios tipos de transformadores en su laboratorio de Massachusetts, y en el invierno de 1885-86, construyó la primera red experimental de distribución de corriente alterna de 1200 m de longitud, que alimentaba 150 lámparas incandescentes de la ciudad.

El éxito de estas experiencias hizo que Westinghouse fundara el 1 de enero de 1886, la empresa que lleva su nombre, para iniciarse en el negocio de la electricidad y se dedicó a comprar multitud de patentes para asegurar su supremacía en la naciente industria eléctrica. De hecho, alrededor de 1890, compró todos los derechos de patentes del ingeniero americano de origen croata, Nikola Tesla, en especial la que se refería al motor asíncrono o de inducción, en su versión bifásica, que obraba en poder de Tesla desde mayo de 1888.

Mientras tanto en Europa, la primera línea de transporte a gran distancia de c.a. trifásica la construyó la Compañía alemana AEG en 1891 con motivo de la Exposición Electrotécnica Internacional de Francfort. Era una línea de 175 km de longitud a 15000 V, que unía Lauffen con Frankfort. La central era hidroeléctrica y estaba situada en el río Neckar a su paso por Lauffen. En la sala de máquinas había un alternador trifásico de 300 CV (hoy diríamos unos 210 kVA) que fue diseñado por el ingeniero suizo Charles Brown, director de los talleres suizos Oerlikon.

En Francfort, que era el final de la línea, la tensión se reducía a 110 V y se utilizaba para iluminar las diversas salas de la Exposición y mover un motor trifásico de anillos rozantes, diseñado por Michael Dolivo-Dobrowolsky, director de ingeniería de la AEG. Los ensayos eléctricos que se hicieron, demostraron que la línea tenía un rendimiento superior al 75%. Estos resultados se divulgaron con rapidez por todo el mundo, y demostraron la superioridad de la corriente alterna y el uso de los transformadores para hacer rentable el transporte de energía eléctrica a gran distancia.

En el año 1893 se celebró la Exposición Universal o Columbiana de Chicago, para conmemorar con un año de retraso, el cuarto centenario del

descubrimiento de América. En esta Exposición, la empresa *General Electric*, que se había fundado en 1892, como fusión de la *Edison General Electric* y la *Thomson-Houston Company*, y la Compañía Westinghouse presentaron sus últimas innovaciones en maquinaria eléctrica ya que era importante demostrar el poderío de cada una de ellas, porque ambas sociedades habían presentado sendos proyectos para la construcción de una gran central hidroeléctrica en las cataratas del Niágara que estaba a punto de adjudicarse. El proyecto de la Central del Niágara fue asignado finalmente a la Compañía Westinghouse.

Esta Central que entró en servicio en 1896 tenía una potencia total de 50.000 CV, es decir doscientas veces superior a la línea Lauffen-Frankfort y que era una cifra monumental en esa época. El salto neto era de 54 m y la central disponía de 10 turbinas que movían alternadores bifásicos de 5000 CV. La tensión bifásica de los alternadores se elevaba y convertía en trifásica por medio de transformadores con conexión Scott hasta un valor de 11 kV, realizándose una línea de transporte de 35 km para alimentar la ciudad de Buffalo cercana a las cataratas.

Esta instalación representó el triunfo definitivo de la corriente alterna frente a la corriente continua, en definitiva el triunfo de la Compañía Westinghouse frente a la empresa General Electric o de otro modo la victoria de Tesla versus Edison. Con ello finalizó lo que por aquella época se conoció como la *guerra de las corrientes*.

3. – Crecimiento y consolidación del sistema eléctrico de potencia

A partir del año 1896, la mayoría de las centrales y líneas de transporte de energía eléctrica que se fueron construyendo en el mundo fueron de c.a. y poco a poco se fue imponiendo el sistema trifásico europeo de la AEG, frente al sistema bifásico de Westinghouse. Sin embargo debido a la influencia de Edison, se seguían construyendo algunas instalaciones de generación y transporte en corriente continua, pero que poco a poco se transformarían en corriente alterna.

A medida que se construían nuevas líneas de mayor potencia y longitud, la tensión de funcionamiento se iba aumentando. Fue para ello importante la invención afortunada en 1906, por parte de Harold Buck y de Edward Hewlett del aislador tipo suspendido o de cadena, que permitió alcanzar tensiones mucho más elevadas, ya que los aisladores clásicos tenían limitada la tensión a unos 40 kV.

Ya en 1898 se había construido en en los Estados Unidos, una línea de transporte trifásica a 30 kV de la red de 120 km entre Santa Ana y los

Angeles, en California y a este proyecto le siguieron otros similares con líneas de más longitud y tensión y que se señalan en la parte izquierda de la transparencia, en la que podrán observar que el nivel de los 380 kV se consiguió en Suecia en 1954. El éxito de esta última línea influyó en la decisión de adoptar el nivel de 380/400 kV para la interconexión de todo el continente europeo. En 1965 se alcanzó en Canadá la tensión de 765 kV y en 1990 se llegó a 1200 kV en la antigua Unión Soviética, aunque poco tiempo después se rebajó su funcionamiento a los 500 kV.

En España, las fechas de puesta en servicio de las líneas de transporte en corriente alterna trifásica, se muestran en la parte derecha de la transparencia, en la que se indican también los niveles de tensión correspondientes, hasta alcanzarse en 1964 los 380 kV que permitió el acoplamiento a la red europea de alta tensión. En la actualidad (año 2016), en España hay más de 42.000 km de líneas con tensiones superiores a los 110 kV.

Debe señalarse, que aunque las redes de transporte han sido casi siempre de corriente alterna en alta tensión, también se utilizan para este fin, sistemas en corriente continua en alta tensión y que se suele denominar por sus siglas en inglés HVDC. De tal modo, que aunque el conjunto generador-transformador son de c.a., hay una etapa de conversión de la c.a. en c.c. utilizando rectificadores y otra al final de la línea, donde se convierte la c.c. en c.a., mediante onduladores o inversores. La corriente continua tiene la ventaja sobre la corriente alterna de necesitar menos aislamiento, y de que no existen caídas de tensión de tipo inductivo; además de que hay una posibilidad total de control de la potencia que transmiten.

La primera red moderna, en la que se utilizó corriente continua en alta tensión la construyó la empresa ASEA, hoy ABB, en 1954 en Suecia. Era una red submarina de 100 km de longitud que unía el continente sueco, con la isla de Gotland, en el mar Báltico; la tensión de c.c. era de 100 kV y la potencia 20 MW y se emplearon grupos rectificadores/inversores de vapor de mercurio. Esta experiencia fue el inicio del gran desarrollo de este tipo de líneas en las últimas décadas del siglo XX. Por ejemplo, en 1979, se inauguró la línea Cahora Bassa, entre Mozambique y Sudáfrica, de 1420 km de longitud, 533 kV y 1920 MW de potencia; esta línea fue una de las primeras en la que se utilizaron tiristores en vez de convertidores de vapor de mercurio y que sería la tecnología de electrónica de potencia que se impondría a partir de entonces.

Con el cambio de siglo, el crecimiento de estas instalaciones ha sido espectacular; por ejemplo en China en el año 2014, entró en

funcionamiento una línea HVDC, de 1680 km, a 800 kV y de 8000 MW. Hay instalaciones similares en la India y en Nueva Zelanda y proyectos previstos para el transporte en c.c. a 1100 kV.

También en España se han construido en los últimos años redes de c.c. en alta tensión y así en el año 2011 se inauguró el proyecto Rómulo, que es una línea submarina que enlaza la península con las islas Baleares, entre Sagunto, en Valencia, con Calviá, en Mallorca. Es una línea de 237 km de longitud de 400 MW de potencia y a una tensión de 220 kV. Otra red de corriente continua en alta tensión, es la Interconexión Eléctrica Francia-España, y que se conoce como proyecto INELFE. Es una línea subterránea de corriente continua que se inauguró en el año 2015 y que une ambos países a través de los Pirineos, desde Figueras hasta Perpiñán con una longitud de 64 km, a 320 kV y de 2800 MW de potencia.

Siguiendo con nuestro relato, se debe tener en cuenta que hasta los años 1917-1920, las redes eléctricas funcionaban como sistemas aislados, en los que las diversas Compañías Eléctricas gestionaban sus propias transferencias de energía y se agrupaban en zonas o áreas específicas, donde predominaban las centrales hidroeléctricas frente a las térmicas equipadas desde principios del siglo XX, con turbinas de vapor de Parsons. En esa época, la gestión de la red se efectuaba en las salas de control de las centrales y su actuación era manual.

Pero conforme empezó a aumentar el desarrollo industrial, que utilizaba la electricidad para su proceso productivo, subió la demanda de energía eléctrica, lo que hizo imprescindible conseguir una mayor seguridad de funcionamiento. Como consecuencia de ello, en los primeros años de la década de 1930, se empezaron a unir las diversas zonas cercanas por medio de *interconexiones*, lo que permitió reducir los costes de operación de los sistemas eléctricos, ya que era más barato para una compañía, el comprar energía a otra empresa vecina antes que producirla en sus propias centrales.

Otro aspecto a tener en cuenta, es que para poder unir las diferentes redes, deben trabajar todas ellas con la misma frecuencia y por tanto con un sincronismo perfecto, lo que fue un problema al principio del siglo XX, debido a la diferencia de las frecuencias que existían entre las diversas centrales de un país. Por ejemplo en el año 1924 en el Reino Unido había 14 frecuencias diferentes en sus redes de c.a. y 43 tensiones distintas de suministro en baja tensión. Hubo que proceder entonces a una normalización. Alrededor de 1930, Estados Unidos y Canadá eligieron una frecuencia de 60 Hz, mientras que en ese mismo periodo, el continente europeo se decidió por 50 Hz.

A este respecto, debe señalarse que en España, entre los años 1915 y 1917, el profesor de Electrotecnia del ICAI, Agustín Pérez del Pulgar, había publicado diversos artículos en la Revista Ibérica, proponiendo la creación de un *proyecto de red eléctrica nacional*. Esta preocupación que se hacía sentir en todo el sector eléctrico hizo que en el año 1919 se nombrase una Comisión para el Establecimiento de una Red Nacional de Energía Eléctrica, formada por los profesores José María Madariaga, de la Escuela de Ingenieros de Minas; Antonio González Echarte, de la Escuela de Ingenieros de Caminos y José Antonio Artigas, de la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid. También pertenecía a esta Comisión, el empresario Juan de Urrutia, que era ingeniero de Minas y que había fundado en la primera década del siglo XX, varias empresas eléctricas, y que tras diversas fusiones y absorciones, son el origen de la actual Iberdrola.

Probablemente la Guerra Civil española dio al traste con la idea de la construcción de una Red Eléctrica Nacional. Pero en el año 1944 se fundó la Sociedad UNESA o Unidad Eléctrica, S.A. Esta empresa hizo un gran esfuerzo entre los años 1945 a 1953 para coordinar el funcionamiento de las diversas centrales eléctricas del país, culminando su trabajo con la creación en 1953 del *Repartidor Central de Cargas (RECA)* y los despachos de zonas, que fueron en definitiva el germen de una Red Eléctrica Nacional. Esta situación duró hasta el año 1985, al constituirse la Sociedad estatal *Red Eléctrica de España*, que fue la primera empresa del mundo dedicada en exclusiva al transporte y operación de un sistema eléctrico nacional.

4. – El sistema eléctrico de potencia y el control automático de la generación

Un sistema eléctrico de potencia es el conjunto de instalaciones y equipos utilizados para generar, transportar y distribuir energía eléctrica a todos los rincones de un país a una frecuencia constante para que se mantenga todo el conjunto en sincronismo. Su función es abastecer a todos los usuarios con energía eléctrica, con un nivel aceptable de calidad y seguridad. En la transparencia se muestra el esquema simplificado de un *sistema eléctrico de potencia*.

Como se muestra en la parte izquierda de la transparencia, la generación de energía procede de las centrales hidráulicas, térmicas y nucleares y también, desde hace unos años, de otras fuentes que contribuyen a la generación, como son los parques eólicos, los sistemas fotovoltaicos, y las centrales solares térmicas, de biomasa, residuos, etc.

De las centrales generadoras parten las *líneas de transporte* a muy alta tensión (en España 400 kV), que son de gran longitud, al final de las cuales se localizan las *subestaciones transformadoras*, que reducen el valor de la tensión, y de las cuales salen las *líneas de reparto* para alimentar las grandes industrias y las grandes ciudades. Estas redes de reparto, llevan la energía eléctrica hasta las *subestaciones de distribución*, en las que se produce otra reducción de tensión, para alimentar desde allí a líneas menores, denominadas *redes de distribución primaria* y que se utilizan para alimentar a pequeñas factorías y a la electrificación rural. Para los consumidores menores, la tensión sufre una nueva reducción a niveles de 230 y 400 V por medio de *cabinas de transformación* y las redes que parten de ellos se denominan *redes de distribución secundaria o de baja tensión*.

Un aspecto clave en los sistemas eléctricos, es el hecho de que la electricidad debe generarse al mismo tiempo que se consume, por lo que debe existir siempre una igualdad entre la potencia demandada por los consumidores, con la potencia generada y que procede, en el caso de las centrales eléctricas convencionales, de la potencia mecánica que desarrollan las turbinas. Cuando existe un aumento de la demanda, mientras no se modifique la potencia mecánica suministrada por la turbina, la energía adicional requerida se extrae de la energía cinética almacenada en las masas giratorias del grupo turbina-generator, con lo cual la velocidad de giro del grupo experimentará un descenso, que se refleja en la misma proporción en la frecuencia del generador. Lo contrario sucede cuando hay una reducción en la demanda.

En el caso del sistema eléctrico, para mantener la frecuencia en su valor nominal ante las variaciones de la carga y realizar la distribución de la potencia entre los grupos de las diferentes centrales, se dispone del denominado Control Automático de la Generación, conocido por sus siglas en inglés como AGC. Este control se realiza con tres lazos diferentes que actúan en escalas de tiempo distintas y que se denominan regulación primaria, regulación secundaria y regulación terciaria.

Cuando se produce un cambio de carga en el sistema eléctrico, es decir un desequilibrio de potencias, el primer lazo que actúa es la *regulación primaria* y que se realiza mediante los *reguladores de velocidad* que tienen los grupos turbina-alternador de las centrales y que actúan de forma automática. Su misión es restablecer la igualdad entre la generación y la demanda, minimizando el desvío de la frecuencia que ha producido el cambio de la carga. La actuación de la regulación primaria deja un error de

frecuencia, por lo que esta regulación es imperfecta, pero es rápida y estable y se *desarrolla en un periodo que no supera los treinta segundos*.

El error o deriva de la frecuencia, se corrige mediante la *regulación secundaria*, que en la práctica es un *motor de control de potencia* que modifica el punto de trabajo del regulador de velocidad y que llevan todos los grupos para devolver la frecuencia al valor nominal. Esta *regulación secundaria* actúa en *decenas de segundos* y a diferencia con la primaria, que se ejecuta sobre una unidad individual, esta maniobra se aplica a un conjunto que incluye varios grupos e incluso varias centrales de una zona, gestionada en principio por una sola empresa eléctrica.

Debe señalarse, que al existir áreas interconectadas en el sistema eléctrico, la regulación secundaria, no solamente se emplea para anular el error de frecuencia del área que vigila, sino que también anula el denominado error de área, que es un parámetro que se utiliza para impedir que varíe la potencia de intercambio entre estas zonas interconectadas y que se mantenga en el *valor estipulado o programado*. Es por este motivo que cuando comenzaron las interconexiones, apareció la denominada *regulación terciaria* (que actúa entre 10 y 15 minutos), que se encarga de realizar el reparto de la generación de energía eléctrica, en función de los costes incrementales de cada central y que se verifica previamente en los denominados *despachos económicos*.

En el sistema eléctrico peninsular español, que tiene conexiones con Francia, Portugal y Marruecos, este Control Automático de Generación, se organiza de forma jerárquica, con un regulador central supervisado por la empresa Red Eléctrica de España, gestionando el mantenimiento de la potencia de intercambio con Francia y la frecuencia en sus valores programados. Portugal y Marruecos son los encargados de mantener la potencia de intercambio entre España y cada uno de ellos.

Para realizar todas estas operaciones existen en la red, sistemas de adquisición de datos, conocidos con el nombre de SCADAs y que son sistemas centralizados que reciben información o datos de los distintos puntos del sistema eléctrico para gestionar la red. Los SCADAs realizan la adquisición y telemida de las variables de la red, hacen también una labor de supervisión, ya que el operador comprueba el estado de los dispositivos remotos.

El funcionamiento coordinado de los tres sistemas de regulación hasta aquí comentados es tan extraordinario y preciso que se puede afirmar sin ninguna duda que el Sistema Eléctrico de Potencia es *una de las estructuras más complejas que ha creado el hombre*, ya que es capaz de

gestionar cantidades enormes de potencia, para asegurar una calidad y seguridad en el suministro de energía eléctrica de un país y que requiere la sociedad contemporánea.

5.- El sistema eléctrico del futuro. La red eléctrica inteligente (*smart grid*)

La población mundial ha pasado de 2.000 millones de personas a principios del siglo XX a los 7.330 millones actuales y la previsión es que estas cifras aumenten un 33% hasta 2050, alcanzando un valor de 9.700 millones. En paralelo a este aumento poblacional, se está produciendo un incremento en el desarrollo económico mundial. En los últimos 30 años, se ha duplicado el consumo energético mundial y las previsiones indican que este valor se incrementará en un 50% para 2030. Además, en un mundo cada vez más automatizado e interconectado, la energía eléctrica es fundamental para su funcionamiento, y por ello, asegurar la fiabilidad del sistema es un aspecto crítico.

Finalmente, y debido a que la mayor parte de la generación eléctrica se realiza actualmente con combustibles fósiles, las emisiones de gases de efecto invernadero están produciendo un cambio climático significativo en el planeta, con un aumento de la temperatura global, favoreciendo el deshielo progresivo de las masas glaciares, la subida del nivel del mar y la producción de fenómenos meteorológicos extremos tales como las tormentas y las sequías.

Aunque existen diversas soluciones conjuntas para solventar este reto, tales como el cambio del modelo de movilidad urbano, la sustitución de fuentes de energía clásica por energías renovables o el cambio de los hábitos de consumo; la solución fundamental para resolver estos desafíos radica en el aumento de la conectividad y el avance de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC).

Las redes inteligentes, conocidas en inglés por el nombre de *Smart Grids*, permitirán integrar el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ellas (los generadores y los consumidores) con el fin de funcionar de manera eficiente, sostenible y económica, garantizando el suministro de electricidad. Las *Smart Grids* no sólo suministrarán energía sino también información.

La generación convencional centralizada, dará paso a una generación local distribuida, permitiendo una reducción drástica de las pérdidas por el transporte. Esta generación descentralizada estará basada en energías renovables y permitirá a los individuos, comunidades, barrios y ciudades, generar su propia electricidad y utilizarla en micro-redes internas,

vendiendo los excedentes a la red principal. El papel del consumidor será mucho más activo y flexible, asumiendo también el rol del productor. Para ello, será necesario avanzar también en el desarrollo del mercado de la electricidad, permitiendo nuevas funcionalidades y servicios a los comercializadores y a los consumidores.

El almacenamiento eléctrico a través de diversas tecnologías, permitirá desacoplar el equilibrio clásico entre la generación y la demanda, almacenando el excedente de generación para recuperarlo posteriormente en periodos de menor consumo. De nuevo este almacenamiento se realizará también a nivel local y de forma distribuida, favoreciendo el autoconsumo entre los usuarios finales.

El almacenamiento también podrá ayudar a solventar el problema de la integración de las energías renovables, ya que este tipo de energías tiene un elevado grado de incertidumbre en su previsión y puede variar fuertemente en periodos de tiempo muy cortos. El trabajo combinado de estos sistemas de almacenamiento con fuentes intermitentes de energía renovable permitirá una mayor regulación de este tipo de centrales.

El sector del transporte es una actividad que requiere un gran consumo energético y es el mayor productor de emisiones de efecto invernadero en el entorno urbano. Los altos índices de contaminación, elevan los riesgos para la salud pública y por ello, la electrificación del transporte se presenta como una de las vías para avanzar en la mejora del medio ambiente a nivel local.

En los próximos años vamos a ser testigos del despliegue masivo de vehículos eléctricos. Estos vehículos son más eficientes, no emiten gases contaminantes de forma local, y tampoco producen ruidos. Este nuevo consumidor de electricidad puede ayudar al sistema eléctrico, permitiendo aplanar la curva de carga y evitando los vertidos de energía renovable que, en ocasiones se produce durante la noche, cuando la demanda eléctrica baja y la generación es elevada.

Además, y puesto que los vehículos están estacionados la mayor parte del tiempo, se podrán utilizar sus baterías como sistemas distribuidos de almacenamiento de energía, pudiendo prestar servicios al sistema eléctrico, permitiendo aportar energía a la red durante las horas punta, mediante aplicaciones conocidas por sus siglas en inglés *V2G*.

El despliegue masivo de sensores a todos los niveles de la red eléctrica, conocido con el nombre de *Internet de las Cosas*, permitirá una mayor supervisión y control de la red eléctrica, gestionándola de forma más

eficiente y aumentando la resiliencia de esta infraestructura crítica, haciendo que opere de forma ininterrumpida y sin incidencias.

El despliegue de los contadores inteligentes, está permitiendo a los usuarios recibir información en tiempo real de su consumo eléctrico, ayudándoles a concienciarse sobre su consumo y a hacer un uso más racional de la energía eléctrica.

Con la actual explosión de datos generados por la interacción de los usuarios a través de las redes sociales y de los millones de sensores y dispositivos conectados a la red, la gestión y análisis de dichos datos para extraer conocimiento y facilitar la toma de decisiones va a ser fundamental dentro de la *Smart Grid*. El conocido como *Big Data* va a tener un papel clave en el desarrollo de estas redes, permitiendo gestionar un gran volumen de datos, de diversos tipos y orígenes, con una gran velocidad de procesamiento y obtener la información correcta en el momento adecuado.

Como vemos, toda esta complejidad que va a adquirir el sistema eléctrico del futuro, necesitará de la contribución de ingenieros de las más diversas especialidades, pero que deberán tener una sólida formación de base y con capacidad para integrarse en equipos multidisciplinares, contribuyendo a una mayor integración de las fuentes de energía renovable, sabiendo concienciar a los ciudadanos para que hagan un uso más racional de la energía a fin de lograr un mundo más sostenible para las generaciones venideras.

Y, por su particular naturaleza, este es el reto de nuestra Universidad Politécnica de Madrid, que deberá seguir preparando a los mejores profesionales de la ingeniería en España, para que impulsen con rigor y entusiasmo este futuro eléctrico en nuestro país.

6. –Epílogo

Antes de dar por finalizada esta lección, quisiera evocar la figura de D. José Morillo y Farfán, que fue el primer catedrático de Electrotecnia de la Escuela de Ingenieros Industriales de Madrid entre 1909 y 1941 y director de ese Centro entre 1919 y 1929. Este profesor escribió en 1931 un magnífico Curso de Electrotecnia en tres tomos, que fue el texto clásico empleado para estudiar esta asignatura en la mayoría de las Escuelas de Ingeniería Superior y de Ingeniería Técnica de España durante casi 50 años.

Tengo que señalar, que esta obra fue mi primer libro de texto de Electrotecnia, y que utilicé en los dos últimos cursos, cuando yo estudiaba mi primera carrera de Perito Industrial Eléctrico en la Universidad de Zaragoza. Y probablemente se deba a la influencia de esta publicación tan

didáctica y a la gran admiración que sentía por el profesor D. Valentín Abadía Lalana, que me explicó esta materia con excepcional magisterio, por lo que años después, decidí consagrar mi vida a la enseñanza de la Ingeniería Eléctrica.

Y es por esta grata experiencia que les acabo de contar a ustedes, por lo que animo a todos los profesores de esta Universidad Politécnica de Madrid, para que pongan el máximo empeño en enseñar su asignatura con pasión y dedicación y que aprovechen las horas de clase para inculcar a los alumnos la importancia del esfuerzo, pues de este modo abrirán sus mentes a la felicidad que supone el saber y esta acción logrará aumentar el deseo de los estudiantes en aprender a aprender, lo que les servirá en el futuro para adaptarse con facilidad a un mundo que está en continua transformación y que les va a obligar a tener que seguir un reciclaje continuo durante toda su vida profesional. Les aseguro que ese esfuerzo del profesor, siempre dejará un recuerdo imborrable en sus alumnos, que serán los ingenieros del mañana que han de recoger la antorcha que les hemos de transferir nosotros.

Quisiera aprovechar este acto, teniendo en cuenta que esta va ser probablemente mi última lección oficial, como profesor de esta universidad, para dar las gracias a las Escuelas de Ingenieros de Telecomunicación, de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas, de Ingenieros Industriales y de Ingenieros de Caminos, en este caso tanto de la Universidad de Cantabria, como de la Universidad Politécnica de Madrid. De todas estas Escuelas guardo inolvidables recuerdos, pues siempre fui muy bien acogido por todos los miembros de la comunidad universitaria.

Y tengo que reconocer que he tenido además la gran fortuna de haber disfrutado enormemente de mi labor docente, intentando contagiar mi entusiasmo a todos los estudiantes a los que he enseñado durante tantos años. Si lo he conseguido, es la mayor recompensa que puede tener un profesor, cuando ha llegado al final de su vida académica.

Deseo también agradecer a toda mi familia, la gran ayuda que he recibido siempre a lo largo de toda mi vida y por comprender mi vocación docente. Mis recuerdos se dirigen en primer lugar, a mis padres: Jesús y Pilar, mis primeros y mejores maestros; su ejemplo de dedicación y esfuerzo siempre fueron la guía de mi vida. Mi agradecimiento se extiende después, en orden cronológico, a mis tres hermanas: Rosario, M^a Pilar y Rosa; a mi esposa Presen; a mis hijos: Jesús y Cristina y a mis nietos: Laura y Pablo, que siempre me han apoyado en los periodos más cruciales de mi vida.

En especial, quiero rendir un merecido homenaje a mi esposa, que ha sido la que de verdad ha sufrido mi gran dedicación a la enseñanza, y que siempre ha estado detrás de mí en la sombra, soportando con gran resignación y entereza, mis largas horas dedicadas al estudio, con tal de comprobar que yo era feliz en mi trabajo.

Finalmente, quiero expresar mi agradecimiento más sincero, a todas las personas que me ayudaron a lo largo de mi vida y que hicieron posible que pudiera dedicarme a esta extraordinaria profesión.

¡Muchas gracias a todos por su atención!