

rAAGI



**REVISTA DE LA ACADEMIA ASTURIANA
DE CIENCIA E INGENIERÍA**

Volumen 1, Año 2021



Revista de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

2021

Director y Responsable de Publicaciones: Mario Díaz y Cristina Rodríguez

Consejo de Redacción (2021): Consuelo Martínez y Javier Cuevas

Coordinador técnico: Javier Sebastián

Consejo Científico

José Luis Acuña	Catedrático de Ecología. Univ. de Oviedo
Antonio Bahamonde	Catedrático de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial. Univ. de Oviedo
Javier Cuevas	Catedrático de Física. Univ. de Oviedo
Mario Díaz	Catedrático de Ingeniería Química. Univ. de Oviedo
María Ángeles Gil	Catedrática de Estadística. Univ. de Oviedo
Carlos López-Otín	Catedrático de Bioquímica. Univ. de Oviedo
Abelardo Margolles	Profesor de Investigación. IPLA - CSIC
Consuelo Martínez	Catedrática de Álgebra. Univ. de Oviedo
Rosa Menéndez	Profesora de Investigación. INCAR - CSIC
María Rosario Rodicio	Catedrática de Microbiología. Universidad de Oviedo
Cristina Rodríguez	Catedrática de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Univ. de Oviedo
Javier Sebastián	Catedrático de Tecnología Electrónica. Univ. de Oviedo

rAACI

Revista de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

Dirección postal: Edificio Histórico de la Universidad de Oviedo.

C/ San Francisco, 3, 33001 Oviedo

<http://www.aaci.es>. Correo electrónico: comunicacion@aaci.es

ISSN 2792-9302

Gestor web: Cristina Rodríguez

Diseño y Maquetación: Javier Sebastián y M^a Ángeles Gil

©2021 AACI

Prefacio

La creación de la Consejería de Ciencia, Innovación y Universidad por parte del Gobierno del Principado de Asturias está catalizando una serie de cambios en la gobernanza, normativa, financiación y estructura de la ciencia, que sentarán el cimiento de una nueva época donde la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación deben hacernos avanzar hacia una realidad socioeconómica más verde, digital e inclusiva. La creación de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería —en adelante la Academia— viene a marcar un hito en este tránsito, recogiendo y desarrollando un precepto constitucional contenido en nuestro Estatuto de Autonomía y que es competencia exclusiva de nuestra Comunidad Autónoma: las academias con domicilio social en el Principado de Asturias. Nuestra Ley 5/1997 las define como “corporaciones de derecho público que tienen como finalidad principal la investigación en el campo de las artes, las ciencias o las letras”.

La necesidad de crear una entidad corporativa que integrase a aquellas personas que están contribuyendo de forma tan decisiva al desarrollo de la ciencia e ingeniería, y el aval a la misma proporcionado por una serie de miembros fundadores y destacados en sus propios ámbitos de investigación a nivel internacional, vienen a refrendar el gran impulso que este nuevo foro puede tener no solo para el desarrollo del sistema científico tecnológico, sino para el del Principado de Asturias.

La creación de la Academia ha sido constituida de forma muy ágil, como denotan los apenas siete meses transcurridos desde el 31 de marzo de 2021, día en que tuve noticias por vez primera de esta iniciativa de mano del profesor Mario Díaz, hasta la fecha de publicación del Decreto 67/2021, el 29 de octubre del mismo año. Desde el Gobierno de Asturias y, concretamente, desde la Consejería de Ciencia no dudamos en apoyar y respaldar presupuestariamente esta iniciativa que consideramos fundamental. Se da así un paso decisivo para fomentar la investigación multidisciplinar, la comunicación y colaboración entre los agentes del Sistema Asturiano de Ciencia e Innovación, y para la transferencia de conocimiento a nuestra sociedad y a nuestro tejido productivo.

El nacimiento de la Revista de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería (rAACI), que ve la luz en este primer número, da buena muestra de la labor de acercamiento de la ciencia a la sociedad y de la importante contribución a la divulgación científica en nuestra comunidad.

¡Enhorabuena por esta iniciativa tan necesaria!



Borja Sánchez
Consejero de Ciencia, Innovación y Universidad
Principado de Asturias

rAAGI

Vol. 1, Año 2021

Índice

<i>Promoviendo la Ciencia y la Ingeniería</i> Mario Díaz	1
Resúmenes de los artículos	3
<i>Ciencia y pesca en Asturias</i> José Luis Acuña	5
<i>Resistencia bacteriana a los antibióticos: ¿Pueden dejar de curar?</i> María Rosario Rodicio	21
<i>Energía Eléctrica: por qué, desde dónde y para qué</i> Javier Sebastián	43
<i>Partículas elementales e interacciones fundamentales: qué sabemos y qué podemos esperar en el futuro</i> Javier Cuevas	71

REVISTA DE LA ACADEMIA ASTURIANA
DE CIENCIAS

Promoviendo la Ciencia y la Ingeniería

Empezando un camino en tiempos de pandemia

“*Los cielos nunca ayudan al hombre que no quiere actuar*”, es una frase que se atribuye a Sófocles. Y los miembros de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería (AACI) queremos actuar promoviendo su desarrollo y difundiendo sus valores, atendiendo siempre al bien común para Asturias. La mejora de la cultura científica es muy importante para el avance de la región. Con estos objetivos se ha proyectado la realización de una revista de difusión dirigida a un público potencialmente interesado, sin una finalidad de investigación especializada, sino orientada hacia la divulgación general. Este primer número supone, por tanto, el lanzamiento de una revista que trata de abordar temas de interés científico e ingenieril, presentados con una explicación suficientemente clara, si bien se prescindirá en ella de detalles o de análisis demasiado profundos, con una visión a un tiempo formativa y amena.

El comienzo de cualquier revista, siempre tiene un componente ilusionante, pero también plantea un interrogante. Este concierne al grado de divulgación de la ciencia e ingeniería que pueda lograrse, siendo conscientes tanto de la dificultad, como de la necesidad de atraer lectores. Sabemos del valor de cada logro, de la importancia del entusiasmo que pueda generar, en particular en jóvenes, junto con la posible contribución general al progreso de la sociedad. Decía Leonardo Da Vinci que “*la ciencia más útil es aquella cuyo fruto es el más comunicable*”, y esta aseveración se mantiene vigente, de modo que procuraremos hacer un esfuerzo para facilitar esa comunicación, habida cuenta de que no siempre será una tarea fácil.

Resulta imposible olvidarnos que llevamos dos años conviviendo con el COVID, lo que ha supuesto dos años tratando con las actividades habituales además de con otros muchos problemas añadidos que han ido apareciendo. Hemos perdido herramientas de comunicación personal muy importantes y hemos tenido que avanzar en comunicación digital, que parece vamos a incorporar de forma fructífera a nuestras formas de intercambio. Así que esperamos haber aprovechado de alguna forma este periodo dando la razón a Gaspar M. Jovellanos cuando decía que “*sólo falta el tiempo a quien no sabe cómo aprovecharlo*”.

Conviene recordar también que la palabra para FundeuRAE del año 2021 ha sido ‘vacuna’, señalando así a la herramienta que nos está colocando en una senda de bastante optimismo, siendo además el arma necesaria para luchar contra un virus que ha resultado una amenaza y nos ha cambiado la vida. Al mismo tiempo, señalar el exitoso papel jugado por la ciencia y la ingeniería, tanto en el desarrollo de la vacuna como en la puesta a punto de miles de millones de unidades en el sistema de salud.

La difusión de la ciencia es una de las actividades relevantes para la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería, por lo que en esta primera ocasión queremos hacer coincidir la presentación de la revista con la de la propia AACI. La Academia se ha creado hace apenas unos meses, con la publicación del Decreto 67/2021 de 26 de octubre donde se aprueban sus Estatutos (BOPA de 15 de noviembre de 2021). En su Preámbulo se señalan sus fines: Contribuir al desarrollo de la ciencia e ingeniería; estimular la investigación científica; promover el desarrollo tecnológico, el nivel económico y el bienestar social de Asturias; potenciar la colaboración multidisciplinar; y trasladar todo el conocimiento generado a la sociedad y al tejido productivo.

Los objetivos de difusión que pretendemos son un elemento más que se añade a las contribuciones que están realizando de forma eficaz otras organizaciones en nuestra región. Otras instituciones en Asturias tienen también su revista contribuyendo en varios campos del saber, en unos casos un tanto alejados, en otros mucho más próximos. Recordar así, entre otros, el *Boletín de Humanidades y Ciencias Sociales* del RIDEA, los *Anales de la Real Academia de Medicina y Cirugía del Principado de Asturias*, la *Revista Jurídica de Asturias de la Real Academia Asturiana de Jurisprudencia*, y la revista de la Academia de la Llingua Asturiana: *Ciencias. Cartafueyos Asturianos de Ciencia y Teunoloxia*. La sociedad asturiana les agradece su contribución a lo largo de los años.

La revista que hoy se presenta con el nombre **rAACI**, se ha organizado en esta primera edición de 2021, cubriendo campos muy diversos. En ella se recogen cuatro artículos, que incluyen: la ciencia y pesca en Asturias, los problemas del uso de antibióticos, las formas de generación de la energía eléctrica y la organización de las partículas subatómicas, todos ellos de gran importancia por su interés general. En el primer caso porque arroja una visión sobre el sector pesquero asturiano, los retos a los que se enfrenta y las oportunidades que se abren; en el segundo por mostrar aspectos tan importantes para la salud como las consecuencias del uso, bueno o malo, de los antibióticos; en el tercer caso para tener una visión tanto de la historia como de las perspectivas en la generación y utilización de la energía eléctrica; y, finalmente, el último artículo, por la importancia de conocer, de forma básica, la constitución elemental de la materia. Y todos ellos corroboran el papel destacado que la ciencia debe jugar en esos campos.

Unas palabras finales de agradecimiento para los autores de cada uno de estos cuatro artículos, José Luis Acuña, María Rosario Rodicio, Javier Sebastián (que ha ejercido de Coordinador) y Javier Cuevas, así como también a este último y Consuelo Martínez, que han desempeñado el papel de editores de este primer número de revista de AACI. Aprovecho, además, para hacer llegar mi gratitud a todos los miembros de AACI y en particular de la Comisión Ejecutiva.

Finalmente, mi especial agradecimiento a quienes han contribuido con su firme apoyo a la creación de la Academia: a la Universidad de Oviedo y al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, a las Academias de Jurisprudencia y de Medicina del Principado de Asturias, y también a los organismos administrativos, Consejería de Hacienda y Consejería de Ciencia, Innovación y Universidad, con especial mención a su Consejero. ¡Gracias a todos!

Esperamos la mejor acogida por los lectores, y deseamos que contribuya a la promoción del interés por la ciencia y la ingeniería, en particular entre los jóvenes. Porque la ciencia no es sólo una disciplina de la razón, como dice Stephen Hawking también lo es del romance y de la pasión. Cualquier comentario al respecto puede realizarse a través de la página web www.aaci.es.



Mario Díaz
Presidente de la
Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

Artículos - Resúmenes



José Luis Acuña

Ciencia y pesca en Asturias

Se señalan algunos de los desafíos a los que se enfrenta el sector pesquero asturiano, todos ellos relacionados con la competencia por el espacio marítimo con otros grupos interesados y que requerirá un fuerte compromiso de colaboración mutua entre dicho sector y científicos de las áreas más diversas.



M. Rosario Rodicio

Resistencia bacteriana a los antibióticos: ¿Pueden dejar de curar?

La disponibilidad de antimicrobianos eficaces resulta esencial, no solo para la prevención y curación de las enfermedades infecciosas, sino también para importantes procedimientos médicos como la cirugía, los trasplantes y la quimioterapia. Se recogen aquí diversos aspectos sobre lo que constituye uno de los mayores retos de la medicina actual: la resistencia bacteriana a los antibióticos, a través de su historia, bases científicas, evolución, perspectivas y prevención.



Javier Sebastián

Energía Eléctrica: por qué, desde dónde y para qué

El triunfo de la energía eléctrica nos interroga acerca de la evolución histórica de los métodos de su obtención, cuáles son las fuentes de energía que pueden transformarse en energía eléctrica, cómo puede almacenarse y cómo se puede cambiar su formato para satisfacer las necesidades de los usuarios.



Javier Cuevas

Partículas elementales e interacciones fundamentales: qué sabemos y qué podemos esperar en el futuro

Se resume nuestro conocimiento de la estructura de la materia y las interacciones que la gobiernan a la escala más fundamental conocida, la de las partículas elementales. Aún existen algunos problemas para los que no se posee una explicación, como la prevalencia de la materia sobre la antimateria en el Universo, o la naturaleza en términos de partículas de la materia oscura.

Ciencia y Pesca en Asturias

José Luis Acuña Fernández
Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

Resumen- Este artículo revisa algunos de los avances que se están produciendo en Asturias hacia una pesca artesanal sostenible, como el sello del Marine Stewardship Council de la Pesquería de pulpo del Occidente de Asturias, los Planes de Explotación del Percebe o la reciente formación del consorcio de colaboración entre pescadores y científicos REDEPESCA. Estas tres iniciativas, que atraen la atención de expertos, pescadores y público en todo el mundo, comparten una misma característica: requieren de la implicación profunda y decidida de la ciencia asturiana. El artículo termina planteando algunos de los desafíos a los que se enfrenta el sector pesquero asturiano, todos ellos relacionados con la competencia por el espacio marítimo con otros grupos interesados. Superar estos desafíos requerirá una cierta audacia por parte del sector pesquero, que deberá armarse de la mejor ciencia disponible. Sólo así podrán jugar con ventaja en los complejos procesos de adaptación y negociación a los que se enfrentará en un futuro próximo. Eso requerirá un fuerte compromiso de los investigadores con el sector pesquero asturiano.

La pesca artesanal se configura como la gran esperanza para la sostenibilidad de las pesquerías en el mundo. Al practicarse a bordo de barcos pequeños que vuelven a puerto todos los días, tiene una huella de carbono más reducida que la pesca industrial.

Las tripulaciones son pequeñas y a menudo familiares, con lo que las ganancias se reparten de forma más equitativa. Las artes suelen ser pasivas y más selectivas, generando menos

descartes y produciendo menos daños en los fondos marinos que los grandes arrastreros. Además, la pesca artesanal forma parte esencial de la identidad de los pueblos costeros y constituye un valioso patrimonio cultural allá donde persiste. Tras décadas de eficacia cuestionable, la Política Pesquera Común Europea se une ahora a una corriente global que persigue la reconstrucción de éstas pesquerías para garantizar un futuro más sostenible. Esta tarea será más factible en aquellos lugares en los que aún persiste un sector pesquero artesanal sobre el que iniciar la reconstrucción.

En Asturias quedan cerca de medio millar de pescadores artesanales, que faenan a bordo de algo más de 200 lanchas desde 19 puertos pesqueros (García de la Fuente, 2020; Figura 1). Es una flota modesta, con escaso relevo generacional - 47 años de promedio de edad - y en un preocupante retroceso en número de barcos y de pescadores.

Ciertamente, las nuevas generaciones abandonan la estela de sus mayores debido a un futuro incierto, con bajos precios de venta y en abierta competencia con pescadores de otras comunidades y países, además de con los furtivos. A esta incertidumbre se añaden los cambios actuales y futuros que genera el Cambio Climático y sus impactos sobre la pesca, la expansión de las Áreas Marinas Protegidas de la Red Natura

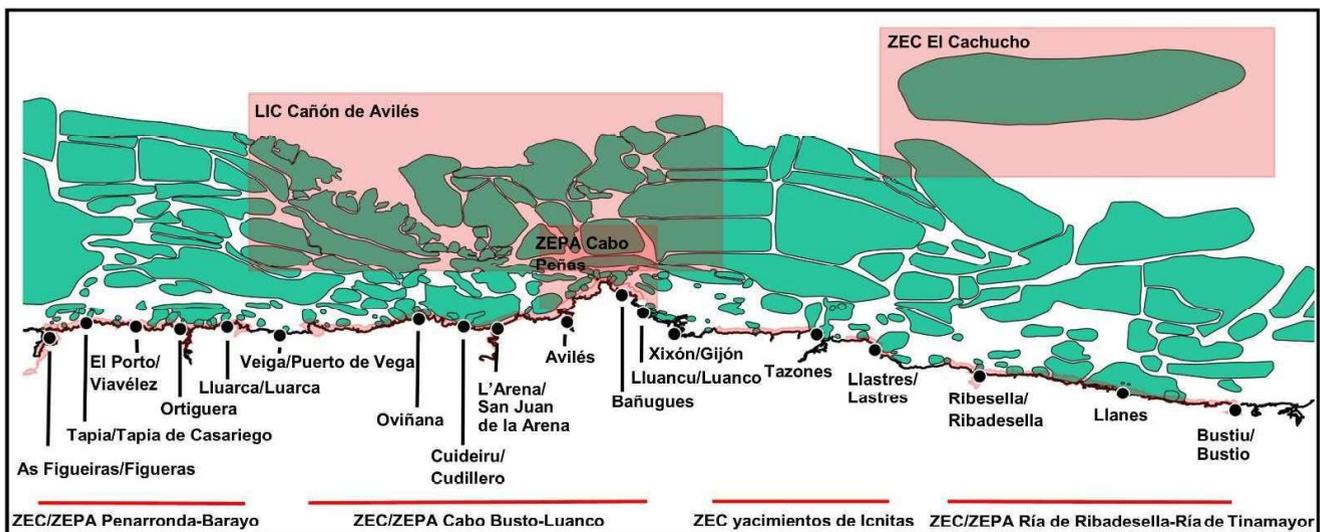


Figura 1. Mapa los puertos asturianos con cofradías, los caladeros y las zonas protegidas de la Red Natura 2000. Los polígonos verdes indican los caladeros, de acuerdo con la cartografía elaborada por el Centro de Experimentación Pesquera del Principado de Asturias (CEP), tras una exhaustiva campaña de entrevistas a pescadores. Puede ser consultado en un visor que el CEP pone a disposición del público, y que proporciona el nombre, tipo de fondo, las especies que se capturan y las artes que se utilizan en cada uno de esos caladeros (<http://www.sigmarinoasturias.es/>). Los rectángulos rojos en mar abierto indican las 3 principales zonas de protección esencialmente marinas de la Red Natura 2000 (capas GIS extraídas de su visor: <https://natura2000.eea.europa.eu/>). LIC es un Lugar de Interés Comunitario. Tras ser aprobado su plan de gestión, un LIC se convierte en ZEC, o Zona de Especial Conservación, ya plenamente integrada en la Red Natura 2000. Las ZEPAs son Zonas de Especial Conservación para las Aves. También se indican con polígonos rojos las ZEP/ZEPA de la zona costera. Las líneas rojas de la zona inferior de la gráfica indican el nombre de esas zonas, con la excepción de la ZEC/ZEPA de la Ría del EO, que no se señala. Se indican además los nombres de los puertos que tienen cofradías de pescadores. Línea de costa extraída del Centro de Descargas del CNIG: <https://centrodedescargas.cnig.es/>

2000, especialmente el Cañón de Avilés, y la más que probable implantación de parques eólicos marinos en un futuro no muy distante.

En este panorama de incertidumbre y desmotivación, el pequeño y modesto sector pesquero asturiano consiguió en 2016 atraer la atención del mundo con una iniciativa que lo situaba en la avanzadilla de la lucha por la sostenibilidad. Tras un complejo y costoso proceso de evaluación, iniciado por las embarcaciones dedicadas al pulpo (*Octopus vulgaris*, Cuvier 1797) de las cofradías de Tapia de Casariego, Viavélez, Ortiguera y Puerto de Vega, con el apoyo del CEDER Navia-Porcía (posteriormente se unirían al proyecto otras embarcaciones de puertos vecinos constituidas en la asociación de pescadores ARPESOS), la pesquería de pulpo del occidente asturiano se convirtió en la primera del mundo de cefalópodos en recibir el prestigioso sello de sostenibilidad del Marine Stewardship Council (MSC). Desde ese momento hasta la actualidad, la experiencia con el pulpo del occidente asturiano nos ha enseñado el papel esencial de la ciencia en el complejo viaje hacia una pesca responsable.

I. EL SELLO DEL MARINE STEWARSHIP COUNCIL

La implantación del sello supuso un aumento en el precio de venta en lonja entre un 15% y un 25% con respecto al de puertos cercanos no certificados (Sánchez et al. 2020). Por primera vez se obtenía evidencia científica de un beneficio directo para los pescadores como consecuencia de la certificación MSC. La demanda es tan notable que los pescadores generalmente llegan a puerto con la carga ya vendida a intermediarios también certificados con la ecoetiqueta que distribuyen los pulpos por todo el mundo (Figura 2). El destinatario final son consumidores ambientalmente sensibilizados, dispuestos a pagar un coste extra por un pulpo capturado de forma sostenible. Pero estos beneficios, que dignifican el oficio de la pesca, llevan asociado un serio compromiso. Es en los entresijos de ese compromiso donde radica el papel esencial de la ciencia.

El sello MSC no se otorga a la ligera, sino tras un complicado proceso de certificación. Antes de la certificación, el número de lanchas y pescadores llevaba más de una década disminuyendo de forma continuada. Esta disminución tuvo un beneficio colateral: la disminución en el esfuerzo de pesca situó a la pesquería de pulpo del occidente de Asturias en el umbral de la sostenibilidad. Por otra parte, se trata de una pesquería en régimen de cogestión desde 2001 (Fernández-Rueda y García-Flórez 2007). La cogestión implica que sólo una lista limitada de cofradías puede pescar pulpos en la zona y que la gestión se realiza de forma conjunta entre los pescadores y la administración. Estos privilegios tienen una contraparte: los pescadores deben ceñirse escrupulosamente a las recomendaciones de gestión y proporcionar información pormenorizada sobre sus capturas.

La cogestión del pulpo generó una base de datos exhaustiva sobre las capturas y otros detalles de la pesca. Estos datos, unidos a un importante esfuerzo de investigación, mediante observadores a bordo, promovido desde el Principado de Asturias desde 2014 y con la colaboración de la Universidad de Oviedo, convirtieron a esta pesquería en una de las mejores documentadas de España. Esta ventajosa situación de partida,

junto con el apoyo del Grupo de Acción Costera de Navia-Porcía y una apuesta decidida de los pescadores, que invirtieron su dinero en la certificación, abrieron las puertas del MSC. La información científica generada jugó un papel decisivo en todo este proceso.



Figura 2. Un pescador de la zona occidental de Asturias muestra su captura. La lancha se haya inscrita dentro del sello de ecocertificación del Marine Stewardship Council (Foto: MSC-España).

II. ¿CUÁNTOS PULPOS HAY EN EL MAR?

El sello MSC no es una medalla que se otorga de por vida. Una entidad independiente evalúa la pesquería periódicamente, solicitando mejoras en aquellos aspectos en los que se detectan deficiencias. Esto incluye los cebos utilizados, la pesca accidental de otras especies, los límites en el número de nasas, y muchos otros detalles. Se trata de una auténtica evaluación continua que puede frustrar la renovación del sello si los problemas persisten.

Desde el principio, la falta de una evaluación del stock marcó el grueso de las críticas. Dicho en términos llanos: no se sabía cuántos pulpos había en el mar. Los límites en las capturas y en el esfuerzo de pesca se establecían siguiendo el principio de precaución, pero sin una base científica objetiva. Claramente, mantener el sello MSC requería mejoras en ese ámbito. Pero esta no era una tarea sencilla. Las grandes pesquerías de merluza, bocarte o xarda, por poner ejemplos familiares, tienen un volumen suficiente para justificar las costosísimas campañas científicas que se requieren para evaluar la biomasa del stock. Pero esto no sucede con muchas de las especies que explota la pesca artesanal, por lo que sus stocks permanecen sin evaluar. En el caso del pulpo, esta falta de conocimiento preciso ponía en peligro la renovación del sello MSC, y preocupaba por igual a pescadores y administración pesquera.

En 2018, un encuentro entre investigadores de la Universidad de Oviedo y expertos nacionales e internacionales en el modelado de stocks pesqueros arrojó alguna esperanza. Uno de estos expertos había desarrollado un procedimiento - Modelos de Depleción Generalizados - para evaluar el stock sin necesidad de costosas campañas científicas, utilizando

simplemente las capturas realizadas por la flota. Gracias al sistema de cogestión, las capturas se conocen en esta pesquería con gran precisión y resolución temporal. Esta riqueza de datos y la particular biología de los pulpos entusiasmaron a los científicos, que vieron una fabulosa oportunidad para poner a prueba sus métodos. Inmediatamente, los técnicos del Principado se movilizaron para alimentar los modelos con la cuantiosa información disponible, consiguiendo la primera evaluación de este stock y la respuesta a las exigencias del MSC en un tiempo record (Roa-Ureta et al. 2021). Además, los modelos pusieron al descubierto una fascinante biología poblacional, que nos situaba directamente en la frontera del conocimiento, planteando, al mismo tiempo, serias dudas sobre las bases tradicionales de la gestión pesquera.

El modelo mostraba que los pulpos de tamaño comercial - más de 1kg - reclutan fundamentalmente en enero, un mes después de abrirse la pesquería. Entre 2 y 18 semanas después, una fracción considerable de los pulpos desaparece, probablemente porque los pulpos hembra que entran en fase reproductora buscan un refugio para reproducirse y finalmente morir. Pero el aspecto más llamativo del estudio son las enormes e impredecibles oscilaciones de esta población de año en año, desde 10000 hasta casi 500000 reproductores (Figura 3). Se sabe desde hace tiempo que las poblaciones de cefalópodos son inestables, lo que muchos investigadores explican por una sensibilidad especial a las variaciones ambientales. Pero ahí es donde el modelo para la población de pulpo asturiana dio la sorpresa.

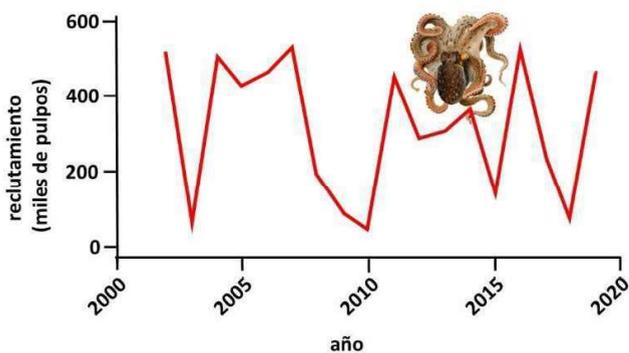


Figura 3. Variación en el tiempo del número de pulpos de tamaño comercial (más de 1 kg) que entran en la población de pulpo del occidente de Asturias cada año, estimados mediante Modelos de Depleción Generalizada (figura modificada de Roa-Ureta et al. 2021; dibujo del pulpo: Comingio Merculiano, Wikipedia, Dominio Público).

III. INESTABILIDAD INTRÍNSECA Y CAOS

En 1974, el investigador Robert May dió un paso importantísimo en la ciencia del caos. Utilizando un modelo muy simple, similar al aplicado a la población de pulpos de Asturias, demostró que, para valores determinados de los parámetros, su comportamiento se volvía fuertemente oscilante e incluso caótico, sin necesidad recurrir a perturbaciones externas para explicar esa dinámica (May 1974). Esto demostraba que el caos puede ser una propiedad estructural del comportamiento de sistemas simples. Esta demostración

revolucionó varios campos del conocimiento, señalando que los comportamientos caóticos, tan frecuentes en sistemas físicos, ecológicos o económicos, pueden deberse a sus propiedades intrínsecas y no a influencias externas.

Efectivamente, los parámetros obtenidos al modelar la población de pulpo del occidente de Asturias están muy próximos a los que se necesitan para generar una dinámica caótica, lo que explica sus fuertes oscilaciones (Figura 3). Dicho de otro modo, la inestabilidad de esas poblaciones es algo estructural, por lo que no es necesario invocar causas ambientales para explicarla. Los valores de esos parámetros serían por una parte el resultado de un ciclo vital muy corto. Los pulpos pueden vivir hasta algo más de un año, generalmente menos y, al ser semélparos, mueren después de la reproducción. Tienen, por ello, diferencias decisivas con respecto a especies que se reproducen varias veces a lo largo de su vida - iteróparas - como merluza, xarda y otras muchas, en cuyas poblaciones coexisten individuos de edades muy diferentes, lo que les confiere una gran estabilidad poblacional. Pero hay además otro rasgo importante de los pulpos que podría estar relacionado con su inestabilidad poblacional. Un rasgo que pertenece a la vida oculta de estos animales.

IV. CANÍBALES A LA GALLEGA

Los pulpos son caníbales. El proceso ha sido documentado por investigadores gallegos con vídeos increíbles que muestran a individuos de gran tamaño atacando a otros más pequeños (https://www.youtube.com/watch?v=0_a-89FABXo). No es información nueva. En los estómagos de pulpo suelen encontrarse patas de otros pulpos. El vídeo sólo - y nada menos - es una confirmación directa de este comportamiento: el canibalismo está extendido entre los pulpos.

La Ecología Teórica nos dice, además, que el canibalismo puede producir inestabilidad en las poblaciones, pero sólo si implica a individuos de diferentes cohortes. Es decir, si los pulpos nacidos un año pueden depredar a pulpos nacidos el año siguiente. ¿Es esto posible en las poblaciones de pulpos de Asturias? Aún no se conoce la respuesta, pero, como en una buena novela de crímenes, tenemos pruebas circunstanciales que apuntan en esa dirección. Los pulpos duran hasta algo más de un año. Un pulpo nacido a principios del periodo de reclutamiento puede crecer a tiempo de reproducirse al año siguiente, completando así un ciclo anual. Sin embargo, se sospecha que un pulpo que nace a finales del periodo reproductor no crecería a tiempo para reproducirse, retrasando su reproducción hasta el periodo siguiente (Figura 4). En este caso, durante un breve periodo coincidirían pulpos grandes, de más de un año de edad, con pulpo más pequeños, del año anterior, pudiendo darse el canibalismo entre cohortes diferentes. El canibal no solo obtiene una fuente extra de alimento, sino que también elimina a un potencial competidor por los refugios reproductores, especialmente si estos escasean. Sin duda, esto puede suceder cuando la población de pulpos es muy abundante. Esta explicación ha sido avanzada por científicos gallegos, pero requerirá más investigación para estar plenamente consolidada.



Figura 4. Un pulpo que nace a finales de 2018 podría tardar más de un año en llegar a la madurez sexual, mientras los primeros pulpos que nazcan en 2019 llegarían a la madurez sexual al año siguiente, pero con un tamaño menor. Los pulpos nacidos en 2018, más grandes, podrían atacar a los nacidos en 2019, más pequeños, generando inestabilidad en la población (dibujo del pulpo: Shutterstock).

V. RENDIMIENTO MÁXIMO (IN)SOSTENIBLE

Canibalismo, caos, poblaciones inestables, ..., la investigación ligada al MSC nos ha adentrado en la vida misteriosa de los pulpos y en los territorios propios de la Ecología Teórica más básica. Pero también remueve los cimientos de la ciencia aplicada, mostrándonos que quizás deberíamos modificar nuestra manera de gestionar esta pesquería. El Rendimiento Máximo Sostenible (RMS) es un número mágico que resulta de los modelos poblacionales. Equivale a la máxima tasa de extracción de recurso que permite, al mismo tiempo, la continuidad de la población sin agotarla a consecuencia de la sobrepesca. Es la solución perfecta. Si el gestor de la pesquería sitúa el límite de capturas en el RMS, teóricamente, los pescadores extraerían la máxima cantidad de pulpo sin comprometer su pesca en años venideros.

Por esta razón, durante décadas el RMS ha sido un Santo Grial para los gestores de pesquerías, su objetivo y su guía. De hecho, sabemos que las pesquerías gestionadas según este límite son, en general, más sostenibles que otras pesquerías en las que no se dispone de modelos analíticos para la gestión. Pero también ha habido sonoros fracasos, y la comunidad científica lleva tiempo recelando del RMS como herramienta de gestión. El pulpo del occidente de Asturias añade motivos suficientes para utilizar otros métodos mejor adaptados a su particular dinámica poblacional. Las simulaciones de los modelos muestran el potencial efecto desestabilizador que tiene la pesca cuando se realiza en el entorno del RMS. Por ese motivo, el pulpo de Asturias nos obliga a replantear los objetivos de gestión de acuerdo con otras premisas más rompedoras. El desarrollo de nuevas herramientas de gestión constituye otro reto apasionante y una frontera de la ciencia.

VI. COGESTIÓN

La existencia de un sistema de cogestión para el pulpo asturiano influyó de forma determinante en la concesión del sello MSC. Pesca artesanal y cogestión son palabras que suenan cada vez más en los foros de pesca, incluyendo la Política Pesquera Común de la Unión Europea. En la cogestión, administración y pescadores (y en algunos casos científicos, ONGs y otros grupos implicados) se ponen de acuerdo para



Figura 5. Arriba, pesca del sonso en la costa catalana. Abajo, cajas de sonso en la lonja (fotos: WWF-España).

lograr unos objetivos de gestión que sean sostenibles. Todos los implicados contribuyen con su conocimiento y aspiraciones, proporcionando soluciones a los problemas a medida que estos se presentan. Por esta razón, las pesquerías cogestionadas se adaptan mejor a los cambios, aportando soluciones que responden a las necesidades locales de la pesquería y de la sociedad. No obstante, es muy frecuente que la cogestión se instaure después de una profunda crisis del recurso. Por ejemplo, la amenaza de cierre de la pesquería de sonso, un pequeño pez típico de la costa catalana, sirvió para lanzar uno de los planes de cogestión más exitosos y con más visibilidad internacional de nuestro país (<https://www.youtube.com/watch?v=99YXzG3-5GI>; Figura 5). Hoy en día la cogestión ha sido incorporada como un elemento esencial de la legislación pesquera catalana.

La cogestión suele ir asociada a sistemas de cesión de derechos. Por ejemplo, en los sistemas de cesión en el uso del territorio, a un grupo de pescadores se les concede la exclusividad para pescar una especie o especies en una zona del mar determinada. A cambio de este privilegio, los pescadores se comprometen a respetar las normas y a proporcionar datos detallados de capturas y otros detalles. Esto es muy diferente de una pesquería en régimen abierto, en donde cualquier pescador puede acceder a ese territorio, compitiendo unos con otros. Es lo que se conoce como "tragedia de los bienes comunes", que

frecuentemente lleva a la sobreexplotación del recurso. Pues bien, los sistemas de cesión de derechos cortocircuitan esta "tragedia", favoreciendo el reparto ordenado del recurso entre los pescadores, que se ponen de acuerdo con otros agentes en la mejor forma de gestionarlo. En el fondo, no es sino un sentido de propiedad del recurso, que les mueve a cuidarlo.

Las pesquerías cogestionadas y con derechos de uso son muy raras en Europa y en España. Los pocos ejemplos que hay suelen generar el interés de la comunidad científica y de los gestores de la política pesquera europea, que quieren promover estas prácticas en otras pesquerías. Curiosamente, de un modo discreto y anodino, como casi todo lo asturiano, nuestra región alberga uno de los más fascinantes sistemas de cogestión del mundo: los planes del percebe.

VII. LOS SINGULARES PLANES DE EXPLOTACIÓN DEL PERCEBE DE ASTURIAS

En los inicios de la década de los 80, el marisqueo del percebe en Galicia experimentaba una profunda crisis debida, en parte, al furtivismo. El percebe era una salida fácil y lucrativa para una generación de jóvenes con escasa formación y en ocasiones enredados en las drogas. Este y otros motivos llevaron a un agotamiento de las zonas de percebe que preocupaba profundamente a los percebeiros profesionales. En 1983, la Cofradía de Malpica dio un paso al frente y, en colaboración con la Consellería de Pesca de Galicia, organizo el primer "Plan de Recuperación del Percebe", que no era otra cosa que un sistema cogestionado con derechos de uso del territorio. El éxito de este experimento hizo que la cogestión se propagara rápidamente, primero a la Cofradía de Corme, y después al resto de cofradías percebeiras de Galicia. Esta expansión viral es muy similar a la que se dió en Chile con los planes de cogestión en la pesquería de locos —un gasterópodo muy apreciado— o en Filipinas para las Reservas Marinas municipales.

En 1993, la cogestión gallega se adoptó en Asturias. A propuesta de la Dirección General de Pesca Marítima del Principado de Asturias se declaró el primer "Plan de Explotación del Percebe" en la Cofradía de Ortiguera, en 1994. En 2001, el sistema ya se había extendido a las cofradías de Tapia-Figueras, Viavélez, Puerto de Vega, Luarca, Cudillero-Oviñana y Cabo Peñas (Figura 6). Recientemente, se ha incorporado la Cofradía de San Juan de la Arena-Avilés y existen expectativas de que el éxito conseguido anime a adherirse a otras cofradías de la costa oriental asturiana. Pero lo que hace realmente interesante y diferente al sistema de cogestión seguido en Asturias es la fina escala espacial a la que las cofradías gestionan el recurso.

Un Plan de Explotación de Percebe abarca una franja de costa de decenas de kilómetros a lo sumo, alrededor de la Cofradía en la que se ha implantado. Los percebeiros asturianos eran conscientes de que la calidad del percebe dependía de las piedras; el corolario lógico era que la gestión debía de considerar cada piedra de forma individualizada. Pongamos un ejemplo: la extracción de percebe en las mejores piedras optimizaría el retorno económico si se llevaba a cabo para las fiestas navideñas, cuando los precios de venta son más altos. Esta consideración llevó a la Dirección General de Pesca Marítima a levantar un mapa detallado de las calidades de los percebeiros en todas las

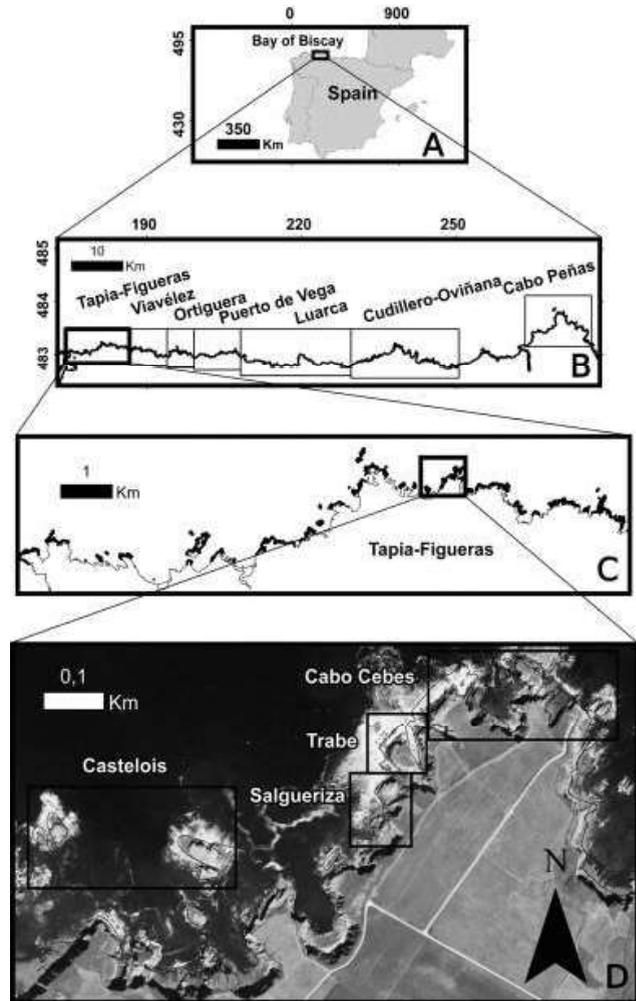


Figura 6. Planes de Explotación del Percebe en Asturias A: Situación de Asturias en España. B: Mapa del Occidente de Asturias mostrando la localización de cada uno de los planes declarados en 2001. C: Mapa detallado de la zona de costa correspondiente al Plan de Tapia-Figueras. Los puntos negros son zonas de percebe. D: Detalle del Cabo Cebes, en el Plan de Tapia-Figueras, mostrando algunas de las piedras, que reciben una microgestión individualizada. Castelois y Trabe son áreas de calidad intermedia o mala que suelen estar abiertas toda la temporada. Salgueriza es un área de buena calidad, que se gestiona mediante vedas parciales. Cabo Cebes también es un área de buena calidad, que suele recibir cierres anuales para su recuperación (tomado de Rivera *et al.* 2014).

piedras del occidente de Asturias tomando como base la información proporcionada por los percebeiros. Sobre este mapa, los percebeiros diseñaron planes pormenorizados para cada piedra (Figura 6). Las piedras de mejor calidad sólo se abren durante el periodo Navideño; las de menor calidad se abren durante periodos más largos, o incluso durante toda la temporada. Y, por último, ciertas piedras que han sido particularmente explotadas y muestran síntomas de agotamiento, se reservan durante un año para favorecer la recuperación de las poblaciones de percebe. La resolución espacial de éste modo de gestión tiene pocos análogos en el mundo.

En 2008, la Universidad de Oviedo lanzó el Master ERASMUS MUNDUS *Biodiversidad Marina y Conservación*, un programa que atrae a alumnos de todo el mundo. En su primera edición, se invitó al Profesor Juan Carlos Castilla, una autoridad mundial en la explotación sostenible de ecosistemas costeros. El Master reunió al profesor Castilla con pescadores de percebes, administración e investigadores asturianos en una Jornada de Pesca Sostenible que tuvo lugar en el Acuario de Gijón, donde se identificó la excepcionalidad de los Planes de Percebe y su extraordinario interés científico. Aquello inició una intensa línea de investigación en la Universidad de Oviedo con

un gran éxito, que ha sido financiada con varios proyectos españoles y europeos, y se ha traducido en una serie de artículos científicos y de diseminación, y una relación continuada con el sector. Las evidencias aportadas por ésta colaboración entre científicos y pescadores señalan a este sistema como ejemplo e inspiración para otras pesquerías en el mundo (Figura 7). Un detallado documental sobre el tema se encuentra disponible en la siguiente dirección: <https://www.youtube.com/watch?v=ORCLpsHPkwl&t=559s>). Gracias a este entendimiento se progresa social, económica y ambientalmente en Asturias.

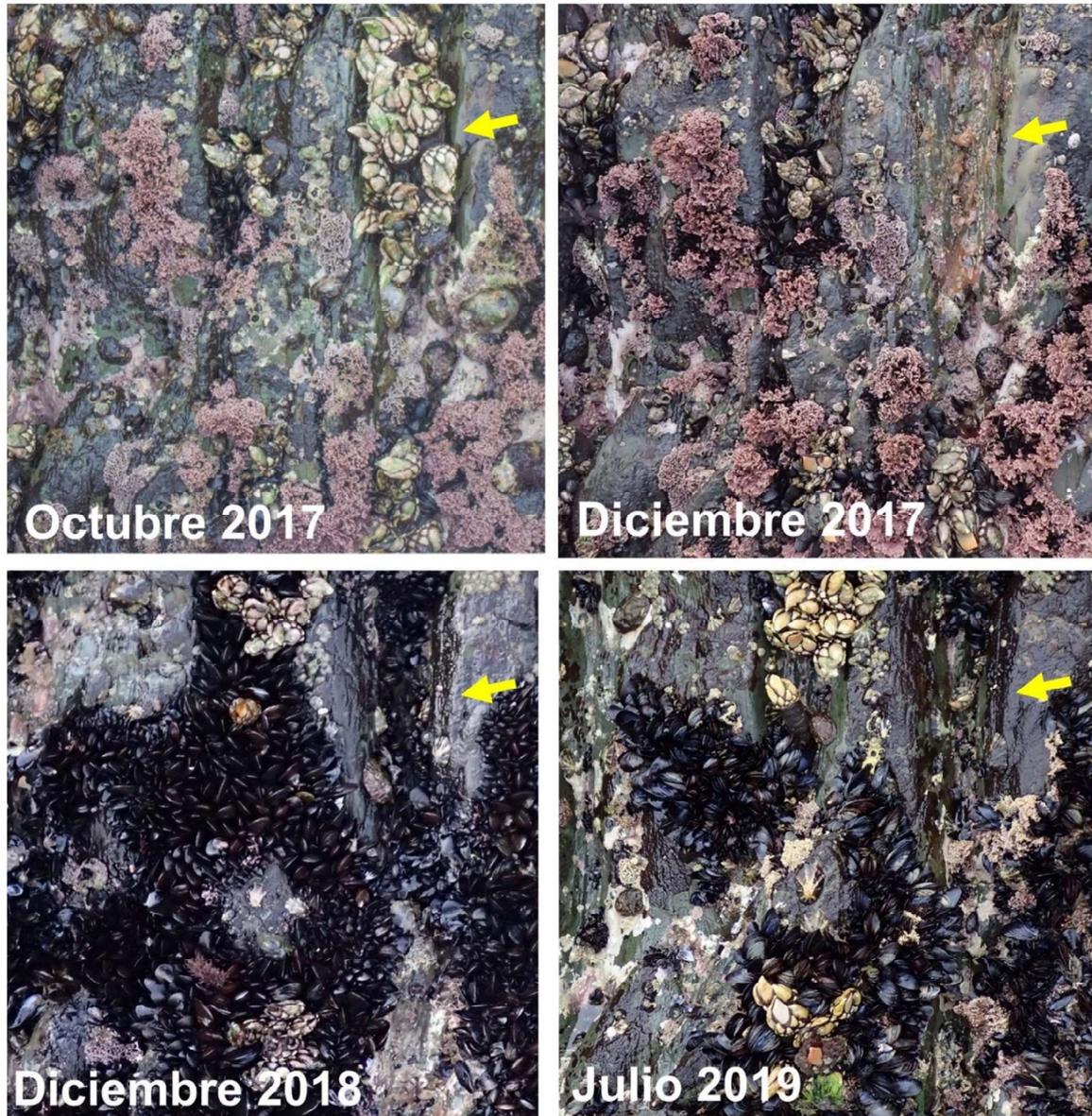


Figura 7. Las imágenes corresponden a superficies experimentales en las que se sigue la evolución de percebes y otras especies en el sistema intermareal rocoso asturiano a lo largo del tiempo. En ellas se observa que la explotación humana afecta a todo el ecosistema, no sólo a la especie objetivo. En octubre de 2017 se aprecia un “piño” de percebes (flecha amarilla), que desaparece como consecuencia de la explotación en Diciembre de 2017 dejando un espacio vacío de roca desnuda. Un año después, en Diciembre de 2018, el hueco se ha cubierto de pequeños mejillones, que en Julio de 2019 han vuelto a desaparecer. Las comunidades intermareales son extraordinariamente dinámicas, aunque los percebes recuperan el terreno perdido muy lentamente. El modelado de la dinámica espacial de ésta comunidad puede ayudarnos a gestionar de una forma sostenible la explotación de percebes (resultados del proyecto PERCEBES de la UE; <http://www.unioviado.es/percebes/>).

VIII. EN LA VÍA DE LA COGESTIÓN:
LOS PLANES DEL OCLE

El ocle -algas del género *Gelidium*, en particular *Gelidium corneum*- se recolecta con fines comerciales en Asturias desde mediados del siglo pasado, aunque hay constancia de su uso tradicional en aplicaciones terapéuticas y como abono para los cultivos. Del ocle asturiano se extrae agar, un polisacárido gelificante que se utiliza en microbiología, biología molecular y alimentación. La forma más antigua y artesanal de **recolección del ocle consiste** en recoger las arribazones que se acumulan en las playas después de las tormentas de finales de verano (Figura 8). Todavía hoy se pueden ver en muchas playas los restos de las torretas y los motores que se usaban para subir las cargas de ocle. Esos sistemas han cedido paso, en la actualidad, a los tractores, que operan en playas con acceso rodado. Era también muy típica la imagen de los grandes secaderos de ocle ubicados en las praderas costeras.

Más recientemente, la recogida de arribazón coexiste con el arranque a mano por buceadores. El material recogido de esta manera tiene una calidad mejor que el de arribazón y se vende a precios más altos.

Se puede decir que la gestión del ocle en Asturias es modélica, y que se dan las condiciones para que éste sistema pase a un régimen de cogestión similar al del percebe o al del pulpo. La costa se divide en varios sectores, donde los campos de ocle han sido mapeados con gran detalle (Figura 9). Las lanchas que se dedican al ocle deben declarar los kilos extraídos y, además, incorporan en las lanchas dispositivos de localización que permiten al Centro de Experimentación Pesquera determinar con precisión cuándo y dónde se extrae ocle de los campos submarinos.

Este seguimiento, ha permitido establecer que las cosechas totales se mantienen estables en el tiempo, y que el crecimiento de las algas compensa la biomasa recogida, de acuerdo con lo estimado por buceadores *in situ*. Esta situación contrasta con la del País Vasco, donde se ha detectado un claro declive de las poblaciones, probablemente relacionado con factores climáticos. Esto ha llevado a la prohibición de la extracción directa en esa Comunidad Autónoma, permitiéndose exclusivamente la recogida de arribazón.

La recogida de ocle está claramente en la senda de la sostenibilidad, si las preocupantes tendencias que se observan en el País Vasco no se extienden a la costa asturiana. Por su parte, la resolución de las tensiones entre recolectores de arribazón y recolectores en los campos submareales de la zona oriental se resolverá cuando se disponga de una estima precisa de la biomasa recogida en las arribazones. Así se podrá determinar si la actividad de recogida de los buceadores afecta a la extracción en las playas.

IX. PESCADORES Y CIENTÍFICOS ASTURIANOS

El MSC, el Plan de Gestión del Pulpo y los Planes de Explotación del Percebe han cambiado la visión que los pescadores tienen de la ciencia. De observadora impertinente a aliada. De sumidero de datos a fuente de herramientas para una mejor salud - ecológica y económica - de las pesquerías. Saben que su esfuerzo en la recogida de datos tiene una finalidad:



Figura 8. Recogida de ocle de arribazón a mediados del siglo XX. La foto superior corresponde a alguna playa en la costa de Llanes, fecha desconocida. La foto inferior fue tomada en la playa de San Antolín, en 1960 (fotos cortesía de Eva M. Galán Fernández; Galán Fernández 2018).



Figura 9. Localización de los campos de ocle en Asturias, obtenida a partir del visor de la Dirección General de Pesca Marítima (<http://www.sigmarinoasturias.es/>)

dignificar su trabajo y garantizar su sostenibilidad económica y ambiental. A los científicos nos proporciona un fascinante sujeto de estudio, que además de atraer la mirada de colegas de todo el mundo, permite a jóvenes científicos completar sus estudios con trabajos de Grado, Master y Doctorado. Pero sobre todo nos ha permitido comprender la necesidad de colaboración y entendimiento entre ambos mundos, antes muy separados e incluso antagónicos, dotando a los científicos de la humildad suficiente para hablar con los que día a día dedican sus afanes a la obtención de su medio de vida.

Muchos otros asuntos del sector pesquero requieren del apoyo decidido de la ciencia, en todas sus disciplinas. La Economía permitirá cuantificar el valor económico del sector pesquero artesanal y su sostenibilidad económica y social. La Sociología nos permitirá sondear las percepciones de los

pescadores, mientras que la Ecología y la Biología pesquera nos ayudarán a evaluar stocks, verificar el origen de las capturas o plantear la organización del espacio pesquero. Todas las disciplinas en su conjunto deberán movilizarse para abordar los grandes desafíos a los que nos enfrentamos, como la gestión de unos stocks cambiantes, la cohabitación de la pesca con las plantas de generación eólica en el mar abierto, o el Cambio Climático.

En un esfuerzo para alinear ciencia y pesca en Asturias, la Dirección General de Pesca Marítima dio, en 2018, un gran paso, creando REDEPESCA, una red de colaboración entre pescadores, gestores de pesca, científicos y ONGs, cuyo objetivo es enfrentar los desafíos del sector desde la mejor ciencia disponible. Representantes de las cofradías de pescadores se reúnen periódicamente con científicos del Principado, Instituto Español de Oceanografía, Universidad de Oviedo y con organizaciones ecologistas. El objetivo de estas reuniones es debatir los temas que preocupan al sector pesquero y movilizar la ciencia para obtener las mejores diagnósticos y propuestas. Esta iniciativa, que ha atraído las miradas de otras comunidades autónomas, marca un claro camino a seguir en el futuro.

Los primeros pasos de REDEPESCA están siendo lentos y difíciles, debido a una rigidez burocrática que impide la puesta en marcha de proyectos. A pesar de ello, ya se han desarrollado iniciativas muy prometedoras, tratando, por ejemplo, el problema del anisakis - parásito del pescado con efectos negativos sobre el precio y la salud humana - o el problema de las basuras en el mar. Son asuntos importantes, que preocupan al sector y a la sociedad y que deben analizarse sin demora. Sin embargo, el sector pesquero es mucho más reticente a la hora de explorar otros asuntos que se encuentran fuera de su zona de confort y en los que anticipan influencias negativas sobre su actividad. En mi opinión, es en el análisis y propuestas de solución de esos asuntos donde radican los desafíos para los próximos años o décadas. Y muchos de ellos tienen un denominador común: la gestión del espacio marítimo.

X. UNA GEOGRAFÍA OCULTA BAJO EL MAR

Las personas que trabajamos en tierra firme solemos ver el mar como una inmensidad homogénea e inabarcable. No hay lugares especiales o característicos, más allá de olas que aparecen y se desvanecen en cuestión de segundos o la siempre cambiante línea del horizonte. Pero para el pescador, el mar es un territorio de montañas, valles, grandes cañones y plácidas playas de arena, tan reales y cotidianos para él como lo son para nosotros los montes y relieves de nuestro entorno.

Mar del Perejil, El Cornorio, Los Reviros de la Sabina, El Calvario del Oeste, El Manantial, y otros muchos que ellos identifican sin dudar, son nombres de caladeros, evocadores de una geografía oculta que se transmite de generación en generación (Figura 1). Durante siglos, esta geografía ha sido el dominio indisputado de los pescadores. Indisputado, que no sin disputas. En ocasiones, un desacuerdo entre pescadores sobre el uso de esos caladeros ha escalado hasta hacerse un hueco en las noticias. Por ejemplo, entre los años 60 y 80 del siglo pasado se gestó a guiso lento un conflicto entre los pescadores de pincho

y los volanteros, que se disputaban los ricos caladeros de merluza de la zona de Cudillero. Los pescadores de pincho sostenían que la volanta dañaba los fondos en los que cría ésta y otras especies, y no dejaban de tener razón. Hoy en día sabemos que estos fondos están cubiertos de arrecifes de coral que dan cobijo a una extraordinaria diversidad de especies y que son un auténtico criadero para muchas especies. Esta disputa se zanjó con la exclusión de la volanta de determinadas áreas, configurando una zonificación de actividades que se ha incorporado al acervo tradicional de los pescadores asturianos. Lo que sucede en la mar, se queda en la mar.

Se puede decir que los mayores conflictos siempre han surgido por un problema de competencia por el espacio. Un buen ejemplo ha sido el tímido intento de iniciar cultivos de mejillones en aguas abiertas en Asturias, que fracasó tras la oposición frontal del sector pesquero, al solapar las instalaciones de cultivo con algunos de sus caladeros habituales. Pero hasta el momento, el mar asturiano ha sido un territorio enteramente por y para la pesca. Ni el tráfico marítimo, ni otras actividades han reclamado espacio ni establecido algún tipo de competencia con las actividades pesqueras. Pero ésta situación de privilegio podría estar a punto de cambiar.

XI. UN NUEVO JUGADOR: LA RED NATURA 2000

En 1986, la empresa Hidroeléctrica del Cantábrico contrató a la Universidad de Oviedo para analizar el impacto de un eventual vertido de escoria de carbón en la zona del Cañón de Avilés. Un equipo de jóvenes oceanógrafos con muy poca experiencia dirigidos por el Profesor Emilio Anadón se embarcó en el buque "Noega" para explorar las profundidades marinas en el entorno del cañón, catalogar su diversidad biológica y documentar el funcionamiento de los ecosistemas que se encontraran en la zona. Aunque, afortunadamente, el vertido nunca llegó a producirse, los resultados de la exploración generaron numerosas publicaciones científicas y tesis doctorales que consolidaron la oceanografía en Asturias y pusieron a ésta región en el mapa de la investigación marina.

Los estudios dieron cuenta de la influencia sobre la zona de estructuras oceanográficas características, como la presencia de un afloramiento costero o corrientes salinas hacia el este en el talud continental. Además, se detectó la presencia de más de 800 especies de invertebrados, incluyendo grandes arrecifes de coral, que situaban al Cañón de Avilés como una zona de elevada diversidad biológica (Louzao et al. 2010). Posteriormente, investigaciones por parte del Instituto Español de Oceanografía (IEO, Proyecto INDEMARES; Sánchez et al. 2014) y de la Universidad de Oviedo (Proyecto BIOCANT) consolidaban el estatus especial de esta zona del mar y arrojaban luz sobre aspectos fundamentales del funcionamiento de los ecosistemas marinos (Figura 10). Estos hallazgos en el Cañón de Avilés se unían a la presencia de arrecifes de coral en el banco submarino de El Cachucho, descubierta por el investigador francés Edouard Le Danois en los años 30, e indicaban que las aguas costeras de Asturias son un "punto caliente" de diversidad marina.

En 1992, pocos años después del descubrimiento de corales en el Cañón de Avilés, arrancarían la Directiva Hábitats de la UE, con el objetivo de proteger espacios naturales con valores especiales de conservación. El instrumento de ésta Directiva es la Red de espacios protegidos Natura 2000. Aunque la red estaba centrada inicialmente en los espacios terrestres, a partir del año 2000 se embarcó en una carrera por la declaración de nuevos espacios protegidos en el mar, como consecuencia de

compromisos internacionales y la cada vez mayor preocupación social por la salud de nuestros mares. Esto puso a dos zonas de Asturias en el punto de mira para la declaración de zonas Natura 2000 marinas: el Cachucho y el Cañón de Avilés (Figuras 1 y 11), ambos seleccionados, entre otras cosas, por los importantes arrecifes coralígenos de sus fondos. Los mismos que motivaron en su día el conflicto de la volanta.

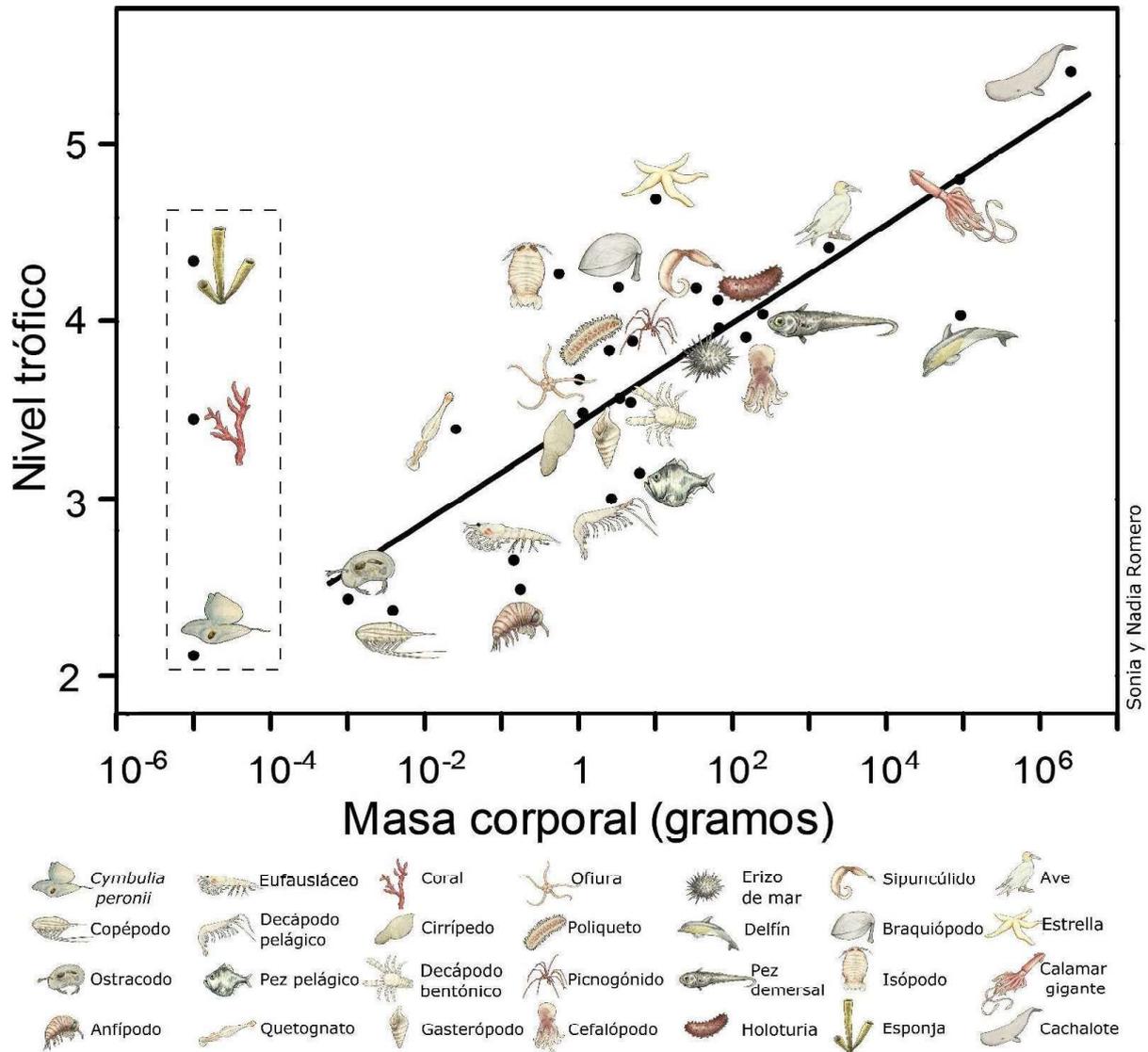


Figura 10. Estructura trófica del Cañón de Avilés. "El pez grande se come al chico" es una frase hecha muy popular, que tiene una versión también muy extendida en la literatura académica: las especies de tamaño más grande ocupan un lugar más alto en la pirámide trófica. Curiosamente, esta afirmación carecía hasta hace poco de fundamento empírico. Mediante el análisis de isótopos estables del nitrógeno, los oceanógrafos de la Universidad de Oviedo han conseguido demostrar empíricamente la relación entre el nivel trófico y la masa corporal en el Cañón de Avilés. Para ello, realizaron análisis en una gran variedad de organismos desde pequeños ostrácodos y copépodos hasta los calamares gigantes y los cachalotes que habitan en las profundidades del Cañón (figura cortesía de Sonia y Nadia Romero; datos de Romero et al. 2016).



Figura 11. Presentación en Madrid de la primera propuesta de Areas Marinas Protegidas para la Red Natura 2000 de España, en 2006. El sector pesquero estaba muy poco representado en ésta reunión. La foto de abajo muestra el plan, encargado a WWF por el Ministerio de Medio Ambiente. Nótese que, en aquel primer plan, el Area Marina Protegida del Cañón de Avilés llegaba hasta la costa, lo cual tiene todo el sentido desde un punto de vista funcional.

Posteriormente, el area se desconectaría de la costa (ver Figura 1). Esto puede ser debido a una interpretación estricta de la Directiva Habitat, que limitaba el area de protección a aquellos habitats que aparecían en el listado, en éste caso los arrecifes de coral que se encuentran alejados de la costa.

Por otro lado, llevar el Area Marina del Cañón de Avilés hasta la costa probablemente generaría conflictos de competencia, ya que las zonas costeras son gestionadas por el Principado de Asturias, mientras que el mar abierto es competencia del Gobierno Central.

De hecho, el Cachucho ya es miembro de pleno derecho de la Red Natura 2000, no exento de cierta polémica por errores en la negociación con el sector pesquero. Esos errores provocan un recelo comprensible por parte del sector en un momento en el que se trabaja en la elaboración de un plan de gestión para el Cañón de Avilés. A pesar de ello, es más que probable que la declaración de una zona de especial conservación en el Cañón de Avilés no suponga impactos de importancia sobre la actividad del sector pesquero. El motivo es simple: existe un solapamiento muy limitado entre los ecosistemas que la Directiva Habitats intenta proteger y las zonas de actividad pesquera. Lo que quizás se deba a que sólo quedan intactos aquellos lugares no afectados previamente por las artes de pesca

destructoras (Figura 12). En todo caso, el Cañón de Avilés deberá de ser gestionado, y ese plan de gestión deberá conciliar los intereses del sector pesquero con los importantes valores naturales de la zona.

XII. RESERVAS MARINAS

En una reciente evaluación, la UE ha detectado la escasez de Reservas Marinas en la Red Natura 2000. Una Reserva Marina es una zona del océano en la que se prohíbe la pesca de una o más especies para que actúe de criadero, de modo que ayude en



Figura 12. Marcas dejadas por los arrastreros en el fondo marino (foto: GRC Geociències Marines, Universitat de Barcelona)

la recuperación de la pesca en las zonas adyacentes. Las reservas marinas no sólo permiten la recuperación de la pesca. Si son gestionadas con éxito, el ecosistema vuelve a una situación que se acerca al estado primigenio, convirtiéndose en ejemplos vivientes del importante efecto que la actividad humana tiene sobre el mar. Por ese motivo, las Reservas Marinas no sólo son interesantes para el sector pesquero, sino que también atraen a turistas y a científicos, interesados por el estudio y contemplación de una naturaleza marina en un estado de conservación excelente.

Hoy en día, existen Reservas Marinas en casi todas las Comunidades Autónomas de España, con la excepción de Asturias y Cantabria. Asturias debería de explorar esa vía. Una Reserva Marina en Asturias, asociada a uno de los lugares de la Red Natura 2000, nos permitiría adelantarnos a lo que sin duda va a ser una exigencia de la UE. ¿Dónde se podría establecer alguna de esas reservas? En mi opinión, no tiene mucho sentido asociarlas al Cachucho o al Cañón de Avilés (Figura 1). En esos lugares seguramente se podrán cumplir muchos de los objetivos de conservación sin la necesidad de excluir la pesca y en todo caso su vigilancia sería probablemente muy costosa. Una Reserva Marina despliega todo su potencial cuando se establece en zonas costeras, accesibles para los ciudadanos, los servicios de vigilancia y los investigadores.

La Universidad de Oviedo cuenta con uno de los programas de Máster sobre el medio marino con más calidad y popularidad de Europa, que cada año atrae a decenas de estudiantes de todos los lugares del mundo, el IMBRSea (Figura 13). En una Reserva Marina, estos estudiantes podrían desarrollar actividades investigadoras y docentes, que ampliasen nuestros

conocimientos sobre el funcionamiento de ecosistemas y especies y sobre el medio marino, y podría actuar como polo de atracción para investigadores de instituciones de otras comunidades o países. Todo ello expandiría las posibilidades de colaboración y dinamización científica lo que sin duda ayudaría a una mayor colaboración internacional y una mejor resolución de problemas. Por ese motivo, estimo que la mejor localización para una reserva en Asturias o, mejor dicho, para la primera Reserva Marina en Asturias, debería estar asociada a uno de los sitios Natura 2000 costeros (Figura 1). El establecimiento de reservas aportaría una dimensión marina a éstos sitios, que hasta la fecha han sido gestionados de espaldas al mar, probablemente por motivos competenciales.



Figura 13. Estudiantes y profesores del Master ERASMUN MUNDUS en Biodiversidad Marina y Conservación de la Universidad de Oviedo (hoy IMBRSea; <http://www.imbrsea.eu/>) trillan una muestra obtenida mediante dragas del fondo del Cañón de Avilés a bordo del Buque Oceanográfico Sarmiento de Gamboa, en 2012, dentro del proyecto BIOCANT/DOSMARES (foto: Jorge Chachero).

Al menos una de las Reservas Marinas existentes en España ha nacido a iniciativa de los propios pescadores, la Reserva de Os Miñarzos, en Galicia. El motivo de su creación era una creciente preocupación por el furtivismo y el agotamiento de los recursos. Pero lo más común es que el sector pesquero rechace su creación al percibir las solamente por la regulación o exclusión que se podría producir, sin un análisis más tranquilo y detallado de las ventajas que se podrían lograr. Otros actores presentes en las zonas costeras, y no sólo los profesionales, las perciben también de forma negativa, como aficionados a la pesca recreativa.

Por todos estos motivos, la implantación de estas herramientas suele realizarse tras largos procesos de reflexión y negociación, que atiendan a los intereses de todos los sectores. Además, es esencial la realización de un seguimiento científico que garantice la eficacia para conseguir los objetivos que se fijaron para su creación y también para su rentabilidad. Pero su implantación requerirá de un diálogo permanente con el sector pesquero, poner sobre la mesa resultados precedentes y, posiblemente, ir tomando decisiones de forma paulatina para que los resultados que se obtengan del seguimiento puedan convencerlos de las ventajas que representan. Como en el caso

del sello MSC, si éste paso se diera, facilitaría la ruta hacia la sostenibilidad, dignificaría el oficio de la pesca y sería motivo de orgullo para los pescadores asturianos. Confío plenamente en que la ciencia estará con ellos si al final se da éste importante paso. Pero no es éste el único desafío al que se enfrentan.

XIII. SE COMPLICA EL TABLERO: LA LLEGADA DE LOS MOLINOS DE VIENTO

El mapa de caladeros (Figura 1) es un precioso regalo para el sector pesquero. Es la constancia, hecha mapa, de sus áreas de trabajo. Antes de este mapa, la información sobre esos caladeros estaba dispersa, en el mejor de los casos. Los nombres y las localizaciones se transmitían por tradición oral, por los registros en cartas de navegación y, más recientemente, en dispositivos de almacenamiento informáticos. El mapa permite visualizar perfectamente el solapamiento de los caladeros con las áreas de la Red Natura 2000, y será esencial en la negociación de los planes de gestión de estas áreas. Pero no será suficiente. Es necesario cuantificar la intensidad de uso de esos caladeros. Esto sólo lo proporciona la información sobre la localización de las lanchas. Los pesqueros de más de 15 metros de eslora ya están obligados a incorporar sistemas de seguimiento que localizan su posición cuando están en el mar. Pero muchos armadores de lanchas de menos de 15 metros son muy reticentes a la incorporación de dichos sistemas.

Los datos de seguimiento, asociados a registros de capturas, permiten determinar la distribución de los bancos de peces, la extensión e intensidad de uso de las zonas de pesca y otros detalles críticos para la biología pesquera. No es por casualidad que varias de las lanchas que faenan al pulpo dentro del sello de sostenibilidad MSC hayan decidido la instalación de éstos dispositivos de forma voluntaria. Estos pescadores comprenden el importante valor de la ciencia y el conocimiento objetivo como aliados en su actividad. Actualmente, otros pescadores asturianos valoran la incorporación de esos dispositivos en sus lanchas, apuntando a un prometedor cambio de tendencia que nos pondría a la cabeza de la pesca sostenible.

Los datos obtenidos con estos medios se convertirán en aliados de los pescadores frente a un nuevo desafío emergente: los parques eólicos marinos. Debido a la necesidad de impulsar fuentes renovables de energía para mitigar el cambio climático, varias empresas están analizando la oportunidad de implantar parques eólicos en mar abierto en la costa asturiana. Aunque por ahora son planes en estudio, la preocupación en el sector pesquero se va acentuando, ya que lo perciben como un nuevo competidor por el espacio marino. La apuesta es importante. No sólo se trata de generar electricidad, sino también de hacerse un hueco en el competitivo mundo de la investigación y desarrollo en energías renovables. Se trata de abrir nuevos mercados para Asturias.

Pero el enfrentamiento está servido. No sólo con el sector pesquero, sino también con los grupos conservacionistas preocupados por la interferencia de los molinos con las rutas migratorias de las aves. Será una discusión larga y difícil, en la que los mapas de actividad deberían jugar un papel fundamental.

Las opiniones serán tanto más fundadas cuanto más se basen en argumentos cartográficos cuantitativos. Y el sector pesquero necesitará aportar datos espaciales de su actividad. No solo de los caladeros, sino de la intensidad con que los usan. Y esa información sólo la proporcionan los dispositivos de seguimiento. En mi opinión, este es otro de los grandes desafíos

en un próximo futuro ¿Cómo se llevarán a cabo las negociaciones y con qué argumentos se trabajará? Una apuesta decidida en la generación de información detallada de la actividad pesquera y de su valor sería una información muy valiosa en manos de los pescadores, pero también lo sería para la sociedad en general.



Figura 14. Visiones de un pasado que probablemente no volverá. La foto superior corresponde a un gran bosque de *Saccorhiza polyschides* en la playa de Coedo, Navia, en verano de 1987. Estas algas asomaban sus frondes en las mareas bajas, y constituían un elemento característico de la costa rocosa. Su estructura albergaba una gran riqueza de especies asociadas, incluyendo algunas de interés comercial. La foto de abajo a la izquierda fue tomada en la playa de Porcia en el año 2000. Se aprecia una densa mata de algas de gran porte, como *Himanthalia elongata*, que hacían muy complicado caminar por esos parajes sin resbalar. Debajo de esas matas habitaba una rica comunidad de invertebrados. La foto de abajo a la derecha corresponde a ese mismo sitio, pero en 2007. Todas las macroalgas de gran porte han desaparecido, dejando un césped de algas verdes y *Bifurcaria bifurcata* (fotos: Julio Arrontes y Rosa Viejo).

XIV. EL TELÓN DE FONDO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

El Cambio Climático añade una componente de incertidumbre a la toma de decisiones con vistas al medio y largo

plazo al estar interactuando con un contexto complejo tanto social como ecológico y económico. En un simulacro superficial, sería como si se moviera el tablero mientras estamos jugando una partida de

ajedrez. Las fichas se mueven en direcciones impredecibles, se caen o se salen del tablero, alguien pone fichas nuevas desde fuera, etc. Y, ese cambio ya está aquí. Su cara más visible es la práctica desaparición de nuestras costas de las grandes macroalgas intermareales y submareales, que ocurrió entre 2004 y 2006 (Figura 14). El cambio, que lleva produciéndose décadas y ahora lo hace de forma acelerada, ha sido seguido con preocupación por personal de la Universidad de Oviedo (p.e. Fernández, 2011, Anadón y Roqueñí, 2009).

Se sabe que éstas algas son vulnerables a “olas de calor”, periodos prolongados muy cálidos durante el verano. Además, a diferencia de las costas Portuguesa y Francesas, que se orientan en dirección Norte-Sur, nuestra costa se extiende de Este a Oeste, lo que podría explicar que los impactos asociados al Cambio Climático se produzcan de una manera más rápida y aparente (Figura 15).

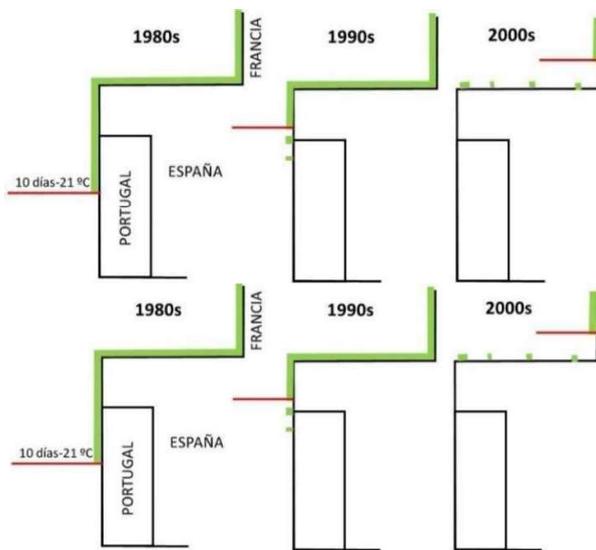


Figura 15. La súbita desaparición de macroalgas de la costa Cantábrica entre 2004 y 2006 se puede explicar por su orientación zonal. Supongamos que la distribución de un alga de agua fría en los 80s (diagrama de la izquierda) llegaba hasta la costa de Portugal (línea verde). El extremo sur de su distribución viene marcado por la isopleta en la que comienza a haber más de 10 días seguidos al año con temperaturas por encima de los 21 °C. En los 90s (diagrama central), como consecuencia del calentamiento global, la isopleta se ha movido desde Portugal al sur de Galicia. El límite sur de la especie se desplaza con la isopleta, quizás dejando algunas poblaciones relictas o marginales en Portugal. Finalmente, en los 2000 (diagrama de la derecha), la isopleta asciende a la misma latitud que en el periodo anterior, llegando a la costa de Francia. Como consecuencia de la zonalidad de la costa cantábrica, la especie desaparece por completo de esa costa, dejando sólo vestigios marginales. Esa es la situación actual para muchas de las grandes macroalgas formadoras de habitat.

En su manifestación más básica, el Cambio Climático está desplazando las distribuciones de especies hacia el norte, haciendo que aparezcan, o aumente la abundancia, de especies meridionales o de aguas templado-cálidas, y que desaparezcan o disminuya la abundancia de especies boreales o de aguas

templado-frías y frías, que se desplazan o resisten en áreas localizadas más al norte. La gestión y adaptación al cambio climático requieren anticiparse a esos cambios y prepararse para ellos, lo que constituye un reto científico de primer orden. Para ello, se construyen modelos predictivos que describen las preferencias de habitat de las especies. Esas preferencias se proyectan al futuro, de acuerdo con diferentes escenarios de cambio climático. Los modelos más realistas requieren de una metodología sofisticada, que recurre al uso de modelos hidrodinámicos para simular el movimiento de las corrientes, datos de satélite para obtener información sinóptica de variables ambientales, o robots que obtienen información *in situ* de forma continua y datos detallados de la distribución actual de las especies. Entre éstos modelos se abren camino cada vez con más fuerza los enfoques bayesianos, especialmente adecuados para reflejar la incertidumbre de las predicciones y guiar la gestión de manera adaptativa.

Según los modelos, el habitat del pulpo se deteriorará con el tiempo en el Golfo de Vizcaya, mientras que mejorará en el Mar del Norte (Schickele et al. 2021). Por el contrario, parecen anticipar un aumento del area de distribución y de la productividad de la anchoa (Erauskin et al. 2019). Hay que tener en cuenta que el mar es un medio tridimensional, en el que la temperatura disminuye con la profundidad. Por ese motivo, las especies pueden responder al cambio climático desplazando su distribución hacia el norte o hacia mayor profundidad, o hacia diferentes combinaciones de las dos respuestas, lo que complica las predicciones. Además, si los cambios térmicos no fueran muy rápidos, las especies de ciclo corto podrían evolucionar hacia una mayor resistencia a temperaturas altas

Todo parece indicar que las contracciones de habitat más importantes se van a dar para los peces demersales que viven a menos de 50 m de profundidad, y que tienden a desplazarse en profundidad, más que en latitud (LeMarchand et al. 2020). Los peces y cefalópodos pelágicos se verán menos afectados, aunque su distribución tenderá a desplazarse hacia el norte. Se producirá una entrada significativa de especies del sur, que reconfigurarán la estructura de los ecosistemas (LeMarchand et al. 2020). Algunas de éstas especies tienen valor comercial y se podrán explotar. Todos éstos cambios se producirán, lógicamente, sin que influyan barreras entre autonomías o países, lo que puede generar escenarios socialmente conflictivos. La gestión adaptativa y sostenible de esos cambios requiere del apoyo de la ciencia, tanto para utilizar el conocimiento disponible como para obtener nuevos datos y estudios en el marco de la cooperación internacional, así como producir nuevas predicciones sobre cambios o mejorar las herramientas de gestión. En todo caso, el carácter multispecífico de la flota artesanal asturiana tendría ventajas para adaptarse a las nuevas situaciones que, sin duda, se darán. La adaptación a la nueva situación es una necesidad básica para un mundo cambiante.

XV. EL FUTURO

La mayor parte de las Comunidades Autónomas están inmersas en planes ambiciosos de ampliación de los sistemas de cogestión, de implantación de reservas marinas, de seguimiento y de promoción del sector pesquero artesanal. En Asturias podemos presentar nuestros logros: el sello MSC del pulpo, el Plan de Explotación del Percebe y la red de pescadores y científicos

REDEPESCA, como más destacables de entre otras iniciativas. Existen ya algunas cofradías con interés en adoptar sistemas de cogestión para el percebe y otras especies, y numerosos armadores han solicitado la instalación de sistemas de posicionamiento en sus lanchas. Los pescadores son cada vez más conscientes de que estos sistemas les servirá para demostrar cuánto y dónde pescan y su vinculación y dependencia del mar. Además, la ciencia pesquera basada en el sector artesanal asturiano se conoce cada vez mejor fuera de nuestra región y tiene difusión internacional e influencia en las normas regulatorias (Figura 16).

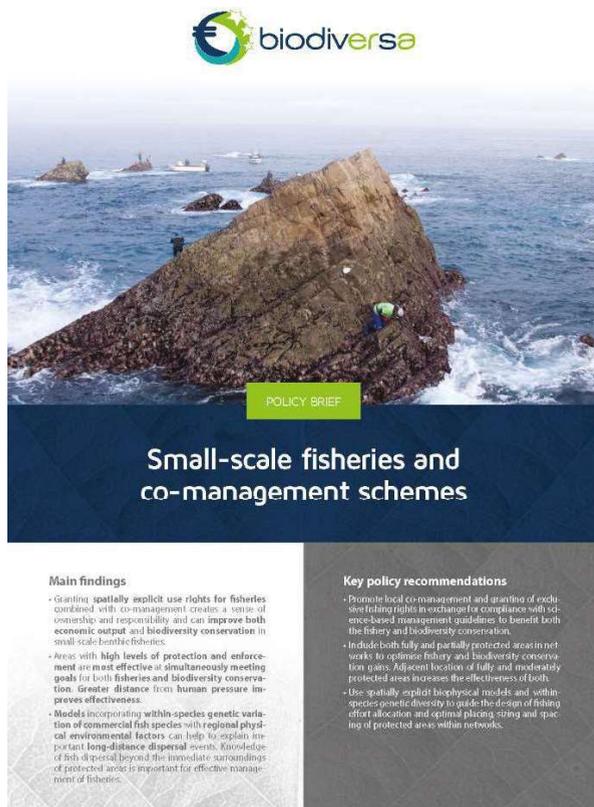


Figura 16. El percebe asturiano ha sido protagonista en PERCEBES, un proyecto internacional liderado por la Universidad de Oviedo. Sus resultados han servido de base para la elaboración de un Policy Brief con recomendaciones para la gestión de pequeñas pesquerías en la Unión Europea. La foto fue tomada en los pequeños arrecifes al oeste de la Isla Erbosa, en Cabo Peñas, y muestran a un grupo de percebeiros de Luanco cavando percebe <https://www.biodiversa.org/1990>.

Pero no debemos detenernos en lo conseguido. Mediante diversas Directivas, la Unión Europea está inmersa en un ambicioso plan de ordenación espacial del espacio marítimo. Quizás en un futuro no tan lejano se añadan nuevos actores a este complicado tablero que es la costa asturiana y europea: cables submarinos, empresas de turismo de pesca y naturaleza submarina, reservas marinas, y otras varias. En la necesaria conciliación, el sector pesquero merece un lugar privilegiado.

Son descendientes de los cazadores y recolectores de la antigüedad y piedra de toque de toda una cultura fascinante y entrañable, con un profundo conocimiento local. Pero el mundo cambia. Sus técnicas han mejorado gracias a la tecnología, y al mismo tiempo su medio se modifica a gran velocidad. El sector pesquero tendrá que adaptarse y responder a los cambios, apoyándose en la mejor ciencia disponible y en su conocimiento, y en el dialogo entre ambos. Eso requerirá audacia y excursiones frecuentes fuera de nuestra zona de confort. Las nuevas herramientas de gestión llegarán tarde o temprano, deberán ser adaptativas y necesitaremos todos disponer de experiencias previas que nos guíen por el buen camino antes que implantarlas desde cero.

REDEPESCA puede ayudarnos a navegar éste futuro revuelto y complejo, y hacerlo de una forma ecológicamente sostenible y atractiva para las nuevas generaciones. En el fondo, no es sino la manifestación, en Asturias, de una tendencia que gana presencia en todo el mundo: la fructífera colaboración entre pescadores y científicos. Solo con ella se logrará que nuestros nietos puedan salir al mar a recoger y contemplar los tesoros vivos que se ocultan bajo su superficie.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincera gratitud hacia Julio Arrontes Junquera, Lucía García Flórez, María del Pino Fernández Rueda, Beti Nieto, Rosa Viejo García, José Manuel Rico Ordás, Jorge Chachero, Ricardo Anadón Álvarez, María Cristina Rodríguez González, María del Rosario Rodicio Rodicio, WWF-España, la Dirección General de Pesca del Principado de Asturias, REDEPESCA y los pescadores asturianos por su colaboración desinteresada.

REFERENCIAS

- Anadón, R. y Roqueñí, N. (2009). Evidencias y efectos potenciales del cambio climático en Asturias. *Consejería de Medio Ambiente, Gobierno del Principado de Asturias*.
- Erauskin-Extramiana, M., Álvarez, P., Arrizabalaga, H., Ibaibarriaga, L., Uriarte, A., Cotano, U., Santos, M., Ferrer, L., Cabre, A., Irigoien, X. y Chust, G. (2019). Historical trends and future distribution of anchovy spawning in the Bay of Biscay. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 159: 169-182.
- Fernández, C. (2011). The retreat of large brown seaweeds on the north coast of Spain: the case of *Saccorhiza polyschides*. *Eur. J. Phycol.* 46 (4): 352-360.
- Fernández-Rueda, P. y García-Flórez, L. (2007). *Octopus vulgaris* (Mollusca: Cephalopoda) fishery management assessment in Asturias (north-west Spain). *Fish. Res.* 83 (2-3): 351-354.
- Galán Fernández, E.M. (2018). *Sostenibilidad de la Explotación del Gelidium corneum en la costa de Llanes (Asturias, España)*. Trabajo de Fin de Grado, Facultad de Biología, Universidad de Oviedo.
- García de la Fuente, L. (2020). *The artisanal fishing fleet in Asturias: characterization and quantitative analysis of its economic and social importance*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- Le Marchand, M., Hattab, T., Niquil, N., Albouy, C. y Lasram, F.B.R. (2020). Climate change in the Bay of Biscay: Changes in spatial biodiversity patterns could be driven by the arrivals of southern species. *Marine Ecol. Prog. Ser.* 647: 17-31.
- Llera, E.M. y Raboso, J.Á. (2007). *Algas Marinas de Asturias*. Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras, Principado de Asturias.
- Louzao, M., Anadón, N., Arrontes, J., Álvarez-Claudio, C., Fuente, D.M., Ocharan, F., Anadón, A. y Acuña, J.L. (2010). Historical macrobenthic community assemblages in the Avilés Canyon, N Iberian Shelf: baseline biodiversity information for a marine protected area. *J. Marine Syst.* 80 (1-2): 47-56.
- May, R.M. (1974). Biological populations with nonoverlapping generations: stable points, stable cycles, and chaos. *Science* 186 (4164): 645-647.

- Rivera, A., Gelcich, S., García-Florez, L., Alcázar, J.L. y Acuña, J.L. (2014). Co-management in Europe: Insights from the gooseneck barnacle fishery in Asturias, Spain. *Marine Policy*, 50: 300-308.
- Roa-Ureta, R.H. Fernández-Rueda, M.D.P., Acuña, J.L., Rivera, A., González-Gil, R. y García-Flórez, L. (2021). Estimation of the spawning stock and recruitment relationship of *Octopus vulgaris* in Asturias (Bay of Biscay) with generalized depletion models: implications for the applicability of MSY. *ICES J. Marine Sci.* 78 (6): 2256-2270.
- Romero-Romero, S., Molina-Ramírez, A., Höfer, J. y Acuña, J.L. (2016). Body size-based trophic structure of a deep marine ecosystem. *Ecology* 97 (1): 171-181.
- Sánchez, F., Cartes, J.E., Papiol, V. y Blanco, M.Á. (2014). Caracterización ecológica del área marina del sistema de cañones submarinos de Avilés: Informe final área LIFE+ INDEMARES (LIFE07/NAT/E/00073).
- Sánchez, J.L.F., Polanco, J.M.F. y García, I.L. (2020). Evidence of price premium for MSC-certified products at fishers' level: the case of the artisanal fleet of common octopus from Asturias (Spain). *Marine Policy* 119: 104098.
- Sarmiento-Vizcaino, A., González, V., Braña, A.F., Palacios, J.J., Otero, L., Fernández, J., Molina, A., Kulik, A., Vázquez, F., Acuña, J.L. y García, L.A. (2017). Pharmacological potential of phylogenetically diverse Actinobacteria isolated from deep-sea coral ecosystems of the submarine Avilés Canyon in the Cantabrian Sea. *Microb. Ecol.* 73 (2), pp.338-352.
- Schickele, A., Francour, P. y Raybaud, V. (2021). European cephalopods distribution under climate-change scenarios. *Sci. Rep.* 11 (1): 1-12.
- generalized depletion models: implications for the applicability of MSY. *ICES J. Marine Sci.* 78 (6): 2256-2270.
- Taboada, F.G. y Anadón, R. (2012). Patterns of change in sea surface temperature in the North Atlantic during the last three decades: beyond mean trends. *Climatic Change* 115 (2): 419-431.

Resistencia bacteriana a los antibióticos: ¿Pueden dejar de curar?

María del Rosario Rodicio
Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

Resumen- De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, la resistencia a los antibióticos y otros antimicrobianos es uno de los mayores retos a los que se enfrenta la medicina actual. La disponibilidad de antimicrobianos eficaces resulta esencial no solo para la prevención y curación de las enfermedades infecciosas, sino también para poder llevar a cabo importantes procedimientos médicos como la cirugía, los trasplantes y la quimioterapia, minimizando los riesgos que éstos conllevan. Sin embargo, las características inherentes a las bacterias, junto con el mal uso y abuso sistemático de los antimicrobianos en diferentes contextos, han conducido a la selección y dispersión de la resistencia. Las medidas coordinadas por la OMS a nivel global para contenerla y adoptadas por España en el marco legislativo de la Unión Europea, están comenzando a dar sus frutos. A pesar de ello, es necesario continuar la lucha contra las bacterias y otros microorganismos resistentes para preservar la eficacia de una de las herramientas más poderosas de las que dispone la humanidad en su lucha contra la enfermedad.

I. HISTORIA DE LAS ENFERMEDADES INFECCIOSAS

Las enfermedades infecciosas son trastornos causados por microorganismos, entidades microscópicas que incluyen protozoos, hongos, bacterias y virus. También se engloban en este concepto las ocasionadas por gusanos parásitos, aunque no sean microorganismos. Este artículo se centrará en las bacterias, que se distribuyen en dos grandes grupos de acuerdo con los resultados de la tinción Gram. En esta tinción diferencial, las bacterias Gram positivas se tiñen de color azul y las Gram negativas de color rosa, debido a diferencias en la composición y estructura de su pared celular (Figura 1). Ambos grupos tienen gran importancia como agentes causales de enfermedad o sea como agentes patógenos.

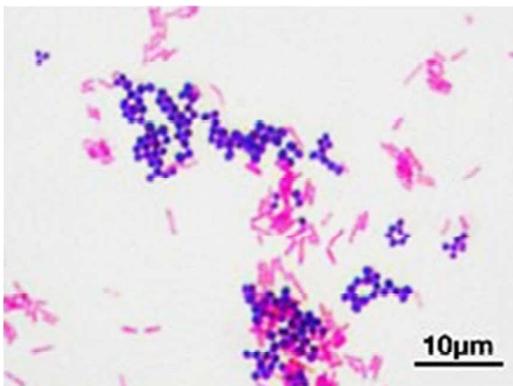


Figura 1. Tinción Gram que diferencia a las bacterias Gram positivas (azules) y Gram negativas (rosas), en base a la composición y estructura de su pared celular (https://es.wikipedia.org/wiki/Tinción_de_Gram).

Estudios paleontológicos y antropológicos indican que las enfermedades infecciosas fueron poco relevantes entre las poblaciones humanas de cazadores-recolectores que vivieron durante el Paleolítico. Caza y recolección fueron las primeras actividades llevadas a cabo con éxito por el género *Homo*, que se dedicó a ellas desde su aparición en la Tierra hace 2,8 millones de años hasta la entrada del Neolítico hace 10.000-11.000 años (Figura 2). Las distintas especies del género *Homo* que habitaron la Tierra durante el ingente periodo de vida nómada, pudieron haber padecido enfermedades infecciosas iguales o similares a las sufridas por otros primates. Sin embargo, las principales causas de muerte por aquel entonces fueron probablemente las carencias nutricionales, los accidentes de caza y los homicidios.

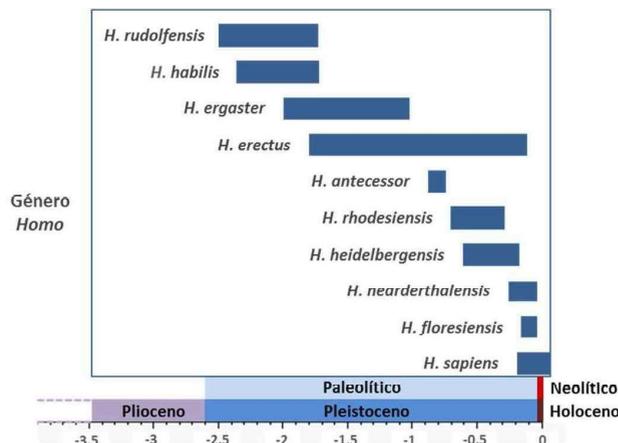


Figura 2. Evolución temporal de las especies del género *Homo*, hasta llegar al *Homo sapiens* (no todas las especies se muestran en el esquema). La escala numérica corresponde a millones de años (elaboración propia, basada en https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Fósiles_de_la_evolución_humana).

El auge y diversificación de las enfermedades infecciosas solo pudo ocurrir a partir del Neolítico, cuando el *Homo sapiens*, única especie del género *Homo* no extinguida, adoptó una forma de convivencia sedentaria ligada a la agricultura. Este cambio condujo a un aumento en la densidad de población, facilitando la propagación de agentes patógenos entre sus miembros. En paralelo tuvo lugar la domesticación de los animales, de modo que los patógenos de estos encontraron en el *H. sapiens* una nueva diana (Wolfe *et al.*, 2007). Desde entonces, pandemias y epidemias de numerosas enfermedades, como la lepra, la peste, la sífilis, la viruela, el cólera, la fiebre amarilla o la fiebre tifoidea azotaron una y otra vez a la

humanidad. La morbilidad y mortalidad ocasionadas por estas enfermedades tuvieron enormes repercusiones sociales, políticas y económicas, que provocaron cambios sustanciales en el devenir de la historia (Piret and Bolvin, 2021).

La búsqueda de las causas de las enfermedades infecciosas se remonta a la antigüedad (Volcy, 2007). En la antigua Grecia, Hipócrates, fundador de la escuela de Cos, atribuyó las enfermedades a causas meramente naturales y no a intervenciones divinas, como se creía hasta entonces. Su obra magna, el *Corpus Hippocraticum*, recoge 70 escritos, elaborados en su mayoría por sus discípulos, en los que se describen distintos descubrimientos en numerosos campos de la medicina. En uno de ellos, *Tratado de los Aires, las Aguas y los Lugares*, indica que la dieta y el clima, junto con la calidad de la tierra, los vientos y el agua, son los factores implicados en el desarrollo de las enfermedades, al influir sobre el equilibrio del hombre y su ambiente. En este tratado se aplica la palabra **miasma** para designar al agente morboso que causa la enfermedad y se utilizan por primera vez los términos “epidemia” y “endemia”, para describir enfermedades que afectan a un país o una región, respectivamente. Hipócrates escribió que los males procedían de un desequilibrio entre los que eran para él los cuatro humores del cuerpo: sangre, bilis amarilla, bilis negra y flema. Por ello, para curar las enfermedades bastaba con restablecer el equilibrio entre estos humores.

Junto con Galeno, Hipócrates se considera el padre de la Medicina Occidental y es autor del Juramento Hipocrático, que establece una ética profesional fundamentada en “no llevar otro propósito que el bien y la salud de los enfermos” (Figura 3). A pesar de que el Juramento Hipocrático ya no se utiliza en su forma original, se considera la base de las leyes que definen las buenas prácticas médicas en la actualidad.

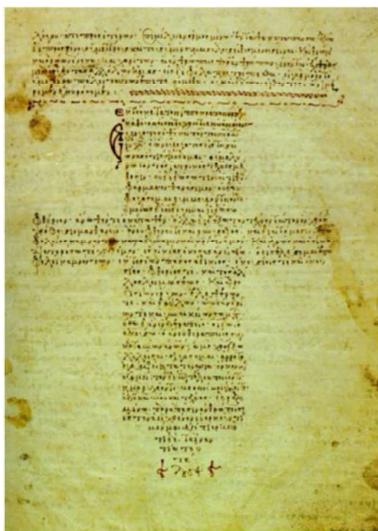


Figura 3. Juramento hipocrático en forma de cruz tomado de un grabado bizantino del siglo XII (<https://es.wikipedia.org/wiki/Hipócrates>).

La noción de la salud como balance entre seres humanos y ambiente, introducida por Hipócrates, perduró hasta que el

colapso de la civilización clásica de occidente, que tuvo lugar a finales del siglo V, dio paso nuevamente a concepciones de carácter mágico-religioso, donde la consideración de la enfermedad como castigo divino conducía inevitablemente a la estigmatización de los enfermos.

Las explicaciones racionales sobre el origen de las enfermedades estuvieron prácticamente ausentes en los escritos médicos elaborados hasta el siglo XV de nuestra era. A pesar de su perspectiva mística-astroológica, la vuelta a una relativa racionalidad se debe a **Paracelso** (1493-1541), famoso alquimista cuyo nombre real fue Teofrasto Phillippus Aureolus Bombast von Hohenheim. Paracelso concibe la enfermedad como resultado de la alteración de mecanismos químicos en el organismo, provocada por el desarrollo de “**semillas morbosas**” a causa de la corrupción del cuerpo. Algo más tarde, el médico veronés **Girolamo Fracastoro** (1478-1553) publicó el libro *De contagione et contagiosis morbis et eorum curatione* (Sobre el contagio y las enfermedades contagiosas y su curación, Venecia 1546), donde se describen por primera vez todas las enfermedades que en aquel momento podían calificarse como contagiosas: peste, lepra, tisis (actual tuberculosis), sarna, rabia, erisipela, viruela, ántrax y tracoma, añadiendo otras nuevas como el tifus exantemático y la sífilis. De hecho, Fracastoro fue el primero en establecer claramente el concepto de enfermedad contagiosa, en proponer una forma de contagio animado resultante de la transmisión de lo que denominó las **seminaria contagiorum** (semillas vivas capaces de provocar la enfermedad) y en establecer tres formas posibles de contagio: por contacto directo (en el caso de la rabia, la lepra y la sarna); por medio de fómites (entre los que menciona las ropas de los enfermos, las sábanas y otros objetos que transportarían a las **seminaria**); y a distancia, sin vehículo alguno, por inspiración del aire o **miasmas** infectados con las **seminaria** (como ocurriría en el caso de la tisis). A este médico italiano se debe también la diferenciación entre los conceptos de infección como causa y epidemia como efecto, y la propuesta de que enfermedades específicas resultaban de contagios específicos. Por todo ello, Fracastoro se considera el padre de la epidemiología moderna.

Aunque la teoría de Fracastoro sobre el origen de las enfermedades infecciosas era de una extraordinaria claridad, tuvo que pasar mucho tiempo hasta que se consiguió identificar a las **seminarias** y demostrar de manera experimental la relación causa-efecto entre ellas y la enfermedad. La identificación de las **seminarias** dependió de la invención del microscopio en el siglo XVII. El comerciante holandés Anton van Leuwenhoek (1632-1723) fue la primera persona que comunicó haber visto a los microbios, ayudándose para sus observaciones de un microscopio simple construido por él mismo. El hallazgo fue comunicado a la Royal Society de Londres en 1676. Por su descripción hoy sabemos que se trataba de protozoos y bacterias a los que llamó “**animálculos**”. El microscopista holandés creyó que el aire era la fuente de sus “animálculos” y que existían en este medio en forma de semillas o gérmenes.

Una vez comprobada la existencia de los microorganismos, el paso decisivo en la demostración experimental del origen de las enfermedades infecciosas se produjo a mediados del siglo

XIX, ligado a la **teoría germinal**. Esta teoría científica propone que los microorganismos son la causa de una amplia variedad de enfermedades. Fue defendida por **Louis Pasteur** y confirmada por **Robert Koch** (Figura 4), que descubrió las bacterias causantes del ántrax o carbunco (*Bacillus anthracis*) y de la tuberculosis (*Mycobacterium tuberculosis* o bacilo de Koch). Por ello fue galardonado con el premio Nobel de Medicina y Fisiología en el año 1905. Formuló, además, lo que se conoce como postulados de Koch, que establecen una serie de criterios experimentales para demostrar si un microorganismo es o no el agente causal de una determinada enfermedad. Estos postulados se siguen utilizando hoy en día. En base a sus aportaciones, Koch se considera, junto a Louis Pasteur, el padre de la bacteriología. Se reconoce, además, que Koch sentó las bases de la microbiología médica moderna.



Figura 4. Robert Koch (https://es.wikipedia.org/wiki/Robert_Koch).

En paralelo a la búsqueda del origen de las enfermedades infecciosas, también se idearon maneras de paliar sus efectos. En este artículo se comentará el tratamiento de la sífilis a lo largo del tiempo, que refleja como pocos los esfuerzos llevados a cabo por el ser humano para combatir la enfermedad, sin o con base científica.

La sífilis es una infección de transmisión sexual, causada por la bacteria *Treponema pallidum*, perteneciente al linaje de las espiroquetas, que son bacterias típicamente alargadas, delgadas, onduladas y flexibles (Figura 5). Se trata de una enfermedad sistémica, de evolución crónica, en la cual se pueden suceder hasta tres etapas sintomáticas, generalmente cortas (denominadas sífilis primaria, secundaria y terciaria), separadas por periodos de latencia de duración variable.

El conocimiento científico de la sífilis se inicia con su primera descripción por parte de Fracastoro. En el poema *Syphillis sive morbus gallicus* (Sífilis o la enfermedad francesa; 1530), Fracastoro describe las aventuras imaginarias del pastor Sifilus encargado de cuidar los rebaños del rey Alcihtous. Molesto con el dios griego Apolo, que quemaba los árboles y consumía los brotes que alimentaban a las ovejas, decidió no adorarlo. Apolo les envió como castigo, a él y a todo el reino, una enfermedad terrible de la cual sólo se librarían bañándose en aguas mercuriales (Tampa *et al.*, 2014). En su libro de medicina *De contagione et contagiosis morbis et eorum*

curatione, mencionado anteriormente, Fracastoro adoptó el término sífilis para designar a la enfermedad que en la época se conocía en Italia, Alemania y Reino Unido como el «morbo francés», en Francia como “morbo italiano” o “mal de Nápoles” y en España como “mal portugués” o “morbo gálico”.



Figura 5. *Treponema pallidum*, espiroqueta causante de la sífilis observada al microscopio electrónico de barrido (micrografía tomada de <https://es.wikipedia.org/wiki/Sífilis>).

La sífilis se extendió por Europa a finales de siglo XV, pero su origen es aún hoy en día fuente de controversia (Tampa *et al.*, 2014). Según la **hipótesis colombina** la enfermedad fue traída de América a España en 1493, por la tripulación de Cristóbal Colón, extendiéndose rápidamente por todo el país. A su difusión por Europa contribuyó decisivamente el ejército del rey Carlos VIII de Francia que, con objeto de conquistar el reino de Nápoles, invade Italia a finales de 1494 con un ejército formado por soldados de numerosos países. La derrota de Carlos VIII en 1495 por una alianza de príncipes italianos supuso la expulsión del ejército invasor y la propagación de la sífilis por toda Europa al regreso de los soldados a sus países de origen. La **hipótesis precolombina** se basa en estudios microscópicos y de datación con carbono-14 de esqueletos con lesiones óseas compatibles con la sífilis, descubiertos en el cementerio de una abadía del noreste de Inglaterra utilizado entre los siglos XII y XVI. Esta hipótesis considera que la enfermedad ya estaba presente en Europa antes de que Colón regresara de América. Como variante de la anterior, algunos autores defienden la **hipótesis unitaria**, según la cual la sífilis ha existido siempre y desde siempre ha tenido una distribución global.

Desde el siglo XVI hasta principios del XX el tratamiento de la sífilis se basó en el mercurio, haciendo famosa la frase “una noche con Venus y una vida con Mercurio”. Pionero en su uso fue Paracelso que, además de sus aportaciones sobre el origen de la enfermedad, tuvo el mérito de buscar un remedio específico para cada una de ellas. En el caso de la sífilis, preconizó el empleo del mercurio, basándose en el poema de Fracastoro. Las formas de aplicación eran variadas: por vía tópica, haciendo friegas contundentes en la piel con el llamado “ungüento gris”, introduciendo al enfermo en una especie de barril donde se quemaba cinabrio que se introducía en el cuerpo por vía respiratoria (Figura 6), e incluso por vía oral en forma de tabletas. Sin embargo, hoy en día sabemos que estos tratamientos resultaban más tóxicos que beneficiosos.



Figura 6. Tratamiento con mercurio de un soldado español afligido con el mal de Nápoles (<https://www.fundacionindex.com/gomeres/?p=1128>).

La primera alternativa al mercurio en el tratamiento de la sífilis fue la madera de guayaco o palo santo. El guayaco, árbol originario de América Central y del Sur, fue introducido en Europa por médicos españoles poco después del descubrimiento. Su madera tenía acción sudorífica y al principio gozó de un gran reconocimiento, pues se consideraba que los gérmenes que causaban la enfermedad eran eliminados del cuerpo a través del sudor, la saliva y la orina. Además, a los que creían que la sífilis procedía del nuevo mundo, les resultaba lógico pensar que el remedio llegara del mismo lugar. La madera del árbol se rallaba hasta obtener un polvo fino, se diluía en agua y se administraba caliente o fría, lo que determinaba la vía de secreción, bien por el sudor o bien por la orina. Entre los defensores decididos del guayaco se encuentra el humanista alemán Ulrich von Hutten, autor de la obra *De guaiaci medicina et morbo gallico liber unus* (1519), que fue reeditada y traducida repetidas veces, contribuyendo a popularizar el uso del guayaco entre los médicos y cirujanos de toda Europa. Durante las dos primeras décadas del siglo XVI gozó de un enorme prestigio como antisifilítico, por lo que llegó a alcanzar precios exorbitantes. De hecho, se convirtió en uno de los negocios más rentables de la familia de banqueros Fugger, que financió a las familias reales, la alta nobleza y la iglesia católica en la época del capitalismo temprano. Además de la madera de guayaco, cuyo uso se descartó a mediados del siglo XVI, otros remedios utilizados frente a la sífilis fueron la raíz de China y la zarzaparrilla, que se administraban conjuntamente y cuyo beneficio se asociaba también a la sudoración, al igual que el mercurio y el guayaco, o los ioduros, especialmente indicados para combatir la sífilis terciaria.

II. LA BALA MÁGICA Y EL NACIMIENTO DE LA QUIMIOTERAPIA

A pesar de los variados intentos encaminados a combatir tanto la sífilis como otras muchas enfermedades infecciosas, hubo que esperar a Paul Ehrlich para que tuviera lugar el nacimiento de la quimioterapia.

Paul Ehrlich (1854-1915) fue un eminente médico y bacteriólogo alemán, cuyas aportaciones en los campos de la microbiología, la inmunología, las enfermedades infecciosas y la quimioterapia antimicrobiana fueron colosales. Fue en este último campo donde Ehrlich realizó una de sus contribuciones

más significativas, al introducir el concepto de **toxicidad selectiva**. En base a sus observaciones acerca de los colorantes que teñían de manera específica a las bacterias, se dedicó a la búsqueda sistemática de compuestos químicos, con objeto de encontrar “la bala mágica”, que matara a los microorganismos causantes de enfermedades y a células alteradas del cuerpo, respetando, sin embargo, las células propias y sanas. Este concepto ha sustentado el desarrollo de la Quimioterapia antimicrobiana y antitumoral, haciéndole acreedor del Premio Nobel de Medicina en 1908.

Entre sus balas mágicas, la más famosa fue el preparado 606, derivado del arsénico que constituyó el primer tratamiento eficaz contra la sífilis, que por aquel entonces seguía siendo una enfermedad endémica e incurable (Ehrlich and Hata, 1910). Este compuesto, una vez patentado, fue fabricado y comercializado por la empresa alemana Farbwerke Hoechst AG, bajo la marca **Salvarsán**, que significa arsénico que salva (del latín *salvare*: salvar y del alemán *arsen*: arsénico). Aunque inicialmente se pensó que se trataba de la arsfenamina, después se demostró que era una mezcla de dos compuestos con estructura trimérica y pentamérica (Figura 7) (Lloyd *et al.*, 2005).

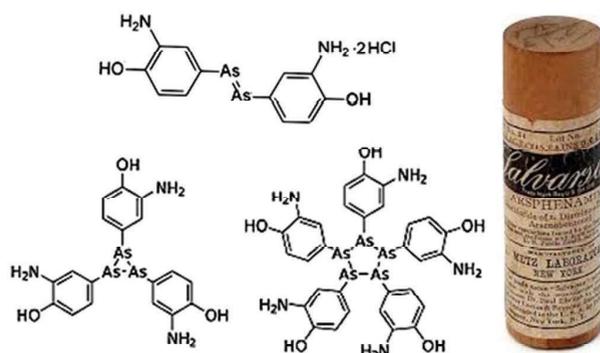


Figura 7. Estructura de la arsfenamina (parte superior derecha) y de las formas triméricas y pentaméricas (parte inferior derecha) que en 2005 se identificaron con el Salvarsán. A la izquierda se muestra el formato comercializado.

(<https://es.wikipedia.org/wiki/Arsfenamina>).

<http://www.historiadelamedicina.org/606Expo/ehrllich2.html>).

Posteriormente Ehrlich desarrolló y patentó un derivado más estable y soluble y menos tóxico, denominado neosalvarsán o neoarsfenamina (compuesto 914), que junto con el salvarsán fueron las drogas más prescritas hasta la introducción de la penicilina en la década de los 1940'. A pesar de que tanto el salvarsán como el neosalvarsán ya no se utilizan hoy en día, al quedar lejos de ser la bala mágica que Ehrlich había perseguido, sentaron, sin embargo, el fundamento de la quimioterapia y cumplieron su función hasta la llegada de las sulfamidas y la penicilina.

Un hito crucial en el campo de la quimioterapia tuvo lugar en la década de los 1930', cuando Gerhard Domagk (1895-1964) demuestra la eficacia antibacteriana del rojo de prontosil (Figura 8), primer fármaco obtenido por síntesis química con amplio espectro de actuación (activo frente a bacterias Gram positivas y Gram negativas).

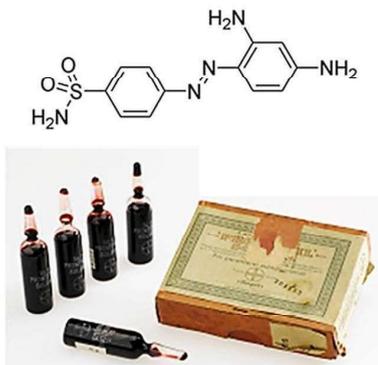


Figura 8. Estructura química del prontosil, primer antimicrobiano sintético (parte superior) y formato comercializado, donde se aprecia el color rojo intenso del contenido de las ampollas (<https://es.wikipedia.org/wiki/Prontosil>; <https://www.biobasedpress.eu/2021/02/chemistry-vs-bacteria-episode-6-gerhard-domagk-and-prontosil-the-first-sulfa-drug/>).

El prontosil resultó eficaz inicialmente en el tratamiento de infecciones causadas por estreptococos y posteriormente de otras bacterias. Dicho hallazgo, publicado en 1935 (Domagk, 1935), le hizo merecedor del Premio Nobel de Medicina en 1939. Posteriormente se demostró que la actividad de este compuesto se debía a uno de sus metabolitos, la p-aminobenzosulfonamida (sulfanilamida), descubriéndose así las propiedades antibacterianas de las sulfamidas. El prontosil no pudo ser patentado porque su metabolito activo, la sulfanilamida, había sido sintetizado en 1908 por el químico vienés Paul Gellmo y era de dominio público. Esto permitió su rápido uso a nivel mundial, así como el desarrollo de nuevas sulfamidas (Otten, 1986).

III. EL DESCUBRIMIENTO DE LA PENICILINA

Durante la mayor parte de la historia de la humanidad, las enfermedades infecciosas fueron una de las principales causas, si no la principal, de mortalidad en seres humano. Aún a mediados del siglo XIX no pocas enfermedades, que después pudieron ser controladas gracias a la prevención por medio de vacunas y al tratamiento con medicamentos antimicrobianos, eran sinónimo de muerte. El descubrimiento de la penicilina por el médico escocés **Alexander Fleming** (1881-1955; Figura 9), marcó el inicio de la era de los antibióticos estableciendo un antes y un después en el control de las enfermedades infecciosas.

El descubrimiento de la penicilina tuvo lugar de manera casual en 1928, cuando Fleming, trabajando en el Hospital St. Mary's de Londres, observó la acción bactericida de un hongo contaminante (*Penicillium notatum*) sobre un cultivo de la bacteria *Staphylococcus aureus* (Figura 10). Esta bacteria Gram positiva es uno de los principales patógenos de seres humanos. Puede producir una amplia gama de enfermedades, entre las que se incluyen infecciones cutáneas superficiales o profundas y muchas otras que afectan a tejidos y órganos internos, como osteomielitis, meningitis, endocarditis, neumonía y sepsis, que pueden representar una grave amenaza para la salud. Fleming comunicó su descubrimiento en el

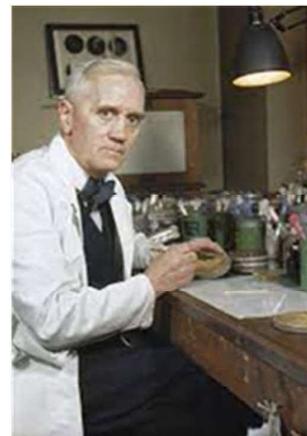


Figura 9. Sir Alexander Fleming en su laboratorio, entre 1939 y 1945 (https://es.wikipedia.org/wiki/Alexander_Fleming).

British Journal of Experimental Pathology (Fleming, 1929), haciendo tan solo una referencia superficial a los potenciales beneficios terapéuticos de la penicilina.

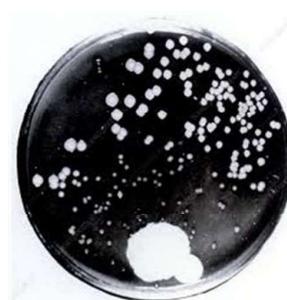


Figura 10. Fotografía de la placa de Fleming donde se observa como un moho contaminante (*Penicillium notatum*, parte inferior de la placa de Petri) disminuye el crecimiento de la bacteria *Staphylococcus aureus*. Esta observación condujo al descubrimiento de la penicilina. (St Mary's Hospital Medical School / Science Photo Library).

Desde entonces tuvo que transcurrir más de una década antes de que se lograra aislar y purificar la sustancia que poseía la capacidad de destruir a un gran número de bacterias, además de *S. aureus*, sin resultar tóxica para el ser humano. Esto se consiguió gracias a la metodología puesta en marcha por Howard Walter Florey y Ernst Boris Chain en 1939 (Aminov, 2010). Estos investigadores de la Universidad de Oxford desarrollaron un método de fermentación en superficie, utilizando primero botellas de leche recicladas y después recipientes específicamente diseñados con ese fin. Los primeros ensayos realizados en ratones para demostrar la eficacia de la penicilina requirieron utilizar 500 litros de caldo de cultivo del hongo por semana que solo permitían obtener unos miligramos del compuesto. La inoculación y cuidado del proceso corrió a cargo de un equipo de mujeres, conocidas como las chicas de la penicilina. Finalmente, el 25 de mayo de 1939 se inyectaron ocho ratones con una cepa virulenta de la bacteria *Streptococcus*, otro de los principales patógenos de seres humanos. Cuatro ratones recibieron el tratamiento con la

penicilina y sobrevivieron, mientras que los cuatro no tratados murieron. En agosto de 1940 se publicó en *The Lancet* el artículo que describía la purificación, producción y uso experimental de la penicilina (Chain *et al.*, 1940). Más adelante, en febrero de 1941, se realizó la primera prueba en humanos. Un policía de Oxford, Albert Alexandre, de 43 años, que había contraído una grave infección por *S. aureus*, fue inyectado con una dosis de penicilina, experimentando una notable mejoría. Desgraciadamente, no se pudo continuar el tratamiento debido a la escasez del fármaco, por lo que falleció poco después. Mejor desenlace tuvo el tratamiento de otros pacientes y pronto hubo planes para la producción de penicilina a gran escala.

Sin embargo, como la II Guerra Mundial impedía seguir la investigación en Europa, las farmacéuticas inglesas cedieron sus resultados al Gobierno de los Estados Unidos. Era muy importante llegar a producir suficiente penicilina para el tratamiento de los soldados de las tropas aliadas, sobre todo teniendo en cuenta que la medicina militar alemana disponía de las sulfamidas. Es necesario tener en cuenta que las infecciones de heridas en el campo de batalla, causadas mayoritariamente por *S. aureus*, junto con las neumonías, provocaban una elevada mortalidad.

Después de un viaje secreto y arriesgado desde Inglaterra a Estados Unidos, Florey llevó muestras del hongo *Penicillium* a Andrew Moyer, un investigador del Departamento de Agricultura en Illinois. Este propuso mejoras en el proceso de purificación, centradas principalmente en sustituir la fermentación en superficie por una fermentación en cultivo sumergido. Utilizando reactores cada vez mayores, cepas de mayor productividad, pertenecientes fundamentalmente a la especie *P. chrysogenum*, y mejorando los métodos de recuperación, en cinco años se consiguió multiplicar por 800 la producción de penicilina. Así, contando con el apoyo del Departamento de Agricultura, de universidades y de varias compañías farmacéuticas, muy pronto fue posible la producción de penicilina a gran escala. En 1943 comenzó su comercialización en Estados Unidos y en 1944 ya hubo suficiente cantidad para tratar a los soldados de los ejércitos aliados heridos en los campos de batalla de Europa (Figura 11). Sin embargo, la penicilina solo llegó a la población civil una vez finalizada la II Guerra Mundial. Algunos infravaloraron el descubrimiento de Fleming, atribuyéndolo al azar. Sin embargo, su capacidad de observación y correcta interpretación de lo observado es innegable. Por todo ello, Fleming, junto con Florey y Chain, fueron galardonados con el Premio Nobel de Medicina en 1945.

Otro hito crucial en la historia de la penicilina se produjo cuando Dorothy Hodgkin resolvió la estructura β -lactámica del antibiótico (Hodgkin, 1949). Zanjó así el debate existente entre los que apoyaban dicha estructura, como el propio Chain, y los partidarios de una estructura tiazolidínico-oxazolona (Curtis and Jones, 2007). Así, todas las penicilinas comparten el anillo β -lactámico que se encuentra ligado a un segundo anillo, el anillo tiazolidínico, dando lugar al núcleo 6-aminopenicilánico, que contiene una cadena lateral unida a su grupo amino (Figura 12).

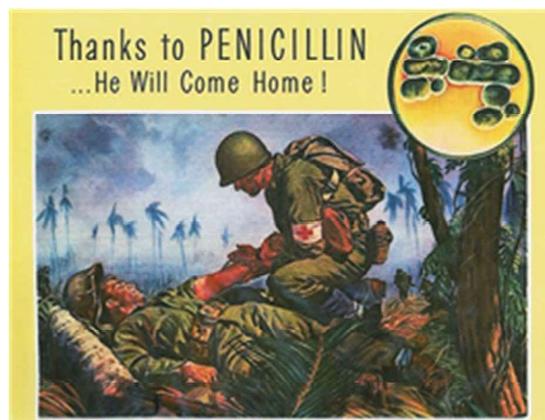


Figura 11. Cartel de agradecimiento a la penicilina por las vidas de soldados salvadas durante la II Guerra Mundial (The National WWII Museum).

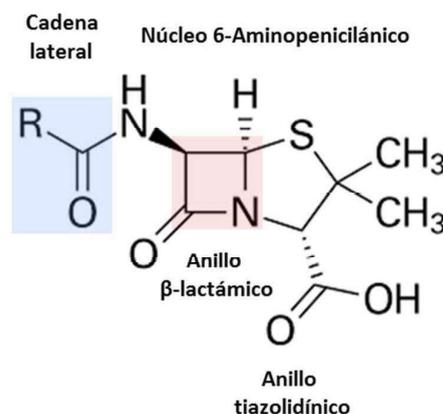


Figura 12. Estructura química de una penicilina, que consta de un anillo β -lactámico (resaltado en rosa), un anillo tiazolidínico (formando ambos el núcleo 6-aminopenicilánico) y una cadena lateral (resaltada en azul). La modificación de la cadena lateral dio lugar a distintas penicilinas semisintéticas (basado en <https://es.wikipedia.org/wiki/Penicilina>).

El conocimiento de la estructura química de la penicilina abrió el camino al desarrollo de derivados semisintéticos, con propiedades mejoradas. De hecho, la penicilina G o bencilpenicilina, descubierta por Fleming, es la única penicilina natural que se utiliza todavía en clínica. La penicilina G actúa principalmente frente a bacterias Gram positivas, debido a la barrera de permeabilidad que representa la membrana externa exclusiva de las bacterias Gram negativas, debe administrarse por vía parenteral ya que es sensible al pH ácido del estómago y es sensible a β -lactamasas (apartado VI.1). Sin embargo, por modificación de la cadena lateral se consiguieron penicilinas activas también frente a bacterias Gram negativas (como la ampicilina), resistentes a la acidez estomacal, por lo que pueden ser administradas por vía oral y resistentes a β -lactamasas (como es el caso de la meticilina, que comparte las últimas características y se utiliza para combatir infecciones causadas por *S. aureus*).

IV. LA EDAD DE ORO DE LOS ANTIBIÓTICOS

El descubrimiento de los tres primeros agentes antibacterianos: el salvarsán, las sulfamidas y la penicilina, constituyó uno de los hitos fundamentales en el campo de la medicina, considerado por muchos como el mayor logro de la medicina del siglo XX. Se inició, a continuación, la conocida como “edad de oro” de los antibióticos que se extendió entre 1940’ y 1960’ (Hutchings *et al.*, 2019). Fue Selman Waksman quien, a finales de la década de 1930’, inauguró esta edad de oro, al iniciar el estudio sistemático de los microorganismos como productores de antibióticos. A él se debe también la definición de antibiótico como “*compuesto sintetizado por un microorganismo que mata a otros microorganismos*”. Waksman descubrió numerosos antibióticos producidos por un grupo de bacterias que viven en el suelo, los actinomicetos, entre los que sobresale el género *Streptomyces*. Entre los antibióticos descubiertos por Waksman se encuentra la estreptomycinina, que precisamente debe su nombre a *Streptomyces* y que fue el primer compuesto utilizado con éxito para el tratamiento de la tuberculosis, salvando millones de vidas. Cabe destacar que los actinomicetos producen más de dos tercios de los antibióticos de origen natural conocidos, siendo el resto sintetizados por otras bacterias y por hongos. Nuevamente, la modificación química de otros compuestos naturales permitió la obtención de antibióticos semisintéticos, con propiedades mejoradas en cuanto a espectro de acción, vía de administración, etc., como ya se comentó en el caso de la penicilina. Además, se fabricaron numerosos agentes antimicrobianos por síntesis química total (Figura 13). Estrictamente hablando, estos últimos se denominan quimioterapéuticos, aunque hoy en día el término antibiótico es utilizado por numerosos autores para referirse a cualquier agente, con independencia de su origen.

Así, durante la “edad de oro” se consiguieron una gran cantidad de antimicrobianos, pertenecientes a múltiples familias (β -lactámicos, glicopéptidos, aminoglicósidos, fenicoles, tetraciclinas, macrólidos, lincosamidas, estreptograminas, quinolonas y fluoroquinolonas, polimixinas, etc.). Especial atención merecen las cefalosporinas y las carbapenemas, antibióticos β -lactámicos de gran relevancia en medicina. La primera cefalosporina descubierta, denominada cefalosporina C, fue aislada a partir del hongo *Acremonium chrysogenum* (previamente conocido como *Cephalosporium acremonium*), mientras que el resto son derivados semisintéticos de ella. Como característica común, todas comparten el núcleo 7-aminocefalosporánico, formado por el anillo β -lactámico unido a un anillo dihidrotiacínico. Por otro lado, la estructura de las carbapenemas es similar a la de las penicilinas con la sustitución del átomo de azufre por un grupo metileno y pequeños cambios en la cadena lateral. Estos cambios confieren gran estabilidad frente a la mayoría de las β -lactamasas (apartado VI.1). El primer representante del grupo fue la tienamicina, producida por *S. catleya*.

Los antibióticos que actúan sobre las bacterias se denominan antibacterianos. Atendiendo a sus efectos se clasifican en bactericidas, si causan la muerte, o bacteriostáticos, si provocan el cese reversible de su crecimiento y multiplicación.

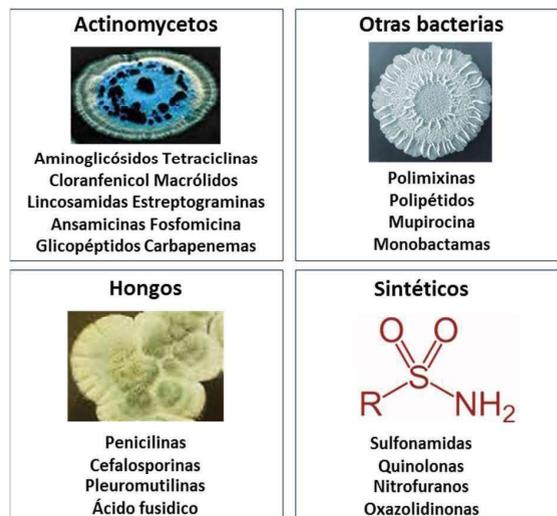


Figura 13. Antibióticos producidos por microorganismos y conseguidos por síntesis química. En el caso de los microorganismos productores se muestran colonias de *Streptomyces coelicolor*, *Bacillus subtilis* (parte superior izquierda y derecha, respectivamente) y de *Penicillium chrysogenum* (parte inferior izquierda) (elaboración propia basada en Hutchings *et al.*, 2019).

Los miembros de una misma familia actúan preferentemente de una forma u otra, aunque el efecto de un mismo compuesto puede variar dependiendo de su concentración, sitio de actuación y/o afinidad por la diana sobre la cual actúan, así como de la bacteria. Estos compuestos ejercen su acción dañando diferentes estructuras celulares o interfiriendo en procesos biológicos esenciales para las bacterias (Figura 14). En general, pueden interferir con la síntesis de la pared celular (antibióticos β -lactámicos, fosfonatos, glicopéptidos, etc.); bloquear la síntesis de ácidos nucleicos (quinolonas y ansamicinas) o de alguno de sus precursores (sulfamidas y trimetoprim); inhibir la síntesis proteica al unirse a las subunidades 30S (aminoglicósidos y tetraciclinas) o 50S (fenicoles, macrólidos y oxazolidinonas) del ribosoma bacteriano; o alterar la integridad de la membrana externa de bacterias Gram negativas (polimixinas). Las dianas sobre las cuales actúan los antibióticos son exclusivas de las bacterias o presentan diferencias fundamentales en relación a organismos superiores, de ahí su toxicidad selectiva.

La aplicación del inmenso arsenal de antibióticos procedentes de la “edad de oro” no solo permitió el control de las enfermedades infecciosas, llevando a pensar que podrían quedar relegadas al pasado, sino que hizo factibles otros muchos procedimientos de la medicina actual, como las operaciones quirúrgicas, los trasplantes y el tratamiento frente al cáncer. Se puede decir, por tanto, que la medicina moderna descansa en gran medida sobre ellos. Sin embargo, el optimismo se vio frenado cuando, a partir de la década de los 70’, disminuyó sustancialmente el número de nuevos compuestos que salieron al mercado. Este hecho, junto con la continua aparición de bacterias resistentes (esto es, bacterias con la capacidad de sobrevivir a la acción de los antibióticos), ha provocado una grave crisis de salud pública a nivel mundial.

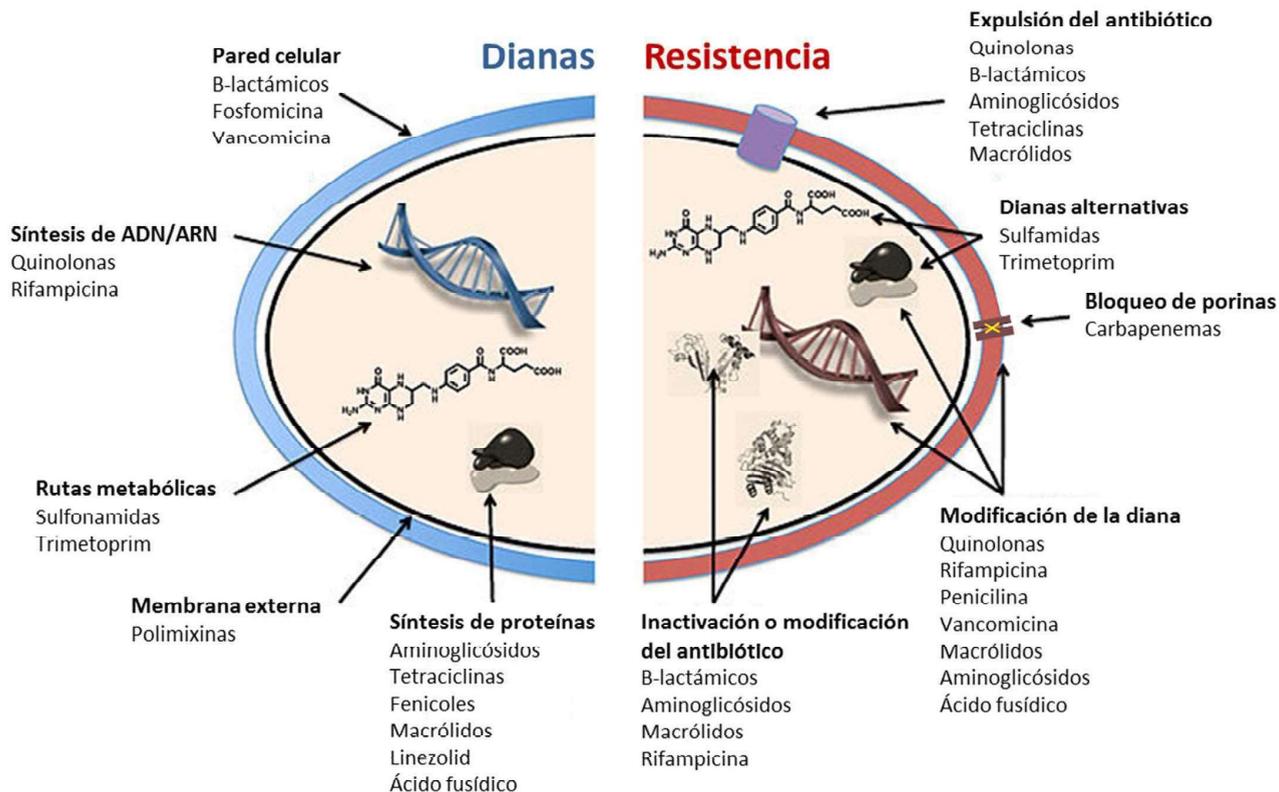


Figura 14. Dianas de acción de los antibióticos (izquierda) y mecanismos de resistencia de las bacterias frente a ellos (derecha). La fosfomicina, la rifampicina y el linezolid pertenecen a las familias de los fosfonatos, las ansamicinas y las oxazolidinonas, respectivamente (ver Figura 15) (basado en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Antibiotic_resistance_mechanisms.jpg).

V. LA PREDICCIÓN DE FLEMING

“Llegará un día en que cualquier persona pueda comprar la penicilina en las tiendas. Entonces existirá el peligro de que un hombre ignorante pueda fácilmente tomar una dosis insuficiente, y que al exponer a sus microbios a cantidades no letales del fármaco los haga resistentes”.

Estas palabras proféticas fueron pronunciadas por Alexander Fleming el 11 de diciembre de 1945, en su discurso durante la ceremonia de entrega del premio Nobel de Medicina. Con ellas, Fleming advertía del riesgo de generar resistencia bacteriana a los antibióticos debido a su uso incorrecto.

Inciendiando sobre el tema, Fleming explicaba en una entrevista concedida a la BBC, que *“hay reglas sencillas para el uso de la penicilina: utilizarla sólo para los microbios que sean vulnerables a ella, aplicar la dosis indicada y hacer que el tratamiento dure lo suficiente para eliminar la infección. Siguiendo estas reglas, todos quedarán satisfechos; de lo contrario, el resultado será decepcionante”* (BBC Mundo).

En la época pre-antibiótica, la mortalidad de los pacientes con infecciones invasivas causadas por *S. aureus* excedía al 80%. La introducción de la penicilina en la práctica clínica, a principios de la década de los 40’ mejoró drásticamente la prognosis de los pacientes con este tipo de infecciones. Sin embargo, ya en 1942 se detectaron variantes (cepas) de *S. aureus* resistentes a penicilina, primero en hospitales y después en la comunidad (Rammelkamp and Maxon, 1942). Para finales de la década de los 60’, más del 80% de las cepas de *S. aureus* eran resistentes al antibiótico. En general, este patrón según el cual la resistencia surge en hospitales y se extiende después a la comunidad, se repite para cada nuevo antibiótico poco después de comenzar su utilización en medicina. En la Figura 15 se muestra un diagrama temporal de la introducción de las diferentes familias de antibióticos en la práctica clínica, junto con el momento de aparición de las resistencias más relevantes.

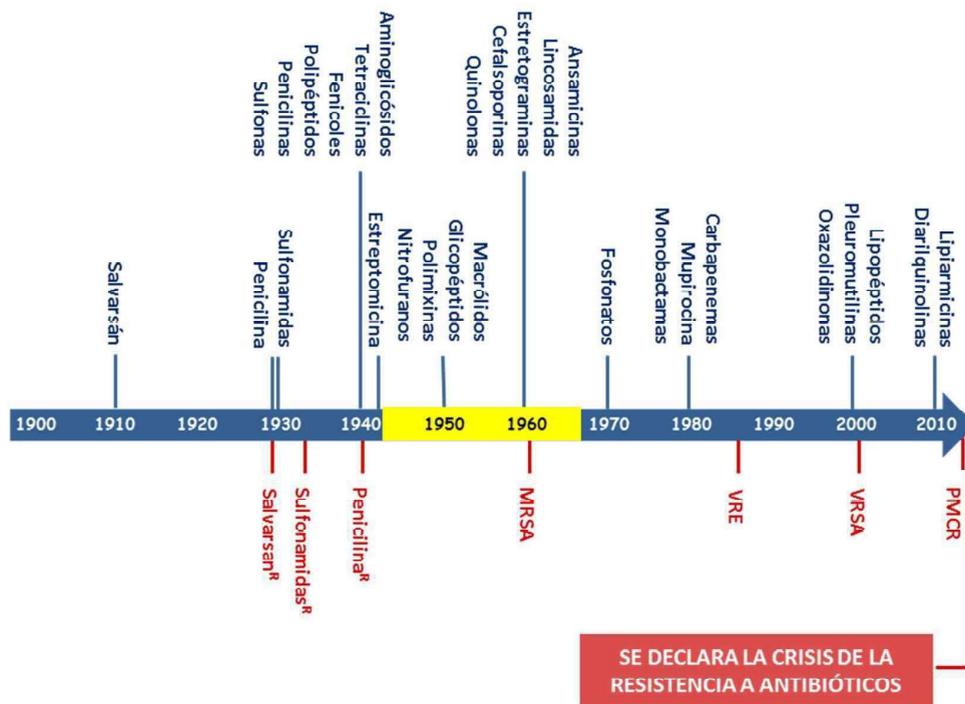


Figura 15. Escala temporal de la introducción de distintas familias de antibióticos en la práctica médica (azul) y de la aparición de resistencias frente a ellas (rojo). La edad de oro de los antibióticos se destaca en amarillo. MRSA, *Staphylococcus aureus* resistente a meticilina; VRE, *Enterococcus* resistente a vancomicina; VRSA, *Staphylococcus aureus* resistente a vancomicina; PMCR, resistencia plasmídica a colistina (modificado de Hutchings *et al.*, 2019)

VI. RESISTENCIA DE LAS BACTERIAS A LOS ANTIBIÓTICOS: CONCEPTO, MECANISMOS BIOQUÍMICOS Y BASES GENÉTICAS

La resistencia a los antibióticos se define como la capacidad que tienen las bacterias de soportar sus efectos adversos. Las bacterias resistentes, pero no las sensibles, consiguen mantener su viabilidad, crecimiento y multiplicación en presencia de los antibióticos, lo cual conduce al fracaso en el tratamiento de las enfermedades infecciosas (Figura 16).

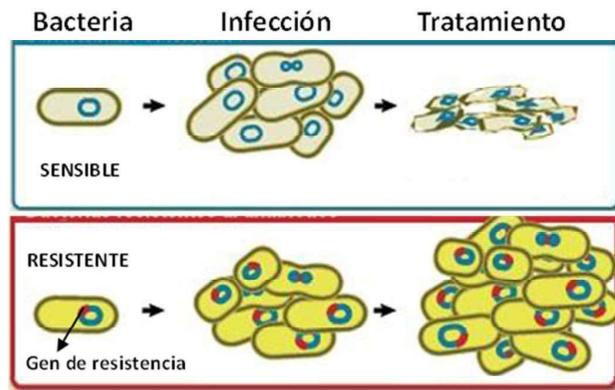


Figura 16. Consecuencias del tratamiento antibiótico de bacterias sensibles y resistentes. El tratamiento selecciona a las bacterias resistentes (modificado de <https://www.niaid.nih.gov/research/antimicrobial-resistance-causes>).

VI.1. BASES BIOQUÍMICAS DE LA RESISTENCIA

A la hora de abordar el problema de la resistencia es preciso conocer, en primer lugar, las **estrategias bioquímicas** que utilizan las bacterias para eludir la acción de los antibióticos (Wright, 2010a). De manera general, estas estrategias son las siguientes (Figura 14):

- **Impedir que el antibiótico penetre en la bacteria.** Las bacterias pueden modificar sus envolturas celulares, haciéndose impermeables a la entrada del antibiótico. Un ejemplo relevante es la alteración de las porinas, proteínas con estructura de barril que se insertan en la membrana externa de bacterias Gram negativas, actuando como canales que permiten la entrada de moléculas hidrofílicas por difusión pasiva. Algunas porinas son utilizadas por los antibióticos para penetrar en las células bacterianas, de modo que los cambios en su conformación pueden impedir la entrada confiriendo resistencia. Este mecanismo está implicado, por ejemplo, en la resistencia a carbapenemas.
- **Expulsar el antibiótico fuera de la bacteria,** utilizando para ello bombas de flujo que impiden su acumulación tóxica en el interior de las células. Este mecanismo puede conferir resistencia, por ejemplo, a fenicolos y tetraciclina.
- **Producir enzimas que inactiven al antibiótico,** impidiendo su actuación. Este es el caso de las β -lactamasas, principal mecanismo de resistencia frente a los antibióticos β -lactámicos que actúan bloqueando la síntesis

del peptidoglicano, componente estructural de la pared celular bacteriana. Dentro de este grupo de compuestos se incluyen la penicilina y sus derivados semisintéticos, las cefalosporinas (de 1ª a 5ª generación, de acuerdo con su espectro de acción), las cefamicinas, las carbapenemas y los monobactámicos. Las β-lactamasas hidrolizan el anillo β-lactámico común a todos ellos, lo que provoca la pérdida de actividad de estos compuestos.

Es interesante destacar que la resistencia a distintas combinaciones de antibiótico β-lactámico e inhibidor de β-lactamasas, como amoxicilina/ácido clavulánico o piperacilina/tazobactam, se debe a la superproducción de β-lactamasas, bien por activación de la expresión del gen que las codifica o bien por aumento del número de copias de dicho gen.

Kirby fue el primero en demostrar la inactivación de la penicilina por cepas resistentes de *S. aureus*, poco después de su introducción en la práctica médica (Kirby, 1944). Posteriormente se identificó el enzima penicilinasas como la β-lactamasa responsable de la inactivación del antibiótico (Bondi and Dietz, 1945) (Figura 17).

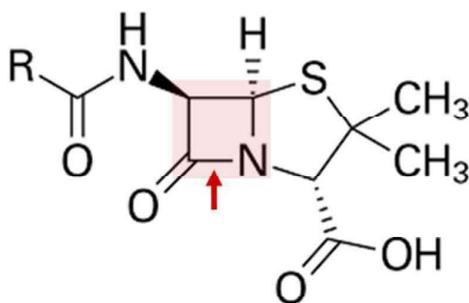


Figura 17. Sitio de acción de las β-lactamasas (flecha roja) sobre el anillo β-lactámico de la penicilina (resaltado en rosa) (modificado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Penicilina>).

En la actualidad más del 90% de las cepas de *S. aureus* producen penicilinasas y se conocen más de 1.100 β-lactamasas, producidas por diferentes bacterias patógenas. Su relevancia clínica depende del rango de sustratos que puedan hidrolizar, así como de la susceptibilidad frente a inhibidores competitivos, como el ácido clavulánico o el tazobactam, mencionados anteriormente.

- **Producir enzimas que modifiquen al antibiótico.** Se conoce un gran número de enzimas que alteran la estructura de diferentes antibióticos bloqueando su actuación. Por ejemplo, la resistencia a los aminoglicósidos se debe comúnmente a la producción de transferasas que catalizan la modificación de sus moléculas añadiendo diferentes grupos. Estos enzimas pueden ser nucleotidiltransferasas (adeniltransferasas), fosfotransferasas y acetiltransferasas. Dentro de la familia de los fenicoles, el cloranfenicol también puede ser modificado por la acción de acetiltransferasas.
- **Modificar la diana de acción del antibiótico,** de manera que el compuesto no pueda reconocerla y por tanto actuar.

La rifampicina es un antibiótico que se une al enzima ARN polimerasa, inhibiendo la transcripción. La resistencia a este antibiótico se asocia normalmente a mutaciones puntuales en el gen que codifica la subunidad β del enzima, que resultan en su alteración. De manera similar, la resistencia a quinolonas se debe a alteraciones en los genes que codifican los enzimas ADN girasa (ADN topoisomerasa II) y ADN topoisomerasa IV que participan en el proceso de síntesis del ADN y son las dianas de actuación de estos compuestos. Otros ejemplos de este tipo de mecanismo, son la resistencia a macrólidos debida a la metilación de un residuo de adenina del ARNr 23S que produce un cambio conformacional en el ribosoma reduciendo su afinidad por los miembros de esta familia de antibióticos, así como la resistencia a linezolid a consecuencia de mutaciones en el gen que codifica ese mismo ARNr.

- **Sintetizar una diana alternativa** cuya función no se ve afectada en presencia del antibiótico. Las sulfamidias y el trimetoprim inhiben la síntesis de ácidos nucleicos en bacterias al bloquear dos etapas diferentes de la ruta que conduce a la formación de ácido tetrahidrofólico, precursor en la obtención de nucleótidos. Las bacterias pueden sintetizar enzimas alternativos a los que catalizan normalmente estas etapas, que ya no se verán afectadas por dichos compuestos. Las sulfamidias y trimetoprim tienen un efecto sinérgico y suelen utilizarse en combinación, bajo el nombre de cotrimoxazol.

VI.2. BASES GENÉTICAS DE LA RESISTENCIA

Detrás de los mecanismos bioquímicos de resistencia a los antibióticos, existe un **sopORTE genético** que no solo contiene las claves de las diferentes estrategias, sino también de la complejidad de la multi-resistencia y de la amplia dispersión que este fenómeno alcanza en la actualidad. En este contexto, hay que diferenciar en primer lugar tres tipos generales de resistencia, la natural, la intrínseca y la adquirida.

La resistencia **natural** es la que poseen de manera inherente las bacterias que no contienen la diana de actuación del antibiótico. Por ejemplo, las micoplasmas son un grupo de bacterias que carecen de pared celular, siendo por tanto resistentes a los antibióticos que interfieren con la biosíntesis del peptidoglicano, como los β-lactámicos, la fosfomicina y la vancomicina. Otro ejemplo es la resistencia de bacterias Gram positivas a las polimixinas, como la colistina, que actúan sobre un componente de la membrana externa, que está presente en la pared celular de las bacterias las Gram negativas pero no de las Gram positivas.

La resistencia **intrínseca** es también un fenómeno natural que afecta de manera simultánea a diferentes clases de antibióticos. Como ejemplos se incluyen el fenotipo de multi-resistencia debido a la impermeabilidad de la membrana externa de bacterias Gram negativas a numerosos compuestos que son clínicamente eficaces frente a Gram positivas, o la expresión de bombas de eflujo que expulsan distintos antibióticos impidiendo su acumulación intracelular. Sin embargo, estudios recientes revelaron la existencia de un

número sorprendente de genes adicionales pertenecientes a diferentes categorías funcionales, que contribuyen a la resistencia intrínseca tanto en bacterias Gram positivas como en bacterias Gram negativas (Cox and Wright, 2013).

A diferencia de las anteriores, la resistencia **adquirida** no está presente de forma natural sino que es conseguida por bacterias eran inicialmente sensibles a través de modificaciones genéticas que se producen bien por **mutación** o bien por **incorporación de material genético exógeno**.

En la actualidad se aplica el término **resistoma** al repertorio de genes que contribuyen de manera directa o indirecta a la resistencia (Wright, 2010b).

La elevada tasa de reproducción de las bacterias, permite la acumulación de un gran número de mutaciones, que se generan al azar a lo largo del tiempo. Algunas de estas mutaciones pueden constituir un “error útil”. Estos errores aportan a las bacterias donde se originan una ventaja selectiva frente al resto de la población (Baquero *et al.*, 2002). Si la mutación confiere la capacidad de resistir a la acción de un antibiótico, en presencia de éste las bacterias resistentes sobreviven, mientras que las sensibles serán eliminadas (Figura 18). Al igual que la resistencia intrínseca, la resistencia adquirida por mutación se transfiere de forma vertical, es decir, de la bacteria resistente a sus descendientes.

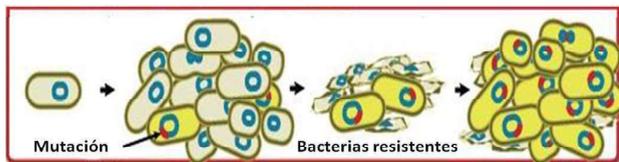


Figura 18. Resistencia a antibióticos adquirida por mutación. El tratamiento antibiótico selecciona a las bacterias resistentes (modificado de <https://www.niaid.nih.gov/research/antimicrobial-resistance-causes>).

En cuanto a incorporación de ADN exógeno, las bacterias poseen un arsenal de elementos genéticos, potencialmente móviles, que desempeñan un papel esencial en la captura, acumulación y dispersión de genes exógenos procedentes de otras bacterias o del ambiente. Entre ellos destacan el sistema integrón-casete génica, los elementos genéticos transponibles (secuencias de inserción y transposones) y los plásmidos. Estos últimos desempeñan un papel esencial en la dispersión de genes de resistencia entre bacterias, mientras que los primeros intervienen en la movilidad intracelular.

- Los **integrones** son sistemas naturales de clonación y expresión, capaces de incorporar **casetes génicas** y convertirlas en genes funcionales (Carattoli, 2001; Partridge *et al.*, 2018). Las casetes génicas son entidades genéticas sencillas, que constan de una única *orf* (del inglés *open reading frame*; marco abierto de lectura en español) y un sitio específico de recombinación denominado *attC* o secundario. Muchas de estas *orfs* codifican funciones adaptativas, normalmente resistencia a antibióticos. El integrón, por su parte, contiene tres componentes: el gen que codifica el enzima integrasa (*intI*), el sitio primario de recombinación *attI*, responsables de la incorporación de las casetes, y el promotor (o los promotores) que permiten su

expresión. El proceso de integración tiene lugar mediante recombinación específica de sitio, entre *attI* y *attC*, catalizada por la integrasa (Figura 19). Este enzima puede promover la adquisición consecutiva de más de una casete génica, expresándose todas ellas a partir del promotor(es) del integrón, y confiriendo así resistencia a más de un antibiótico.

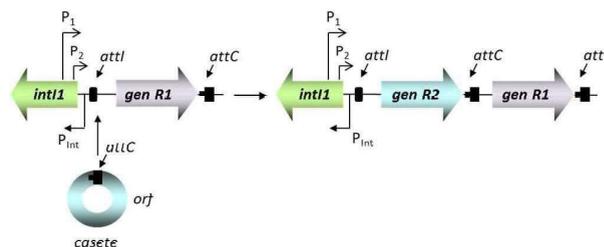


Figura 19. Captura de una casete génica por parte de un integrón que la transforma, además, en un gen funcional (gen R2). *intI1*, gen que codifica la integrasa; *attI* y *attC*, secuencias de recombinación específica de sitio del integrón y de la casete, respectivamente; *P_{int}*, promotor del gen de la integrasa; *P₁* y *P₂*, promotores que permiten la expresión de las casetes génicas, una vez incorporadas (modificado de Carattoli, 2001).

- Los **elementos genéticos transponibles** poseen la capacidad de desplazarse de un sitio a otro del genoma de una bacteria, ya que codifican la maquinaria enzimática necesaria para su propia movilización (enzimas transposasa, resolvasa y proteínas reguladoras). Desempeñan un papel importante en la evolución de los genomas bacterianos, ya que pueden promover mutaciones, deleciones, inversiones y reorganizaciones, aumentando la diversidad. Además, pueden portar genes de resistencia a antibióticos e incluso integrones. Dentro de este grupo se incluyen las secuencias de inserción y los transposones (Partridge *et al.*, 2018).

Las **secuencias de inserción** son los elementos transponibles más sencillos. Son de pequeño tamaño, están delimitadas por secuencias repetidas e invertidas, contienen el gen de la transposasa responsable del desplazamiento y en ocasiones un gen que codifica una proteína reguladora. Se encuentran ampliamente distribuidas en los genomas bacterianos, contribuyendo a su variabilidad. Además, cumplen un papel esencial en la movilización de genes de resistencia específicos, situados en su proximidad o formando parte de estructuras más complejas como **transposones compuestos** (o de clase 1). Estos últimos presentan una estructura modular, formada por dos copias de una misma secuencia de inserción que flanquean una región central variable, donde se localizan frecuentemente genes de resistencia a antibióticos. En este tipo de transposones, las secuencias de inserción de los extremos son las que aportan la maquinaria necesaria para la movilización de todo el conjunto como una unidad. Finalmente, los **transposones complejos** (o de clase 2) se encuentran delimitados por repeticiones invertidas (al igual que las secuencias de inserción), codifican la maquinaria requerida para su propia transposición y contienen uno o más genes de resistencia a antibióticos (Figura 20).

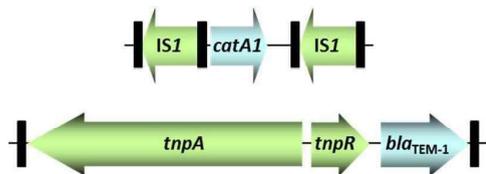


Figura 20. Estructura de un transposón compuesto (Tn9; parte superior) y un transposón complejo (Tn3; parte inferior). El primero se encuentra delimitado por dos copias de la secuencia de inserción IS1, cada una de ellas flanqueada por repeticiones invertidas (líneas verticales negras) y contiene un gen de resistencia a cloranfenicol (*catA1*). El segundo, también flanqueado por repeticiones invertidas, lleva los genes que codifican los enzimas transposasa (*tnpA*) y resolvasa (*tnpR*) y el gen que codifica una β-lactamasa (*bla_{TEM-1}*).

Finalmente, los **plásmidos** son elementos genéticos extra-cromosómicos, con capacidad de replicación autónoma. No codifican funciones esenciales para el crecimiento y multiplicación de las bacterias donde se encuentran, pero pueden conferir ventajas adaptativas para sobrevivir en circunstancias adversas, como por ejemplo, en presencia de antibióticos (Partridge *et al.*, 2018). Los plásmidos se encuentran en casi todas las especies bacterianas y muchos de ellos pueden diseminarse entre diversas bacterias, por transferencia horizontal, gracias a los procesos de conjugación o movilización (Figura 21). Por todo ello, son los elementos genéticos con mayor impacto en la adquisición, mantenimiento y dispersión de genes de resistencia.

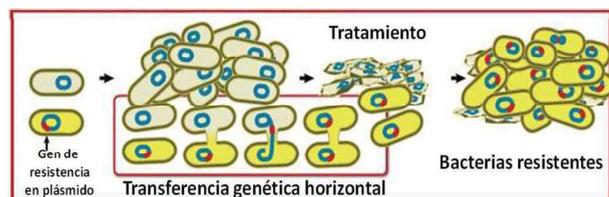


Figura 21. Resistencia a antibióticos por transferencia genética horizontal (entre diferentes bacterias) mediada por un plásmido conjugativo portador de un gen de resistencia. El tratamiento antibiótico selecciona las bacterias resistentes (modificado de <https://www.niaid.nih.gov/research/antimicrobial-resistance-causes>).

En cuanto al origen de los genes de resistencia, durante mucho tiempo se pensó que procedían de los microorganismos productores de antibióticos, donde se encuentran como mecanismo de autodefensa (Waksman and Woodruff, 1940). Estos genes podrían dispersarse a las bacterias patógenas mediante los procesos de transferencia genética horizontal ya mencionados, adquiriendo así la misma capacidad defensiva (Martínez and Baquero, 2009). Sin embargo, la presencia de genes de resistencia en bacterias ambientales que no producen antibióticos o en bacterias ambientales que no están sometidas a presión selectiva por parte de estos, indica que tanto los antibióticos como los genes de resistencia podrían tener otras funciones. En este contexto, destaca la detección de genes de resistencia a β-lactámicos, tetraciclina y glicopéptidos, como la vancomicina, en bacterias encontradas en el permafrost (capa del subsuelo de la corteza terrestre que se encuentra

permanentemente congelada en algunas de las regiones más frías de la Tierra) de hace 30.000 años (D’Costa *et al.*, 2011). De cualquier manera, estos resultados demostraron de forma inequívoca que la resistencia es un fenómeno natural y no un fenómeno reciente que surgió a raíz del descubrimiento y utilización de los antibióticos por el hombre.

VI.3. EL CAPITALISMO GENÉTICO Y LAS SUPERBACTERIAS

Cabe destacar que los distintos elementos genéticos portadores de genes de resistencia, comentados anteriormente, no siempre se presentan de manera aislada. Frecuentemente, los integrones están incluidos en transposones y estos a su vez en plásmidos, aunque también pueden encontrarse en el cromosoma, formando a menudo parte de islas o regiones de resistencia complejas, como las caracterizadas por nuestro grupo en *Salmonella enterica*, una de las principales bacteria patógenas transmitidas por alimentos (Martínez *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2006). De especial relevancia son los plásmidos híbridos que, además de genes de resistencia, contienen genes de virulencia, descritos también por nuestro grupo en *S. enterica* (Rodicio *et al.*, 2011; Vázquez *et al.*, 2021). En resumen, las bacterias disponen de una maquinaria genética de gran plasticidad y dinamismo, con una extraordinaria capacidad para adquirir y acumular material genético exógeno, en lo que se conoce como “capitalismo genético” (Baquero, 2004). Los genes de resistencia adquiridos de este modo representan una importante amenaza epidemiológica y clínica, al afectar con frecuencia a más de una familia de antibióticos.

En base al número de familias afectadas, se han establecido tres categorías de resistencia, designadas con las siglas MDR (multi-resistencia; del inglés *multidrug-resistance*), XDR (resistencia extensiva; del inglés *extensively drug-resistance*) y PDR (pan-resistencia; del inglés *pan drug-resistance*). Aunque aún no existe consenso en cuanto a los límites establecidos para cada una de estas categorías, en general se consideran **MDR** las bacterias resistentes a tres o más familias de antibióticos que tengan relevancia clínica para el tratamiento de las infecciones que originan; **XDR** las que carecen de sensibilidad por lo menos a un antibiótico de todas las familias disponibles en la práctica clínica excepto una o dos; mientras que las **PDR** serían resistentes a todos los antibióticos de todas las familias habitualmente utilizadas para su tratamiento (Oteo *et al.*, 2016). La MDR fue adquirida por numerosas bacterias, tanto Gram negativas como Gram positivas. Sin embargo, la XDR y PDR afecta fundamentalmente a determinadas bacterias como es el caso de *Acinetobacter baumannii*, *Klebsiella pneumoniae* y *Pseudomonas aeruginosa*, entre las Gram negativas, y *M. tuberculosis* entre las Gram positivas.

Independientemente de las categorías oficiales, de manera coloquial se utiliza el término “**superbacterias**” para referirnos a aquellas que, debido a su resistencia, causan infecciones difíciles de tratar. Sin embargo, como se comentó anteriormente, este problema no afecta por igual a todas las bacterias, de modo que la Organización Mundial de la Salud (OMS) elaboró en 2017 una lista de bacterias resistentes con escasas alternativas terapéuticas, que debe servir como guía

para priorizar la investigación, así como el descubrimiento y desarrollo de nuevos antibióticos (WHO, 2017). Esta lista no incluye a *M. tuberculosis*, agente causal de la tuberculosis, que se trata por separado debido a su enorme importancia. De hecho, la tuberculosis es la enfermedad infecciosa que más muertes origina a nivel mundial y su tratamiento es difícil debido a la elevada resistencia de *M. tuberculosis*. Otras bacterias resistentes se distribuyeron en categorías de acuerdo con el grado de prioridad (Tabla 1).

Tabla 1. Lista de bacterias resistentes prioritarias establecida por la OMS para orientar la investigación, así como el descubrimiento y desarrollo de nuevos antibióticos.

BACTERIA	RESISTENCIA
Prioridad 1: CRÍTICA	
<i>Acinetobacter baumannii</i>	Carbapenemas
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Carbapenemas
<i>Enterobacterales</i>	Carbapenemas Cefalosporinas de 3ª generación
Prioridad 2: ALTA	
<i>Enterococcus faecium</i>	Vancomicina
<i>Staphylococcus aureus</i>	Meticilina Vancomicina (R o I)
<i>Helicobacter pylori</i>	Claritomicina
<i>Campylobacter</i>	Fluoroquinolonas
<i>Salmonella</i>	Fluoroquinolonas
<i>Neisseria gonorrhoeae</i>	Cefalosporinas de 3ª generación Fluoroquinolonas
Prioridad 3: MEDIA	
<i>Streptococcus pneumoniae</i>	Penicilina
<i>Haemophilus influenzae</i>	Ampicilina
<i>Shigella spp</i>	Fluoroquinolonas

Dentro de las bacterias del orden *Enterobacterales* se incluyen *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli*, *Enterobacter spp.*, *Serratia spp.*, *Proteus spp.*, *Providencia spp* y *Morganella spp.* (basado en https://www.who.int/medicines/publications/WHO-PPL-Short_Summary_25Feb-ET_NM_WHO.pdf).

En la misma línea, la Sociedad de Enfermedades Infecciosas de América (IDSA) identificó seis especies de bacterias patógenas particularmente peligrosas, debido a su virulencia y resistencia a múltiples antibióticos. Estas bacterias, que se reúnen bajo el acrónimo ESKAPE en base a sus iniciales (Figura 22) (Rice, 2008), se han adaptado al ambiente hospitalario y constituyen hoy por hoy los patógenos más problemáticos en las infecciones asociadas con la asistencia sanitaria.

VII. LA SITUACIÓN ACTUAL Y LAS PERSPECTIVAS FUTURAS

Hoy en día, los antibióticos siguen siendo uno de los recursos más eficaces a la hora de combatir las enfermedades infecciosas. Sin embargo, como predijo Fleming, su uso y abuso ha provocado la selección de bacterias resistentes, poniendo en peligro su eficacia. De acuerdo con estimaciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), el 35% de las infecciones humanas en países de renta alta son causadas por bacterias resistentes a los

antibióticos, pudiendo alcanzar entre el 80 y el 90% en países de renta media o baja (OECD, 2018). Así, aunque la verdadera magnitud del problema no se conoce con exactitud, se calcula que las bacterias resistentes son responsables de unas 700.000 muertes al año en el mundo. Además del coste en vidas humanas, el impacto económico de la resistencia a antibióticos es enorme, con estimaciones de más de 3.500 millones de dólares al año a nivel global (OECD, 2018).

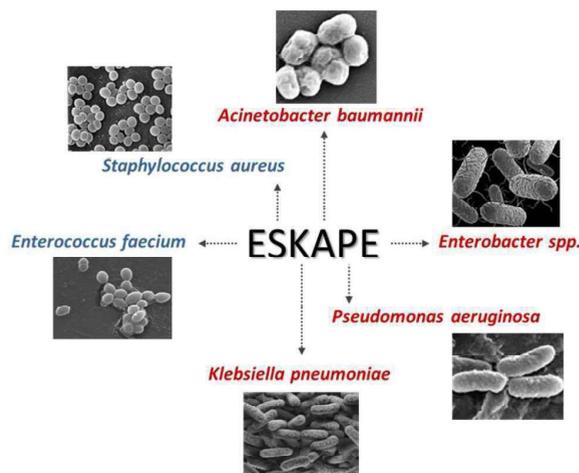


Figura 22. Bacterias ESKAPE seleccionadas en base a su peligrosidad y resistencia a antibióticos. Las Gram positivas se indican en azul y las Gram negativas en rojo (elaboración propia).

En cuanto a Europa, se calcula que alrededor de 33.000 personas mueren cada año debido a infecciones causadas en hospitales por bacterias resistentes, de las cuales en torno a 4.000 ocurren en España. Además, el tratamiento de estas infecciones representa un coste añadido de 1.500 millones de euros anuales a nivel de la Unión Europea (UE), que extrapolando a nivel nacional la cifra alcanzaría los 150 millones (Cassini *et al.*, 2019).

Agravando el problema, como ya se mencionó anteriormente, la crisis de la resistencia a los antibióticos ha ido acompañada de un descenso considerable en el descubrimiento de nuevos compuestos. A lo largo de los años, las grandes empresas farmacéuticas han ido suprimiendo los programas de investigación y desarrollo de nuevos antibióticos. Uno de los principales motivos es que la inversión que necesitan afrontar para desarrollar un nuevo antibiótico no resulta rentable si se compara con los medicamentos utilizados en el caso de enfermedades crónicas. Por otro lado, la situación se agrava con el problema de la resistencia, ya que los antibióticos que dejan de ser eficaces pierden su valor económico.

En lo que se refiere al futuro, si no se toman medidas urgentes que reviertan la tendencia actual, se calcula que en los próximos 30 años 2,4 millones de personas podrían morir a causa de infecciones por bacterias resistentes, solamente en países de Europa, Norte América y Australia, donde las estimaciones son más precisas (OECD, 2018). En cuanto a Europa, en el año 2050 el número de muertes atribuibles a las infecciones causadas por las superbacterias alcanzaría las

390.000, de las cuales unas 40.000 tendrían lugar en España. Se estima que para entonces la resistencia a los antibióticos matará a más personas que el cáncer (O'Neill, 2016).

En resumen, la resistencia representa uno de los retos más importantes a los que se enfrenta la medicina del siglo XXI, lo que preocupa enormemente a científicos y autoridades sanitarias. De no adoptarse medidas que consigan revertir la tendencia actual, las enfermedades infecciosas volverán a ser la principal causa de morbilidad y mortalidad para la humanidad. Esto provocará el paso a la ya denominada era post-antibiótica, que no sería más que el regreso a la era pre-antibiótica.

VIII. CAUSAS DE LA RESISTENCIA A LOS ANTIBIÓTICOS

La crisis actual planteada por la resistencia a los antibióticos es consecuencia inevitable de una conjunción de factores relacionados por un lado con las bacterias y por otro con la actuación del hombre (Michael *et al.*, 2014).

VIII.1. FACTORES RELACIONADOS CON LAS BACTERIAS

Los antepasados de las bacterias actuales aparecieron en la Tierra hace 3.500 millones de años, unos 1.000 millones de años después de que se formara el planeta, cuya edad se calcula en 4.600 millones. Llama la atención el periodo de tiempo relativamente corto durante el cual la Tierra estuvo deshabitada, sobre todo teniendo en cuenta las condiciones inhóspitas que imperaban en un principio. A pesar de los sucesivos cataclismos y extinciones que afectaron a formas de vida más evolucionadas, las bacterias han perdurado hasta nuestros días y continuarán haciéndolo sin duda mientras exista el planeta. Esto se debe a su enorme capacidad de adaptación ante situaciones desfavorables.

Debido a su pequeño tamaño, las bacterias son formas de vida sencilla, en comparación con los organismos superiores. Consideradas individualmente, las bacterias tienen una capacidad limitada de respuesta a los cambios ambientales ya que sus reducidos genomas carecen del enorme repertorio de genes accesorios cuyas funciones serían necesarias para responder a los retos que éstos plantean. Sin embargo, a nivel de población y comunidad, estos microorganismos destacan por su sorprendente capacidad de adaptación. Dicha capacidad descansa en el gran número de descendientes que se originan a consecuencia de la elevada tasa de reproducción. Por ello, aunque la posibilidad de que se produzca una mutación al azar en el genoma de una bacteria individual es muy baja, el elevado número de individuos asegura la presencia de múltiples mutaciones, neutras, perjudiciales o beneficiosas, a nivel poblacional. La alta tasa de reproducción garantiza, además, que los cambios favorables seleccionados lleguen a ser prevalentes en las comunidades bacterianas, que se encuentran en continua evolución (Michael *et al.*, 2014).

Junto con la mutación, una segunda fuente de variabilidad bacteriana reside en el enorme reservorio de genes adaptativos, que pueden ser movilizados entre los miembros de una misma especie o de diferentes especies (Gogarten *et al.*, 2002; Michael *et al.*, 2014). Estos genes, moneda de cambio del "capitalismo genético" mencionado anteriormente, están disponibles para las distintas comunidades, gracias a los

procesos de transferencia genética horizontal. Las funciones de sus productos pueden aportar soluciones prácticamente a cualquier reto al que se enfrenten las bacterias, incluidos los antibióticos (Baharoglu *et al.*, 2013).

VIII.2. FACTORES RELACIONADOS CON EL COMPORTAMIENTO HUMANO

La información disponible sobre las bacterias podría haber ayudado a limitar el impacto de la resistencia a los antibióticos. Sin embargo, el error cometido al infravalorarlas se alió a otros muchos factores hasta desembocar en la crisis actual (Michael *et al.*, 2014; Ventola, 2015).

VIII.2.1. Sobreutilización y Uso Indebido de los Antibióticos

Como se comentó anteriormente, ante el tratamiento antibiótico, solo las bacterias resistentes conseguirán sobrevivir y reproducirse, desplazando a las sensibles. De acuerdo con ello, la resistencia es una consecuencia inevitable del uso de los antibióticos en cualquier proporción y contexto. Sin embargo, cuanto más indiscriminado y persistente sea el uso mayor será la presión selectiva y en consecuencia la aparición de bacterias resistentes. Así, un importante factor a tener en cuenta es la **sobreutilización** de los antibióticos, tanto en medicina humana como en ganadería, acuicultura y agricultura. De hecho, estudios epidemiológicos han demostrado una relación directa entre el consumo de los antibióticos y la aparición y dispersión de bacterias resistentes.

VIII.2.1.1. Medicina Humana

Entre las prácticas que han contribuido a la sobreutilización de los antibióticos en medicina humana se incluye la prescripción empírica de antibióticos previa al diagnóstico correcto de la enfermedad, la identificación del agente causal y especialmente la determinación de su susceptibilidad a los antimicrobianos. Obviamente, un paciente con una infección grave que ponga en riesgo su vida requiere un tratamiento inmediato. A menudo este consiste en la utilización de antibióticos de amplio espectro o en la administración simultánea de más de un antibiótico, con la esperanza de que al menos uno de ellos controle al patógeno aún no identificado. Estos tratamientos se aplican normalmente, de manera controlada, a pacientes ingresados en hospitales, por lo que su impacto en la selección de resistencias es limitado. Mayor dimensión alcanza el uso empírico de antibióticos en medicina general, recetándolos a pacientes con infecciones agudas, no en base al diagnóstico sino a la experiencia del médico y la información disponible sobre la epidemiología local. Además, el uso de antibióticos administrados en la comunidad y también en hospitales tiene como efecto secundario seleccionar y mantener bacterias no patógenas con genes de resistencia, pertenecientes a nuestra microbiota normal o presentes en el ambiente. Estas, a su vez, se transforman en un importante reservorio de genes de resistencia para bacterias patógenas (Michael *et al.*, 2014; Prescott, 2014).

Junto con la sobreutilización, el **uso inapropiado de los antibióticos** contribuye también a la resistencia. Como

ejemplos destacan la prescripción innecesaria de antibióticos para tratar infecciones víricas, frente a las cuales no tienen ningún efecto, o el uso inadecuado por parte del paciente, al reducir la dosis o la duración del tratamiento. Esto permite que algunas bacterias sobrevivan y puedan desarrollar resistencia. En este contexto, es especialmente preocupante la automedicación, que se aplica en ausencia de un diagnóstico correcto, no se adhiere a la elección del antibiótico, dosificación y tiempo de administración adecuados, ni conlleva el seguimiento de la eficacia del tratamiento. La automedicación puede ocurrir en países donde la venta de antibióticos no se encuentra regulada. Sin embargo, en los tiempos de Internet, la compra *on line* permite el libre acceso a los antibióticos de manera ilegal, incluso en países donde se requiere receta médica para adquirirlos en farmacias.

VIII.2.1.2. Veterinaria, Producción Animal y Agricultura

La utilización de antibióticos en veterinaria, producción animal y agricultura está también contribuyendo a la selección de bacterias resistentes. Los antibióticos no solo se utilizan en veterinaria con fines curativos, para el tratamiento de las enfermedades que padecen los animales, sino también como metafilácticos y profilácticos (Aarestrup, 2005). La aplicación metafiláctica consiste en el tratamiento de animales sanos que pertenezcan al mismo grupo que otros clínicamente enfermos, para frenar así la dispersión de la enfermedad entre los que conviven en una misma explotación. En el caso de la profilaxis, el tratamiento se administra a animales sanos, con objeto de prevenir el desarrollo de enfermedades infecciosas en periodos de vulnerabilidad y estrés.

Tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo, los antibióticos se han utilizado o están aún siendo utilizados como promotores del crecimiento animal. Esta práctica tiene como objetivo aumentar la productividad, añadiéndolos rutinariamente como suplemento en agua y alimentos (Aarestrup, 2005). Los antibióticos utilizados como promotores del crecimiento tienen la capacidad de seleccionar bacterias resistentes en el animal, que podrán ser transferidas a humanos a través de la cadena alimentaria. De la misma manera, los antibióticos presentes en la carne, leche y otros alimentos de origen animal podrán seleccionar bacterias resistentes en el propio consumidor, pertenecientes por ejemplo a su microbiota normal. Sin embargo, más del 90% de los antibióticos que se dan a los animales son excretados en la orina o las heces y dispersados ampliamente, a través del estiércol, aguas superficiales y aguas profundas. Todo ello contribuye a la selección de bacterias resistentes, al igual que el uso más amplio y menos dirigido de los antibióticos en acuicultura y agricultura, alterando la ecología ambiental al incrementar el número de bacterias resistentes en relación a las susceptibles (Ventola, 2015). Afortunadamente, la utilización de antibióticos como promotores del crecimiento en producción animal fue prohibida en la UE a partir de 2006 (European Parliament & Council of the European Union, 2003), aunque esta práctica aún sigue vigente en muchos otros países.

VIII.2.1.3. Población y Globalización

Finalmente, otro factor a tener en cuenta es el aumento del número de habitantes a nivel mundial y el modo de vida actual. La población humana ha pasado de los casi 1.000 millones de habitantes que había a principios del siglo XIX a los 7.800 millones alcanzados en 2021. Este crecimiento ha ido acompañado de un importante proceso de urbanización, de modo que hacia el año 2007 más de la mitad de la población humana se había concentrado en las ciudades (Michael *et al.*, 2014). El elevado número de personas, viviendo en estrecha proximidad, provee la oportunidad para la rápida proliferación de las enfermedades infecciosas, como ya había ocurrido en el Neolítico, salvando las distancias.

Al riesgo que supone el aumento en el número de habitantes y la concentración de la población, es necesario añadir la globalización. Los viajes nacionales e internacionales, además de transportar a las personas a cualquier punto del planeta, transportan también a sus microbios. Así, toda la población mundial puede quedar expuesta a patógenos existentes y emergentes, para los cuales la humanidad es una diana asequible en toda la superficie del planeta. De la misma manera, la globalización del comercio, tanto de animales como de alimentos, contribuye de manera muy significativa a la dispersión de los agentes patógenos en general y de las bacterias resistentes en particular.

IX. PREVENCIÓN Y CONTROL

Cabe destacar que la amenaza global de la resistencia a los antibióticos guarda importantes analogías con la amenaza global del cambio climático, debido a la acumulación de dióxido de carbono y gases invernadero. Como la resistencia a antibióticos, el cambio climático deriva de múltiples causas con numerosos contribuyentes; está aumentando a un ritmo considerable, muestra evidencias de ser auto-sostenible y puede llegar a tener consecuencias catastróficas. La humanidad posee los medios necesarios para combatir ambas amenazas, pero la solución a problemas tan complejos requiere la aplicación conjunta de múltiples intervenciones, ninguna de las cuales por sí sola, tendría un impacto significativo (Prescot, 2014).

IX.1. PLAN DE ACCIÓN MUNDIAL SOBRE LA RESISTENCIA A LOS ANTIMICROBIANOS

En el caso de la resistencia a antibióticos, la Asamblea Mundial de la Salud, órgano decisorio supremo de la OMS, en su reunión de mayo de 2015 adoptó el “**Plan de acción mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos**” (OMS, 2016). Este Plan, que incluyen no solo a los antibióticos sino también a los antivirales, los antifúngicos y los antiprotzoarios, adopta el concepto “**Una Salud**” (One Health en inglés). Esta se define como los esfuerzos de colaboración de múltiples disciplinas y estamentos que trabajan a nivel local, nacional y mundial para lograr la salud óptima de las personas, los animales y el medio ambiente (Figura 23). En concreto se destaca la necesidad de implicar a numerosos sectores (médico, veterinario, agrícola, farmacéutico, financiero y medio ambiental) así como a los agentes internacionales y a los consumidores bien informados.

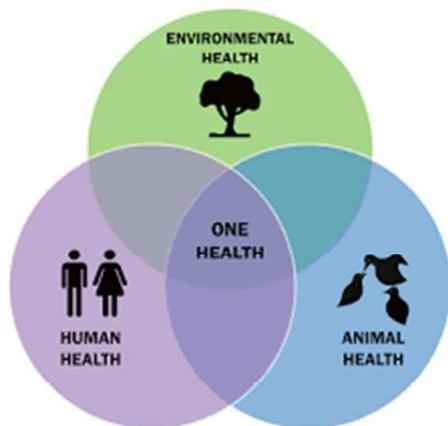


Figura 23. El concepto “Una Salud” reconoce la conexión e interdependencia existente entre salud humana, animal y del medio ambiente (tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Una_Salud).

El **objetivo general** del Plan es velar para que se mantenga la capacidad de tratar y prevenir las enfermedades infecciosas con medicamentos que sean eficaces y seguros, se utilicen de forma responsable y sean asequibles a todas las personas que los necesiten. Para conseguir el objetivo general, se han establecido cinco **objetivos estratégicos**:

1. **Mejorar la concienciación y la comprensión con respecto a la resistencia a los antimicrobianos a través de una comunicación, educación y formación efectivas.** Se trata de aumentar la concienciación sobre el problema y fomentar un cambio de comportamiento no solo en el personal implicado en salud humana, animal y prácticas agrícolas, sino también en los propios consumidores. Se propone, además, introducir la resistencia a los antimicrobianos en los planes escolares, para fomentar la comprensión y concienciación desde las etapas tempranas del proceso educativo. Dentro de esta estrategia, entre otras actuaciones se instauró la “Semana mundial de concienciación de los antimicrobianos”.
2. **Reforzar los conocimientos y la base científica a través de la vigilancia y la investigación.** Al idear el Plan, se detectaron una serie de carencias relativas a los siguientes aspectos, que será necesario subsanar:
 - i) Información sobre la incidencia, la prevalencia y las pautas geográficas de la resistencia, así como sobre los patógenos resistentes. Los datos servirán como guía para orientar el tratamiento de los pacientes, adoptar medidas a nivel local, regional y nacional y supervisar la eficacia de las intervenciones.
 - ii) Conocimientos sobre la aparición y propagación de la resistencia entre seres humanos, animales, alimentos y medio ambiente.
 - iii) Capacidad de caracterizar con rapidez las resistencias de nueva aparición y de comprender los mecanismos subyacentes.
 - iv) Estudios clínicos sobre los tratamientos y la prevención de las enfermedades infecciosas.

- iv) Investigación básica y traslación de los resultados que sirvan de apoyo para elaborar nuevos tratamientos, nuevos métodos de diagnóstico y nuevas vacunas. Además, investigación sobre alternativas a los usos no terapéuticos de los antibióticos en ganadería, agricultura y acuicultura.
- v) Investigación económica para evaluar el costo de la resistencia y los costos/beneficios del Plan de Acción.

3. **Reducir la incidencia de infecciones con medidas eficaces de saneamiento, higiene y prevención.** Entre estas últimas cabe destacar la enorme importancia de las vacunas, cuya seguridad y eficacia ha sido sobradamente demostrada desde su descubrimiento por Jenner a finales del siglo XVIII hasta el momento actual, dominado por la pandemia del COVID-19. Las vacunas, cuyo objetivo es ayudar a nuestras defensas, constituyen una herramienta esencial para combatir la resistencia a los antibióticos, limitando su utilización. Las ya existentes pueden prevenir enfermedades infecciosas cuyo tratamiento requeriría el uso de dichos compuestos así como las infecciones víricas que son tratadas a menudo con antibióticos de manera incorrecta. Por otro lado, el desarrollo de vacunas nuevas o mejoradas podrán llegar a prevenir infecciones por bacterias resistentes, difíciles de tratar o para las cuales no exista tratamiento en la actualidad.

Otras muchas medidas, entre las que se incluyen el lavado de manos e higiene general, ventilación, depuración del agua de consumo, el saneamiento de aguas residuales y las relativas a la higiene y seguridad alimentaria, resultan también imprescindibles para la prevención de las enfermedades infecciosas.

4. **Utilizar de forma óptima los medicamentos antimicrobianos en la salud humana y animal.** A pesar de las medidas adoptadas por algunos países, incluidos los pertenecientes a la Unión Europea, el uso de antibióticos en seres humanos, animales domésticos, acuicultura y la agricultura sigue en aumento en todo el mundo.

Con el fin de apoyar a los países en la consecución de este objetivo, un comité de expertos de la OMS elaboró una lista de antimicrobianos distribuyéndolos en categorías (Figura 24), establecidas en base a su importancia en medicina humana (WHO, 2018).



Figura 24. Clasificación de los antibióticos en distintas categorías de acuerdo con su importancia en medicina humana (basado en <https://www.who.int/foodsafety/publications/WHO-CIA-list-6flyer-ES.pdf>).

El documento va dirigido a las autoridades en salud pública y salud animal, a personal médico y veterinario, así como a cualquier otra persona o entidad implicada en la gestión de los antimicrobianos. El objetivo es asegurar que todos los antimicrobianos, especialmente los de importancia crítica en salud humana, se utilizan de manera prudente no solo en medicina humana sino también en veterinaria. Posteriormente, la OMS ofertó una nueva herramienta para facilitar la selección, por parte del personal sanitario, del antibiótico correcto en el momento adecuado (<https://aware.essentialmeds.org/list>). Para ello se elaboró un listado de 180 antibióticos que se distribuyeron en tres grupos, reunidos bajo el acrónimo **AWaRe**, del inglés **Access**, **Watch** y **Reserve**, lo que significa de acceso, bajo vigilancia y de reserva en español (Tabla 2). Los antibióticos de acceso deben estar disponibles en cualquier momento para cualquier sistema de salud, a un precio asequible; los antibióticos bajo vigilancia deben usarse con moderación; mientras que los antibióticos de reserva son el último recurso para el tratamiento de enfermedades infecciosas causadas por bacterias multi-resistentes, cuando no existe otra alternativa efectiva o segura.

La meta de esta nueva herramienta es conseguir que al menos el 60% de los antibióticos consumidos a nivel mundial pertenezcan al grupo de acceso. Estos antibióticos son de espectro reducido (o sea, actúan contra bacterias específicas), lo que disminuye el riesgo de aparición de resistencias. Además, su precio es relativamente bajo, al estar disponibles en formulaciones genéricas. De manera inversa, la propuesta busca reducir el uso de los antibióticos bajo vigilancia y de reserva para preservar su eficacia.

Tabla 2. Clasificación de los antibióticos en los grupos AWARe llevada a cabo por la OMS.

DE ACCESO	48 antibióticos Activos frente a numerosos patógenos Opción preferente frente a las 25 infecciones más comunes Deben estar disponibles en todo momento, a un precio asequible (formulaciones genéricas) y con calidad asegurada Bajo riesgo de selección de bacterias resistentes
BAJO VIGILANCIA	110 antibióticos Deben usarse con moderación, solo en circunstancias específicas y limitadas Mayoría de los categorizados como de importancia crítica y máxima prioridad en medicina humana y veterinaria Mayor riesgo de selección de bacterias resistencia
DE RESERVA	22 antibióticos Deben usarse solo como opción de último recurso para el tratamiento de infecciones causadas por bacterias multiresistentes, cuando no existe alternativa Deben usarse solo para pacientes concretos en entornos concretos

(Elaboración propia, basada en <https://adoptaware.org/>).

5. Preparar argumentos económicos a favor de una inversión sostenible que tenga en cuenta las necesidades de todos los países y aumentar la inversión en nuevos medicamentos, medios de diagnóstico, vacunas y otras intervenciones. De hecho, el Plan de acción mundial de la

OMS no solo reconoce y aborda la variabilidad de los recursos de que disponen las diferentes naciones para luchar contra la resistencia a los antimicrobianos, sino también los factores económicos que desalientan el desarrollo de productos de recambio por parte de la industria farmacéutica. En este contexto, la OMS publicó en el año 2020 un informe sobre los compuestos antibacterianos, tradicionales y no tradicionales (como bacteriófagos o enzimas fágicos, inhibidores de factores de virulencia, compuestos inmunomoduladores, agentes moduladores de la microbiota, etc.) que se encuentran en las fases preclínica y clínica de desarrollo (WHO, 2021). El informe evalúa también su validez para el tratamiento de las infecciones causadas por las bacterias prioritarias de la OMS (Tabla 1), además de *M. tuberculosis* y *Clostridioides difficile*. Esta última forma parte de la microbiota de nuestro intestino donde se localiza sin causar enfermedad. La toma de antibióticos mata o inhibe el crecimiento de numerosas bacterias de la microbiota. Sin embargo, *C. difficile*, dada su elevada resistencia, puede multiplicarse activamente ocasionando enfermedad asociada a la producción de toxinas. Cabe destacar que dos de las últimas familias de antibióticos introducidas en clínica, las diarilquinolinas y las lipiarrmicinas (Figura 15), son activas frente a *M. tuberculosis* y *C. difficile*, respectivamente.

A la hora de elaborar el informe 43 compuestos estaban en fase clínica, 26 activos frente a las bacterias prioritarias de la OMS, 12 frente a *M. tuberculosis* y cinco frente a *C. difficile*. Aunque algunos de ellos ya han sido aprobados para su utilización en medicina, y muchos otros se encontraban en fase preclínica, la conclusión alcanzada es que resultan insuficientes para combatir el problema que plantea la resistencia. Además, el desarrollo de nuevos agentes antibacterianos se encuentra actualmente en manos de medianas y pequeñas empresas, que normalmente se enfrentan a graves problemas de financiación, particularmente en las últimas etapas del desarrollo. Un inconveniente adicional al que deben enfrentarse es que la mayoría de los nuevos antibióticos pertenecen al grupo de reserva, hecho que limitará las ventas, en caso de ser aprobados.

Nuevamente, será necesaria una actuación coordinada a nivel global para ofertar incentivos económicos a las empresas, que aseguren el desarrollo de nuevos productos innovadores con claros beneficios para la práctica clínica. Como primer paso, la OMS en colaboración con el Banco Europeo de Inversiones y el “Welcome Trust” (organización benéfica de investigación biomédica con sede en Londres), puso en marcha la denominada “AMR Action Fund” (Fondo de Acción frente a la resistencia a los antibióticos). Mediante la incorporación de nuevos accionistas, la actuación prevé una inversión de 1.000 millones de dólares para acelerar la investigación y desarrollo de nuevos compuestos antibacterianos. El objetivo final es poner en el mercado entre dos y cuatro nuevos antibióticos durante la presente década. Poniendo el foco tanto en los patógenos prioritarios como en los tratamientos innovativos, dichos compuestos deberían

cumplir una serie de criterios, como son ausencia de resistencia cruzada con otros agentes antibacterianos, actuación sobre nuevas dianas, presentar nuevos mecanismos de acción y pertenecer a nuevas clases o familias.

IX.2. PLAN NACIONAL FRENTE A LA RESISTENCIA A ANTIBIÓTICOS (PRAN)

De acuerdo con la estrategia global propiciada por la OMS, combatir la resistencia a los antibióticos es también una prioridad de la UE. En este contexto, España al igual que otros Estados Miembro, ha puesto en marcha en 2014 el **Plan Nacional frente a la Resistencia a Antibióticos** (PRAN) (Figura 25), que establece seis líneas estratégicas o de acción (<https://www.resistenciaantibioticos.es/es/publicaciones/plan-nacional-frente-la-resistencia-los-antibioticos-pran-2019-2021>):

1. **Vigilancia** del consumo de antibióticos y de las bacterias resistentes, no solo en hospitales y centros de salud sino también en las explotaciones ganaderas.
2. **Control**, mediante la promoción de programas de uso prudente de los antibióticos (PROA) y creación de guías de prescripción.
3. **Prevención** y diagnóstico rápido de las enfermedades infecciosas.
4. **Investigación**, para mejorar el conocimiento de las causas y las consecuencias de la aparición y diseminación de la resistencia a los antibióticos y para impulsar el desarrollo de nuevos antibióticos y alternativas a ellos en el tratamiento de las enfermedades infecciosas.
5. **Formación** continuada para todos los profesionales de la salud en todas las etapas de su carrera.
6. **Comunicación** que permita sensibilizar al consumidor sobre el problema de la resistencia a los antibióticos y la necesidad del uso correcto de los mismos. Se llevan a cabo campañas de comunicación integral, dirigidas tanto al público en general como a sectores específicos: niños, jóvenes, ancianos, dueños de mascotas, productores del sector primario, etc.



Plan Nacional Resistencia Antibióticos

Figura 25. Logotipo del Plan Nacional frente a la Resistencia a los Antibióticos (tomado de <https://www.msbs.gob.es/campanas/campanas16/AntibioticosUsoAdecuado.htm>)

Dentro de la segunda línea estratégica, una de las acciones prioritarias del PRAN es la implantación en el ámbito de la medicina humana de “**Programas de optimización del uso de los antimicrobianos**” (PROA), que se están llevando a cabo tanto en hospitales como en atención primaria. Siguiendo las directrices de la OMS, los PROA tienen como misión

promover el uso prudente de los antibióticos, mejorar los resultados de los pacientes, reducir la resistencia a los antimicrobianos, las infecciones asociadas a la asistencia sanitaria y los gastos sanitarios. Hoy en día, los PROA constituyen uno de los tres pilares en los que se apoya un método integrado para fortalecer los sistemas de salud. Los otros dos son la prevención y control de infecciones (PCI) y la seguridad de los medicamentos y de los pacientes. Para conseguir sus objetivos, los PROA utilizan como guía la lista AWaRe de la OMS y concentran sus mayores esfuerzos en los antibióticos de los grupos bajo vigilancia y de reserva.

Como ejemplo del éxito de uno de estos programas en nuestra comunidad autónoma, cabe destacar el instaurado en 2019 en el Hospital Universitario Central de Asturias (HUCA). Desde la puesta en marcha del PROA, un equipo multidisciplinar de microbiólogos, farmacéuticos, internistas, intensivistas, etc. tiene reuniones diarias en las que se revisan las pautas antibióticas de los pacientes ingresados en el hospital, con especial énfasis en aquellos críticos o de riesgo (oncohematológicos, trasplantados, etc...) y/o con tratamientos de amplio espectro o de larga duración. Esto ha redundado en la seguridad de los pacientes, consiguiendo además una reducción significativa del consumo de antibióticos de amplio espectro categorizados como “bajo vigilancia” o “de reserva” (Tabla 2), entre los que se encuentran las fluoroquinolonas, las carbapenemas o la colistina.

A nivel nacional, de acuerdo con estimaciones del PRAN, el consumo total de antibióticos en salud humana se redujo un 7,2% entre los años 2015 y 2018. Este dato confirma una tendencia decreciente, aunque España aún sigue siendo uno de los países de la UE donde el consumo de antibióticos es más elevado.

En el campo de la sanidad animal, también se están realizando importantes esfuerzos para disminuir el consumo de antibióticos. En concreto, se ha mejorado el sistema nacional de recogida de datos de ventas de antibióticos de uso veterinario, se está trabajando en la implantación de un sistema nacional de recogida de datos de prescripción veterinaria de antibióticos y se han puesto en marcha los Programa REDUCE en distintos sectores ganaderos. Estos últimos han permitido disminuir las ventas de antibióticos en un 32,4% entre 2014 y 2017, reducción importante que refleja un cambio de tendencia significativo. En este sentido cabe destacar un acuerdo firmado por el 80% de las empresas del sector porcino para la “Reducción del Uso de Colistina”, que permitió una disminución de más del 97% durante el periodo 2015-2018. Este hecho tiene una gran relevancia ya que la colistina es un antibiótico categorizado por la OMS como de importancia crítica y máxima prioridad. Introducida en medicina humana a raíz de su descubrimiento hace más de 50 años, su uso fue posteriormente descartado debido a su toxicidad a nivel de riñón y sistema nervioso. A pesar de ello, la colistina fue recientemente reintroducida en la práctica clínica como antibiótico de último recurso para el tratamiento de bacterias Gram negativas multi-resistentes que causan infecciones graves en hospitales. Este antibiótico se utilizó en veterinaria durante décadas, para combatir infecciones del ganado porcino y vacuno. Esto ha conducido a la selección de bacterias

resistentes en animales destinados al consumo, desde los cuales pueden transmitirse a seres humanos a través de la cadena alimentaria. Particularmente preocupante es la reciente detección de genes de resistencia plasmídica a colistina, que pueden dispersarse eficazmente entre bacterias mediante transferencia genética horizontal (Liu *et al.*, 2016). Por todo ello, los esfuerzos encaminados a la reducción del consumo de este antibiótico, con el fin de frenar la propagación de la resistencia, son esenciales para preservar su eficacia en medicina humana.

Otra de las actividades del PRAN encaminada a potenciar el uso prudente de los antibióticos consiste en concienciar a la población general, al personal sanitario y a los responsables políticos sobre la amenaza que supone la resistencia. En este contexto se instauró el “**Día Europeo para el Uso Prudente de los Antibióticos**”, que se celebra el 18 de noviembre de cada año en los diferentes Estados Miembro, incluida España (Figura 26). La campaña de 2021, con el lema "Antibióticos: tómatelos en serio", alcanzó una gran cobertura en la prensa, la radio, la televisión, los medios digitales y las redes sociales.



Una iniciativa europea para la salud 

Figura 26. Logotipo del día europeo para el uso prudente de los antibióticos (tomado de <https://www.mscbs.gob.es/campanas/campanas16/AntibioticosUsoAdecuado.htm>)

X. LA MICROBIOLOGÍA AL SERVICIO DE LA SOCIEDAD ASTURIANA

Aunque el panorama actual de la resistencia a antibióticos invita al pesimismo y el futuro de su utilidad puede parecer incierto, existen motivos para el optimismo.

Finalizada hace tiempo la edad de oro de los antibióticos, estamos actualmente inmersos en lo que algunos consideran como la edad de oro de la Microbiología. En el campo de la resistencia, el auge de la Microbiología se apoya en un número asombroso de nuevas tecnologías que permiten la rápida identificación de los agentes patógenos, clones o variantes de alto riesgo y genes de resistencia, la detección de nuevos genes y mecanismos de resistencia y la identificación del “talón de Aquiles” de diferentes patógenos (Prescot, 2014). En todo ello desempeñan un papel fundamental las tecnologías “ómicas”, gracias al desarrollo de nuevos métodos de secuenciación masiva que aportan una ingente cantidad de información, en un tiempo reducido a un costo razonable.

Nuestro grupo de investigación de la Universidad de Oviedo (UO), trabajando en colaboración con distintos

hospitales de la región, principalmente el HUCA, y con el Laboratorio de Salud Pública (LSP), dependiente de la Agencia de Seguridad Alimentaria, Sanidad Ambiental y Consumo del Principado de Asturias, está utilizando técnicas experimentales tradicionales junto con secuenciación genómica para el estudio de bacterias patógenas y el seguimiento de la resistencia a los antibióticos en nuestra región. En colaboración con el HUCA nos centramos en casi todas las bacterias del grupo ESKAPE, en concreto *E. faecium*, *S. aureus*, *K. pneumoniae*, *A. baumannii* y *Enterobacter* spp., estableciendo su incidencia, profundizando en el conocimiento de sus mecanismos de resistencia y ayudando a evaluar la eficacia de las medidas implementadas para su control. En colaboración con el LSP, llevamos varias décadas realizando el seguimiento epidemiológico y estudio detallado de una de las bacterias patógenas más importantes entre las transmitidas por alimentos, *S. enterica* (Figura 27).

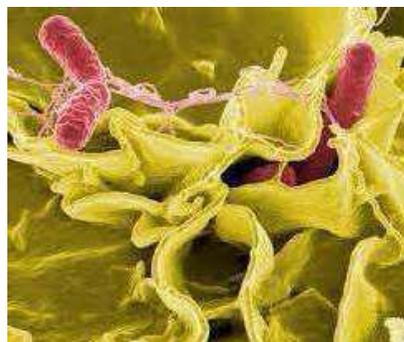


Figura 27. Invasión de una célula epitelial humana por *Salmonella enterica*. Se observan las estructuras a modo de embudo (en amarillo) provocadas por la bacteria (en rosa) al actuar sobre la membrana de la célula eucariota, utilizándolas para penetrar en su interior (tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Salmonella_enterica).

En ambos casos, nuestra aportación se enmarca en el segundo objetivo estratégico del “Plan de acción mundial sobre la resistencia a los antimicrobianos” de la OMS: “Reforzar los conocimientos de la resistencia a antimicrobianos y la base científica a través de la vigilancia y la investigación”. A modo de ejemplo de la investigación que estamos llevando a comentaré tres estudios.

El primero de ellos se centró en *Escherichia coli*, una de las bacterias que causa mayor número de infecciones en los hospitales, desempeñando a la vez un importante papel en la dispersión de genes de resistencia a antibióticos (de Toro *et al.*, 2017). El principal valor de la investigación consistió en la aplicación de herramientas bioinformáticas de última generación para analizar los mecanismos de resistencia a antibióticos en bacterias procedentes de pacientes ingresados en el HUCA o atendidos en Centros de Salud vinculados a dicho hospital. Además, se procedió a la evaluación de estas técnicas en comparación con herramientas clásicas de biología molecular. El estudio, coordinado por la UO, se llevó a cabo en colaboración con investigadores del HUCA, las Universidades de Cantabria y Santiago de Compostela (Campus de Lugo) y la Plataforma Genómica y Bioinformática del Centro de

Investigación Biomédica de la Rioja. Las bacterias analizadas eran resistentes a la mayor parte de los antibióticos disponibles, incluyendo las carbapenemas utilizadas para el tratamiento de infecciones graves causadas por bacterias multi-resistentes en hospitales. Estos antibióticos han sido categorizados por la OMS como de importancia crítica y gran prioridad en medicina humana. Muchos de los genes de resistencia, incluido el que confiere resistencia a carbapenemas, se localizaron en plásmidos que, como se comentó anteriormente, son elementos genéticos móviles que pueden dispersarse entre bacterias contribuyendo muy significativamente al problema de la resistencia (Figura 28).

El trabajo fue distinguido en 2019 con el premio nacional a la mejor publicación científica en el campo de la resistencia a antibióticos. Dicho premio es convocado por la Agencia Española del Medicamento y Productos Sanitarios a través del PRAN. La entrega tuvo lugar el 18 de Noviembre de 2019 en el Ministerio de Sanidad, dentro del programa de actos de la Jornada del Día Europeo para el Uso Prudente de los Antibióticos.

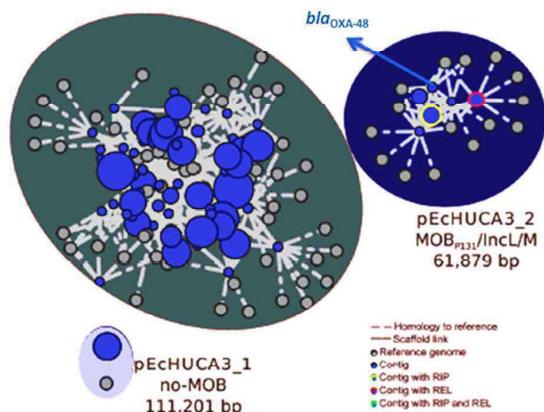


Figura 28. Reconstrucción del genoma de *Escherichia coli* EchUCA3, una bacteria resistente a múltiples antibióticos incluidas las carbapenemas. La reconstrucción, llevada a cabo con PLACNETw (<https://castillo.dicom.unican.es/upload/>), identifica el cromosoma (óvalo mayor) y dos plásmidos. Uno de ellos (pEcHUCA3_2) contiene el gen de resistencia a carbapenemas (*bla*_{OXA-48}) (elaboración propia).

El segundo trabajo a destacar se llevó a cabo con el fin de evaluar la eficacia a largo plazo de una serie de medidas instauradas en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) del HUCA con objeto de reducir la prevalencia de *A. baumannii* resistente a carbapenemas (CRAB) (Rodríguez-Lucas *et al.*, 2021). Esta bacteria se incluye entre las de prioridad 1 (crítica) en la lista de la OMS (Tabla 1) y pertenece al grupo ESKAPE (Figura 22). La UCI del HUCA había sufrido durante más de 18 años una endemia por CRAB (Carbapenem-resistant *Acinetobacter baumannii*), a pesar de aplicar las medidas estándar de control de infección: cultivos periódicos de vigilancia activa, aislamiento de contacto de pacientes infectados/colonizados, programas de descontaminación ambiental, higiene de manos y formación continuada del personal de la unidad (Escudero *et al.*, 2017). La dificultad

para erradicar esta bacteria se debe, entre otros factores a su larga supervivencia en materiales inanimados, muchos de los cuales son además de difícil limpieza (respiradores, tensiómetros, etc.).

La intervención, instaurada en abril de 2016 y mantenida hasta la fecha, se basó principalmente en observar las medidas de control de infección estándar mencionadas anteriormente y bloquear los boxes durante dos días tras las altas de pacientes de la unidad, con el fin de realizar al menos cuatro limpiezas terminales antes del siguiente ingreso, seis si el paciente dado de alta había estado colonizado/infectado por una bacteria multi-resistente y hasta 12 si lo había estado por CRAB. Además, en los boxes cerrados donde era posible llevar a cabo la desinfección con peróxido de hidrogeno, ésta se hizo durante uno o dos días al mes (Escudero *et al.*, 2017).

El trabajo retrospectivo realizado por nuestro grupo demostró la eficacia de dicha intervención (Rodríguez-Lucas *et al.*, 2021). Así, durante el periodo de estudio (2015-2018) se detectó una drástica disminución en el número de CRAB, especialmente marcada en la UCI, principal nicho de esta bacteria, pero también importante en el resto del hospital. De hecho, los aislados de CRAB obtenidos en la UCI desde la intervención fueron recuperados de pacientes infectados o colonizados por CRAB antes de su ingreso en esta unidad. El estudio puso de manifiesto, además, la reducción del consumo de colistina. Como se comentó anteriormente, se trata de un antibiótico de último recurso que se utiliza cuando no existe ninguna otra alternativa para el tratamiento de infecciones graves causadas por bacterias Gram negativas en hospitales. Este trabajo demuestra claramente como el cumplimiento del objetivo estratégico 3 de la OMS “Reducir la incidencia de infecciones con medidas eficaces de saneamiento, higiene y prevención” puede contribuir a la reducción del consumo de antibióticos, fundamental para el control de la resistencia.

El tercer ejemplo seleccionado es un estudio realizado en colaboración con el LSP, cuyo objetivo fue determinar la prevalencia de la resistencia a colistina en *S. enterica* procedente de alimentos del Principado de Asturias (Vázquez *et al.*, 2022). Muchos de los miembros de esta especie se encuentran ampliamente distribuidos en animales domésticos. Por ello, *S. enterica* puede adquirir resistencia a colistina en el reservorio animal y transmitirse a seres humanos a través del consumo de alimentos de origen animal. Una vez en humanos, *S. enterica*, además de causar enfermedad, podrá transferir la resistencia a otras bacterias, incluyendo *E. coli*, *Enterobacter* y *Klebsiella* que, como se comentó anteriormente, causan serios problemas en hospitales, y también a miembros de nuestra propia microbiota.

Los resultados obtenidos en nuestro trabajo pusieron de manifiesto un importante descenso en el número de aislamientos de *S. enterica* encontrados en alimentos de Asturias durante el periodo de estudio (2004-2019). Esta tendencia favorable se debe probablemente a la implementación de la legislación de la EU encaminada al seguimiento y control de *S. enterica* a lo largo de la cadena alimentaria (European Commission, 2005; Hugas and Beloeil, 2014). Por otro lado, aunque la frecuencia de la resistencia a colistina fue baja (2,2%), se constató la presencia en derivados

cárnicos de aislamientos portadores de genes de resistencia a este antibiótico, localizados en plásmidos transferibles. Las iniciativas basadas en el concepto de Una Salud resultan esenciales para evitar la dispersión de estas bacterias patógenas y de los genes de resistencia que contienen. En el Principado de Asturias la reducción del número de aislamientos de *S. enterica* recuperados de alimentos, junto con la baja incidencia de resistencia a colistina, pone de manifiesto la eficacia de dichas medidas adoptadas a nivel regional.

En resumen, el trabajo resultante de la colaboración entre la UO, el HUCA, otros hospitales de Asturias y el LSP, mantenida a lo largo de más de 20 años, ha generado una gran cantidad de información que, puesta al servicio de las autoridades y del personal sanitario, puede redundar en un claro beneficio para la salud de la sociedad asturiana.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Dra. M. Carmen Mendoza (Catedrática de Microbiología jubilada, que inició la línea de investigación de “Epidemiología Molecular y Resistencia” en *Salmonella* y otras enterobacterias, así como en *S. aureus* en la UO), a la Dra. Rosaura Rodicio (Catedrática de Bioquímica y Biología Molecular de la UO), al Dr. Javier Fernández Domínguez (Facultativo Especialista Adjunto del Servicio de Microbiología del HUCA, responsable de la sección de antibiogramas y miembro del equipo PRAN), al Dr. Carlos Rodríguez-Lucas (Facultativo Especialista Adjunto del Servicio de Microbiología del Hospital Universitario de Cabueñes, Gijón) y al Dr. Abelardo Margolles (Profesor de Investigación adscrito al Instituto de Productos Lácteos de Asturias, IPLA-CSIC). Todos ellos han revisado este artículo contribuyendo a mejorarlo, al aportar interesantes comentarios y sugerencias. Estoy además en deuda con todas las personas que a lo largo de los años realizaron conmigo su Tesis Doctoral, tanto en el campo de *Streptomyces*, principal bacteria productora de antibióticos, como en el campo de la resistencia a los mismos. Mis conocimientos sobre el tema se deben en gran medida a su excelente trabajo, dedicación y estímulo.

REFERENCIAS

- Aarestrup, F.M. (2005). Veterinary drug usage and antimicrobial resistance in bacteria of animal origin. *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.* 96: 271-281.
- Aminov, R.I. (2010). A brief history of the antibiotic era: lessons learned and challenges for the future. *Front Microbiol.* 1: 134.
- Baharoglu, Z., Garriss, G. and Mazel, D. (2013). Multiple pathways of genome plasticity leading to development of antibiotic resistance. *Antibiotics* 2: 288-315.
- Baquero, F. (2004). From pieces to patterns: Evolutionary engineering in bacterial pathogens. *Nat. Rev. Microbiol.* 2: 510-518.
- Baquero, F., Blázquez, J. and Martínez, J.L. (2002). Mutación y resistencia a antibióticos. *Investig. Cienc.* 315: 72-78.
- BBC Mundo - Sucedió en el Siglo XX - El siglo de la salud. BBC Mundo.com. Disponible en <https://www.bbc.co.uk/spanish/seriesigloxx02a.shtml>.
- Bondí, J.A. and Dietz, C.C. (1945). Penicillin resistant staphylococci. *Proc. Royal Soc. Exper. Biol. Med.* 60: 55-58.
- Carattoli, A. (2001). Importance of integrons in the diffusion of resistance. *Vet. Res.* 32: 243-59.
- Cassini, A., Högberg, L.D., Plachouras, D., Quattrocchi, A., Hoxha, A., Simonsen, G.S., Colomb-Cotinat, M., Kretzschmar, M.E., Devleeschauwer, B., Cecchini, M., Ouakrim, D.A., Oliveira, T.C., Struelens, M.J., Suetens, C. and Monnet, D.L.; Burden of AMR Collaborative Group. (2019). Attributable deaths and disability-adjusted life-years caused by infections with antibiotic-resistant bacteria in the EU and the European Economic Area in 2015: a population-level modelling analysis. *Lancet. Infect. Dis.* 19: 56-66.
- Chain, E., Florey, H., Gardner, A., Heatley, N., Jennings, M., Orr-Ewing, J. and Sanders, A.G. (1940). Penicillin as a chemotherapeutic agent. *Lancet* 236: 226.228.
- Cox, G. and Wright, G.D. (2013). Intrinsic antibiotic resistance: mechanisms, origins, challenges and solutions. *Int. J. Med. Microbiol.* 303: 287-92.
- Curtis, R. and Jones, J. (2007). Robert Robinson and penicillin: an unnoticed document in the saga of its structure. *J. Pept. Sci.* 13: 769-775.
- D'Costa, V.M., King, C.E., Kalan, L., Morar, M., Sung, W.L.S., Schwarz, C., Froese, D., Zazula, G., Calmels, F., Debruyne, R., Golding, G.B., Poinar, H.N. and Wright, G.D. (2011). Antibiotic resistance is ancient. *Nature* 477: 457-461.
- de Toro, M., Fernández, J., García, V., Mora, A., Blanco, J., de la Cruz, F. and Rodicio, M.R. (2017). Whole genome sequencing, molecular typing and in vivo virulence of OXA-48-producing *Escherichia coli* isolates including ST131 H30-Rx, H22 and H41 subclones. *Sci. Rep.* 7: 12103.
- Domagk, G. (1935). Ein Beitrag zur Chemotherapie der bakteriellen Infektionen. *Dtsch. Med. Wochenschr.* 61: 250.
- Ehrlich, P. and Hata, S. (1910). Die Experimentelle Chemotherapie der Spirillosen. Berlin: Julius Springer.
- European Parliament & Council of the European Union (2003). Regulation (EC) No 1831/2003 of the European Parliament and of the Council of 22 September 2003 on additives for use in animal nutrition. *OJEU* 268: 29-43.
- European Commission (2005). Commission regulation (EC) No 2073/2005 of 15 November 2005 on Microbiological Criteria for Foodstuffs: *OJEU. L* 338 22.12.2005. Luxembourg: European Commission, 1-26.
- Escudero, D., Cofiño, L., Forcelledo, L., Quindós, B., Calleja, C. and Martín, L. (2017). Control of an *Acinetobacter baumannii* multidrug resistance endemic in the ICU. Recalling the obvious. *Med. Intensiva* 41: 497-499.
- Fleming, A. (1929). On antibacterial action of culture of *Penicillium*, with special reference to their use in isolation of *B. influenzae*. *Br. J. Exp. Pathol.* 10: 226-236.
- Gogarten, J.P., Doolittle, W.F. and Lawrence, J.G. (2002). Prokaryote evolution in light of gene transfer. *Mol. Biol. Evol.* 19: 2226-2228.
- Hodgkin, D.C. (1949). X-ray crystallographic investigation of the structure of penicillin. *Adv. Sci.* 6: 85-89.
- Hugas, M. and Beloeil, P. (2014). Controlling *Salmonella* along the food chain in the European Union – progress over the last ten years. *Euro. Surveill.* 19: 20804.
- Hutchings, M.I., Andrew, W., Truman, A.W. and Wilkinson, B. (2019). Antibiotics: past, present and future. *Curr. Opin. Microbiol.* 51: 72-80.
- Kirby, W.M.M. (1944). Extraction of a highly potent penicillin inactivator from penicillin resistant staphylococci. *Science* 99: 452-453.
- Liu, Y.Y., Wang, Y., Walsh, T.R., Yi, L.X., Zhang, R., Spencer, J., Doi, Y., Tian, G., Dong, B., Huang, X., Yu, L.F., Gu, D., Ren, H., Chen, X., Lv, L., He, D., Zhou, H., Liang, Z., Liu, J.H. and Shen, J. (2016). Emergence of plasmid-mediated colistin resistance mechanism MCR-1 in animals and human beings in China: a microbiological and molecular biological study. *Lancet Infect. Dis.* 16: 161-168.
- Lloyd, N.C., Morgan, H.W., Nicholson, B.K. and Ronimus, R.S. (2005). The composition of Ehrlich's Salvarsan: resolution of a century-old debate. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 44: 941-944.
- Martínez N., Mendoza, M.C., Rodríguez, I., Soto, S., Bances, M. and Rodicio, M.R. (2007). Detailed structure of integrons and transposons carried by large conjugative plasmids responsible for multidrug resistance in diverse genomic types of *Salmonella enterica* serovar Brandenburg. *J. Antimicrob. Chemother.* 60: 1227-34.
- Martínez, J.L. and Baquero, F. (2009). Antibiotics and the evolution of antibiotic resistance. In: *ELS*. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester.
- Michael, C.A., Dominey-Howes, D. and Labbate, M. (2014). The antimicrobial resistance crisis: causes, consequences, and management. *Front Public Health.* 2: 145.
- OMS (2016). Plan de acción mundial sobre la Resistencia a los antimicrobianos. Organización Mundial de la Salud. Disponible en <https://apps.who.int/iris/handle/10665/255204>.
- O'Neill, J. (2016). Tackling drug-resistant infections globally: final report and recommendations. Disponible en: https://amr-review.org/sites/default/files/160518_Final%20paper_cover%20cover.pdf.
- OECD (2018). Stemming the superbug tide: Just a few dollars more. OECD Health Policy Studies. Paris: OECD Publishing.

- Oteo, J., Bou, G., Chaves, F. and Oliver, A. (2016). Métodos microbiológicos para la vigilancia del estado de portador de bacterias multirresistentes. *SEIMC* 35: 667-675.
- Otten, H. (1986). Domagk and the development of the sulphonamides. *J. Antimicrob. Chemother.* 17: 689-696.
- Partridge, S.R., Kwong, S.M., Firth, N. and Jensenc, S.O. (2018). Mobile genetic elements associated with antimicrobial resistance. *Clin. Microbiol. Rev.* 31:e00088-17.
- Piret, J. and Bolvin, G. (2021). Pandemics throughout history. *Front. Microbiol.* 11: 631736. doi: 10.3389/fmicb.2020.631736.
- Prescot, J.F. (2014). The resistance tsunami, antimicrobial stewardship, and the golden age of microbiology. *Vet. Microbiol.* 171: 273-278.
- Rammelkamp, C.H. and Maxon, T. (1942). Resistance of *Staphylococcus aureus* to the action of penicillin. *Exp. Biol. Med.* 51: 386-389.
- Rice, L.B. (2008). Federal funding for the study of antimicrobial resistance in nosocomial pathogens: no ESKAPE. *J. Infect. Dis.* 197: 1079-1081.
- Rodicio, M.R., Herrero, A., Rodríguez, I., García, P., Montero, I., Beutlich, J., Rodicio, R., Guerra, B. and Mendoza, M.C. (2011). Acquisition of antimicrobial resistance determinants by virulence plasmids specific for nontyphoid serovars of *Salmonella enterica*. *Rev. Med. Microbiol.* 22: 55-65.
- Rodríguez, I., Martín, M.C., Mendoza, M.C. and Rodicio, M.R. (2006). Class 1 and class 2 integrons in non-prevalent serovars of *Salmonella enterica*: structure and association with transposons and plasmids. *J. Antimicrob. Chemother.* 58: 1124-1132.
- Rodríguez-Lucas, C., Rodicio, M.R., Vázquez, X., Escudero, D., Quindós, B., Alaguero, M. and Fernández, J. (2021). Extensively drug-resistant *Acinetobacter baumannii* carrying *bla_{OXA-23}*-like and *armA* in a hospital after an intervention in the intensive care unit which ended a long-standing endemicity. *Eur. J. Clin. Microbiol. Infect. Dis.* 40: 385-389.
- Tampa, M., Sarbu, I., Matei, C., Benea, V. and Georgescu, S.R. (2014). Brief history of syphilis. *J. Med. Life.* 7:4-10.
- Vázquez, X., García, P., García, V., de Toro, M., Ladero, V., Heinisch, J.J., Fernández, J., Rodicio, R. and Rodicio, M.R. (2021). Genomic analysis and phylogenetic position of the complex IncC plasmid found in the Spanish monophasic clone of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium. *Sci. Rep.* 11: 11482.
- Vázquez, X., García, V., Fernández, J., Bances, M., de Toro, M., Ladero, V., Rodicio, R. and Rodicio, M.R. (2022). Colistin resistance in monophasic isolates of *Salmonella enterica* ST34 collected from meat-derived products in Spain, with or without CMY-2 co-production. *Front. Microbiol.* Pub Date: 2022-01-06.
- Ventola, C.L. (2015). The antibiotic resistance crisis: part 1: causes and threats. *P. & T.* 40: 277-283.
- Volcy, C. (2007). Historia de los conceptos de causa y enfermedad: paralelismo entre la Medicina y la Fitopatología. *Iatreia* 20: 407-421.
- Waksman, S.A. and Woodruff, H.B. (1940). The soil as a source of microorganisms antagonistic to disease-producing bacteria. *J. Bacteriol.* 40: 581-600.
- WHO (2017). Prioritization of pathogens to guide discovery, research and including tuberculosis. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/311820>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- WHO (2018). Critically important antimicrobials for human medicine. 6th revision. Geneva: World Health Organization; 2019. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- WHO (2020). Antibacterial agents in clinical and preclinical development: an overview and analysis. Geneva: World Health Organization; 2021. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Wolfe, N.D., Dunavan, C.P. and Diamond, J. (2007). Origins of major human infectious diseases. *Nature.* 447: 279-83.
- Wright, G.D. (2010a). Q&A: Antibiotic resistance: where does it come from and what can we do about it? *BMC Biol.* 8: 123.
- Wright, G.D. (2010b). The antibiotic resistome. *Expert Opin. Drug. Discov.* 5: 779-788.

Energía Eléctrica: por qué, desde dónde y para qué

Francisco Javier Sebastián Zúñiga
Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería

Resumen- La energía eléctrica se ha convertido en la forma de energía que resulta imprescindible en la vida de los seres humanos, con una expansión creciente en ámbitos donde, hasta hace poco tiempo, otras formas de energía se veían como imprescindibles. Esta tendencia inexorable hacia "lo más eléctrico" se ve ahora incentivada por la necesidad de prescindir de la energía procedente de la combustión de materiales fósiles. El triunfo de la energía eléctrica nos hace preguntarnos acerca de la evolución histórica de los métodos de su obtención, cuáles son las fuentes de energía que pueden transformarse en energía eléctrica, cómo puede almacenarse y cómo se puede cambiar su formato para satisfacer las necesidades de los usuarios.

I. CITIUS, ALTIUS, FORTIUS

Una persona en buena forma física puede desarrollar una potencia de unos 150 vatios cuando practica "deporte salud" sobre una bicicleta estática. Si en esa misma bicicleta se sentara el Miguel Induráin de sus mejores años, el valor medio de esa potencia en una hora superaría los 500 vatios. Una herramienta taladradora de las que utilizamos en el bricolaje casero posee una potencia semejante, pero la lavadora de nuestra casa llega a triplicar esta potencia en algunos momentos de su operación. Si nos referimos a un automóvil de prestaciones medias, la potencia que puede desarrollar llega hasta unos 100 kilovatios (10^5 vatios), mientras que la locomotora que mueve un tren "normal" desarrolla unos 2 Megavatios ($2 \cdot 10^6$ vatios), llegando a 8 Megavatios si el tren es un AVE. Tenemos que dar un nuevo salto en el valor de la potencia si nos referimos a los motores de los grandes aviones, que puede superar los 50 Megavatios ($50 \cdot 10^6$ vatios).

Como nos enseña la física, la potencia es la cantidad de trabajo (o energía) desarrollado por unidad de tiempo. La potencia que el ser humano puede desarrollar con su propio cuerpo resultó ser insuficiente para sus aspiraciones desde tiempos prehistóricos. La domesticación de diversos bóvidos y équidos, con el fin de aprovechar su mayor potencia, data de los albores de la historia humana. Dicha potencia resultó útil para incrementar la capacidad y velocidad del transporte, así como para facilitar las labores de la agricultura. El uso de carros de guerra tirados por caballos se encuentra en los vestigios de las grandes civilizaciones de Mesopotamia y de Egipto. La potencia de los elefantes (paquidermos) frenó el avance de Alejandro Magno en la India y ayudó a Aníbal en su invasión de la Península Itálica.

Además de las capacidades de los grandes mamíferos, también las fuerzas de la naturaleza han sido utilizadas por los seres humanos de todas las civilizaciones para alcanzar las potencias requeridas en algunas de sus actividades. En el transporte marítimo, la potencia desarrollada por la fuerza del viento aliviaba (e incluso sustituía) a la desarrollada por los



Figura 1. Fotografía reciente de las Médulas, en la provincia de León, donde los romanos utilizaban la fuerza del agua para realizar labores de minería del oro.

remeros. Esa misma potencia ayudaba a la distribución del agua por los terrenos de siembra y propiciaba la molienda de los cereales, contribuyendo a la alimentación de la población.

La fuerza del agua también fue usada desde la antigüedad para desarrollar tareas que resultaban inabordables con la rapidez requerida usando exclusivamente la potencia que es capaz de desarrollar el ser humano. Un ejemplo de ello se encuentra en las proximidades de nuestra Asturias, en la comarca leonesa de El Bierzo. En las Médulas (Figura 1) podemos ver cómo los romanos utilizaban la fuerza del agua para arrancar el oro a la tierra. Sin necesidad de cruzar la Cordillera Cantábrica, podemos visitar en el Principado de Asturias molinos, batanes (Figura 2) y ferrerías, tal y como se describe en Morís Menéndez (2001), ingenios mecánicos pensados para aprovechar la potencia que pueden desarrollar los cauces de agua.

Nuestros ancestros localizaban cuatro elementos en la naturaleza: el agua, el fuego, la tierra y el aire. Desde tiempos preindustriales se utilizaba la fuerza del viento y del agua para obtener la potencia requerida por ciertas actividades humanas. Para aprovechar la del fuego, hubo que esperar al siglo XVIII. Fue el escocés James Watt (Figura 3) el que desarrolló la primera máquina de vapor realmente operativa, en la que el salto térmico provocado por la combustión de una sustancia propiciaba el cambio de fase del agua, que pasaba a vapor, provocando una fuerza de expansión, aprovechable mediante un mecanismo de émbolo y manivela, para generar un par de rotación. La potencia asociada a ese par de rotación se aprovechó para sustituir a voluntad la generada por animales, el viento o el agua.



Figura 2. Perspectiva de un batán. Dibujo del Ingeniero Industrial Don Gonzalo Moris Menéndez, catedrático del área de conocimiento Expresión Gráfica en la Ingeniería en la Universidad de Oviedo.

Comenzó así la Revolución Industrial, precursora de todos los meteóricos avances que han tenido lugar en los últimos 250 años. Durante el siglo XIX los barcos de vela fueron desplazados por los barcos de vapor y las recuas de mulas y las diligencias por trenes. Se construyeron fábricas en las que la potencia necesaria se obtenía de máquinas de vapor, que transmitían la potencia a cada puesto de trabajo a través de conjuntos de mecanismos compuestos por ejes, correas de transmisión, engranajes, etc., como se puede apreciar en la fotografía de la Figura 4. En este punto es necesario hacer especial hincapié: la potencia mecánica generada en un lugar muy concreto era difícilmente trasladable a otro, incluso muy cercano.



Figura 3. Retrato de James Watt, realizado por Henry Raeborn.

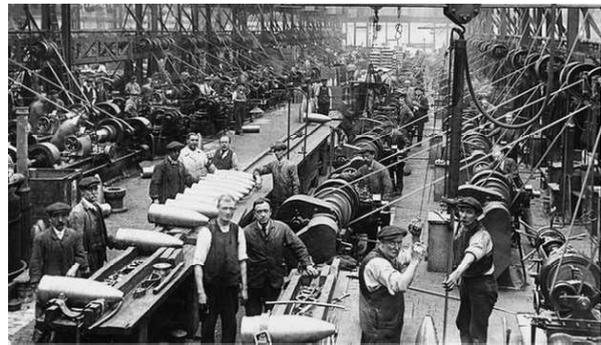


Figura 4. Fotografía tomada en 1916 de una fábrica de proyectiles en Inglaterra. En ella se muestra la manera de distribuir la energía mecánica a cada puesto de trabajo, mediante sistemas de poleas y correas.

La máquina de vapor de James Watt era una máquina de ciclo cerrado y de combustión externa. Esto quiere decir que el fluido expandido por el calentamiento era reutilizado una y otra vez tras enfriarse lo suficiente como para pasar a fase líquida y que no era el propio fluido el encargado de generar el salto térmico que posibilitaba el cambio de fase, sino la combustión de un material externo al circuito de fluido de la máquina. Este material externo, habitualmente madera o carbón, se quemaba en una caldera que provocaba el calentamiento del fluido. Al contrario, los motores de los vehículos que hemos estado utilizando durante el siglo XX han sido (y mayoritariamente aún son) motores de ciclo abierto (el fluido expandido no se reutiliza) y de combustión interna (el fluido que se expande es la propia mezcla de combustible y comburente). Estos motores acaban siendo más simples y eficientes, además de que la densidad de energía de los combustibles usados en ellos es mayor que la de la madera (aproximadamente 5 veces mayor) o el carbón (aproximadamente 2 veces mayor). Además, los motores de combustión interna no dejan residuos sólidos apreciables después de la combustión (al menos aparentemente), mientras que los de combustión externa sí que lo hacían cuando el combustible es una sustancia sólida como el carbón o la madera.

El rendimiento energético en la transformación de la energía procedente de una combustión en energía mecánica choca con el escollo teórico que impone el límite de Carnot. En la práctica, el rendimiento de un motor de combustión interna real está en el entorno del 30%. Esta cifra mejora en el caso de las turbinas de vapor modernas, pero es preciso resaltar que sólo una parte relativamente pequeña de la energía disponible en los combustibles es transformable en energía mecánica, lo que supone un despilfarro constante de la misma que, además, se manifiesta en forma de calor. El funcionamiento constante de motores de combustión (externa o interna) supone una generación, también constante, de lo que en física se llama "cantidad de calor". Esta cantidad de calor debe ser evacuada hacia el exterior del planeta si queremos que la temperatura no suba también constantemente, con el cambio de todos los procesos naturales que ello conllevaría. Desgraciadamente, esa capacidad de evacuar el calor hacia el exterior depende de la

proporción de determinados gases, especialmente del metano y del dióxido de carbono, y de la combustión de sustancias de origen orgánico (madera, carbón, gas natural, derivados del petróleo, etc.) que genera el segundo de ellos. Esto nos introduce en un círculo vicioso que es imprescindible revertir: los seres humanos cada vez tenemos (nos las creamos a nosotros mismos) mayores necesidades energéticas, que generan calor y producen dióxido de carbono, es decir, calor y la sustancia que colabora en dificultar su evacuación. El resultado es la subida media de la temperatura de la Tierra, generando cambios (y catástrofes) que están alterando la vida de todos los seres del planeta, incluidos los humanos.

El salto de temperatura que necesita una máquina térmica (las citadas anteriormente lo son) para transformar la energía térmica en energía mecánica se puede obtener sin necesidad de una combustión. Esto alivia el problema anterior, ya que si no hay combustión no hay generación de dióxido de carbono. Así, se pueden aprovechar gradientes de temperatura o bien de origen natural, consecuencia del afloramiento de materiales procedentes del interior de la tierra, o bien procedentes de la concentración de la radiación solar en determinadas posiciones concretas, o bien obtenidos de la utilización de la fuente de energía origen de casi todas las demás: las reacciones nucleares. No perdamos de vista que el Sol es, principalmente, un gran reactor nuclear y que casi todas las fuentes de energía que hemos citado hasta ahora tienen su origen en la energía que, en forma de radiación solar, llega a la Tierra y provoca los vientos, la evaporación del agua y la existencia de vida presente, y que, en su día, propició la vida de las plantas y de los animales cuyos vestigios fósiles hemos venido quemando masivamente desde los albores de la Revolución Industrial. También existe en la Tierra un conjunto de energías heredadas de su proceso de formación, como es la energía ligada a las altas temperaturas internas de la misma, la energía que es consecuencia de la existencia de un satélite en rotación alrededor de ella, la Luna, (que provoca el desplazamiento de las masas de agua de la Tierra) y la energía derivada de la desintegración de isótopos radioactivos naturales presentes en ella. Salvo estas energías "geoprimitivas", realmente toda la energía de la que podemos disponer acaba siendo energía procedente de la gran reacción termonuclear que es nuestro Sol.

La reacción nuclear del Sol es una reacción de fusión, en la que se obtiene helio y una gran cantidad de energía desde el hidrógeno. Es un tipo de reacción extremadamente energética, que el ser humano lleva decenios queriendo "domesticar", pero en la que en realidad está consiguiendo pocos avances significativos. Lleva mucho tiempo siendo una meta, pero parece que, aunque corremos hacia ella, aún está muy lejana. No parece factible que a corto plazo podamos aprovechar los isótopos del hidrógeno (deuterio y tritio) presentes en el agua del mar para generar reacciones de fusión nuclear controladas que permitan el funcionamiento de máquinas térmicas que, a su vez, generen grandes cantidades de energía mecánica.

Por el contrario, las reacciones de fisión nuclear, en las que elementos compuestos por átomos muy pesados (con muchos

protones y neutrones) se desintegran para dar elementos más ligeros y mucha energía, son perfectamente controlables desde hace más de 65 años. En este caso sí es perfectamente factible que el salto de temperatura provocada por la reacción nuclear acabe generando energía mecánica mediante el uso de un conjunto de máquinas térmicas (intercambiadores de calor, generador de vapor y turbina). El problema aquí son los residuos que se obtienen de la reacción nuclear, cuya manipulación y almacenamiento resulta siempre peligroso y acaba generando gran controversia en la opinión pública.

"Citius, altius, fortius" (más rápido, más alto, más fuerte) no es sólo un lema olímpico, sino también un deseo que forma parte de los anhelos del ser humano. Para ir más rápido, para llegar más alto o para poder aplicar más fuerza hace falta disponer de más potencia que la que desarrollan sus músculos. Durante toda la historia de la humanidad, ésta no ha cesado de idear formas de obtener y manejar fuerzas, energías y potencias mayores que las propias de su naturaleza, utilizando para ello desde la domesticación de grandes animales hasta la fisión de los átomos de uranio enriquecido o de plutonio.

Pero, ¿qué papel juega la electricidad en el panorama de las necesidades energéticas del ser humano? Nótese que deliberadamente no ha aparecido la palabra electricidad hasta este momento en este trabajo de divulgación, siendo la energía eléctrica su eje central. La razón de ello es que para entender las grandes ventajas que la energía eléctrica aporta, es preciso compararla con la energía mecánica, que es la que nos permite ir más rápido, llegar más alto y ser más fuertes. Es evidente que para que un automóvil se mueva y alcance grandes velocidades cargando con varios seres humanos (y algunos de sus enseres), es necesaria energía mecánica. Es evidente que, para desplazar las mercancías por tierra, mar o aire, también hace falta energía mecánica, al igual que para realizar la transformación de muchos materiales o para modificar el terreno construyendo carreteras, puertos, puentes, edificios o embalses. Si somos capaces de obtener energía mecánica desde el aire, el agua, el fuego y la tierra (para completar el ciclo de los cuatro elementos, asignando a la tierra la energía de fisión nuclear), ¿por qué la electricidad es tan importante para el ser humano?

Dos son las grandes ventajas de la energía eléctrica:

1) En primer lugar, es muy fácilmente transportable entre puntos predefinidos. Como se aprecia en la antigua foto de la Figura 4, la energía mecánica es sólo fácilmente transportable entre puntos relativamente cercanos y requiere una instalación voluminosa que además necesita un constante mantenimiento. Esto no ocurre con la energía eléctrica, que llega a los lugares en los que habitamos o trabajamos de forma estable, con gran comodidad y sigilo, sin modificar el aspecto de dichos lugares de forma apreciable.

2) La energía eléctrica admite muchas transformaciones, siendo algunas de ellas altamente eficientes. Así, desde la energía eléctrica obtenemos fácilmente energía mecánica (con motores eléctricos), luz (con bombillas, arcos eléctricos, plasma o determinados semiconductores) y energía térmica (con resistencias). Además, permite la realización de determinadas

transformaciones de los materiales que no se pueden realizar fácilmente sin su uso.

Por otra parte, la energía eléctrica se puede almacenar de una manera relativamente cómoda de varias formas, aunque siempre (de momento) con una densidad de energía (en julios por unidad de volumen o de masa) inferior al caso de las sustancias que acaban generando energía térmica. Dicho de otra manera, el peso o el volumen de las baterías actuales (o de los condensadores actuales) es bastante mayor que el de la gasolina o el gasoil necesarios para desarrollar el mismo trabajo mecánico. En el fondo, el uso que hemos hecho de estos combustibles procedentes del petróleo nos ha "mal acostumbrado" a establecer nuestras actividades alrededor de unas sustancias con una densidad energética que aún no alcanzan los métodos de almacenamiento de la energía eléctrica. ¿Se puede decir que la energía eléctrica es difícilmente almacenable? Personalmente creo que no; lo que pasa es que aún estamos lejos de poder almacenarla de una forma "tan densa" como se almacena la energía química, que dará origen a energía térmica, en los combustibles derivados del petróleo.

El balance de beneficios y limitaciones del uso de la energía eléctrica estaba hasta hace unos 20 o 30 años bastante bien establecido. Sin embargo, los problemas medioambientales ligados a la quema masiva de combustibles fósiles nos están obligando a modificar este equilibrio de una manera acelerada. Años atrás se pensaba que la finitud de los combustibles fósiles acabaría arrinconando su uso, pero realmente los problemas medioambientales están siendo el detonante del cambio. En ámbitos en los que el uso de combustibles fósiles se consideraba imbatible, ya se habla del "más eléctrico", seguramente preludio del "completamente eléctrico"; la aviación puede ser el caso más extremo de ello.

Ya establecidas las ventajas del uso de la energía eléctrica, la siguiente pregunta es de dónde la podemos obtener. Para contestar a esta pregunta vamos a revisar las formas que tenemos para conseguir energía eléctrica partiendo de otras formas de energía más difícilmente transportables, transformables y almacenables. En esta revisión no podemos olvidarnos de relacionar la electricidad con el magnetismo, que es un fenómeno físico ligado intrínsecamente a ella. También es importante añadir la escala temporal a esta revisión, para entenderla mejor.

II. DEL ÁMBAR A LOS PANELES SOLARES

Las primeras referencias a fenómenos eléctricos que nos han llegado datan de la Grecia Clásica, siendo entonces ya conocida la propiedad que posee el ámbar de atraer pequeños objetos tras haber sido frotado con determinados tejidos. De hecho, todos los términos utilizados que hacen referencia a los fenómenos eléctricos provienen del término usado entonces para nombrar a la citada sustancia fósil, que era ἤλεκτρον (élektron). Cuando el ámbar, algunos tipos de vidrios o de plásticos y otras sustancias adquieren esa "extraña" propiedad de atraer a otros objetos decimos que están "electrizadas" y, con mayor precisión, que han creado un "campo eléctrico". Lo que ocurre es que el

frotamiento de las dos sustancias propicia que una de ellas arranque unidades discretas de "carga eléctrica" (electrones) a la otra. A los electrones les hemos asignado "signo negativo" en su carga eléctrica por puro convenio. Por extensión, una sustancia que tiene más electrones que los que tendría en condiciones normales decimos que está cargada negativamente y, por el contrario, si tiene menos electrones que los que tenía antes de ser electrizada decimos que está cargada positivamente.

La capacidad de electrizar por frotamiento puede repetirse sistemáticamente, de tal forma que se acumule gran cantidad de carga eléctrica. Esto se consigue mediante ingeniosos artilugios, algunos de ellos desarrollados en el siglo XVIII, como por ejemplo, la máquina perfeccionada por el inglés Jesse Ramsden. Muy posteriormente (avanzado el siglo XIX) se fueron creando otras, como las "máquinas eléctricas de influencia" de los alemanes August Töpler y Wilhelm Holtz, o la muy conocida desarrollada por el inglés James Wimshurst, que mejoraba las anteriores. Esta máquina, de la que se reproduce una imagen en la Figura 5, es muy conocida y muchos de los lectores la podrán haber visto en museos o en laboratorios de física.

Las máquinas de electricidad por frotamiento (o triboelectricidad) generan tensiones eléctricas altísimas, de varias decenas (casi centenas) de kilovoltios. Alta tensión, sin duda. Este hecho se pone de manifiesto por los largos arcos (chispas) que pueden generar. Sin embargo, ¿se puede aprovechar esa alta tensión para generar altas potencias eléctricas? Parece intuitivo que no va a ser así, por dos razones:

- Estando tan ávidos de energía eléctrica, si este método fuera efectivo generando potencia eléctrica, lo usaríamos, y no es así.
- Parece obvio que si nos "cuesta poco" (empleamos poca energía mecánica) generar estas altas tensiones, estas tensiones no podrán devolvernos mucha energía mecánica. Lo contrario contradeciría todos los principios sólidos de la física.

Para comprender el porqué de esto, hay que introducir el concepto de corriente eléctrica, que es el movimiento de las cargas eléctricas. La intensidad de corriente eléctrica (más comúnmente denominada "corriente eléctrica", sin más) mide el paso de carga eléctrica por unidad de tiempo. La potencia eléctrica es producto de la tensión eléctrica y de la intensidad de

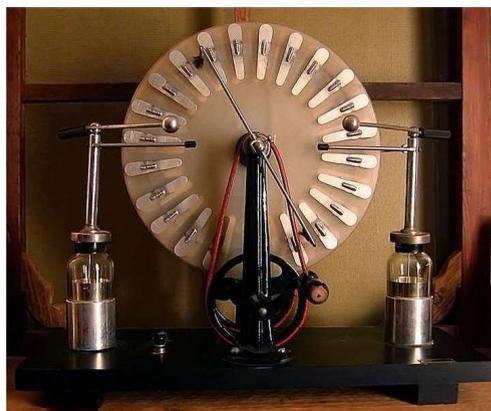


Figura 5. Máquina de Wimshurst.

corriente eléctrica. Si conectamos con algún elemento capaz de permitir el movimiento de los electrones por él (por ejemplo, un metal) dos puntos cargados eléctricamente, se establecerá circulación de corriente eléctrica. Esta circulación de corriente eléctrica, establecida entre dos puntos de diferente tensión eléctrica, sí tiene capacidad de desarrollar potencia, pero ésta desaparece rápidamente dado que el paso de los electrones hace que los potenciales de ambos puntos se igualen.

La circulación de corriente eléctrica desde puntos de diferente tensión obtenida por frotamiento (por ejemplo, desde una máquina de Ramsden) era ya conocida en el siglo XVIII, llegando a formar parte de las atracciones de feria, provocando situaciones cómicas como generar desagradables efectos al tocar a una persona o a un objeto previamente electrizado. En aquellos tiempos, el norteamericano Benjamin Franklin (Figura 6) relacionó la electricidad por frotamiento con los rayos de las tormentas y desarrollo la nomenclatura alrededor de los fenómenos eléctricos que seguimos usando (cargar y descargar, cargas positivas y negativas, etc.). La electricidad por frotamiento era, por tanto, un fenómeno que se daba en la naturaleza, que explicaba un fenómeno al que se le había atribuido orígenes divinos y que podía incluso actuar como entretenimiento. Sin embargo, no era útil para ayudar a incrementar la potencia a desarrollar para provecho de los humanos. La razón de ello es muy fácil de comprender: la comunicación mediante un cuerpo capaz de conducir corriente eléctrica (un "conductor") de los dos puntos con diferencias de tensión altísima (por ejemplo, 80.000 voltios) hacía que rápidamente desapareciera esa diferencia de tensión. La ausencia, en una parte, y el exceso, en la otra, de electrones en los dos terminales puestos en comunicación por el conductor es la causa de la diferencia de tensión y cuando los electrones se mueven por el conductor lo hacen justamente para anular esa diferencia de tensión. En otras palabras, en tiempos muy cortos (microsegundos o milisegundos, dependiendo de la carga eléctrica acumulada y de la "resistencia" eléctrica del conductor), la corriente cesa. Podemos dar potencia, pero durante un tiempo muy corto. El resultado final no conduce a un aprovechamiento



Figura 6. Estatua de Benjamin Franklin en el Smithsonian's National Postal Museum de Washington.



Figura 7. Grabado reproduciendo un retrato de Luigi Galvani.

real de esta energía. Cuando la cantidad de cargas eléctricas es exageradamente grande, como en una nube electrizada, donde sí tenemos grandes cantidades de energía (como atestigua la capacidad destructiva de los rayos), ¿podremos aprovecharla? No parece probable; al menos ahora no sabemos cómo hacerlo.

El primer cambio radical en la historia de la energía eléctrica vino de la mano del médico y fisiólogo italiano Luigi Galvani (Figura 7). La historia de las "ranas de Galvani" merecería mucho más tiempo (ver Guarnieri, 2014b), porque su integridad intelectual al tratar de explicar lo que por pura casualidad observó y el rigor en la experimentación posterior, son un ejemplo para cualquier científico. Galvani descubrió que la corriente eléctrica puede provocar contracción muscular, incluso en seres vivos ya muertos. La asociación entre electricidad y movimiento de músculos muertos tuvo un impacto enorme, ya que parecía que la electricidad podía conseguir algo parecido a la "resurrección". Esta idea está presente en la famosísima novela de la inglesa Mary Shelley, *Frankenstein o el moderno Prometeo*, preludio de todo un género literario.

Siguiendo en la senda emprendida por Galvani y habiendo estado estudiando los fenómenos eléctricos antes que él, otro italiano, Alessandro Volta (Figura 8), desarrolló la primera "pila eléctrica" en el último año del siglo XVIII (Guarnieri, 2014b).



Figura 8. Alessandro Volta expone a Napoleón Bonaparte sus experiencias con las "columnas de Volta", las primeras pilas eléctricas. Cuadro de Giuseppe Bertini.



Figura 9. "Columnas de Volta", en el "Templo Voltiano" de Como.

Volta descubrió que, sin necesidad de ninguna sustancia de origen animal, sólo poniendo en contacto dos metales distintos a través de un medio acuoso, era posible generar una diferencia de tensión que, aunque muchísimo menor que la procedente de las máquinas de electricidad por frotamiento, conseguía algo que no conseguían aquellas: circulación continuada de corriente eléctrica. De este modo, Volta construyó las primeras "pilas eléctricas", las llamadas "columnas de Volta" (Figura 9). Además, realizó una lista ordenada de metales, de tal forma que cuanto más lejanos se encontraban en esa lista, mayor era la tensión eléctrica que generaban al ponerse en contacto a través del medio acuoso. La forma de medir esta tensión (a falta, en aquel momento, del instrumento capaz de hacerlo, el voltímetro) era su propia lengua, tal y como muchos hemos hecho de niños para comprobar el estado de una pila.

La energía eléctrica que nos proporciona una pila proviene de las reacciones químicas que en ella experimentan las sustancias que la forman. No obstante, para crear esas sustancias hay que utilizar más energía (por ejemplo, térmica) que la que luego la pila va a proporcionar. En otras palabras, la generación masiva de energía eléctrica no puede provenir de pilas electroquímicas. Sin embargo, sí es posible realizar "pilas reversibles" (pilas recargables, que ahora conocemos como "baterías") que permiten almacenar energía eléctrica de una forma bastante eficiente.

Para encontrar una manera eficiente de generar energía eléctrica desde la energía mecánica, hay que añadir un nuevo fenómeno: el magnetismo. Al igual que los fenómenos asociados a la triboelectricidad, los fenómenos magnéticos eran conocidos en la antigüedad, ya que una de las menas más importantes de mineral de hierro, la magnetita, presenta imanación natural, es decir, se comporta como un imán natural. Las trayectorias de la electricidad y el magnetismo fueron por caminos separados hasta que en el año 1819 el danés Hans Christian Ørsted observó accidentalmente que la corriente eléctrica podía desviar la indicación de una brújula, como también consigue realizar la magnetita. Quedaba claro, por primera vez, que la corriente eléctrica generaba un campo magnético y que, por tanto, electricidad y magnetismo tenían

"alguna relación". Ørsted no cuantificó los fenómenos magnéticos producidos por la corriente eléctrica, pero escribió un artículo en latín describiendo lo observado (Ørsted, 1820). Dicho artículo llegó a manos del francés André-Marie Ampère, quien estudió minuciosamente las relaciones entre corrientes eléctricas y campos magnéticos, cuantificándolas. Los estudios de Ørsted, Ampère y otros investigadores (como François Arago y William Sturgeon) establecían sólidamente que a partir de una corriente eléctrica se podía generar un campo magnético, pero no lo recíproco, ya que un imán colocado junto a un conjunto de conductores que configuraran un circuito cerrado no originaban circulación de corriente eléctrica en él. ¿Se podría llegar a generar corriente eléctrica partiendo de un campo magnético?

La respuesta positiva a esta pregunta la dio el inglés Michael Faraday (Figura 10), uno de los científicos más importantes de la historia y otro ejemplo de compromiso con la ciencia y con la ética. Faraday descubrió que el campo magnético variable procedente de una corriente eléctrica, también variable, producía tensión eléctrica en otro conductor (realmente una bobina realizada con hilo conductor) cuando era atravesado por el citado campo magnético (Guarnieri, 2013). Posteriormente verificó que, si el campo magnético variable se conseguía moviendo un imán en la cercanía del conductor, también se producía tensión eléctrica. Por tanto, la clave para conseguir generar electricidad desde el magnetismo era que el campo magnético tenía que estar variando en el tiempo. Un imán parado cerca de una bobina de hilo conductor no genera tensión eléctrica en los extremos del hilo, pero sí la genera si el imán o el hilo se mueven uno con respecto al otro, de tal forma que el campo magnético dentro de la bobina varíe con el tiempo.

La importancia de este fenómeno es trascendental, por lo que merece la pena que reflexionemos sobre él. Si movemos un conjunto de imanes en las proximidades de un conjunto de devanados de hilo conductor, conseguimos tensión eléctrica en



Figura 10. Estatua de Michael Faraday en la sede de la "Institution of Engineering and Technology", IET, en Londres.

los extremos del devanado. La tensión eléctrica es tanto mayor cuanto mayor sea el número de espiras que tiene el devanado y cuanto mayor sea el ritmo de variación del flujo del campo magnético. Esto lo podemos hacer casi sin esfuerzo mecánico, si montamos un artilugio adecuado. De nuevo, como en el caso de las máquinas de electricidad por frotamiento, podemos generar altas tensiones con esfuerzos mecánicos pequeños. Sin embargo, mientras no haya circulación de corriente eléctrica, sencillamente porque no hemos conectado nada en los terminales eléctricos del citado artilugio, no estamos obteniendo potencia eléctrica del mismo. ¿Qué ocurrirá si conectamos algo que nos sea útil, algo que necesite potencia eléctrica para funcionar, algo que consuma corriente eléctrica, lo que llamamos en ingeniería eléctrica, "una carga"? Lo que va a pasar es que la circulación de corriente eléctrica por el devanado va a provocar un campo magnético que se va a oponer al movimiento, dificultándolo y haciendo que haya que aportar una potencia mecánica que ya no será despreciable. El "carácter opositor a la causa que lo genera" que tiene el campo magnético ahora creado es la base de la llamada ley de Lenz, (formulada por Heinrich Lenz) y es clave para entender el proceso de conversión de energía mecánica en eléctrica. Si mantenemos la velocidad de variación del campo magnético ahora (con la carga) en el mismo valor que tenía antes (sin la carga), la tensión eléctrica será la misma, pero la potencia mecánica que tenemos que desarrollar para mantener la velocidad de variación del campo magnético deberá ser ahora mucho mayor. Así, finalmente, se ha conseguido la conversión de la energía mecánica en eléctrica. Si el "artilugio" que he mencionado se construye adecuadamente (y llevamos ¡190 años! mejorando su diseño), el rendimiento de esta conversión puede llegar a ser muy alto, del orden del 95%.

Estos "artilugios" son los generadores, que pueden ser de corriente continua o de corriente alterna. Es más fácil construirlos para que generen corriente alterna (corriente cambiante de sentido de circulación con el tiempo) que de

corriente continua (corriente siempre con el mismo sentido de circulación). Los primeros se han venido llamando tradicionalmente "alternadores", mientras que a los segundos se les denominaba "dinamos". El primer alternador fue construido por el francés Hippolyte Pixii en 1832 y transformado en una rudimentaria dinamo por Ampère. Las primeras dinamos realmente operativas se deben al belga Zénobe Gramme. La dinamo de Gramme (Figura 11) es un generador "reversible", es decir, que se puede usar también como motor, transformando energía eléctrica en mecánica. Por tanto, si le aplicamos potencia mecánica nos genera potencia eléctrica y si, por el contrario, le aplicamos potencia eléctrica desde otro generador o desde una pila o batería, él gira y tiene capacidad de desarrollar potencia mecánica. Cuanto mayor sea el "par resistente" (la oposición mecánica al giro), mayor será la corriente eléctrica que tenemos que demandar del generador o desde la pila o batería. Una vez más, el balance de potencias nos tiene que cuadrar.

Los motores eléctricos que encontramos en la mayoría de los juguetes corresponden realmente a una versión simple de la dinamo de Gramme usada como motor. La reversibilidad de la dinamo de Gramme no es un caso aislado, sino que es extensible al resto de las "máquinas eléctricas"; lo que pasa es que cuando son de corriente alterna la reversibilidad se manifiesta de una manera más compleja (variando en función de las características de dicha corriente alterna).

La reversibilidad es un punto muy importante a favor de las máquinas eléctricas, si las comparamos con los motores de combustión interna. Con motores eléctricos será posible recuperar energía mecánica (por ejemplo, procedente de frenadas o de bajadas), lo que es imposible con un motor de gasolina o de gasoil.

La generación de energía eléctrica desde energía mecánica a través las "máquinas eléctricas rotativas" empleadas como generadores ha venido siendo la principal forma de generar energía eléctrica desde finales del siglo XIX hasta la actualidad. Sin embargo, ¿se puede generar energía eléctrica por otros métodos que no sean el frotamiento, las reacciones químicas o la variación de campo magnético? La respuesta es sí, si bien no todos los métodos que vamos a describir a continuación se pueden aprovechar, con la tecnología actual, para generar grandes cantidades de esta energía.

La compresión y consiguiente deformación de determinadas sustancias naturales, como el cuarzo, o artificiales, como algunos tipos de sustancias cerámicas, produce la aparición de cargas eléctricas. Este efecto recibe el nombre de "efecto piezoeléctrico". La repetición de ciclos de compresión y expansión acaba generando circulación de corriente eléctrica si se conecta un circuito en los extremos de las partes comprimidas y expandidas. El efecto piezoeléctrico es otra forma de convertir energía mecánica en energía eléctrica y fue inicialmente descrito en 1881 por los franceses Pierre y Jacques Curie. Es un fenómeno interesante y atractivo para generar pequeñas cantidades de energía eléctrica, útil para hacer funcionar pequeños equipos aislados de una conexión eléctrica

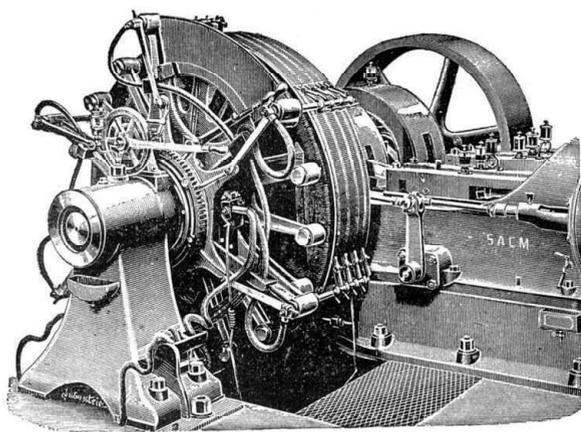


Fig. 641.

Figura 11. Grabado mostrando una máquina eléctrica tipo Gramme, construida por la "Société Alsacienne de Constructions Mécaniques".



Figura 12. Ignitor piezoeléctrico moderno de la firma "SparkFun Electronics".

convencional. Quizás los ejemplos más comunes de aprovechamiento de la energía eléctrica procedente de efecto piezoeléctrico sean algunos encendedores de calderas (Figura 12) y los mecheros habituales, en los que la chispa eléctrica se consigue por este método. Completamente al margen de la generación de energía eléctrica y debido a su reversibilidad, el efecto piezoeléctrico es la base de determinados componentes de múltiples aplicaciones en acústica y en generación y tratamiento de señales eléctricas en el mundo de la electrónica, especialmente para telecomunicaciones.

Se puede generar energía eléctrica desde un salto térmico sin necesidad de utilizar la energía mecánica como paso intermedio, es decir, sin usar una máquina térmica que transforme la energía del salto térmico en energía mecánica y de un generador eléctrico que transforme ésta en energía eléctrica. Existe el efecto llamado "termoeléctrico", que pone de manifiesto que, si existe un salto térmico entre las partes de un metal, aparecerá en él tensión eléctrica, que genera circulación constante de corriente eléctrica. Este efecto fue observado por el estonio, de origen alemán, Thomas Johann Seebeck en 1821, aunque no supo explicarlo correctamente. El efecto termoeléctrico es más patente en uniones entre diferentes metales que estén a diferente temperatura. Las tensiones eléctricas generadas son muy pequeñas (del orden de decenas de microvoltios por grado centígrado de salto térmico), aunque es posible conectar "en serie" agrupaciones de pares de metales con uniones calientes y frías alternativas para generar mayores tensiones. Los fenómenos termoeléctricos son útiles para realizar lo que se llaman "termopares", que son dispositivos útiles para la medición precisa de temperatura. Sin embargo, no son útiles, con la tecnología actual, para la generación masiva de energía eléctrica. La razón de ello es que los materiales que son buenos conductores de la electricidad también lo son del calor, por lo que resulta muy complicado mantener el salto térmico entre los extremos de los metales. Pese a ello, son útiles en determinadas ocasiones en las que no se puede acudir a otras formas de generación de energía eléctrica. Un ejemplo muy especial es el de la sonda espacial Voyager (Figura 13), que se nutre de energía mediante tres generadores termoeléctricos de radioisótopos, que transforman en energía eléctrica el salto térmico producido por la desintegración de plutonio. En el verano del año 2021, esta sonda se encontraba a $23 \cdot 10^9$ km de la

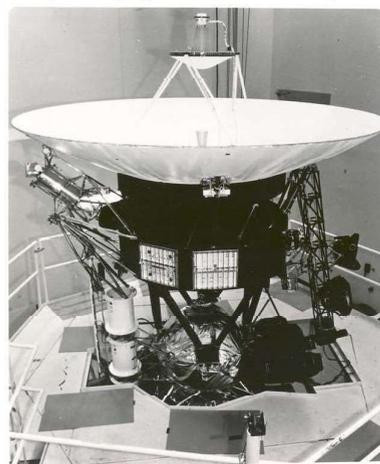


Figura 13. Fotografía de una de las sondas espaciales "Mariner Jupiter Saturn 1977", conocidas como "Voyager". Se lanzaron dos de estas sondas, que actualmente están en el espacio interestelar. La Voyager-1 es el objeto fabricado por el ser humano más alejado de la Tierra y continúa transmitiendo datos gracias a que sus generadores termoeléctricos de radioisótopos siguen alimentando sus transmisores de radio.

Tierra y sus generadores termoeléctricos son capaces de alimentar aún sus pequeños transmisores y receptores de radio.

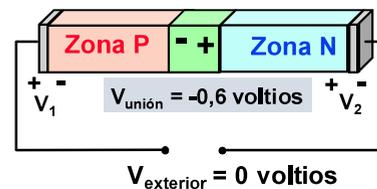
Algo parecido a lo que ocurre en los metales, ocurre en los materiales semiconductores, los elementos clave en el desarrollo de toda la electrónica moderna, desde el invento del transistor en 1947. Con uniones de semiconductores a distinta temperatura también se puede conseguir transformación de energía térmica en eléctrica. El efecto llega a ser reversible, denominándose "efecto Peltier" (en honor a su descubridor, el francés Jean Peltier, quien lo observó no en uniones de material semiconductor, sino de metales). Sin embargo, las uniones de material semiconductor sí que son clave en el futuro de la generación de energía eléctrica, no a partir de salto térmico, sino de radiación solar.

Como hemos comentado anteriormente y salvo la energía "geoprímitiva" que la Tierra aún conserva de la que tenía en el momento de su formación (y la que va cediendo a la Tierra el sistema Tierra-Luna en forma de movimiento de masas de agua debido a la atracción gravitatoria), el resto de la energía nos llega de la reacción de fusión nuclear que ocurre en el Sol. Tenemos parte de esa energía fosilizada y la estamos utilizando de una manera que ya sabemos que es inadecuada. Sin embargo, la energía que seguimos recibiendo nos sigue generando combustible orgánico, que tampoco debemos utilizar masivamente, vientos, evaporación de agua (que al depositarse en forma de lluvia en terrenos altos y ser almacenada supone energía potencial) y oleaje en las masas de agua de la Tierra. Esta energía mecánica la transformamos en eléctrica con el uso de generadores eléctricos. Sin embargo, la radiación solar puede transformarse directamente en energía eléctrica a través del "efecto fotovoltaico", que merece la pena que expliquemos con más detalle.

Los materiales semiconductores son sustancias sólidas con capacidad de conducción de corriente eléctrica intermedia entre los buenos conductores (como los metales) y los buenos aislantes (como los vidrios, los plásticos y las cerámicas). Sus propiedades de conducción de corriente eléctrica pueden modificarse drásticamente con la adición de pequeñas concentraciones de sustancias que, sin modificar la estructura cristalina del semiconductor, añaden electrones adicionales con capacidad de movimiento por la red o atrapan electrones de este tipo y les obligan a permanecer fijos en la red cristalina, generando una ausencia de electrón en un enlace covalente del material semiconductor. El proceso de añadir estas sustancias se denomina "dopado". Un semiconductor que ha sido dopado para tener más electrones capaces de moverse que los que tendría antes del dopado es un semiconductor "tipo N", mientras que uno que tiene menos de ellos (y más enlaces covalentes con falta de electrones, lo que se denominan "huecos"), es un semiconductor "tipo P". Cuando se construye una unión entre semiconductores dopados de manera distinta, lo que se denomina una unión PN, existe un trasvase de cargas eléctricas que genera una diferencia de potencial entre las dos zonas de la unión PN. Esta tensión, si el material de la unión PN es silicio, es de unas décimas de voltio (alrededor de 0,6 voltios, que aparecen como -0,6 voltios en la Figura 14.a), aunque depende de cómo se ha dopado y de la temperatura. Si queremos utilizar esa tensión para "algo útil", conectando unas uniones metálicas adecuadas a los extremos del material semiconductor y montando un circuito eléctrico, observaremos con frustración que no circula corriente eléctrica. Lo que ocurre es que en las uniones metálicas antes mencionadas (las que se establecen entre el extremo de la zona tipo P y el metal, y entre el extremo de la zona tipo N y el metal) también aparecen tensiones eléctricas que compensan exactamente la generada en la unión PN (Figura 14.a). No podría ser de otro modo, ya que al sistema no estamos entregándole ninguna energía y, por tanto, él no nos puede entregar ninguna tampoco. Para que el sistema nos dé energía tenemos que entregársela nosotros primero (o desintegrar masa, lo que no tiene nada que ver con esta situación).

La forma de entregar energía al sistema es hacer incidir sobre él la energía procedente de la luz (por ejemplo, de la solar). Si la energía de los "fotones" (que son los "paquetes" más pequeños en los que cuantificamos la energía de una radiación) es suficientemente alta como para romper los enlaces covalentes del material, entonces se generan nuevos electrones y nuevos huecos. Estos nuevos "portadores de carga" (nombre con el que designamos con un único concepto a los electrones y a los huecos) pueden romper el equilibrio de tensiones anteriormente descrito. La energía que procede del sol está compuesta por radiaciones de distintas longitudes de onda, con fotones suficientemente energéticos como para romper muchos enlaces covalentes de la red de silicio. Los electrones y huecos así generados son separados por el campo eléctrico que origina la tensión que existe en la unión PN (esa que decíamos que antes era de, por ejemplo, -0,6 voltios, "no aprovechables"),

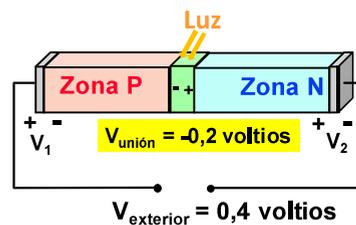
disminuyéndola (por ejemplo, a -0,4 voltios en la Figura 14.b). En estas condiciones, se rompe el "frustrante" equilibrio anterior que originaba la imposibilidad de circulación de corriente, existiendo ahora generación de energía eléctrica en el circuito si conectamos una carga eléctrica en los terminales exteriores. Pero, ¿qué forma tiene esa energía eléctrica? Estamos hablando de que las tensiones externas que mediremos, sin conectar ninguna carga (ningún circuito externo), serán dependientes de la intensidad de la radiación luminosa incidente, pero siempre menor de esos 0,6 voltios. Esa tensión es pequeña, pero agrupando muchas de estas uniones PN (a las que para esta aplicación ya podemos denominarlas "células solares") en montaje serie podremos aumentar sustancialmente la tensión del conjunto, que se denomina "panel solar". La tensión "en vacío", es decir, sin carga, que da un panel solar puede llegar a cientos de voltios, sin más que conectar un número suficientemente alto de células solares. La capacidad de hacer circular corriente eléctrica que va a tener el panel solar va a ser tanto mayor cuanto mayor sea la intensidad de la radiación solar y cuanto mayor sea el área de cada célula del panel y, por tanto, cuanto mayor sea el área total del panel. Cuando conectemos una carga al panel solar, su tensión será menor cuanto mayor sea la corriente eléctrica que



Sin luz:

$$\left. \begin{matrix} V_{unión} = -0,6 \text{ V} \\ V_1 + V_2 = 0,6 \text{ V} \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_{exterior} = 0 \text{ V}$$

a)



Con luz:

$$\left. \begin{matrix} V_{unión} = -0,2 \text{ V} \\ V_1 + V_2 = 0,6 \text{ V} \end{matrix} \right\} \Rightarrow V_{exterior} = 0,4 \text{ V}$$

b)

Figura 14. Principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica. a) Si no incide luz sobre la zona de transición de una unión PN, la tensión de esta zona (-0,6 V en la figura) queda perfectamente compensada con la suma de las tensiones existentes entre el semiconductor y el metal. b) La incidencia de luz rompe este equilibrio, de tal forma que la generación de pares electrón hueco por efecto de los fotones de la luz disminuye la tensión en la zona de transición (a -0,2 V en la figura), con lo que ahora aparecen 0,4 V en el circuito exterior.

pidamos. Esto nos lleva a una limitación intrínseca a esta forma de generación de energía, que procedemos a explicar con más detalle.

Cuando nosotros transformamos energía mecánica en eléctrica, la tensión generada por el generador depende de su velocidad de giro. Si conectamos una carga que pide mucha corriente, la ley de Lenz nos dice que esa corriente va a dificultar el movimiento del generador (va a generar un par resistente a la rotación), de tal forma que, si no aplicamos más energía mecánica, la tensión del generador bajará. Sin embargo, de una manera cómoda podemos modificar la situación si podemos controlar la energía mecánica aplicada al sistema. Por ejemplo, si la energía mecánica viene de transformar la energía cinética del agua que acciona una turbina, no tenemos más que aumentar el caudal del agua ("abrir más el grifo") hasta que la velocidad de la turbina y, por tanto, del generador a ella conectado, vuelva a retomar el valor inicial, también volviendo al valor inicial la tensión suministrada por dicho generador. Lo mismo pasaría con el combustible y el vapor en una central térmica o nuclear. En todos estos casos tenemos "mucho energía detrás" y sólo tenemos que dosificar su aplicación al sistema para conseguir la generación de una tensión eléctrica constante e independiente del consumo de los usuarios conectados al generador. En estos ejemplos, los generadores son "generadores fuertes", generadores en los que mediante el mecanismo descrito podemos independizar la tensión generada de la carga a ellos conectada. Esto no es posible en un panel solar, donde no podemos aumentar la situación de radiación luminosa recibida si la generación de energía eléctrica se antoja insuficiente. Este problema se puede solucionar, pero su solución implica el uso de métodos electrónicos de modificación de las tensiones generadas por los paneles solares. Este asunto será tratado posteriormente.

La energía solar de origen fotovoltaico tiene ventajas y limitaciones con relación a la generada desde la energía mecánica. Además de la desventaja citada, tenemos que hablar de la potencia por unidad de superficie, del rendimiento en la conversión de la energía solar a eléctrica y del coste de los paneles solares.

Si nos colocamos fuera de la atmósfera terrestre, pero relativamente cerca de la Tierra, la potencia por metro cuadrado que supone la energía que nos entrega el Sol es, de media (ya que depende de la lejanía de la Tierra al Sol), de algo más de 1,3 kW/m², suponiendo que la superficie está colocada perpendicularmente al Sol. Si descendemos por la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre en un lugar en el que el Sol esté en su cénit, la potencia anterior, también medida en una superficie perpendicular a los rayos del Sol, disminuye hasta llegar a valer un poco más de 0,9 kW/m². Esta potencia por unidad de superficie es bastante más pequeña en posiciones de la Tierra alejadas del Ecuador, además de disminuir según va cambiando la posición relativa del Sol sobre el horizonte terrestre, al aumentar el recorrido que los rayos solares tienen que efectuar en la atmósfera para llegar al panel. Si en vez de potencia analizamos la energía media de la que vamos a

disponer (teniendo en cuenta que hay noches y estaciones), nos encontramos que, en España, el promedio anual de valores diarios de energía solar global medida en un plano horizontal (esto último es importante) es de 3,6 kWh/m² en Asturias y que este valor sube hasta 5,4 kWh/m² en Almería. Si orientamos la posición de los paneles solares, de tal forma que los rayos solares incidan perpendicularmente sobre el panel, estos datos mejoran, pero añaden una complejidad al sistema que sólo queda justificada en las grandes instalaciones fotovoltaicas, sobre todo si el seguimiento se hace en dos ejes.

Otra de las preguntas fundamentales es cómo es el rendimiento de la transformación de la potencia "luminica" incidente en el panel en potencia eléctrica. Si se trata de paneles de silicio, el rendimiento está en el entorno del 20%. Si el material de los paneles es arseniuro de galio, este rendimiento se aproxima al 28%. De forma experimental se ha llegado al 32,8%, apilando células solares realizadas en arseniuro de galio y en silicio y al 35,9% si una de las células apiladas se ha realizado con "heterouniones" (uniones de semiconductores distintos) de fosforo de indio y de galio y de arseniuro de galio, mientras que la otra se ha realizado con silicio.

Los paneles solares de uso habitual, sin embargo, son los de silicio, ya que incluso la tecnología bien asentada de paneles de arseniuro de galio resulta mucho más cara y sólo queda justificada en aplicaciones en las que el rendimiento, el peso y el volumen de los paneles es crucial, como ocurre en las aplicaciones espaciales. Una de las razones del mayor coste de los paneles de arseniuro de galio radica en el propio material, muchísimo menos abundante que el silicio. El silicio es un elemento muy común en la corteza terrestre, ya que es uno de los dos elementos fundamentales del cuarzo y, por tanto, de todas las rocas que incluyen este mineral en su composición, como las areniscas y las cuarcitas. Además, una de las grandes familias de minerales son los silicatos (como el feldespato del granito), también muy abundantes en nuestro planeta y en otros "planetas rocosos".

Aunque el silicio es extraordinariamente abundante y los dispositivos semiconductores que reinan en la electrónica desde los años 60 se han venido construyendo con este material a precios bajísimos, los paneles solares han sido, hasta hace muy poco tiempo, bastante caros. Hay varias razones para ello, pero la principal es que las células solares de silicio se construyen con estructuras cristalinas de este material que son grandes (la corriente eléctrica que van a generar será proporcional a su área) y, además, tienen que ser "muy perfectas", es decir, con muy pocos defectos en una red cristalina que, también, debe ser "muy pura", es decir, con una muy baja concentración de trazas de otras sustancias distintas del dopante. La razón de esta necesidad es que los citados defectos de la red generan en ella lo que se llaman "centros de recombinación", que son lugares de aniquilación mutua de electrones y huecos. Obviamente, los portadores de carga que desaparecen ya no generan corriente eléctrica y si hay muchos defectos en la red cristalina de la célula solar, su capacidad de generar corriente eléctrica disminuirá; lo que ocurrirá es que la mayor parte de la radiación luminosa acabará generando, exclusivamente, calentamiento del panel.

Pese a las dificultades técnicas para construir células solares baratas, lo cierto es que el precio de los paneles solares ha experimentado un muy notable abaratamiento en los últimos 15 años, dividiendo aproximadamente por 9 su coste por vatio. Debido a ello, la venta de paneles solares se ha popularizado enormemente.

La conversión de la energía del Sol directamente en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico, presenta, en resumen, importantes ventajas e importantes limitaciones. La principal ventaja es que la energía primaria (la radiación solar) llega al lugar de conversión sin necesidad de ser encauzada, aunque también podría ser intensificada con el uso de concentradores. Además, su conversión en energía eléctrica puede ser completamente "estática", es decir, sin elementos móviles, lo que simplifica las labores de mantenimiento. Sin embargo, también sabemos que si queremos optimizar la producción de energía eléctrica sí que es preciso mover los paneles siguiendo la trayectoria del Sol en el horizonte. Por el contrario, además de la clara desventaja que supone que la energía primaria no está presente por las noches y que su intensidad es muy variable en función de la situación meteorológica, el rendimiento de la conversión es bastante pobre (en los paneles reales frecuentemente menor del 20%) y, además, las características de la energía eléctrica que se genera son tales que no puede usarse directamente, sino que ha de ser transformada por circuitos eléctricos (en realidad, circuitos "electrónicos de potencia") adecuados. Tal como se ha comentado, la tensión eléctrica en los extremos del panel, incluso cuando no cambia la energía solar incidente, cambia en función de la corriente eléctrica consumida, siendo, de natural, generadores de energía "débiles". Cuando un panel solar no tiene ningún circuito conectado (cuando está en vacío) y, por tanto, la corriente eléctrica que está suministrando es cero, la potencia eléctrica que está dando es cero (recordemos que la potencia eléctrica es producto de la tensión y la intensidad de corriente). Al contrario de lo que ocurre en una batería, pila, o en el enchufe de pared del que obtenemos energía eléctrica, un panel solar se puede cortocircuitar sin que ocurra problema alguno. Cuando se cortocircuita, circula una corriente fuerte por el cortocircuito, pero la tensión eléctrica en el cortocircuito vale cero, siendo cero también la potencia suministrada. Entre las situaciones extremas de resistencia de carga infinita (panel en vacío) y resistencia cero (panel en cortocircuito), que en ambos casos conducen a potencia cero, existe un valor de resistencia que implica una circulación de corriente y una tensión en el panel cuyo producto es el más alto posible. Cuando el panel solar trabaja en ese punto, se dice que trabaja en el "punto de máxima potencia". Si queremos realmente obtener el citado 20% de rendimiento del panel solar, los circuitos electrónicos de potencia deben encargarse de que el panel trabaje exactamente en el punto de máxima potencia.

La energía eléctrica que nos da un panel solar, además de variable en función de las circunstancias citadas, aparece en un "formato" que en la mayoría de los casos no es útil. Los paneles solares dan energía eléctrica de corriente continua. Si queremos

volcar esa energía en la red eléctrica, que es de corriente alterna, vuelve a tener que existir una circuitería electrónica de potencia que se encargue de esa conversión, además de garantizar un valor de tensión compatible con la red a la que se conecta. Si queremos usarla directamente de forma compatible con la mayoría de las cargas habituales, diseñadas para recibir corriente alterna (de 230 voltios de tensión y de 50 hercios de frecuencia), igualmente hay que realizar esa conversión. Si queremos utilizar la energía eléctrica obtenida para alimentar cargas que trabajan con corriente continua (como ocurre internamente en la mayoría de los circuitos electrónicos), volvemos a tener que utilizar circuitería electrónica de potencia, en este caso para garantizar que la tensión es siempre la misma, la propia que la carga requiere. Por ejemplo, en cualquiera de los terminales USB que usamos para cargar nuestros teléfonos móviles debe existir una tensión de 5 voltios de corriente continua.

Por otra parte, si la fuente de energía eléctrica es exclusivamente la solar, no queda otra opción que diseñar el sistema de forma que durante los periodos de presencia de luz solar se produzca un exceso de energía eléctrica que pueda ser almacenado. La mejora de las técnicas de almacenamiento de la energía eléctrica es, quizás, el reto tecnológico más importante que en la actualidad tiene la ingeniería eléctrica. Acudiendo a la tecnología actual más extendida, el uso de baterías es el sistema habitual. Las baterías se cargan con corrientes eléctricas controladas y a tensiones cercanas (ligeramente superiores) a su tensión nominal. Nuevamente, la circuitería electrónica de potencia debe encargarse de ello, así como de transformar la tensión de continua que suministra la batería en la necesitada por la carga a ella conectada. Volviendo a los ejemplos anteriores, si hemos almacenado energía en una batería de 12 voltios, hay que transformar la energía en el formato "12 voltios de corriente continua" al formato "230 voltios de corriente alterna de 50 hercios" para poder colocarla en el enchufe de la pared, o al formato "5 voltios de corriente continua" para poder colocarla en un terminal USB.



Figura 15. Fotografía de la llamada "pérgola fotovoltaica del Fórum", en Barcelona. Ocupa unos 4.000 metros cuadrados y consta de casi 3.000 paneles solares.

En resumen, la transformación directa de la energía que recibimos del Sol en energía eléctrica está siendo posible después de haber conseguido sistemas eficientes y baratos de cambio del formato de la energía eléctrica, lo que se logra mediante el uso de circuitos electrónicos de potencia. Este tipo de circuitos electrónicos, al igual que los de otros ámbitos, han experimentado una muy rápida evolución en los últimos 40 años. Este hecho, unido al abaratamiento de los costes de los paneles solares en los últimos 15 años, hace que el uso de la energía solar transformada en eléctrica en instalaciones fotovoltaicas sea una tecnología muy interesante, sobre todo en un escenario de generación eléctrica "distribuida" (y cercana al usuario) en vez de "concentrada" en centros concretos de producción (y alejada de los usuarios). Por supuesto, con muchos paneles solares también se puede realizar generación concentrada, construyendo las llamadas "plantas solares fotovoltaicas" (Figura 15).

La energía del Sol, además de poder ser convertida en eléctrica directamente a través del efecto fotovoltaico, puede servir para calentar un fluido que se expanda en una máquina térmica para obtener energía mecánica, que será transformada en eléctrica en un alternador. Se trata de la llamada generación "termosolar". Al contrario de lo que ocurre con la energía solar de origen fotovoltaico, que se presta a la generación distribuida y a la generación concentrada, la generación termosolar se realiza de forma concentrada en centrales termosolares. Pese a que su principio de operación es bastante simple, las instalaciones reales son bastante complejas. Existen varios tipos de centrales termosolares, pero en todas ellas hay que concentrar la radiación solar en una pequeña superficie, para que en ella genere temperaturas suficientemente altas para garantizar eficiencia en la máquina térmica. Esto implica el uso de concentradores de los rayos solares, siendo los más habituales los llamados "colectores cilíndricos parabólicos" (Figura 16) y los basados en los llamados "heliostatos", existiendo también otras alternativas menos asentadas (basados en espejos en todos los casos). Los colectores cilíndricos parabólicos calientan un fluido que los va atravesando, mientras que los heliostatos reflejan los rayos del Sol en una pequeña superficie localizada



Figura 16. Central solar con colectores "cilindrico parabólicos".



Figura 17. Fotografía de la central termosolar de Ivanpah, en el desierto de Mojave, en California. Consta de 173.500 heliostatos de 2 espejos, que apuntan a 3 torres centrales de 139,3 metros de altura. La máxima potencia producida es 392 megavatios.

en lo alto de una torre (el "punto focal"), donde calientan el fluido. Estos dos tipos de concentradores dan nombre a los dos principales tipos de centrales termosolares: las "centrales termosolares de canales parabólicos" y las "centrales termosolares de heliostatos con receptor central en torre". Para conseguir que la central pueda estar funcionando incluso en ausencia de luz solar, frecuentemente el fluido que se calienta inicialmente no es el agua que generará el vapor de alimentación de la turbina, sino que es un fluido compuesto por sales fundidas de alto "calor específico" (40% de nitrato potásico y 60% de nitrato sódico), que sirven para almacenar la energía térmica. Este fluido intercambia calor con el agua que genera el vapor de alimentación de la turbina.

Los heliostatos de las centrales termosolares con receptor central en torre (Figura 17) deben seguir con precisión la posición del Sol, por lo que deben tener movimiento en dos ejes. Cada heliostato debe seguir su propia secuencia de movimientos (diferente de la de otros heliostatos), en concordancia con el movimiento del Sol, para reflejar los rayos de éste en el punto focal, con la consiguiente complejidad que esto representa. El número de heliostatos a utilizar en estas instalaciones es muy grande (por ejemplo, en la planta PS10 de Sanlúcar la Mayor, en Sevilla, existen 624 heliostatos), por lo que la superficie que ocupan es muy grande (en el ejemplo anterior, 60 hectáreas para generar 11 MW). Como consecuencia de esto, se trata de instalaciones complejas, con alto coste en la generación de la energía eléctrica.

Es de destacar que España es el país del mundo con un mayor número de instalaciones de este tipo. En el año 2019, en el mundo existían centrales termosolares capaces de generar 6.200 MW, 2.300 de los cuales se generaban en España. La comparación entre la generación termosolar y la generación fotovoltaica demuestra el mayor interés que la segunda suscita, ya que la potencia generada en el mundo por la opción fotovoltaica es 100 veces mayor que la generada por la opción térmica. Sin ninguna duda, cualquier persona interesada en

aprovechar la energía solar puede instalar un sistema de generación eléctrica fotovoltaica en su domicilio, pero no uno de generación eléctrica térmica, al menos con la tecnología actual. Por supuesto, esto no excluye en absoluto el interés por contribuir con energía solar a la generación de agua caliente doméstica y así aliviar el consumo de energía eléctrica o la quema de sustancias ricas en carbono.

III. CAMBIANDO EL TIPO DE ENERGÍA

En la Figura 18 se muestra una clasificación de las fuentes de energía, sus manifestaciones y sus transformaciones hasta llegar a ser energía eléctrica.

En el planeta Tierra existe una energía "geoprimitiva", consecuencia de su formación, que se manifiesta en el salto térmico que existe entre su núcleo y su superficie, en la energía mecánica que posee debida a su traslación, a su rotación y a las de su satélite y la energía que generan las transformaciones nucleares que sufren determinadas sustancias con proporciones no estables de protones y neutrones. Existe también una energía "fosilizada" en forma de petróleo, carbón y gas natural, que es consecuencia de la formación de materia orgánica en el pasado, con la imprescindible actuación del Sol. Por último, seguimos recibiendo energía "nueva" procedente del Sol, en forma de radiación, que se manifiesta en nueva formación de materia orgánica y en calentamiento desigual de la superficie de la Tierra. A su vez, este calentamiento desigual provoca evaporación de agua (y su posterior precipitación sobre el mar y los continentes), corrientes de agua en el mar y viento en la atmósfera (que, además, origina oleaje en las grandes masas de agua).

De todas estas energías, sea directamente o sea a través de una transformación intermedia en energía térmica, podemos obtener energía mecánica. Así, podemos obtener energía mecánica útil desde la energía mecánica "geoprimitiva" que posee la agrupación Tierra-Luna (a través de las mareas) y podemos obtener energía mecánica útil desde la energía mecánica "nueva" que adquieren las masas de agua y aire después de ser calentadas por el Sol, es decir, a través de las corrientes de agua y del viento. También podemos obtener energía mecánica útil desde la energía térmica "geoprimitiva" que aflora a la corteza terrestre desde su interior en determinados lugares (Islandia es el mejor ejemplo) o desde la energía térmica que producen las desintegraciones de masa que sufren sustancias nuclearmente inestables (convenientemente concentradas en los reactores nucleares). Asimismo, la energía mecánica útil puede ser obtenida desde la energía "fosilizada" a través de la energía térmica que se produce al quemar combustibles fósiles, sean sólidos (carbón), líquidos (derivados del petróleo) o gaseosos (gas natural). De igual forma, se obtendría desde energía "nueva", si las sustancias orgánicas proceden de seres vivos (esencialmente plantas o partes de ellas). También la energía "nueva" que nos llega del Sol puede ser transformada en térmica y posteriormente en mecánica, que es lo que sucede en las centrales termosolares.

Por tanto, hay muchas maneras de obtener energía mecánica desde las energías geoprimitiva, fosilizada y nueva. Sin embargo, como la energía mecánica no es fácilmente transportable, la transformamos en energía eléctrica para hacerla llegar con comodidad a los lugares en los que la vamos a

Procedencia temporal de la energía	Procedencia espacial de la energía	Tipo de energía primaria	Fenómenos físicos que provoca	Ejemplos de manifestación a escala terrestre	Energía transformada 1	Energía transformada 2	Energía transformada 3	Planta generadora
Geoprimitiva (formación de la Tierra y la Luna)	Sistema Tierra-Luna	Mecánica de traslación y rotación (Tierra y Luna)	Movimiento de líquidos	Mareas	Mecánica de rotación	Eléctrica		Planta mareomotriz
	Interior terrestre	Térmica	Gradiente térmico en la corteza terrestre	Afloración de agua caliente	Mecánica de rotación	Eléctrica		Central geotérmica
	Corteza terrestre	Nuclear	Radioactividad	Radioactividad natural (uranio)	Térmica	Mecánica de rotación	Eléctrica	Central nuclear
Fosilizada (transformaciones de materia orgánica)	Corteza terrestre	Química en sólidos	Combustiones espontáneas	Yacimientos de carbón	Térmica	Mecánica de rotación	Eléctrica	Central termoelectrónica
		Química en líquidos		Yacimientos de petróleo	Térmica	Mecánica de rotación	Eléctrica	Central termoelectrónica
		Química en gases		Yacimientos de gases naturales	Térmica	Mecánica de rotación	Eléctrica	Central termoelectrónica
Nueva (generada por desintegración de masa en el Sol)	Sol	Radiación	Fotosíntesis	Biocombustibles	Térmica	Mecánica de rotación	Eléctrica	Central de biomasa
			Gradiente térmico en líquidos	Evaporación y lluvia	Mecánica potencial	Mecánica de rotación	Eléctrica	Central hidroeléctrica
				Corrientes marinas	Mecánica de rotación	Eléctrica	Parque submarino	
			Gradiente térmico en gases	Viento	Mecánica de rotación	Eléctrica	Parque eólico	
				Oleaje	Mecánica de traslación	Mecánica de rotación	Eléctrica	Central Undimotriz
			Radiación	Luz solar	Eléctrica		Parque fotovoltaico	
		Térmica	Mecánica de rotación	Eléctrica	Central termosolar			

Figura 18. Clasificación de las fuentes de energía disponibles en la Tierra, sus manifestaciones y sus transformaciones hasta llegar a ser energía eléctrica.

necesitar. En todos los casos anteriores, la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica se realiza con generadores eléctricos, normalmente alternadores. Además, sabemos que podemos obtener energía eléctrica directamente desde el Sol a través del efecto fotovoltaico.

Por otra parte, también sabemos que somos capaces de generar diferencias de tensión y de mantener circulación de corriente por muchos métodos, tal y como se ha analizado en la sección anterior. Pese a ello, sólo la transformación de energía mecánica en eléctrica a través de generadores eléctricos (esencialmente alternadores) y la transformación de energía solar en eléctrica mediante paneles fotovoltaicos son métodos suficientemente desarrollados para resultar capaces de generar las grandes cantidades de energía eléctrica que necesita el ser humano. Para conseguirlo, en el caso de los alternadores, deberán llevar acoplados a su eje de rotación o bien una turbina de vapor de agua, o una turbina hidráulica, o las gigantescas palas de un aerogenerador o un sistema ingenioso (Figura 19) para transformar el movimiento de las olas del mar en un movimiento aprovechable por un generador eléctrico menos convencional que un alternador. El vapor de agua podrá provenir del calentamiento de agua líquida por el Sol (a través de un fluido intermedio), por la quema de combustibles fósiles o de biocombustibles, por el magma del interior de la Tierra, o por la desintegración de átomos inestables. Las corrientes de agua que entran en la turbina hidráulica podrán ser consecuencia de la acumulación de agua en un gran embalse que se alimenta de un río, o del movimiento de las mareas (Figura 20), o de un pequeño cauce de agua estacional. En todos los casos, las transformaciones tendrán muchísimas peculiaridades técnicas, pero tienen principios generales semejantes.

Sin embargo, sí que existe otro tipo de división de los sistemas que nos tienen que proporcionar la energía eléctrica que resulta crucial para el diseño de los mismos. Esta división



Figura 19. Un ejemplo de energía "nueva" es la energía mecánica obtenida como consecuencia del oleaje. Esta energía puede ser transformada en eléctrica con un equipo tipo "Penalis", como el mostrado en esta figura. La foto corresponde a su fase de pruebas en el año 2007, en el Puerto de Peniche, en Portugal.



Figura 20. Un ejemplo de energía "geoprimitiva" es la energía mecánica obtenida como consecuencia de las mareas. Esta energía mecánica puede ser transformada en eléctrica en centrales como la mostrada en esta figura, la primera en su género, situada en el estuario del río Rance, entre Dinard y Saint-Malo, en Francia. Opera desde el año 1966 y posee 24 turbinas acopladas a generadores de 10 MW.

se basa en la disponibilidad de la energía primaria (que será convertida en eléctrica a través de las transformaciones necesarias en cada caso). Si la disponibilidad de esa energía es la misma en cada momento y, además, la cantidad de energía es relativamente grande, será fácil construir una red de suministro de energía eléctrica, ya que podremos adaptar el consumo de la energía primaria a las necesidades de suministro. Esta es la situación que se produce en las formas más tradicionales de generación de energía eléctrica, como son las centrales hidráulicas, las térmicas y las nucleares. En todas ellas podremos regular algún conjunto de variables físicas (caudal de líquido, temperatura y presión de vapor calentado por combustión o por reacción nuclear) que dosifiquen la energía mecánica que desarrolla una turbina. Podremos así garantizar que el alternador genera energía eléctrica en todo momento y además con un formato predefinido. A esto es a lo que estamos acostumbrados: queremos tener la energía eléctrica en todo momento y asegurando, además, que sus características permitan que todos los equipos que funcionan en base a ella lo hagan correctamente.

Desgraciadamente, esta forma "cómoda" de generar energía eléctrica está acotada por varios factores. La energía eléctrica de procedencia hidráulica está acotada por la disponibilidad de espacios físicos para almacenar agua. La energía eléctrica de origen nuclear de fisión tiene el problema de los residuos y el de ser una tecnología que genera gran rechazo social por las gravísimas consecuencias que pueden generar determinados fallos. La energía eléctrica de procedencia térmica, obtenida de la combustión de combustibles fósiles, además de estar acotada por las reservas de estas sustancias, a día de hoy está en regresión por los problemas medioambientales que genera.

Las fuentes de energía mecánica que están a libre disposición del ser humano sin los inconvenientes anteriores y en emplazamientos generales (para excluir la geotérmica, sólo presente en lugares muy concretos), tienen el grave problema de que ni están constantemente presentes, ni lo están siempre en las cantidades necesarias. Esta afirmación es obvia en el caso de la energía eléctrica de origen solar, eólico o undimotriz (basada en



Figura 21. Módulo de almacenamiento de energía en forma de energía cinética de rotación, desarrollado por la NASA.

el aprovechamiento de la energía mecánica del oleaje). En el caso de la mareomotriz (de aprovechamiento de las mareas), el problema es semejante al de la energía eléctrica de origen hidráulico, es decir, de emplazamiento y uso del espacio físico.

La única manera de coordinar la energía primaria disponible y la energía eléctrica demandada es almacenar energía de alguna forma. Sabemos almacenar energía térmica durante periodos de varias horas (durante las noches, por ejemplo) mediante el uso de sales fundidas. Sabemos almacenar energía mecánica en forma de energía cinética (volantes de inercia, Figura 21) y energía potencial (subiendo, mediante bombas accionadas eléctricamente, agua a un embalse), transformando así energía eléctrica sobrante en energía potencial, que en otro momento será convertida en cinética en una turbina y en eléctrica en un alternador. Sin embargo, en otros casos, como en las centrales solares fotovoltaicas, la forma de almacenar energía debe ser ya, directamente, como energía eléctrica.

La pregunta de cómo se puede almacenar la energía eléctrica merece una sección aparte. El almacenamiento de energía eléctrica es importante en muchas circunstancias, pero será inevitable si queremos prescindir de quemar combustibles fósiles y de utilizar energía nuclear. No es posible, con la tecnología actual, pensar que vamos a tener una calidad semejante de energía eléctrica acudiendo sólo a los rayos solares, el viento, las olas y las mareas, si no somos capaces de almacenar la energía eléctrica generada en los picos de producción para rellenar con ella los de consumo.

Por otra parte, el almacenamiento de energía eléctrica es imprescindible para garantizar la eliminación de la quema de combustibles fósiles en todos los medios de transporte que no pueden tener acceso a energía eléctrica del exterior.

IV. COMO LAS HORMIGAS, ALMACENANDO PARA CUANDO FALTE

La energía eléctrica es más fácilmente almacenable que otras formas de energía y, pese a ello, el almacenamiento de la energía eléctrica es un asunto que consideramos que no está completamente resuelto, siendo, además, un punto crítico para la extensión de los usos de la energía eléctrica.

La energía potencial derivada de tener grandes masas de agua se almacena con relativa comodidad, si bien requiere anegar grandes superficies de terreno atractivos para otros usos, incluidos los asentamientos humanos. La energía cinética se puede almacenar en volantes de inercia, pero los rozamientos inherentes al movimiento generan pérdidas constantes, además de existir muchos otros problemas que limitan la operatividad real de esta tecnología. La energía térmica se puede almacenar en determinadas sustancias (como las sales fundidas usadas en las centrales termosolares), también existiendo problemas de pérdidas de calor (y, por tanto, de energía) y de densidad de almacenamiento. Entonces, ¿qué forma de energía resulta tan ventajosa en su almacenamiento que nos hace ser tan exigentes en el modo de almacenar la energía eléctrica?

Se trata de la energía química, que es capaz de ser convertida en térmica en una combustión y que existe en determinados combustibles, como la gasolina. Así, en un litro de gasolina se almacena una energía química de unos de 35 megajulios ($3,5 \cdot 10^7$ julios). Sin embargo, en la batería de plomo-sulfúrico (habitual en los vehículos tradicionales con motores de combustión interna) la energía química acumulada por litro es aproximadamente 150 veces menor. Está claro que los derivados del petróleo nos ponen "el listón muy alto", cuando se trata de almacenar energía en pequeños volúmenes o con pequeño peso.

Sabemos que la presencia de cargas eléctricas genera un campo eléctrico y la circulación de cargas eléctricas (la corriente eléctrica) genera un campo magnético. El hecho de generar "campos" implica una cesión de energía, que está en el campo. Como lógica conclusión, la forma más directa de almacenar energía eléctrica es generar campos eléctricos o campos magnéticos en zonas del espacio que sean recintos confinados que eviten que los campos se propaguen indefinidamente por el espacio. Por supuesto, es importante que los campos no disminuyan su energía con el paso del tiempo, lo que a su vez implica que no cese la presencia de carga eléctrica (caso de campo eléctrico) o la corriente eléctrica (caso de campo magnético) y que los recintos de almacenamiento sean relativamente pequeños, para conseguir buenas "densidades de energía volumétricas" (energía por unidad de volumen) y buenas "densidades de energía gravimétricas" (energía por unidad de masa).

El campo eléctrico se almacena en "condensadores" y el campo magnético en "bobinas". Las personas que trabajamos en electrónica diseñamos circuitos en los que además de dispositivos semiconductores ("transistores" y "diodos") casi siempre existen bastantes condensadores y, en función del tipo de circuito, frecuentemente bobinas. En nuestros circuitos, los

condensadores y las bobinas almacenan energía durante periodos muy cortos de tiempo, frecuentemente entre "nanosegundos" (un nanosegundo es 10^{-9} segundos) y centenas de "milisegundos" (un milisegundo es 10^{-3} segundos). Por el contrario, cuando pensamos en necesidades energéticas ligadas a la actividad humana, los periodos de tiempo a considerar son de días, semanas o meses, ya que los ciclos de aporte de energía desde el Sol directamente (radiación solar incidente en un lugar) o indirectamente (vientos, evaporación y lluvia, corrientes marinas, etc.) sufren estos ritmos de periodicidad. ¿Se pueden construir condensadores o bobinas para estas aplicaciones con densidades energéticas "adecuadas"? Al valorar el alcance de la palabra "adecuada" no olvidemos lo alto que los combustibles fósiles nos han puesto el listón ...

Un condensador es un dispositivo que consiste en dos láminas de material conductor, que se llaman "placas", separadas por una sustancia aislante, que se conoce como "dieléctrico". La energía que almacena un condensador depende de su "capacidad" y de la diferencia de tensión entre sus placas. La capacidad de un condensador es proporcional a la "constante dieléctrica" (permitividad) del dieléctrico y a la superficie de las placas, y es inversamente proporcional a la distancia entre ellas. La disminución de la separación entre placas está limitada porque debe evitarse que llegue a saltar un arco eléctrico entre ellas al superarse la "rigidez dieléctrica" del dieléctrico.

De entre los condensadores utilizados habitualmente en electrónica, los condensadores de dieléctrico electrolítico son los que mayores densidades de energía consiguen. Cálculos sencillos en un condensador como el de la Figura 22 dan como resultado una densidad de energía de 75 julios por litro (recordemos que la gasolina almacena 35 millones de julios por litro), eso sin tener en cuenta que en este tipo de condensadores la carga eléctrica se va perdiendo por imperfecciones en el dieléctrico.

En los últimos años se ha detectado un gran interés en mejorar las densidades energéticas de los condensadores, intentando que la superficie efectiva de las placas sea muy grande, pese a que deban ocupar poco volumen. En este contexto



Figura 22. Condensador electrolítico convencional. Su densidad de energía volumétrica es de 75 julios por litro. La de la gasolina es de 35 millones de julios por litro.

han surgido los "supercondensadores" (o "ultracondensadores"), cuya estructura interna y tipos de materiales usados dista mucho de la simplicidad descrita anteriormente. Con ellos se consigue mejorar la densidad de energía de los condensadores electrolíticos "normales" en varios órdenes de magnitud, dependiendo de su principio interno de funcionamiento. Así, si con los mejores condensadores electrolíticos se llega a almacenar hasta 1.000 julios por kilogramo, con supercondensadores se llega a 14.000 julios por kilogramo, existiendo tecnologías, a mitad de camino entre las de los condensadores y las de las baterías, con las que se llega a 32.000 julios por kilogramo. El supercondensador de la Figura 23 consigue una densidad energética volumétrica de 22.000 julios por litro. Sin embargo, con la gasolina se llega a almacenar ¡43 millones de julios en un kilogramo y 35 millones de julios por litro...! Pese a estos números, la investigación alrededor de la mejora en las prestaciones de los supercondensadores sigue siendo muy importante, no sólo como potenciales acumuladores de energía eléctrica, sino como complemento a otras tecnologías de almacenamiento que presentan menor capacidad de respuesta rápida ante aumentos bruscos del consumo de corriente.

¿Se pueden construir sistemas de almacenamiento eléctrico en base a la creación de campos magnéticos confinados? La respuesta es sí, pero el sistema final presenta graves deficiencias que aún no se han superado. Si construimos una bobina "toroidal", como la mostrada en la Figura 24, conseguiremos que el campo magnético quede, en su mayor parte, confinado en el interior del toroide que definen las espiras de la bobina. Para que ante una circulación de corriente dada por la bobina, el campo magnético sea más intenso, podemos utilizar un núcleo "ferrítico", es decir, de materiales compuestos por hierro u otros materiales que como el hierro pueden proporcionar un camino "más fácil" al campo magnético. Las "ferritas" son un buen ejemplo de estos materiales, poseyendo en su composición elementos como el níquel, el zinc o el manganeso. Sin embargo, aunque las bobinas con núcleos ferríticos se utilizan masivamente en la electrónica de potencia y en la electrónica de comunicaciones, su uso en el almacenamiento masivo de energía eléctrica choca con dos inconvenientes muy importantes.

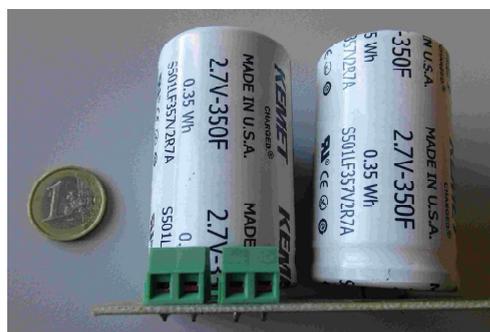


Figura 23. Supercondensadores comerciales. Su densidad de energía volumétrica es de 22.000 julios por litro. Recordemos, que la de la gasolina es de 35.000.000 de julios por litro.



Figura 24. Bobina toroidal con núcleo de "polvo de hierro". Este tipo de dispositivo se utiliza en electrónica de potencia para almacenar energía eléctrica en forma de campo magnético. Sólo es efectiva almacenando energía en tiempos tan cortos como algunas decenas de microsegundos.

En primer lugar, la citada "facilidad" para guiar el campo magnético se mide con la llamada "permeabilidad relativa del material". La permeabilidad relativa de los materiales férricos usados en aplicaciones de ingeniería eléctrica puede llegar a ser tan grande como 80.000 (en el "superpermalloy"), lo que quiere decir que con ese material y a igualdad de corriente por la bobina, almacenaríamos en ella 80.000 veces más energía que si no existiera el núcleo férrico y la bobina toroidal estuviera devanada sobre el aire. Sin embargo, la deseable característica que suponen los altos valores de la permeabilidad relativa de los núcleos férricos desaparece cuando el campo magnético es muy intenso, llegando a la situación que se califica como "saturación" del núcleo férrico. El resultado final es que, para almacenar grandes cantidades de energía en bobinas, éstas deben tener núcleo de aire, no pudiéndose aprovechar las cualidades de los núcleos de material férrico.

El segundo de los problemas es la resistencia de los devanados, que determinan una gran pérdida de la energía que se pretende almacenar. Este problema se soluciona realizando los devanados con "superconductores". Éstos son materiales metálicos (o aleaciones de los mismos) enfriados "suficientemente" como para adquirir un estado en el que no presentan resistencia al paso de la corriente eléctrica. ¿Qué significa en este contexto "suficientemente"? En todos los casos significa temperaturas muy bajas, difíciles de conseguir, y cuya conservación también supone importantes pérdidas de energía en los sistemas de refrigeración. Existen superconductores "de alta temperatura", entendiéndose por tal 90 kelvin (es decir, ¡183 grados centígrados bajo cero!). Si algún día tenemos sustancias superconductoras a las temperaturas a las que se desenvuelve nuestra vida, esta tecnología podrá entrar en consideración para almacenar energía eléctrica de forma masiva, lo que no ocurre con la tecnología actual.

Después de analizar las posibilidades de almacenar energía eléctrica en los campos eléctricos y magnéticos de condensadores y bobinas, y concluir que la tecnología actual nos deja muy lejos de la densidad de energía existente en las sustancias derivadas de los combustibles fósiles, vamos a

abordar el almacenamiento de la energía eléctrica con una transformación energética intermedia.

Éste es el caso de las baterías. En ellas la energía eléctrica se transforma en química cuando se carga la batería y esta energía química se transforma en eléctrica cuando la batería se la transfiere a una carga. La tensión eléctrica en los terminales de la batería no cambia sustancialmente cuando la batería está cargándose, lo que es una ventaja para el uso directo de la batería en múltiples circuitos, pero es un inconveniente para detectar su "estado de carga", es decir, si todavía tiene mucha energía almacenada o si ésta está a punto de agotarse. Esta situación es justo la contraria de la que se da en un condensador, en el que la tensión depende de la carga, invirtiéndose las ventajas y los inconvenientes. El sentido de circulación de la corriente eléctrica cambia en función de si la batería está en proceso de carga (los electrones entran por el terminal negativo de la batería) o si está en proceso de descarga (los electrones salen por el citado terminal la batería).

Para nuestra fortuna, la densidad de energía almacenada en las baterías ha aumentado drásticamente en los últimos 25 años. El progreso en la tecnología de baterías es, seguramente, el reto más importante que tiene la ingeniería eléctrica, ya que en la consecución de baterías de alta densidad de energía (lo más próxima posible a la de los derivados de los combustibles fósiles), con costes razonables y basadas en materiales abundantes en la Tierra (y fáciles de procesar), está la solución para la superación de los problemas medioambientales debidos al CO₂. Con baterías que cumplan estas condiciones, podremos dejar a la radiación solar directa, al viento, a los saltos de agua y a las corrientes marinas la responsabilidad de suministrarnos la energía eléctrica que necesitamos, y con los estándares de calidad a los que estamos acostumbrados.

Sin pretender realizar un estudio exhaustivo de las características de los diferentes tipos de baterías, que está fuera del objetivo de este artículo, es preciso comentar cómo ha ido cambiando la densidad energética de las baterías que todos hemos ido conociendo. En valores medios, las baterías de plomo-ácido presentan densidades de energía de unos 110.000 julios por kilogramo, aumentando este valor a 180.000 julios por kilogramo si la batería es de níquel-cadmio, a 300.000 julios por kilogramo si es de níquel-hidruro metálico y, finalmente, a 420.000 julios por kilogramo en el caso de las de litio-ion. ¡Seguimos lejos de los 43 millones de julios por kilogramo de la gasolina! Sin embargo, la investigación en este campo no se detiene y la esperanza está puesta en las baterías de "litio-aire", con las que se están reportando densidades energéticas 5,4 millones de julios por kilogramo, aunque esta tecnología aún no está madura.

Con las baterías de litio y pensando en que vengan a solucionar el problema del almacenamiento masivo de energía eléctrica, tanto para aplicaciones estáticas (generación fotovoltaica, eólica, undimotriz, etc.) como dinámicas (transporte terrestre, marino e, incluso, aéreo), llega el momento de plantearse la abundancia del litio. El litio es un elemento relativamente abundante, pero en pequeñas cantidades de

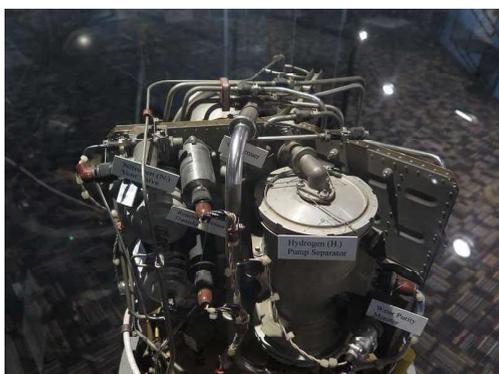


Figura 25. Célula de combustible usada en el Proyecto Apolo, de la NASA. Además de generar energía eléctrica, la célula de combustible también abastecía de agua a la tripulación. Las naves llevaban 3 celdas de combustible de 28 voltios, que alimentaban el Módulo de Comando y el Módulo de Servicio, mientras que el Módulo Lunar usaba baterías. Cada célula de combustible podía generar 1,5 kW.

muchos minerales y rocas. Es decir, está "muy repartido", lo que dificulta su obtención masiva. Está claro que la consolidación de las baterías de litio puede hacer de este elemento metálico un nuevo objeto de deseo de naciones y empresas.

El almacenamiento de energía eléctrica con una etapa intermedia de energía química no sólo se puede realizar en las baterías, sino que también puede realizarse usando el llamado "vector hidrógeno". Se trata de producir por "electrólisis" hidrógeno, es decir, de usar la energía eléctrica para separar los átomos de hidrógeno y de oxígeno presentes en las moléculas de agua, generando moléculas de ambos elementos. Una vez separados estos elementos, se retiene y almacena el hidrógeno para posteriormente usarlo para producir, de nuevo, energía eléctrica. Aunque se podría pensar hipotéticamente en quemar controladamente el hidrógeno en una máquina de combustión interna o externa, que se acoplaría en un eje a un alternador, a día de hoy las soluciones más atractivas (por muchas razones) pasan por transformar la energía química del hidrógeno en energía eléctrica mediante las llamadas "pilas de combustible", también llamadas "celdas" o "células" de combustible (Figura 25). Al contrario que en una batería, en las pilas de combustible hay que introducir el hidrógeno y usar el oxígeno del aire para generar energía eléctrica, es decir no se están reutilizando sus sustancias internas. En este sentido, funciona como una máquina térmica; entra combustible y comburente y sale el producto de la combustión, que ahora es agua. Sin embargo, su funcionamiento interno, desde el punto de vista de las reacciones químicas, es más parecido al de una batería. Los rendimientos de conversión de energía química del hidrógeno en energía eléctrica son mucho mayores (entre el 40 y el 60% en la propia celda de combustible) que los obtenibles con máquinas térmicas y alternadores, además de no tener los problemas inherentes a las conversiones con energía cinética intermedia (rozamientos, desgastes, ruidos, etc.).

En el caso de las celdas de combustible, el cuello de botella de los materiales no son el combustible y el comburente, sino

los elementos que forman parte de los catalizadores de las reacciones químicas, en particular el platino. Aunque existen diversos tipos de celdas de combustible, son las que utilizan platino las que mejores ventajas globales presentan, volviendo a ser el material, en este caso el platino, un problema para el uso masivo de esta tecnología en el almacenamiento de la energía eléctrica.

En el caso del hidrógeno, es también preciso recalcar que su almacenamiento es complejo. Se almacena a 350 bares y existen instalaciones experimentales a 700 bares. Para ponernos en situación de lo que esto significa, pensemos que los neumáticos de nuestros vehículos tienen una presión de entre 2 y 3 bares. Mantener el hidrógeno líquido a presión atmosférica significa mantener los tanques a temperaturas por debajo de ¡253 grados bajo cero! Por otra parte, la densidad de energía (volumétrica) en fase líquida es de 8,4 millones de julios por litro (en la gasolina es 35 millones de julios por litro), por lo que ya se puede considerar altísima. Sin embargo, tales densidades de energía son potencialmente peligrosas, especialmente en el hidrógeno, extremadamente volátil. El accidente del dirigible relleno de hidrógeno "Hindenburg" (Figura 26), el 6 de mayo de 1937, marcó el final del uso de estas aeronaves, impresionando negativamente a toda una generación (el dirigible ardió en tan sólo 32 segundos y causó 35 muertos). También es preciso mencionar el problema de la fragilización que sufren los materiales metálicos que deben trabajar en presencia de este elemento (tanques de almacenamiento, tuberías de distribución, etc.).

Como resumen de todo lo anterior, es posible concluir que la estrategia de almacenamiento de energía eléctrica con la que se consigue un almacenamiento "más denso" es usando la energía química como energía intermedia. En las baterías habituales este almacenamiento no implica el intercambio de sustancias con el exterior, pero la tecnología de litio-aire cambia esta afirmación, ya que necesita intercambio de oxígeno con el entorno, con las ventajas y limitaciones que este hecho acarrea. Esto mismo ocurre en las pilas de combustible basadas en hidrógeno (existen otras con otros combustibles distintos de este gas), en las que el hidrógeno es obtenido a partir del agua mediante electrólisis (y,

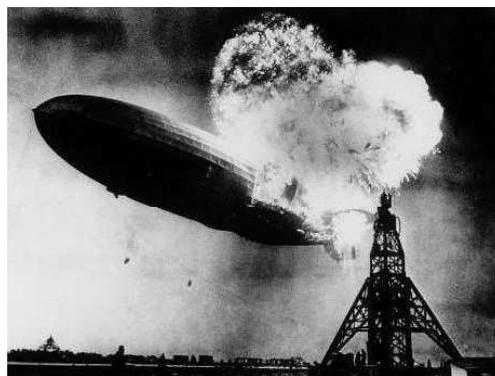


Figura 26. Espectacular fotografía del dirigible "Hindenburg" ardiendo, el 6 de mayo de 1937.

por consiguiente, aportando energía eléctrica), con rendimientos energéticos comprendidos entre el 65 y el 85%. Todas estas formas de almacenamiento de energía eléctrica, utilizando energía química intermedia, presentan limitaciones de coste, seguridad y disponibilidad de materiales, lo que limita, en la práctica, su uso para compensar la variabilidad de la generación fotovoltaica, eólica o undimotriz. Pese a ello, no cabe duda de que la tecnología en este almacenamiento tiene que progresar. Con las posibilidades reales de nuevos embalses muy limitadas, la quema de combustibles fósiles en obligado retroceso y la energía nuclear rechazada socialmente, sólo tenemos dos alternativas:

- Modificar radicalmente nuestra demanda de energía, volviendo a una situación preindustrial, lo que supone un cambio inimaginable.
- Desarrollar y mejorar suficientemente (asumiendo los costes) sistemas de almacenamiento como los descritos, de tal forma que podamos basar la mayor parte de la producción de energía eléctrica en la generación solar, eólica y undimotriz, con la ayuda de la tradicional generación hidráulica ya existente.

V. ¿PARA QUÉ SIRVE LA ENERGÍA ELÉCTRICA?

Creo que cualquier lector puede responder a esta pregunta con una lista larga de aplicaciones, que se resume en que sirve para todo o para casi todo.

Si nos plantemos cuándo la energía eléctrica llegó al domicilio (y a la vida) del ciudadano medio, tenemos que pensar en la bombilla del archiconocido inventor norteamericano Thomas Alva Edison (Figura 27). El uso de la electricidad para producir luz fue el desencadenante de que la corriente eléctrica fuera distribuida por los domicilios. Este hecho perdura en nuestro lenguaje y constantemente se habla del "precio de la luz" cuando se quiere hacer mención al precio de la energía eléctrica. Una vez se realizó "el cableado" de la red de distribución de energía eléctrica y ésta estaba presente en los domicilios, fue fácil producir masivamente electrodomésticos de distintos tipos que facilitaban las tareas domésticas. Si pensamos en la evolución de la proporción del gasto eléctrico de un domicilio que se debe a la iluminación, este porcentaje no ha hecho más que disminuir por dos razones: la ampliación de usos de la

energía eléctrica en los domicilios y la mejora de la transformación de energía eléctrica en energía lumínica. Vamos a detenernos brevemente en este segundo asunto.

Los nacidos en ciudades españolas en la segunda mitad del siglo pasado siempre hemos conocido sistemas de iluminación eléctrica, inicialmente basado en bombillas de filamento incandescente (herederas directas de Edison) y en "tubos fluorescentes", que han ido cambiando según la electrónica y el abaratamiento de los componentes electrónicos progresaba. En los años 80 empezó a utilizarse circuitería electrónica para aplicar a los tubos fluorescentes tensiones de frecuencias muy superiores a los 50 hercios, desembocando en este siglo en las llamadas "bombillas ahorradoras de energía", que son pequeños tubos fluorescentes con circuitería electrónica para ser alimentados a varias decenas de kilohercios. Sin embargo, también en este siglo se ha producido la gran revolución de la iluminación: el uso de los diodos emisores de luz (LEDs) blancos.

Un LED es un dispositivo electrónico que esencialmente es una unión PN, como las de las células fotovoltaicas, pero con una particularidad fundamental: están construidas con un tipo de semiconductor en el que se manifiesta en forma de radiación luminosa la energía que se libera cuando los electrones y los huecos son movidos por un campo eléctrico a un encuentro fatal para ellos, que acaba con su aniquilación (lo que ya hemos definido anteriormente como "recombinación"). La recombinación de electrones y huecos en materiales semiconductores como el silicio y el germanio no genera prácticamente radiación luminosa, pero sí en otros, como el arseniuro de galio o el fosfuro de galio. Pero, ¿de qué color es la luz que emite un LED? Como es sabido, la energía de la luz depende de su longitud de onda, siendo inversamente proporcional a ella. En la producción de luz en un LED, su color va a depender de la energía que separe a los electrones y los huecos en el material antes de su recombinación. Por ejemplo, en el arseniuro de galio esta separación no es tan grande como para producir luz visible, sino que se queda en valores inferiores de energía (mayores de longitud de onda), que corresponden al infrarrojo. Así es la luz que emite el mando a distancia de nuestra televisión. Por el contrario, si el material es, por ejemplo, fosfuro de galio, la luz es visible y de color verde. Combinando arsénico, galio y fósforo en diversas proporciones podemos construir LEDs que suministran luz que va desde el rojo al verde, pasando por el amarillo y el naranja. La comercialización a precios bajos de LEDs que generaran colores "tan energéticos" como el azul y el violeta no se produjo hasta finales del siglo pasado. Todos estos LEDs se usaban para señalización, no para iluminación.

Si los LEDs generan luces de colores distintos en función del material semiconductor usado, ¿cómo se puede generar luz blanca para iluminación? Esto se puede conseguir por composición de colores (justo al contrario de lo que pasa en el arco iris), bien sea utilizando LEDs individuales de varios colores, o por otro procedimiento, que es el usado en los LEDs que a día de hoy configuran los focos luminosos de nuestros domicilios: varios tipos de materiales fluorescentes absorben la

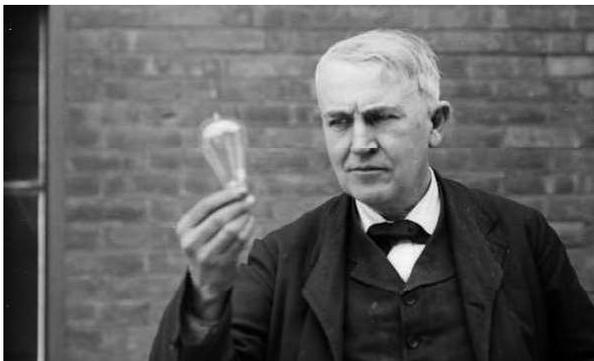


Figura 27. Thomas Alva Edison mostrando una de sus bombillas.

luz de un LED azul y generan luz de distintos colores (amarillo, verde, rojo, etc.), que finalmente es percibida por el ser humano como luz blanca.

Los LEDs son dispositivos electrónicos que se alimentan en corriente continua. Para poder utilizarlos desde la red de distribución de energía eléctrica habitual de 230 voltios y 50 hercios, de nuevo tiene que venir la electrónica de potencia a ayudarnos a cambiar el formato de la energía eléctrica para adaptarla a la que necesita el LED o conjunto de LEDs (Arias *et al.*, 2012). Por esta razón nuestras bombillas LED son algo más que un simple dispositivo. Sin embargo, la capacidad de miniaturización de la electrónica moderna consigue "esconder" la electrónica de potencia en el casquillo de la bombilla, de tal forma que nos pasa desapercibida.

La irrupción de la iluminación LED en sustitución de la incandescente ha supuesto una positiva revolución en el consumo de electricidad para generación de luz. Las cifras son elocuentes: pese a la circuitería electrónica interna, una bombilla LED moderna genera la misma intensidad luminosa que una incandescente, pero consumiendo una potencia 7 veces menor. Se entiende fácilmente la decreciente importancia de la luz en la "factura de la luz".

El uso de la energía eléctrica para generar calor fue el siguiente paso en la generalización de su uso en el hogar. El llamado "efecto Joule" (en honor de su descubridor, el físico inglés James Prescott Joule, cuyo apellido da nombre a la unidad de trabajo y energía, el julio) es la base de esta aplicación, que permite realizar, de manera muy sencilla, estufas y planchas.

Por otra parte, el desarrollo de motores para transformar energía eléctrica en energía mecánica data de la primera mitad del siglo XIX, contando con las importantísimas aportaciones del alemán Moritz von Jacobi y, como se comentó anteriormente, del belga Zénobe Gramme. Jacobi construyó un motor eléctrico



Figura 29. Réplica de la locomotora construida por la compañía "Siemens & Halske" en 1879, conservada en el Museo de la Técnica de Berlín.

operativo en 1834, con una potencia de 15 vatios. En 1838 diseñó y construyó un barco con tracción eléctrica; en la noticia de la Figura 28 sobre un barco eléctrico en el Támesis, aún se hace mención al barco de Jacobi. Los motores eléctricos evolucionaron rápidamente en la segunda mitad del siglo XIX, de tal forma que en 1879 la empresa Siemens (fundada por el alemán Werner von Siemens) ya había desarrollado una locomotora eléctrica operativa (Figura 29).

Aunque también se desarrollaron automóviles con motores eléctricos al comienzo de la segunda mitad del siglo XIX, las fuentes de energía eléctrica existente en aquel momento eran rudimentarias "pilas", es decir, acumuladores electroquímicos de energía no recargables. Un hito hacia la posibilidad práctica del uso del vehículo eléctrico fue la invención y posterior mejora de la primera batería, es decir el primer acumulador electroquímico de energía eléctrica, llevadas a cabo por los franceses Gaston Planté y Camille Alphonse Faure. Contando con "buenas baterías" (desde el punto de vista de finales del siglo XIX), se diseñó el Egger-Lohner en 1898, el primer automóvil eléctrico, que se presentó en la exposición universal de París de 1900. Era un diseño del austriaco Ferdinand Porsche. Durante los primeros años del siglo XX, los coches eléctricos y los coches con motor de combustión interna convivieron, como cromañones y neandertales. De hecho, el primer automóvil en superar los 100 km/h fue el "La Jamais Contente" (Figura 30), que lo consiguió a finales del siglo XIX (concretamente en 1899) y que estaba accionado eléctricamente. Finalmente, la densidad energética de la gasolina decantó a su favor durante un siglo una balanza que, ahora, va camino de revertir su inclinación.

En el camino hacia el uso masivo de motores eléctricos en la industria, el desarrollo de las distribuciones "trifásicas" fue un hito muy importante. La corriente eléctrica alterna, que encontramos en los enchufes de nuestros domicilios, es "monofásica", es decir, de una única "fase". Esto significa que su valor de tensión varía senoidalmente en función del tiempo. En estas condiciones, la potencia eléctrica que nos llega cuando

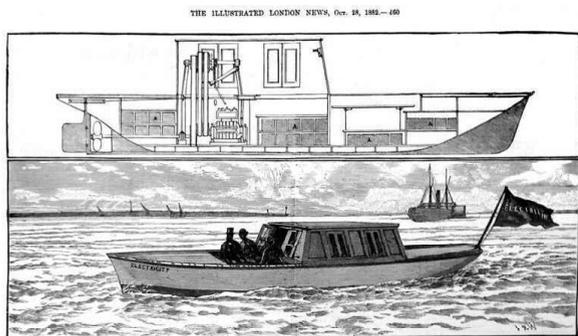


Figura 28. Noticia aparecida el 28 de octubre de 1882 en la publicación "Illustrated London News" sobre un barco eléctrico que había navegado por el Támesis un mes antes. En la noticia se hace mención al primer barco propulsado eléctricamente, construido 43 años antes por Jacobi, calificado como "ruso" en la noticia.



Figura 30. Foto histórica de "La Jamais Contente", primer automóvil en superar los 100 km/h. Se trataba de un vehículo eléctrico, construido y conducido por el belga Camille Jenatzy, apodado "El Diablo Rojo", por su barba pelirroja.

conectamos una carga está también cambiando en función del tiempo (si lo que conectamos se comporta como una resistencia eléctrica, entonces la evolución de la potencia es del tipo "senoidal al cuadrado"). Al estar cambiando constantemente la potencia transmitida, el sistema de transporte de la energía eléctrica no trabaja en las condiciones óptimas. Por el contrario, si el transporte de energía eléctrica se produce en tres conductores eléctricos con idénticos valores senoidales de tensiones y de corrientes, pero con desfases entre ellos de 120° (configurando lo que se llama un "sistema trifásico equilibrado") entonces la potencia transmitida no cambia en función del tiempo, permitiendo la optimización del sistema. El desarrollo de los sistemas trifásicos durante la parte final del siglo XIX está unida a los nombres del ruso Mikhail Dolivo-Dobrovolsky, del serbio Nikola Tesla, del italiano Galileo Ferraris y del sueco Jonas Wenström. Con generadores (alternadores),

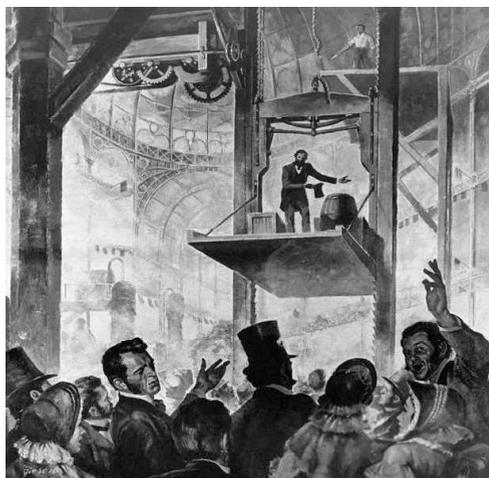


Figura 31. Ilustración que recrea la demostración sobre la seguridad de su sistema ascensor que realizó Elisha Otis en el "Crystal Palace" de Nueva York en 1853. El primer ascensor eléctrico fue construido en 1889 por la compañía Otis, ya fallecido Elisha Otis.

transformadores y motores trifásicos la energía eléctrica se hizo omnipresente en el mundo industrial.

La llegada del motor eléctrico a los edificios de apartamentos se produce con el ascensor. El primer ascensor con motor eléctrico fue construido en 1889 por la compañía Otis, fundada por un pionero en el mundo del ascensor, el norteamericano Elisha Graves Otis (Figura 31), que nunca llegó a ver un ascensor eléctrico, pues había muerto tempranamente en 1861. El ascensor eléctrico hizo posible la revolución de la arquitectura, ya que supuso la proliferación de los rascacielos.

En los domicilios tenemos enchufes de corriente alterna monofásica, a los que se pueden conectar motores eléctricos también monofásicos. Estos motores son cruciales para el funcionamiento de muchos de los electrodomésticos de los que disfrutamos (lavadoras, lavavajillas, etc.). De entre ellos, hay uno que resulta imprescindible para la vida de muchos de nosotros: el refrigerador. En los refrigeradores el frío se genera mediante una máquina térmica que describe el mismo proceso que se describe en una turbina de vapor, pero cambiando las funciones del salto térmico y de aporte de energía mecánica. En una turbina, se calienta el fluido hasta que forma vapor a alta presión, cuya expansión genera energía mecánica aprovechable. En el interior de un refrigerador existe un fluido en fase líquida que se fuerza mecánicamente (con aporte de la energía mecánica que le da un compresor accionado por un motor eléctrico) a expandirse después de experimentar un cambio brusco de presión (en la llamada "válvula de expansión"), de tal forma que a la nueva presión pasa a fase gaseosa, tomando del ambiente el calor latente de vaporización y, por tanto, enfriándolo. El resultado final es una máquina que convierte energía mecánica en salto térmico. Esta máquina sería impensable en nuestros domicilios accionada desde otra energía distinta de la eléctrica.

Como resumen de todo lo dicho, con energía eléctrica podemos calentarnos, iluminarnos, mover objetos (y movernos a nosotros mismos) y hasta enfriarnos. Con la energía eléctrica hacemos todo esto cómoda y "limpiamente". También es cierto que podemos hacerlo con menos comodidad (y, en general, con más suciedad) utilizando otras formas de energía, como quemando combustibles. Sin embargo, hay algo que sólo con electricidad podemos realizar: comunicarnos a largas distancias, realizar cálculos rápidamente y procesar grandes volúmenes de información.

VI. SOLAMENTE CON ELECTRICIDAD

En un tiempo como en el que vivimos, en el que el mundo está tan extraordinariamente comunicado, nos es difícil comprender el nivel de comunicación que existía hace tan solo 250 años. Si un barco partía a otro continente a través de alguno de los océanos, la suerte de los viajeros no se conocería hasta muchas semanas o meses después, cuando otro barco realizara el mismo viaje, pero en sentido inverso. Si una nación enemiga invadía un territorio, sólo se sabría lo ocurrido cuando un jinete informara de lo ocurrido, transcurrido el tiempo empleado en recorrer la distancia de separación a "uña de caballo". Es fácil imaginar, por tanto, la importancia que desde el punto de vista

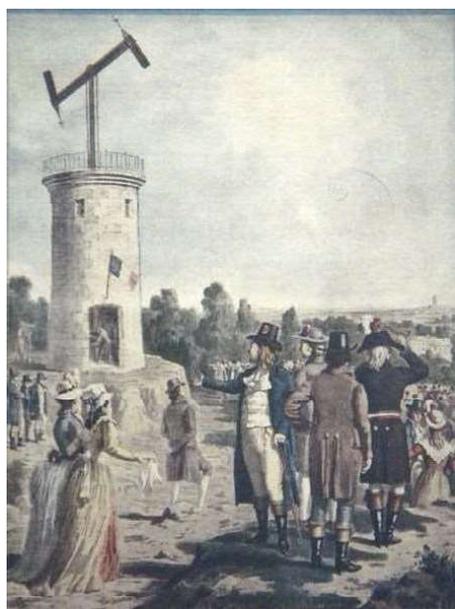


Figura 32. Ilustración que recrea una torre del sistema telegráfico óptico desarrollado por Claude Chappe a finales del siglo XVIII.

militar representaba tener la posibilidad de transmitir mensajes lo más rápido posible.

En la historia, los ejemplos de sistemas de transmisión de información a distancia a mayor velocidad que la propia del mero desplazamiento humano son muy numerosos. Desde las señales de humo, hasta los códigos con banderas o el "telégrafo óptico" (Figura 32) del francés Claude Chappe, desarrollado en los tiempos de la Revolución Francesa y que llegó a estar operativo en Francia conectando 29 ciudades, con más de 500 estaciones de repetición. Es evidente que la efectividad de este sistema de transmisión, como la de otros basados en la visión,



Figura 33. Francisco Salvá según el pintor José María Marqués y García. Este cuadro fue pintado 72 años después de la muerte de Francisco Salvá.

estaba directamente ligado a la visibilidad, además de requerir manipulación humana en cada estación de repetición.

Los campos electromagnéticos se propagan en el vacío a la velocidad de la luz. Una perturbación eléctrica en un conductor que esté en el aire se propaga a esa velocidad, de noche y de día y no requiere manipulación humana alguna. Incluso antes de que Volta fuera capaz de mantener una corriente eléctrica constante, sólo con electricidad obtenida por frotamiento, el suizo Georges Lesage experimentó un sistema telegráfico. Ya con corriente eléctrica, el barcelonés Francisco Salvá y Campillo (Figura 33) realizó un telégrafo basado en la aparición de burbujas en tubos en los que se introducían electrodos y agua acidulada. Salvá había experimentado previamente telégrafos basados en electricidad por frotamiento y los avances de Galvani y Volta le llevaron a plantear un telégrafo basado en la corriente eléctrica, el primero que se planteó en la historia. El telégrafo "electroquímico" de Salvá se presentó en 1804, cuando aún no se conocía la creación de campos magnéticos por la corriente eléctrica, que fue descubierto en 1819 por Ørsted. En cuanto se supo que la circulación de corriente eléctrica podía modificar la posición de la aguja de una brújula, se pensó en que este sistema podría servir para transmitir información a distancia. El camino hacia el telégrafo eléctrico acababa de comenzar. En este camino, un hito importante es la invención del electroimán por el norteamericano William Sturgeon y su perfeccionamiento por el también norteamericano Joseph Henry. En dicho camino realizaron aportaciones muchos investigadores, entre ellos Ampère, el ruso Pavel Schilling y hasta el famosísimo matemático, físico y astrónomo alemán Carl Friedrich Gauss, que, con la ayuda de su compatriota Wilhelm Eduard Weber, construyó una línea telegráfica que comunicaba la Universidad de Gotinga con el observatorio astronómico. La forma de relacionar las letras y los números a transmitir con las señales eléctricas manejadas también fue evolucionando, con importantes aportaciones de Gauss y, sobre todo, del pintor



Figura 34. Telégrafo Morse (1837), que forma parte de la colección histórica de "France Télécome" y que está expuesto en la Ciudad de las Telecomunicaciones, en Pleumeur-Bodou (Francia).

norteamericano Samuel Morse, que junto a su compatriota Alfred Vail contribuyeron al desarrollo del llamado "código morse" además de construir un telégrafo realmente operativo (Figura 34). El telégrafo de Morse conectó ciudades a través del tendido de cables sujetos por postes y, a partir de la década de 1850, se experimentan los primeros cables submarinos para comunicar Gran Bretaña y Francia, inicialmente, y Gran Bretaña y Estados Unidos, después (Guarnieri, 2014a). Pese a muchos problemas técnicos y la rotura del cable en varias ocasiones, por fin en 1865 se consiguió fabricar un cable suficientemente resistente. Por primera vez, el ser humano podía sentirse informado "casi instantáneamente" de lo que estaba pasando a miles de kilómetros.

Al telégrafo (escribir a distancia) le siguió el teléfono (hablar a distancia). Como en el caso de la transmisión a distancia de signos, que codificaban letras y mensajes, la transmisión a distancia de la voz humana basándose en señales eléctricas fue objeto de muchos estudios, entre ellos, los del norteamericano Charles Grafton Page y el francés Charles Bourseul. Era necesario realizar un dispositivo capaz de transformar las vibraciones mecánicas en el aire en señales eléctricas (el micrófono) y de después realizar la transformación inversa (auricular). La consecución final de un teléfono operativo está relacionada con buenas ideas e ideas fallidas, con casualidades y con controversias legales, en las aparecen los nombres del italiano Antonio Meucci (Figura 35), del alemán Johann Philipp Reis, del norteamericano Elisha Gray y del también norteamericano (de origen escocés) Alexander Graham Bell. Animo a los lectores a seguir la pista de las pugnas entre Meucci, Gray y Bell por la invención del teléfono.

El telégrafo y el teléfono de finales del siglo XIX permitían la comunicación "alámbrica", es decir, usando un conductor por el que circulaba la corriente eléctrica con la información a



Figura 35. Fotografía de Antonio Meucci. ¿Se le puede atribuir el invento del teléfono con mayor justicia que a Alexander Graham Bell?

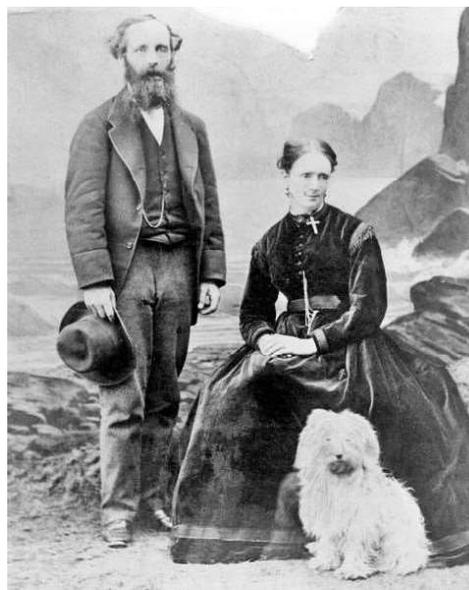


Figura 36. Fotografía de James Clerk Maxwell, su esposa Katherine y su perro. Maxwell frecuentemente explicaba sus desarrollos teóricos a su fiel terrier irlandés, Toby.

transmitir. Esto permitía comunicaciones punto a punto entre lugares conectados "alámbricamente", excluyendo, por tanto, las comunicaciones con los barcos. Sin embargo, en la segunda mitad del citado siglo se estaban estableciendo las bases para que a finales del mismo se llegara a la "telegrafía sin hilos", comienzo de las comunicaciones por radio.

El escocés James Clerk Maxwell (Figura 36) es, para la electricidad, tan importante como el inglés Isaac Newton para la mecánica. Maxwell realizó una síntesis genial de los descubrimientos previos sobre electricidad y magnetismo (como los de Ampère y Faraday), desentrañando de forma definitiva las relaciones entre ambos fenómenos físicos (Maxwell, 1892). Las relaciones entre las magnitudes eléctricas y magnéticas que aparecen en la citada síntesis (las famosas 4 ecuaciones de Maxwell) predicen que tienen que existir "ondas electromagnéticas". Maxwell no pudo demostrar su existencia empíricamente, aunque sí predijo hasta su velocidad de propagación, que según sus cálculos era "sospechosamente" parecida a la que se había medido para la luz ¿Era la luz una radiación electromagnética? Él pensó que sí, y acertó.

La existencia de ondas electromagnéticas fue demostrada por el alemán Heinrich Rudolf Hertz en 1889, 20 años después de que Maxwell planteara su existencia. Una vez conocido cómo generar y detectar ondas electromagnéticas, se abrió el camino para conseguir la telegrafía sin hilos, primera versión de las comunicaciones por radio. En este camino vuelve a haber muchas personas y algunas controversias, unidas a los nombres del italiano Guglielmo Marconi (Figura 37) y de Tesla. Al igual que Hertz, Marconi generaba ondas electromagnéticas con la ayuda del llamado "carrete de Ruhmkorff" (artilugio muy



Figura 37. Fotografía de Guglielmo Marconi tomada en 1901. A la izquierda se aprecia el receptor telegráfico, con los mecanismos propios del telegrafo de Morse para dejar el mensaje impreso en una cinta de papel. A la derecha se aprecia un carrete de Ruhmkorff, que es en cargado de generar las descargas eléctricas (chispas) propias de este tipo de transmisores.

importante no sólo para este fin, sino también en la generación de los primeros rayos X), conectándolo a la "antena" desarrollada por el ruso Aleksandr Stepánovich Popov para detectar las descargas eléctricas de las tormentas. En el sistema receptor, además de la antena de Popov, Marconi usaba el "cohesor de limaduras de hierro", desarrollado por el francés Édouard Branly y mejorado por el inglés Oliver Joseph Lodge. Marconi tuvo la genialidad de reunir conocimientos previos para construir transmisores de telegrafía sin hilos, que fue mejorando hasta conseguir una transmisión entre Cornualles y Terranova (Guarnieri, 2014a) en 1901, sólo 6 años después de sus primeros experimentos. Aunque existe una gran polémica sobre si la invención de las comunicaciones por radio se debe atribuir a Marconi, a Popov, a Lodge o a Tesla, lo cierto es que Marconi consiguió fundar una empresa que construyó muchísimos transmisores de telegrafía sin hilos, lo que contribuyó a posibilitar el auxilio en muchos naufragios.

Si en la comunicación alámbrica primero se desarrolló la telegrafía y después la telefonía, era lógico que una vez establecida la telegrafía sin hilos se llegara a la telefonía sin hilos. El canadiense Reginald Fessenden fue el primero en conseguirlo a finales de 1900, realizando la primera transmisión por radio de voz humana, aunque con una pésima calidad.

Las mejoras en transmisores y receptores vinieron de la mano de los "tubos termoiónicos" (Guarnieri, 2012) (también llamados "válvulas termoiónicas" y "tubos de vacío"). El efecto termoiónico consiste en la emisión de electrones que se produce en determinados metales cuando están muy calientes en el vacío, justamente la situación que se produce en una bombilla incandescente. Precisamente fue Edison el que observó este fenómeno en 1880, aunque el fenómeno realmente había sido reportado 7 años antes por otros investigadores. Edison especuló sobre algunas posibles aplicaciones de este fenómeno, ya que se dio cuenta de que si se colocaba cerca del filamento un metal cargado positivamente con relación al filamento se establecía corriente eléctrica y, por el contrario, no se establecía si el metal

estaba cargado negativamente. Sin embargo, la aplicación realmente importante de este fenómeno vino de la mano del inglés John Ambrose Fleming, quien propuso el uso de un dispositivo basado en este fenómeno en los receptores de telegrafía sin hilos. El dispositivo fue denominado "diodo" (Figura 38.a); hoy lo llamamos diodo termoiónico o "diodo de vacío", para distinguirlo del diodo basado en materiales semiconductores, que es el que se usa para multitud de aplicaciones en electrónica. El "hijo" ha acabado siendo más importante que el "padre". La irrupción del diodo marca el comienzo de la electrónica, que ha revolucionado la vida de los seres humanos de los siglos XX y XXI.

Un diodo es un elemento "rectificador" de la corriente alterna, es decir, un dispositivo que sólo permite circulación de corriente en un sentido, por lo que es pieza fundamental en las transformaciones de corriente alterna a corriente continua. No olvidemos que, aunque la energía eléctrica se genera y transporta con más facilidad en forma de corriente alterna, se almacena (siempre) y consume (frecuentemente) en "formato" de corriente continua.

Los diodos termoiónicos no nacieron, esencialmente, para hacer conversión del "formato" de la energía eléctrica, sino para ayudar a que los receptores de telegrafía sin hilos (lo que era la radio de entonces) pudieran detectar las señales con mayor facilidad y sensibilidad. Sin embargo, pronto llegó una modificación crucial del diodo termoiónico: la inclusión de un terminal eléctrico adicional que, en forma de pequeña rejilla, estaba interpuesta entre el filamento y la placa de metal cargada positivamente (que recibía los nombres de "ánodo" o, simplemente, "placa"). Este dispositivo estaba formado, por tanto, por 4 terminales con 3 funciones: 2 terminales formaban el "filamento" que se calentaba hasta la incandescencia y configuraba el llamado "cátodo" emisor de electrones, el "ánodo" o "placa" que era el receptor de los electrones y la "rejilla" interpuesta entre los terminales anteriores.

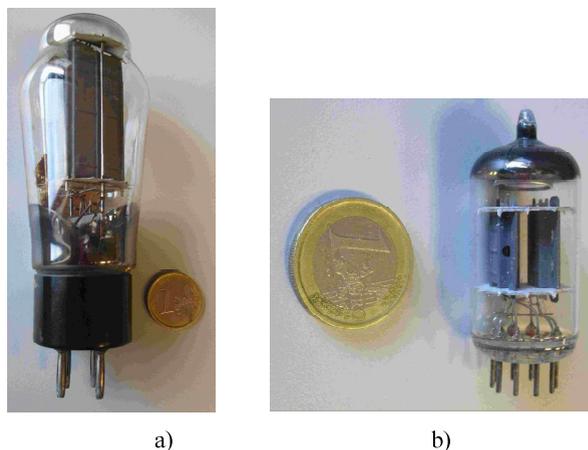


Figura 38. Válvulas termoiónicas. a): Tubo termoiónico AZ50, que incluye 2 diodos con el cátodo común a ambos y que apareció en 1939. b): Tubo termoiónico ECC82, que incluye 2 triodos independientes y que apareció en 1951.

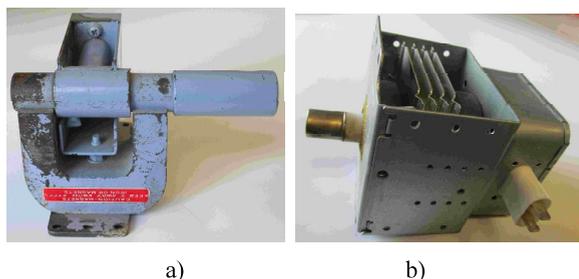


Figura 39. El último vestigio de la era termoiónica de la electrónica es el magnetrón. a): Magnetón 2J42 usado en RADAR pulsado. b): Magnetrón de horno de microondas doméstico.

Contabilizando cátodo, ánodo y rejilla tenemos tres electrodos, lo que propició que a este dispositivo se le atribuyera el nombre de "triodo" (Figura 38.b). El dispositivo fue inventado por el norteamericano Lee De Forest, quien inicialmente lo denominó "audiión". En el triodo de De Forest las tensiones eléctricas entre la rejilla y el cátodo regulan el paso de corriente entre cátodo y ánodo, y lo hacen de tal manera que con una circuitería adecuada se puede conseguir que las señales eléctricas introducidas entre rejilla y cátodo aparezcan aumentadas ("amplificadas") entre cátodo y ánodo. Por tanto, el triodo abre la posibilidad de realizar amplificación de las señales, tanto en receptores como en transmisores. Los transmisores basados en el carrete de Ruhmkorff primero y en alternadores de alta frecuencia después (así era el transmisor de radio del famoso "Titanic"), son abandonados y sustituidos por circuitos electrónicos basados en triodos. Lo mismo ocurre en los receptores, donde los circuitos con triodos consiguen aumentar muchísimo la sensibilidad de los receptores, lo que posibilita transmitir con menores potencias y a mayor distancia.

Con triodos y sus modificaciones posteriores ("tetrodos" y "pentodos") se populariza la radiodifusión y la electrónica crece y se desarrolla para las comunicaciones civiles y militares. Los receptores de radiodifusión empiezan a formar parte del mobiliario de las familias y así entra la electrónica "termoiónica" en los hogares. Otro dispositivo termoiónico, el "magnetrón" (Figura 39), hizo posible el "radar", que jugó un papel tan importante en la Segunda Guerra Mundial. El magnetrón es el único dispositivo termoiónico que ha conseguido sobrevivir a la revolución de los semiconductores, desatada por la invención del "transistor" en 1947. Muchos de nosotros hemos convivido con los "tubos de rayos catódicos" en televisores y pantallas de ordenador, pero este dispositivo termoiónico ya ha desaparecido y sólo perviven con nosotros los magnetrones de nuestros hornos de microondas (Figura 39.b).

La mejora de las características del radar implicaba la subida de su frecuencia de trabajo. Para la detección eficiente de ondas electromagnéticas de frecuencias cada vez mayores, se empezó a investigar la posibilidad de realizar diodos no termoiónicos, basados en materiales "de estado sólido", en contraposición con los dispositivos termoiónicos, en los que los electrones circulaban en el vacío. Como en otras muchas ocasiones en la historia de la ciencia y de la técnica, la observación de

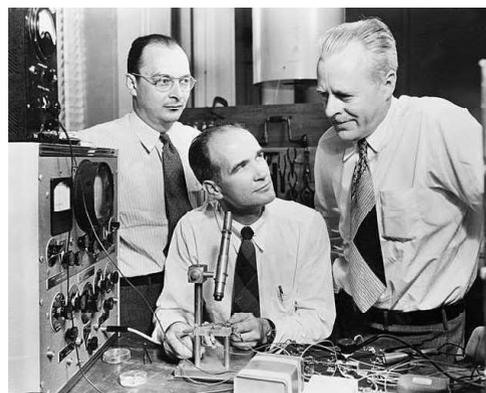


Figura 40. Los inventores del transistor (de izquierda a derecha): John Bardeen, William Shockley y Walter Brattain. Esta fotografía fue tomada en 1948 en los Laboratorios Bell. La relación entre ellos no siempre fue fácil.

fenómenos no previstos condujo a que los norteamericanos John Bardeen, Walter Houser Brattain y William Shockley (Figura 40), de los Laboratorios Bell, desarrollaran un primer transistor, el llamado "de puntas de contacto", a finales de 1947 (Bardeen y Brattain, 1948). Este primer transistor fue rápidamente sustituido por el llamado "transistor bipolar", desarrollado por Shockley. El mismo Shockley patentó en 1951 el "transistor de efecto de campo", aunque ya existía una patente de 1925 del austro-húngaro Julius Edgar Lilienfeld sobre un antecesor de este transistor. La tecnología de la época de Lilienfeld no permitió su fabricación, mientras que la de 1951 sí permitió que un año después se construyera. Prácticamente en paralelo con los desarrollos norteamericanos, los científicos alemanes Herbert Mataré y Heinrich Welker, que trabajaban en Francia para una filial de la empresa norteamericana Westinghouse (*Compagnie des Freins et Signaux*), desarrollaron un transistor

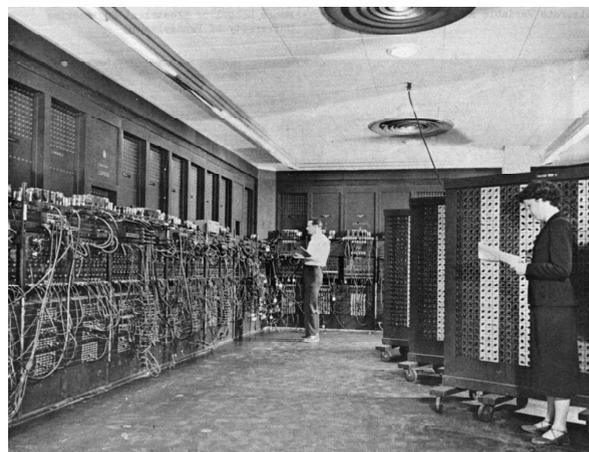


Figura 41. Fotografía tomada en el interior del "Electronic Numerical Integrator and Computer", ENIAC, el primer computador digital, construido con válvulas termoiónicas y con relés. En el primer plano de la fotografía aparece Betty Snyder Holberton, una de las 6 programadoras del ENIAC.

"europeo", al que llamaron "transistrón". El transistrón sucumbió por falta de inversión, pese a sus buenos resultados (Riordan, 2005).

Antes de la existencia del transistor, un ordenador "digital", se podía construir con triodos, pero el resultado era tremendamente voluminoso. El mítico "ENIAC" (Figura 41) fue un ejemplo de ello, ocupando una superficie de 167 m² y pesando 27 toneladas. Además, consumía 160 kW de potencia eléctrica. La llegada primero del transistor y después de los circuitos integrados repletos de minúsculos transistores fue disminuyendo el tamaño, abaratando el coste y aumentando la velocidad de procesamiento de datos hasta llegar a nuestros tiempos. La electrónica termoiónica nació para mejorar las comunicaciones inalámbricas (y alámbricas), pero en la segunda mitad del siglo XX se transformó en la electrónica de los semiconductores, impulsando aún más las comunicaciones y abriendo el camino a la computación electrónica. No es concebible, a día de hoy, otra manera realista y rentable de realizar los procesos de cálculo, procesado y almacenamiento de datos que realiza un ordenador, con otra máquina distinta de un ordenador electrónico, que por propia definición utiliza circuitos eléctricos. La electricidad, de nuevo, resulta imprescindible para la realización de máquinas que ejecutan tareas que se han vuelto imprescindibles en la vida cotidiana del ser humano.

Sin electricidad no son posibles ni las comunicaciones a largas distancias (y casi instantáneas), ni el almacenamiento de enormes cantidades de datos en pocos centímetros cúbicos, ni la realización de cientos de billones de operaciones en un segundo.

VII. CONCLUSIÓN: ELECTRÓNICA DE POTENCIA PARA QUE SIGAMOS TENIENDO ENERGÍA ELÉCTRICA

La energía eléctrica es imprescindible en la vida de los seres humanos del siglo XXI. Con ella realizamos funciones y tareas como calentar, enfriar, mover e iluminar, que podríamos realizar con otras formas de energía, pero que con electricidad hacemos de una manera más simple, rápida y limpia. También realizamos otras funciones y tareas que no podemos pensar cómo hacer sin el concurso de la electricidad, como comunicarnos a largas distancias o procesar y almacenar grandes cantidades de información y de datos.

Durante el siglo XX hemos desarrollado sistemas "cómodos" de obtención de energía eléctrica, en gran medida basados en la quema de las sustancias que almacenan la energía que nos donó el Sol hace millones de años, y durante también millones de años. Hemos estado pensando, durante demasiado tiempo, que el consumo realizado en un par de cientos de años del "ahorro energético fosilizado" que la Tierra había realizado durante millones de años (en el caso del carbón, 60 millones de años en el Periodo Carbonífero) no iba a tener consecuencias graves y que el único problema surgiría con su agotamiento. El hallazgo continuo de reservas de carbón, gas y petróleo, así como la mejora de las técnicas de su extracción, no planteaban la necesidad de renunciar a estas sustancias, cuya densidad energética es, además, enorme.

Sin embargo, el problema ha resultado ser que devolver a la atmósfera en forma de CO₂ el carbono escondido en la corteza

terrestre (procedente de seres que vivieron hace millones de años) altera gravemente la temperatura de nuestro planeta, con resultados catastróficos para los seres vivos y, especialmente, para los seres humanos.

Afortunadamente, la energía del Sol sigue llegando al planeta y, a menos que ocurra una catástrofe de magnitud cósmica, seguirá haciéndolo durante varios miles de millones de años. La energía que nos llega del Sol podemos utilizarla directamente o indirectamente, en este último caso aprovechando los movimientos de fluidos que genera en la Tierra. Sabemos hacerlo desde hace decenas de años (más de un siglo en algunos casos), pero chocamos con el hecho de que la presencia de esta energía puede ser muy variable. Sin ninguna duda, nuestro futuro energético pasa por recoger esta energía, siempre que esté disponible, y almacenarla eficientemente, para poder disponer de ella en los momentos precisos. Los cambios en el formato de esta energía eléctrica (valores de su tensión y frecuencia) son indispensables, ya que los formatos de generación, de almacenamiento y de consumo son normalmente distintos.

Afortunadamente, en la segunda mitad del siglo XX hemos sido capaces de desarrollar la electrónica para resolver muchos problemas en muchos campos (comunicaciones, computación, industria, ocio, etc.) y, también, para conseguir construir circuitos eficientes en la consecución del cambio del formato de la energía eléctrica. La parte de la electrónica que se encarga de estudiar los componentes y los circuitos capaces de realizar eficientemente estos cambios de formato se llama electrónica de potencia. En el presente y en el futuro cercano vamos a tener que diseñar y construir muchísimos "convertidores electrónicos de potencia". Afortunadamente, en la Universidad de Oviedo existe una larga tradición en investigación y docencia en esta materia, que resulta crucial para conseguir mantener la calidad actual tanto en el suministro de la energía eléctrica como en su uso en aplicaciones como son el transporte terrestre, marítimo y aéreo, hasta ahora dominadas por los motores de combustión.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este artículo agradece a Gonzalo Morís Menéndez la autorización para el uso de la imagen de la Figura 2 y a Flickr y Wikimedia Commons la posibilidad de utilizar imágenes de sus depósitos de fotografías. En particular, en este artículo se han obtenido de Flickr las fotografías de las figuras 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 20, 25, 27, 28 y 29, y de Wikimedia Commons las de las figuras 4, 5, 19, 21, 26, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 40 y 41.

REFERENCIAS

- Arias, M., Vázquez, A. and Sebastián, J. (2012). An overview of the AC-DC and DC-DC converters for LED lighting applications. *Automatika* 53 (2): 156-172.
- Bardeen, J. and Brattain, W.H. (1948). *The Transistor, A Semiconductor Triode.* *Phys. Rev.* 74 (2): 230-231.
- Guarnieri, M. (2012). The age of vacuum tubes: Early devices and the rise of radio communications. *IEEE Ind. Elect. Mag.* 6 (1): 41-43.
- Guarnieri, M. (2013). Who invented the transformer? *IEEE Ind. Elect. Mag.* 7 (4): 56-59.
- Guarnieri, M. (2014a). The Conquest of the Atlantic. *IEEE Ind. Elect. Mag.* 8 (1): 53-67.

- Guarnieri, M. (2014b). The big jump from the legs of a frog. *IEEE Ind. Elect. Mag.* 8 (4): 59-61, 69.
- Maxwell, J.C. (1892). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, Oxford.
- Morís Menéndez, G. (2001). *Ingenios Hidráulicos Históricos: Molinos, Batanes y Ferrerías*. Editado por el Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Asturias y León.
- Ørsted, H.C. (1820). *Experimenta Circa Effectum Conflictus Electrici in Acum Magneticam*. Impreso privadamente por el autor y enviado a diversas
- Riordan, M. (2005). How Europe missed the transistor. *IEEE Spectrum* 42 (11): 46-51.

que pueda seguir iluminando el sistema solar, y la Tierra en particular, durante algunos miles de millones de años más.

Algunos fenómenos de naturaleza electromagnética se han observado también siempre. Fenómenos naturales como las tormentas han sido objeto de observación continua y de estudio, y más recientemente, en los dos últimos siglos, se han comprendido los procesos electromagnéticos y se han aplicado de innumerables modos a la vida diaria. En 1861 y 1862 J.C. Maxwell (ver Maxwell, 1873) estableció un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen cómo el campo eléctrico y el campo magnético aparecen a partir de cargas y corrientes eléctricas y cómo dichos campos evolucionan con el tiempo. Una de las predicciones fundamentales de estas ecuaciones es la existencia de ondas electromagnéticas que transportan energía a medida que se propagan. Se puede decir que estas ecuaciones resumen décadas de observaciones experimentales, y leyes muy bien conocidas como las de Gauss, Ampère o Faraday. Se trata, además, de la primera vez que se unifican dos tipos de interacciones, la eléctrica y la magnética en una sola: la fuerza electromagnética. La unificación de las fuerzas, es decir, el que para algún valor de la energía las interacciones tengan la misma intensidad es uno de los caminos que guía muchos modelos de Física que intentan explicar algunos fenómenos que el ME, tal como está planteado en la actualidad, y a pesar de ser la teoría más predictiva jamás desarrollada en Física, no puede explicar.

II. LA MECÁNICA CUÁNTICA Y LA RELATIVIDAD ESPECIAL

Existen dos ingredientes fundamentales para describir las interacciones fundamentales mencionadas, así como el comportamiento de las partículas elementales. Ellos son, la Mecánica Cuántica y la Relatividad. Ambas fueron desarrolladas en el final del siglo XIX y en la primera mitad del XX, y el conjunto ha ido evolucionando hacia las teorías cuánticas de campos, cuyo mejor representante es precisamente el Modelo Estándar.

La Mecánica Cuántica fue iniciada por Max Planck para tratar de explicar la radiación del cuerpo negro, y en la explicación de este problema aparece la constante que lleva su nombre, la constante de Planck, h , cuyo valor en el sistema internacional es:

$$h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Esta constante es necesaria para describir aquellos procesos físicos en que la magnitud de acción que caracterice dicho proceso, definida como el producto de una energía por un tiempo característicos del proceso, tiene un valor cercano a h . Cuando en un proceso dado, esa acción es mucho mayor que h , la

Mecánica Clásica, newtoniana, describe dichos procesos adecuadamente.

La Relatividad especial describe adecuadamente el comportamiento de los sistemas físicos y sus propiedades cuando se observan desde distintos sistemas de referencia, también llamados sistemas inerciales, que se mueven uno respecto a otro con una cierta velocidad relativa uniforme. Las leyes de la Naturaleza han de ser las mismas en dichos sistemas de referencia, lo que constituye el primer postulado de la Relatividad. En este marco, las transformaciones que relacionan los sistemas inerciales son las transformaciones de Lorentz. Además, existe un segundo postulado que establece que la velocidad de la luz, en el vacío, es finita e independiente del movimiento de la fuente que la produce en cualquier sistema de referencia. El valor de la velocidad de la luz en el vacío es de:

$$c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Puede resultar curioso que la velocidad de la luz sea un número entero medido en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, la razón es que la definición de metro es la distancia que viaja la luz en $1/299792458 \text{ s}$. Cuando los sistemas físicos se mueven con velocidades “cercanas” a la de la luz en el vacío, se acostumbra a decir que la Relatividad especial es necesaria para su correcta descripción, mientras que para velocidades “bajas” los conceptos clásicos establecidos por Galileo y Newton entre otros, son suficientes. La Mecánica Newtoniana proporciona una excelente descripción de la Naturaleza, pero no es universalmente aplicable. En realidad, a las escalas nuclear y subnuclear, que son las que consideramos aquí, no es la velocidad la magnitud que caracteriza los sistemas sino la energía. Y en este contexto, la energía que debe considerarse es aquella que “ganan” los sistemas cuando están unidos respecto a la que tienen cuando están separados, que generalmente conocemos como energía de enlace. Cuando los sistemas no interactúan, su energía es solamente la equivalente a su masa en reposo de acuerdo con la ecuación de la relatividad que relaciona masa¹ y energía:

$$E = m c^2$$

III. EL ÁTOMO DE HIDRÓGENO Y EL PROTÓN

Si consideramos en cambio, por ejemplo, un electrón y un protón cuando forman el átomo de hidrógeno, la energía total del sistema es la suma de las masas de electrón y protón transformadas a energía según la ecuación anterior además de la energía que ganan por interactuar. En este caso dicha energía es de $13,6 \text{ eV}$ ² cuando el electrón se encuentra en lo que llamamos su estado fundamental, que corresponde al estado más estable en que puede encontrarse el átomo de hidrógeno.

¹ Cuando mencionamos la masa de las partículas en el resto del texto, nos referimos al valor de su masa en unidades del Sistema Internacional (SI) multiplicadas por c^2 , de tal modo que dichas masas se expresan en unidades de energía. Se utiliza también a menudo otro sistema de unidades, llamado natural, en el que $h/2\pi = c = 1$, que permite simplificar notablemente las

fórmulas que contienen estas constantes y en los que las masas de las partículas también se expresan en unidades de energía.

² 1 eV es la energía que adquiere un electrón cuando se le somete a una diferencia de potencial de 1 Voltio.

Posiblemente este valor de energía configura una buena parte de la Naturaleza tal como la contemplamos a escala humana, además de ser una de las magnitudes que mejor se conocen experimentalmente, con casi 12 cifras decimales significativas. Como es bien conocido, Niels Bohr obtuvo este valor de energía en 1913 en el curso de los primeros modelos que trataban de describir la estabilidad del átomo tras el descubrimiento del núcleo atómico por Ernest Rutherford. Sin embargo, aunque el valor que obtuvo era correcto, clásicamente, un sistema formado por un protón y un electrón girando en torno a él, no es estable, pues se trata de una partícula con carga eléctrica continuamente acelerada y, por tanto, de acuerdo a las leyes del Electromagnetismo, perdería energía continuamente, de acuerdo con la fórmula de Larmor (1897), lo que llevaría al colapso del electrón sobre el protón en unos de 10^{-11} s, lo que no está de acuerdo con la observación de la estabilidad del átomo de hidrógeno, y otros muchos átomos que conocemos y que son estables.

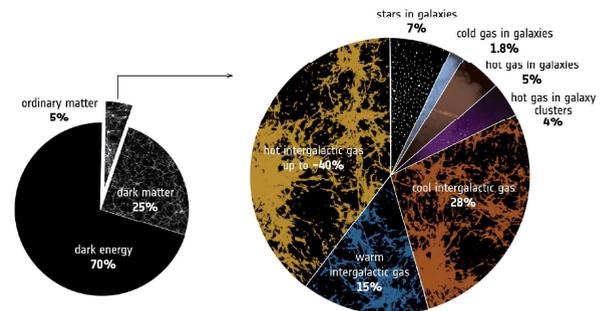
La necesidad de explicar, entre otros, este fenómeno fundamental de la estabilidad de los átomos, dio lugar, durante aproximadamente el primer tercio del siglo XX al desarrollo de la Mecánica Cuántica, que podemos considerar uno de los pilares de la Ciencia actual.

Entender el hidrógeno, que es el átomo más sencillo, es muy importante. Las observaciones más recientes apuntan a que el hidrógeno constituye, en la actualidad, aproximadamente el 90% de todos los átomos del Universo. En la Figura 2 se muestra la composición del Universo en términos de materia y energía. La materia ordinaria o materia visible constituye aproximadamente el 5% del total, y es la que compone las estrellas, los planetas y los seres vivos que conocemos. Del total de esta, solo alrededor del 7% se encuentra en forma de estrellas y planetas y el resto está formada prácticamente por hidrógeno y helio en forma de gas.

Parecería por tanto que, si pudiésemos pesar el Universo con una balanza, su peso sería fundamentalmente el de todos los protones y electrones que forman el hidrógeno, que podríamos considerar como el peso de los ladrillos y cimientos que forman un edificio y la energía de enlace entre ambos, los 13.6 eV, serían el cemento que une toda la estructura, pero que es una pequeña fracción del total. Las masas del protón y del electrón en unidades de energía son respectivamente 938.272 y 0.511 millones de eV o MeV, siendo la masa del protón más de 1.800 veces mayor que la del electrón, por lo que en buena aproximación podemos decir que la masa del Universo visible está constituida, en alrededor del 90 % del total, por la suma de la masa de todos los protones que lo constituyen. Podemos decir, por tanto, que si queremos entender cuál es el origen de la mayor parte de la masa del Universo visible, necesitamos entender la estructura del protón.

El protón no es una partícula elemental sino un sistema físico complejo y bastante especial. Una representación del protón se puede observar en la Figura 3. Es la única partícula de su clase que es estable, es decir, que el tiempo que tarda en desintegrarse, si es que lo hace, es mayor que la edad actual del Universo. El

resto de los sistemas con propiedades similares, como por ejemplo el neutrón, se desintegra cuando se encuentra en libertad, con una vida media de 877.75 segundos (González *et*



Figurara 2. Izquierda: Estimación de la fracción de materia ordinaria, materia y energía oscura del Universo. Derecha: Composición de la materia ordinaria del Universo, según los datos de la misión XMM-Newton de la Agencia Espacial Europea (ESA), <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0204-1>

al., 2021), poco menos de 15 minutos. El neutrón, que como se describe más adelante es una parte fundamental de la materia, pues junto con el protón forma los núcleos, y que precisamente debido a la energía de enlace que gana al formarlos, es por lo que en esas condiciones no se desintegra, permitiendo la existencia de muchos núcleos como sistemas estables. El resto de las partículas similares al protón y al neutrón son inestables, con vidas medias mucho menores que el neutrón, por lo que la única posibilidad de estudiarlas es producirlas en aceleradores de partículas.

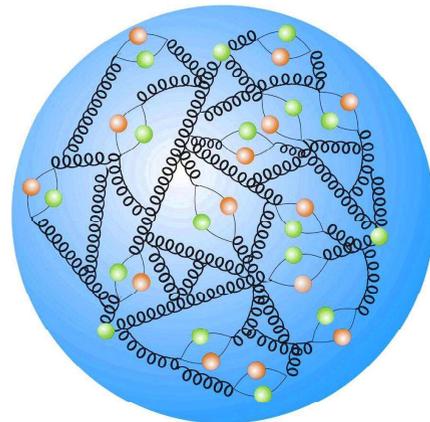


Figura 3. Representación de un protón como un sistema complejo no solo formado por 3 quarks de valencia, sino por otros pares quark-anti-quark y gluones que lo mantienen unido. Este esquema emerge de la interpretación de los experimentos Zeus y H1 del acelerador HERA de DESY (Alemania).

En 1911 Ernest Rutherford propuso el primer modelo nuclear basado en los resultados experimentales obtenidos fundamentalmente por Ernest Marsden, estudiante de doctorado

al que Rutherford y Geiger asignaron un proyecto para medir la difusión de partículas α por capas delgadas de metal, oro en este caso, hacia atrás, es decir en el sentido opuesto al que eran enviadas. Rutherford ya había medido el flujo de partículas difundidas hacia adelante a pequeños ángulos, donde se suponía, de acuerdo con los modelos de estructura de la materia vigentes -fundamentalmente el modelo de Thomson-, que aparecerían la gran mayoría de las partículas α tras atravesar la lámina de oro, pero no quería dejar ningún ángulo de desviación sin examinar. Marsden no esperaba encontrar ninguna partícula desviada hacia atrás, y más tarde escribió que pensaba que se le había propuesto el proyecto para determinar sus cualidades como experimentador. Construyó un detector de sulfuro de zinc que producía luz de centelleo cuando una partícula cargada lo atravesaba, que sería detectada directamente por el ojo en la oscuridad. A diferencia de lo esperado, Marsden comenzó a observar *flashes* de luz amarilla cada segundo para ángulos de desviación mayores que 90° . Después de revisar el experimento concienzudamente y ver que no había problemas ni fallos en la observación, expuso sus resultados a Rutherford, quien se mostró igualmente sorprendido del resultado, que describió con la comparación de que éste sería equivalente a disparar una bala sobre una hoja de papel y la bala rebotase y golpease a quien la

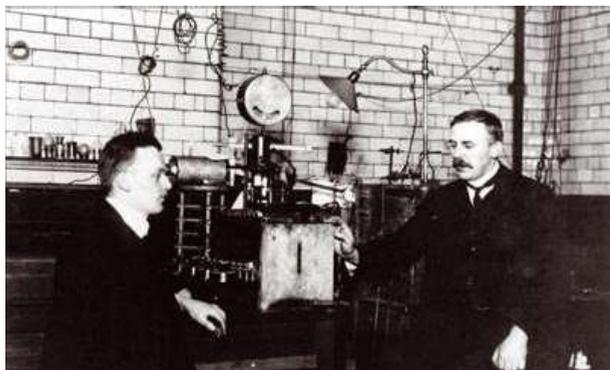


Figura 4. A la izquierda Hans Geiger y a la derecha Rutherford, en su laboratorio en Manchester alrededor de 1908
Imagen: Familia de Rutherford.

había disparado. La Figura 4 muestra parte del dispositivo experimental original que se utilizó para obtener estos resultados.

En 1911 Rutherford sugirió que la única explicación posible era considerar que las partículas α eran difundidas por una gran cantidad de carga positiva concentrada en una muy pequeña región del espacio en el centro del átomo de oro, mientras que los electrones debían estar orbitando de alguna manera en torno al mismo. La estimación del tamaño del núcleo llevada a cabo por Rutherford fue de aproximadamente $1/100.000$ del tamaño del átomo, lo que es esencialmente correcto. El átomo se podía considerar, por tanto, bastante “vacío”.

Durante parte de la primera guerra mundial, Rutherford dedicó sus esfuerzos a problemas más inmediatos, como la detección de submarinos cuando estos permanecían sumergidos.

No fue hasta bien entrado 1917 cuando pudo retomar su investigación sobre el comportamiento del núcleo, más concretamente estudiando la desviación de partículas α por átomos ligeros, intentando “romper” los átomos con este método. Estudió el retroceso de “partículas de hidrógeno” en diferentes medios materiales, y obtuvo “sorprendentemente” que el número de estas partículas aumentaba cuando el medio atravesado era aire o nitrógeno. De ello dedujo que cuando la partícula α “entraba” en el núcleo de nitrógeno se emitía un átomo de hidrógeno. Este hecho fue el que precisamente permitió descubrir el núcleo de hidrógeno, o protón como lo denominó Rutherford en 1920, mostrando que era un constituyente de núcleos atómicos más grandes como el del nitrógeno. Esto también significa que el nitrógeno sufría un proceso de desintegración, y el protón que se liberaba formaba parte de dicho núcleo. Igualmente se pudo deducir que la partícula α en sí misma era capturada por el núcleo de nitrógeno que emitía un átomo de hidrógeno y producía un nuevo isótopo el ^{17}O . Habiendo dividido de este modo el nitrógeno y observado que en algunos casos este proceso se producía de modo natural, se podía haber pensado que Rutherford y sus colaboradores eran el primer grupo de alquimistas que habían logrado el fenómeno de la transmutación. Evidentemente esa palabra no gustaba nada, por lo que Rutherford dijo que si lo que habían descubierto era ese fenómeno de transmutación, “les cortarían la cabeza como alquimistas”, y por supuesto, desde entonces el fenómeno se conoce como desintegración nuclear.

Rutherford y su grupo de colaboradores no solo realizaron el descubrimiento del núcleo, estimando correctamente su tamaño y algunas de sus propiedades más importantes, sino que describieron los fenómenos de transformación nuclear, y caracterizaron el protón como componente del núcleo atómico. También dedujeron que las fuerzas que mantenían el núcleo unido no podían ser solamente de origen eléctrico pues en tal caso serían únicamente repulsivas al ser causadas por partículas con la misma carga eléctrica, positiva. En otras palabras, puso de manifiesto la necesidad de la existencia de una nueva fuerza cuya dependencia con la distancia no podía variar como $1/r^2$ y que además, a la escala nuclear, debía tener más intensidad que la fuerza eléctrica repulsiva. Claramente se trata de la primera vez que se menciona la idea y la necesidad de la existencia de lo que actualmente llamamos la interacción fuerte, estableciendo dos de sus propiedades esenciales: es más intensa que la interacción electromagnética, y su rango, o distancia a la que actúa, es aproximadamente del orden del tamaño nuclear.

Para explicar la masa de los isótopos que se producían en los procesos nucleares que estudiaron, también postularon la idea de la existencia de una partícula neutra, de masa aproximadamente igual a la del protón, y que posteriormente, en 1931, sería descubierto por Chadwick (1932): el neutrón.

En 1908 Rutherford había recibido el premio Nobel de Química “por sus investigaciones en la desintegración de los elementos y la Química de las sustancias radiactivas”. Sorprendentemente, nunca recibió el premio Nobel de Física por

sus descubrimientos del núcleo, el protón y la fuerza fuerte, a pesar de haber sido nominado nada menos que en 20 ocasiones para el galardón³ por científicos del prestigio de Philipp Lenard, Johannes Stark, o Max Planck, todos ellos premios Nobel en Física. En cualquier caso, hay pocas dudas de las inmensas contribuciones al entendimiento de la estructura de la materia y de la Física de Partículas en general, realizadas por Rutherford.

El neutrón, que como ya comentamos fue descubierto por Chadwick en 1931, tiene una masa similar a la del protón, ligeramente mayor, y el spin es también el mismo, es decir como había supuesto Rutherford, protón y neutrón tenían propiedades muy similares excepto la carga eléctrica. Este hecho llevó a Heisenberg (1932) a proponer la idea de nucleón, de modo que el protón y el neutrón serían dos estados cuánticos de dicha partícula. Hoy en día se siguen llamando nucleones a los constituyentes del núcleo.

IV. LA FÍSICA ATÓMICA, NUCLEAR Y DE PARTÍCULAS

Como se ha visto, durante esta época, los términos átomo, núcleo o partícula, se utilizaban para describir estos sistemas. Con el descubrimiento del neutrón quedó claro que el núcleo es un sistema formado por protones y neutrones unidos por la fuerza fuerte, lo que condujo definitivamente al nacimiento de la rama de la Ciencia que llamamos Física Nuclear, y la estructura de la materia se estableció de manera casi como la conocemos actualmente, pudiendo describirse en buena aproximación como se muestra en la Figura 5, donde además se

muestran, de modo general, los tamaños de cada uno de los sistemas. El átomo y el núcleo tienen ya características claramente diferenciadas. El átomo es un sistema compuesto, en el que los electrones interactúan con el núcleo debido al campo eléctrico que este genera sobre los electrones. El estudio de los átomos constituye la rama de la Física que llamamos Física Atómica, muy relacionada en muchos aspectos con la Química así como con la Física que estudia las moléculas, los sólidos y otras estructuras. Su comportamiento está gobernado por la interacción electromagnética.

El núcleo es otro sistema compuesto, en este caso por protones y neutrones. La Física Nuclear estudia cómo y por qué el núcleo está enlazado, y de qué forma se producen las transformaciones y desintegraciones entre diferentes núcleos. La interacción principal que gobierna el comportamiento de los núcleos es la fuerte, aunque la interacción electromagnética juega un papel importante en la estabilidad nuclear. Las transformaciones o desintegraciones nucleares están gobernadas muy mayoritariamente por la fuerza débil.

Existen, como acabamos de mencionar, diferencias importantes para entender los átomos y los sistemas nucleares y subnucleares. La Física de los átomos y de los sistemas compuestos por átomos, así como las estructuras a mayor escala (moléculas, sólidos, etc.), están gobernadas, exclusivamente, por la interacción electromagnética. Para entender la Física de los núcleos, la Física de los protones así como la de otras estructuras a menor escala, denominada Física de Partículas, es necesario entender las interacciones fuerte, débil y electromagnética y cómo actúan a dichas escalas.

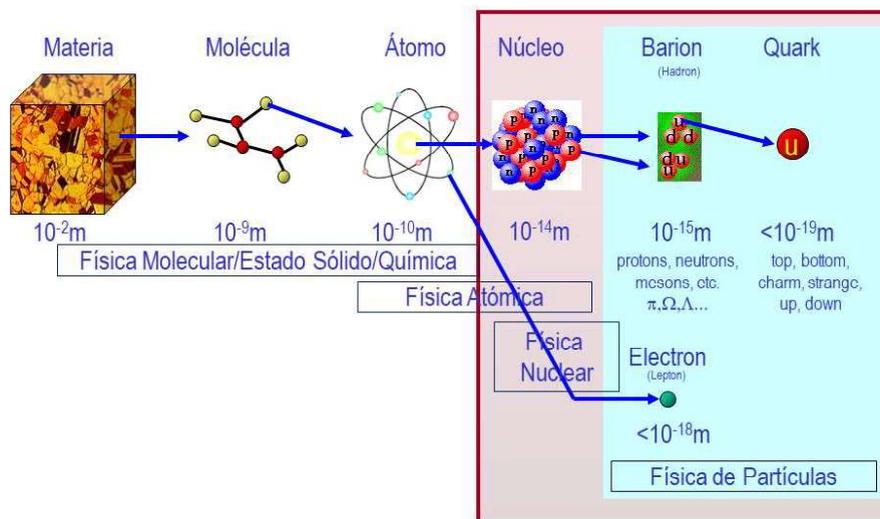


Figura 5. Esquema de los diferentes tamaños de las estructuras que forman la materia ordinaria, desde el átomo a las partículas elementales (electrones y quarks).

³ <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1908/rutherford/nominations/>

El número de especies atómicas y de especies nucleares es muy distinto. Conocemos en la actualidad 118 especies atómicas determinadas por el número de protones (Z) en su núcleo que es igual al número de electrones. El número de isótopos lo determina el número de neutrones (N) en el núcleo. Existen más de 3500 núcleos conocidos de los que 254 son estables y determinan la región denominada “valle de la estabilidad”, representada en la Figura 6 por la zona de color más oscuro. Además de ello, basado en el comportamiento de los núcleos ricos en neutrones, se piensa que podrían existir entre 6000 y 8000 especies nucleares inestables que aún no se han observado. Aparte de unas pocas excepciones, todos los elementos en la Naturaleza tienen un isótopo nuclear estable. “Añadir” o “quitar” neutrones, modifica el equilibrio nuclear y se producen isótopos generalmente inestables, de tal manera que cuanto mayor es la diferencia entre el número de protones y el de neutrones más rápido es el proceso de desintegración.

El estudio de los núcleos se complica a medida que sus vidas medias son más cortas. Las especies inestables han de ser producidas en el laboratorio, y en algunos casos se logra producir solamente un isótopo por semana, que puede desintegrarse en una fracción de segundo. Algunos ejemplos se pueden ver en la Figura 6.

Por el contrario, los núcleos más estables son los más abundantes, y su estudio es importante, entre otras cosas, para entender la formación y evolución de los sistemas estelares, lo que ha dado lugar a la rama de la Física que se conoce como Astrofísica Nuclear.

El entendimiento y la comprensión del comportamiento de la interacción fuerte es uno de los problemas más importantes en Física Nuclear y en Física de Partículas. A pesar del inmenso esfuerzo realizado por la comunidad científica no se puede considerar un problema resuelto. Aunque se ha avanzado notablemente, el entendimiento de la fuerza fuerte y de los fenómenos a los que da lugar a escalas nuclear y subnuclear, no está al mismo nivel de comprensión que la fuerza electromagnética o la fuerza débil, y aún no se ha logrado una descripción completamente unificada de la misma que sirva para describir la estabilidad de los núcleos y el comportamiento de las partículas como los protones y los neutrones.

Los protones y los neutrones forman parte de una familia muy numerosa de partículas no elementales que se denominan genéricamente hadrones, y que hasta donde sabemos, son las estructuras equivalentes a los átomos, pero en las que su energía de enlace es fundamentalmente de origen fuerte. Los núcleos serían, en este sentido, el equivalente a las moléculas, es decir, la fuerza fuerte que los une tendría un comportamiento similar a la interacción entre dipolos eléctricos, como ocurre en las fuerzas de van der Waals.

Una de las herramientas básicas para el entendimiento de estos problemas que se han venido utilizando en el último siglo, y a gran escala en los últimos 50 años, son los aceleradores de partículas. En la actualidad el acelerador de partículas que acelera éstas a la máxima energía es el LHC, que junto con el resto del complejo de aceleradores del CERN, se muestra en la

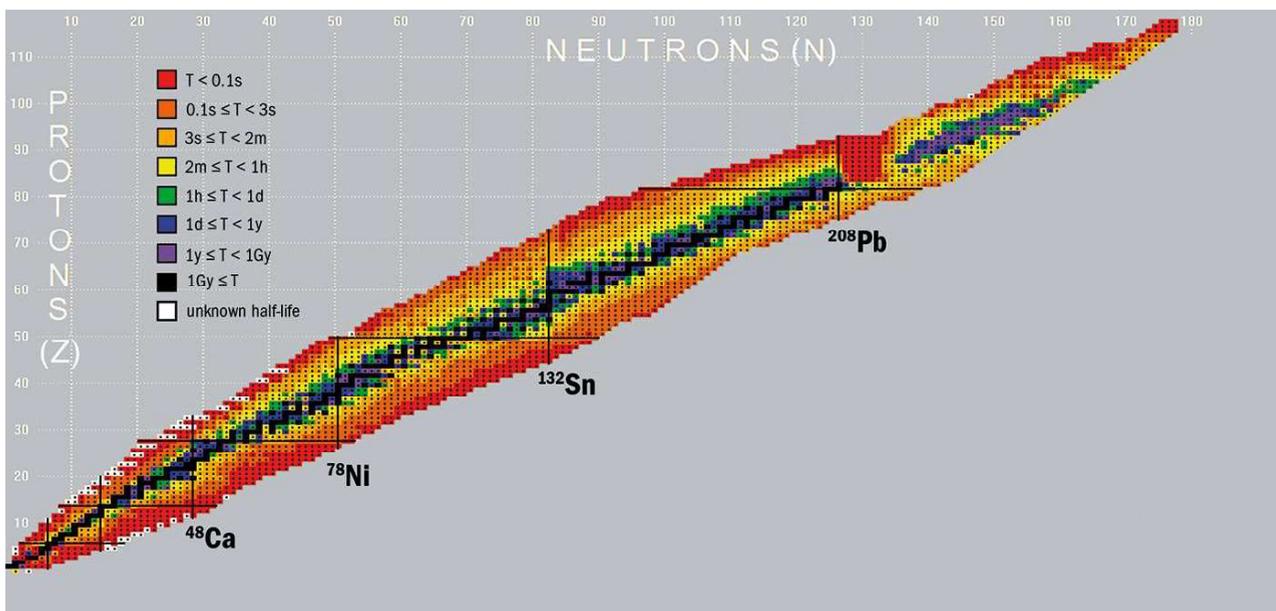


Figura 6. La carta de los núcleos donde se representa en el eje X el número de neutrones (N) y en el eje Y el de protones (Z) y cada núcleo es un cuadrado en ese plano. Los cuadrados negros corresponden a los núcleos estables y, en el resto, la vida media disminuye a medida que los valores de Z y N se aleja de los estables. Imagen: CERN.

Figura 7 con las componentes con las que el LHC volverá a operar a partir de 2022. Los aceleradores de partículas pueden considerarse como “máquinas del tiempo”. No pretenden crear réplicas de lo que era el Universo, pero si reproducir las condiciones que nos permitan entender las leyes que lo regían en sus inicios.

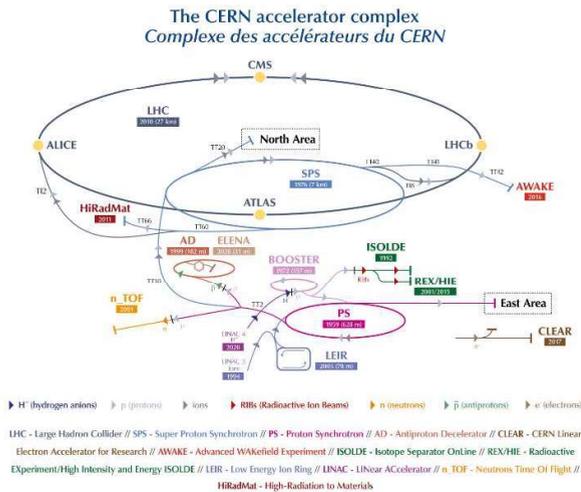


Figura 7. Esquema del complejo de aceleradores del CERN. Los protones se aceleran en el LINAC, LINAC4 a partir de 2022, y se transfieren al PS y posteriormente al SPS donde alcanzan los 450 GeV. EL SPS comenzó a funcionar en 1976. De ahí se envían al LHC, que posee 27 Km de longitud de circunferencia, donde son acelerados hasta la energía con la que colisionan en los cuatro grandes experimentos que actualmente se encuentran en operación: ALICE, ATLAS, CMS y LHCb.

Un aspecto importante que siempre ha de considerarse sobre los descubrimientos científicos es su impacto en la sociedad. A menudo la investigación en Ciencia básica se encamina por el entendimiento de ciertos problemas que, en un primer momento, pueden parecer sin impacto directo en las necesidades inmediatas de la sociedad. A veces este tipo de argumentos se han aplicado al entendimiento de las partículas elementales, los componentes fundamentales de la materia, y a las interacciones, fuerzas, que se ejercen entre las mismas. Las partículas elementales y las interacciones entre las mismas, que como veremos más adelante también están representadas por otras partículas elementales con alguna característica fundamental diferente, su espín, son sistemas físicos que a menudo no son directamente observables a escala humana, o parece que no se notan directamente en la vida diaria, pero juegan un papel determinante en el comportamiento general de lo que sí es observable cotidianamente. Un buen ejemplo es el sol, que gobierna nuestras vidas y del que la humanidad siempre se ha preguntado cómo genera la luz que produce y por qué a la escala temporal humana no parece agotarse.

La primera partícula elemental descubierta como tal y que aún hoy en día sigue manteniendo tal carácter de elemental fue el electrón. A J.J. Thomson se le puede considerar el descubridor

del electrón como partícula elemental y por ello recibió el premio Nobel en 1906. En una entrevista de radio en 1934 Thomson fue preguntado sobre su descubrimiento y respondió: “¿Podría parecer a primera vista algo tan poco práctico como una partícula que es tan pequeña que su masa es una fracción insignificante de la masa del átomo de Hidrógeno? ¿Y qué es tan pequeña que un conjunto de ellas en número igual a la población del mundo entero es aún tan pequeño que no podría detectarse por ningún medio conocido por la Ciencia?”. Obviamente las consecuencias prácticas del descubrimiento del electrón son ricas y variadas, y han dado lugar a tantas aplicaciones que podemos decir que configuran muchas de las características de nuestra vida diaria.

El conocimiento de las propiedades del electrón marcó una parte importante del desarrollo de la Física en el siglo XX desde muchos puntos de vista, con contribuciones de científicos de primer nivel como, Millikan, Frank y Hertz, Schrodinger, Dirac, Anderson, Davisson y Thomson, hijo de J.J. Thomsom.

La segunda partícula elemental descubierta fue el fotón. Hoy sabemos muy bien que el fotón, además de poder ser considerado una partícula elemental, también es el mediador de la interacción electromagnética. Se puede decir que la carga eléctrica es la capacidad que tienen las partículas para emitir o absorber fotones y, por tanto, para experimentar esa interacción, o fuerza.

Se puede considerar que fue Heinrich Hertz, quien en 1887 observó por primera vez lo que hoy conocemos como efecto fotoeléctrico. Este se observó cuando se iluminaban con radiación electromagnética, luz, visible o ultravioleta, en el caso de los experimentos de H. Hertz, dos placas metálicas separadas, y se observaba que se producía el paso de corriente eléctrica entre las mismas. Algunas cuestiones interesantes sobre el efecto fotoeléctrico tienen que ver con la imposibilidad de explicar dicho efecto utilizando la teoría electromagnética clásica en la que la luz tiene un comportamiento ondulatorio.

En 1906 Philipp Lenard recibió el premio Nobel en parte por sus contribuciones al entendimiento de este proceso, pues observó que la energía de los electrones variaba con la longitud de onda, o frecuencia, de la luz incidente y no con la intensidad de esta como debería ocurrir si el comportamiento de la luz fuese puramente clásico y ondulatorio.

En 1921 A. Einstein recibió el premio Nobel por la explicación teórica de este efecto con la introducción del concepto de fotón, esos “paquetes” cuánticos con energías bien definidas que correspondían a valores concretos de sus frecuencias. En 2021 se conmemoró el centenario de este importante galardón a uno de los científicos más brillantes e influyentes en la sociedad en todo el siglo XX. En 1923 R.A. Millikan recibió este premio por las contribuciones experimentales al entendimiento de este proceso físico.

En 1927 Arthur H. Compton también obtuvo esta distinción por el descubrimiento del efecto que lleva su nombre. En esencia en el efecto Compton, rayos X incidentes interactúan con la materia, de tal manera que el estado final está compuesto por electrones y rayos X, aunque estos tienen mayor longitud de

onda que los incidentes. Este proceso confirma las ideas desarrolladas durante la explicación del efecto fotoeléctrico, demostrando que las ondas electromagnéticas se comportan como partículas que transportan energía y momento, y que son capaces de producir procesos como el que se muestra en la Figura 8, en los que los rayos X incidentes son capaces de provocar un proceso completamente equivalente al que ocurriría cuando dos partículas colisionan entre sí y una dispersa a la otra tras el proceso. Este proceso es bastante similar al que ocurre en una mesa de billar entre dos bolas, y acabó de convencer a la comunidad científica de las ideas cuánticas aplicadas por Einstein en la explicación del efecto fotoeléctrico. Hay que notar que en este último, no resulta tan inmediato el comportamiento de la onda inicial como partícula, ya que la onda electromagnética, que se comporta como un fotón, es absorbida por el material y solo se observa el electrón producido.

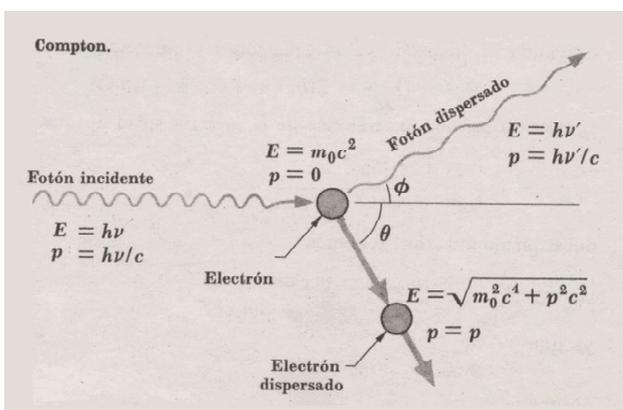


Figura 8. Esquema del efecto Compton. Un fotón “colisiona” con un electrón en reposo y después del proceso ambos salen en direcciones que permiten la conservación de energía y momento.

Otro hito decisivo se produjo en 1924 cuando de Broglie conjeturó sobre el aspecto ondulatorio de la materia, en particular los electrones, introduciendo la dualidad onda-partícula como una propiedad universal de todos los tipos de materia y radiación. La idea tuvo un significado decisivo para la consolidación de la Mecánica Cuántica. La famosa fórmula de de Broglie nos dice que si una partícula tiene momento p , su longitud de onda λ ⁴ asociada, tiene un valor igual a la constante de Planck dividida por dicho momento:

$$\lambda = h/p \quad (1)$$

Esta misma relación se cumple para el fotón, que es una partícula de masa 0, si consideramos que su energía viene dada según las ecuaciones de Einstein de la Relatividad Especial por $E = pc$, y del efecto fotoeléctrico como $E = h\nu$, de tal manera que:

$$p = h\nu/c \quad (2)$$

que es la misma fórmula que (1) para el fotón, dado que su longitud de onda es $\lambda = c/\nu$ y viaja con velocidad c .

Louis de Broglie recibió el premio Nobel en 1929, lo mismo que en 1937 Clinton Davisson y George Thomson, hijo de J.J. Thomson, descubridor del electrón, por la confirmación experimental de la difracción, fenómeno que sufren las ondas, de electrones al incidir en cristales.

Las ecuaciones (1) y (2) han resultado decisivas, también, desde el punto de vista del entendimiento de la estructura de la materia y de la necesidad de construir aceleradores de partículas de altas energías para su entendimiento. De hecho, en muchos casos se denomina casi indistintamente a esta rama de la Física tanto Física de Partículas como Física de Altas Energías. Podemos considerar que cuando lanzamos partículas producidas en un acelerador contra un blanco, fijo o en movimiento, éstas tienen una longitud de onda dada por (1), que equivaldría al poder de resolución de un microscopio con el que observásemos la materia con dichas partículas. A mayor momento, y consiguientemente mayor energía de las partículas incidentes, menor será la distancia a la que podemos observar el comportamiento de la materia, y por tanto mejor resolución tendrá el haz de partículas producido en el acelerador para entender los detalles de la estructura del sistema que queremos estudiar. Es por ello por lo que los aceleradores de partículas a altas energías se pueden considerar los microscopios más potentes que se pueden construir y nos permiten “mirar” en las profundidades de la materia a distancias proporcionales a la inversa de la energía de las partículas aceleradas.

Como ya hemos mencionado, el principio de de Broglie fue decisivo para el desarrollo de las teorías cuánticas. En 1925 Heisenberg desarrolló la Mecánica Cuántica desde un punto de vista matricial, y meses después Schrödinger desde un punto de vista ondulatorio, siendo ambas formulaciones cuánticas decisivas para explicar el comportamiento de los electrones en los sistemas atómicos. Dirac demostró que ambas formulaciones eran equivalentes y Born introdujo la interpretación probabilística de la función de onda, solución de la ecuación de Schrödinger. En 1927 Heisenberg formuló las relaciones de incertidumbre que establecen, en el caso del momento lineal y las coordenadas, la imposibilidad de realizar medidas simultáneas con precisión ilimitada del momento de la partícula en una dirección y de la coordenada espacial en dicha dirección. Y, quizá como culminación de todos estos desarrollos, Dirac derivó en 1928 una ecuación que combina la Mecánica Cuántica y la Relatividad para describir el electrón en todos sus aspectos. Hay que mencionar que la mayoría de las propiedades cuánticas tienen un análogo o precursor clásico. Energía, momento, etc. tienen interpretaciones en ambos casos, pero existe una magnitud, el espín, que solamente aparece en el mundo cuántico y, aunque se comporta como una magnitud que tiene las

⁴ La letra griega “ λ ” se utiliza para definir longitud de onda, así como el recorrido libre medio de una partícula, y la letra “ ν ”

para denotar frecuencia o las partículas que conocemos como neutrinos.

propiedades de un momento angular, no existe análogo clásico ni interpretación “mecánica” para la misma. La ecuación de Dirac incorpora por primera vez el espín de modo completamente natural dentro del marco conjunto de la Mecánica Cuántica y la Relatividad. En 1932 Heisenberg obtuvo el premio Nobel “por la creación de la Mecánica Cuántica” y en 1933 lo recibieron Dirac y Schrödinger. Max Born tuvo que esperar a 1954 cuando recibió el galardón “por su investigación fundamental en Mecánica Cuántica, especialmente por la interpretación estadística de la función de onda”.

Cuando se aplica la ecuación de Dirac al electrón, una consecuencia directa y fundamental de la misma es que tienen que existir partículas cargadas positivas con las mismas características que el electrón. Dirac pensó en un primer momento que esas partículas eran protones, pero no tardó en darse cuenta de que lo que precedía su ecuación eran nuevos “objetos” que llamó positrones. Estas partículas tienen exactamente las mismas propiedades que los electrones, en particular tiene masa idéntica, y carga positiva de la misma magnitud. Se puede considerar que este es el primer ejemplo de lo que hoy llamamos antipartículas, que realmente son una nueva forma de materia que conocemos como antimateria.

Casi inmediatamente, en 1931, Carl D. Anderson observó partículas cargadas positivamente, producidas por radiación cósmica, que tenían la misma masa que los electrones. En un primer momento ni Bohr ni Pauli creían que estos eran los positrones predichos por la ecuación de Dirac, pero se probó posteriormente que sí lo eran.

Carl Anderson compartió el premio Nobel en 1936 con Victor F. Hess, que fue quien precisamente descubrió la radiación cósmica. Fue en 1912, utilizando globos aerostáticos, cuando observó que la ionización era mayor en las capas altas de la atmósfera, concluyendo que ello era debido a la presencia de radiación proveniente de fuera de la atmósfera. También probó, realizando medidas durante la noche y en periodos de eclipse, que esta radiación no provenía del Sol. La radiación cósmica ha sido desde entonces, y es en la actualidad, una de las mejores fuentes, junto con los aceleradores de partículas realizados en los laboratorios, para producir y estudiar partículas inestables y los procesos de interacción que las producen.

Hess probó que existía radiación cósmica que no provenía del Sol. En la actualidad sabemos que existe radiación cósmica de diferentes fuentes, por supuesto del Sol, de otras fuentes de nuestra galaxia, pero también de fuera de nuestra galaxia. Están principalmente compuestas por protones y otros núcleos, y llegan a la atmósfera terrestre produciendo diferentes tipos de procesos, que como hemos mencionado, se usan para producir otras partículas. En las últimas décadas esto ha dado lugar a una nueva rama de la Física de Partículas, que llamamos Astropartículas, y que, en conjunto, estudia todos los tipos de radiación y partículas que llegan a la Tierra procedentes de cualquier lugar de nuestro Universo. La última incorporación a este gran conjunto de procesos que componen las Astropartículas lo constituyen las Ondas Gravitacionales,

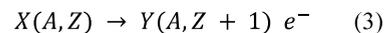
observadas por primera vez en 2015 por los detectores de LIGO y Virgo (ver Abbott *et al.*, 2016), y que habían sido predichas en la teoría de la Relatividad General de Einstein.

A finales de 1930 y en 1931 se alcanzó un consenso general dentro de la comunidad científica de que la Mecánica Cuántica y la Relatividad estaban bien establecidas y representaban las teorías con las que se debían tratar de entender la estructura del átomo y del núcleo, y los nuevos fenómenos recientemente descubiertos en ellos. Se consideraba también, que existían 4 partículas “fundamentales”, el electrón, el fotón, el protón y el neutrón que se descubrió justo ese año. Las cuestiones relacionadas con el enlace nuclear y los mecanismos que explican las desintegraciones nucleares, y después, de las partículas elementales y no elementales, se convirtieron en los problemas principales a los que la comunidad científica en estos campos ha dedicado sus esfuerzos hasta la actualidad.

V. LA INTERACCIÓN DÉBIL Y LOS NEUTRINOS

Durante los comienzos del siglo XX se empezó a observar que ciertos materiales, como el radio, emitían electrones en un proceso que se conoce como desintegración β . Este proceso es muy bien conocido hoy en día en Física Nuclear pues es el responsable de la gran mayoría de procesos en que los núcleos inestables van alcanzando la estabilidad (ver Figura 6). Hacia 1927 estaba ya bien claro que el espectro, es decir la distribución de energía cinética de los electrones, era continuo entre 0 y un valor máximo que depende de cada núcleo pero que es cercano a 1 MeV. Por algún tiempo tampoco estuvo claro si estos electrones eran de origen atómico o nuclear, pues tanto un sistema como otro presentan niveles de energía discretos, y resultaba difícil entender, tanto en un caso como en otro, cómo era posible que la distribución de energía observada fuese continua.

En el caso nuclear, este proceso se puede describir como:



donde X e Y denotan los núcleos antes y después del proceso, Z es el número de protones del núcleo y A el número total de protones y neutrones. El número de neutrones es por tanto $N = A - Z$. En un proceso de estas características la conservación de energía y momento implica que el e^- ha de tener una energía fija prácticamente igual a:

$$Q = [(M_{A,Z} - M_{A,Z+1}) - m_e]c^2 \quad (4)$$

puesto que la masa de los núcleos, M , es mucho mayor que la del electrón, m_e , y se puede considerar que ambos están en reposo durante el proceso.

El espectro de los electrones en la desintegración β es continuo, con un punto final que corresponde al valor dado por la ecuación (4). En un primer momento se pensó que el espectro continuo podía ser debido a la energía perdida por los electrones en el detector en que eran medidos, pero Ellis y Wooster (1927) probaron que la energía del electrón era realmente menor que la que se esperaba de la emisión β en diferentes núcleos y dada por la ecuación (4).

En 1930, Pauli, en cartas y conversaciones privadas, sugirió, que además del electrón en la desintegración β se producía otra partícula, de tal manera que la suma de la energía del electrón y la de esta nueva partícula era la que sería discreta y correspondería a la transición entre dos niveles de energía (nucleares). La cuestión estaba bastante clara, el espectro continuo en estos procesos β , se podía interpretar como una manifestación de que en este proceso no se cumplía el principio de conservación de la energía-momento. Ni antes ni después se ha puesto jamás en duda dicho principio, que es considerado un pilar básico de la Ciencia y de la Física en particular. Dada la situación, Pauli sugirió “la solución desesperada” para “salvar” el principio de conservación de la energía, de la existencia de una nueva partícula con la que se satisfacía dicho principio, a pesar de que dicha partícula no se detectaba, es decir atravesaba los detectores sin dejar rastro, lo que implicaba que su carga eléctrica era nula y que se describe como:

$$X(A, Z) \rightarrow Y(A, Z + 1) e^- \text{ “}n\text{”} \quad (5)$$

Además, para que se cumpliera el principio de conservación del momento angular, su espín debía ser como el del electrón $\frac{1}{2}$, en unidades de h . Pauli supuso que, junto con el electrón y el protón, esta nueva partícula era un constituyente del núcleo atómico. Sin embargo, como ya hemos mencionado, en 1932 Chadwick publicó su descubrimiento del neutrón, y seguidamente Heisenberg, Majorana e Ivanenko propusieron que el núcleo estaba formado por protones y neutrones, lo que como sabemos, es la composición correcta.

La siguiente contribución fundamental a la correcta descripción de la desintegración β fue realizada por Enrico Fermi (1934), construyendo la primera teoría de dicho proceso en el núcleo y utilizando la hipótesis de Pauli, de que junto con el electrón se producía una partícula ligera, neutra de carga eléctrica y de espín $\frac{1}{2}$. Es interesante mencionar que el resultado no se publicó en la revista *Nature* porque ésta consideró que “contenía especulaciones demasiado remotas (alejadas) de la realidad para resultar de interés para los lectores”.

Tras el descubrimiento del neutrón, Fermi propuso llamar a la partícula propuesta por Pauli neutrino, ν , que es el nombre que se ha utilizado desde entonces. Fermi propuso, además, la existencia de una nueva interacción, la interacción débil, para explicar el fenómeno. Además, se trata de la primera teoría en que una partícula “fundamental” cambia su naturaleza, a través del proceso:

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu} \quad (6)$$

La introducción de una nueva interacción, además de las más familiares gravitatoria y electromagnética, y la fuerte relacionada con la estabilidad nuclear, supuso un paso crucial, aunque bastante radical en ese momento, para el desarrollo posterior de la Física de Nuclear y de Partículas. La idea de que tanto el electrón como el neutrino producido en los procesos β no estaban de ninguna manera, es decir, no eran parte constituyente del núcleo emisor, era también radicalmente nueva. Los miembros del par electrón-neutrino no son

constituyentes del núcleo, sino que se producen en la transición cuántica de un neutrón en un protón.

Casi inmediatamente se comenzó a pensar en la posibilidad de detectar los neutrinos y probar directamente su existencia, pero durante las décadas de 1930 a 1950 no había posibilidades técnicas reales de realizar los experimentos necesarios para ello.

Existen dos procesos de desintegración β , y uno equivalente de captura electrónica que tienen lugar en el núcleo:

$$\begin{aligned} X(A, Z) &\rightarrow Y(A, Z + 1) e^- \bar{\nu} \\ X(A, Z) &\rightarrow Y(A, Z - 1) e^+ \nu \\ e^- X(A, Z) &\rightarrow Y(A, Z - 1) \nu \end{aligned} \quad (7)$$

y así mismo existen dos tipos de procesos principales que pueden inducir los neutrinos:

$$\begin{aligned} \bar{\nu} X(A, Z) &\rightarrow Y(A, Z - 1) e^+ \\ \nu X(A, Z) &\rightarrow Y(A, Z + 1) e^- \end{aligned} \quad (8)$$

La primera estimación de la probabilidad de que ocurra el proceso descrito en (8) fue realizada por Hans Bethe y Rudolf Peierls (1934).

La magnitud física que se utiliza para determinar dicha probabilidad es conocida como sección eficaz (σ) y, como su nombre indica, tiene dimensiones de área, por lo que no se trata de una verdadera probabilidad en términos matemáticos sino de una magnitud relacionada. En procesos como los representados en (8) y que pueden ocurrir tanto entre partículas como entre partículas y núcleos, el procedimiento experimental consiste en repetir la colisión tantas veces como sea posible. En el caso general, se producen haces de partículas que se hacen colisionar con un blanco, y se miden las propiedades cinemáticas de las partículas en el estado final, es decir, sus momentos lineales y energías, a partir de las trayectorias de las partículas en los detectores correspondientes, para cada colisión. La sección eficaz se determina, dependiendo de la configuración experimental, como el cociente del número total de procesos producidos o el de los que tienen lugar para un ángulo dado o para una energía dada, entre el número de colisiones totales. Teóricamente, la sección eficaz se determina como el producto del cuadrado de la amplitud de probabilidad cuántica de pasar de un estado inicial a un estado final por el número de estados finales posibles. Este número de estados finales corresponde a las diferentes configuraciones en que se puede repartir la energía disponible en la colisión entre las partículas del estado final, conservando siempre momento lineal y energía. La medida experimental de la sección eficaz nos permite, por tanto, determinar una verdadera probabilidad de que ocurra un proceso de transición entre partículas gobernadas por una determinada interacción, satisfaciendo las leyes de la Mecánica Cuántica y de la Relatividad, y de este modo, obtener propiedades y características de las partículas y núcleos que participan en la colisión, así como de la interacción fundamental que las produce.

Como se muestra en la Figura 5 el protón es una partícula cuyo radio es de aproximadamente $10^{-15} m$, o $1 fm$ (femtometro o fermi como se denomina esta unidad a menudo). En realidad, el radio del protón es un poco menor, alrededor de

0.84 fm. La sección eficaz y en parte de ahí su nombre, se puede interpretar de un modo geométrico, correspondiendo al área que expondría, por ejemplo, el protón, a un haz de partículas que incidiese sobre él. Suponiendo que el protón es una esfera, el protón expondría un área transversal de πr^2 a dicho haz. Si tomamos, por simplificar el radio del protón como 1 fm, el área expuesta sería de aproximadamente $\pi 10^{-30} m^2$, número evidentemente muy pequeño comparado con las magnitudes de área con las que estamos familiarizados. Sin embargo, es un número bastante grande en el mundo subnuclear, donde la unidad de sección eficaz es el barn, $1 \text{ barn} = 10^{-28} m^2 = 100 fm^2$.

En el caso del proceso descrito en (8), como hemos mencionado, Bethe y Peierls determinaron teóricamente la sección eficaz del proceso utilizando el modelo de Fermi que esquemáticamente está representado en la Figura 9. El resultado que obtuvieron, que es muy similar al mejor conocido actualmente, fue que, por ejemplo, para $\bar{\nu}$ de 2 MeV, la sección eficaz era de $\sigma = 10^{-4} m^2$. Este número es 18 órdenes de magnitud más pequeño que el área del protón, lo que en el momento de su determinación llevó a la comunidad científica a pensar que “no había un modo práctico de detectar neutrinos”, como concluían Bethe y Peierls en su artículo. El propio Pauli, en algún momento, mencionó “haber hecho una cosa terrible. He postulado la existencia de una partícula que no se puede detectar”.

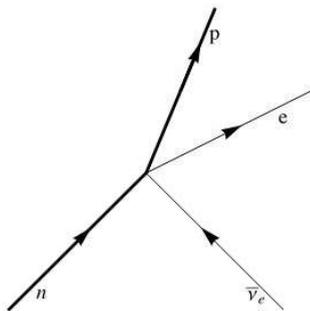


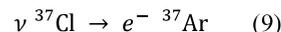
Figura 9. Diagrama de la desintegración β del neutrón según el modelo de Fermi.

Un modo de ver el grado de dificultad que presenta la detección de neutrinos se puede derivar del recorrido libre medio de los mismos en un cierto material. El recorrido libre medio λ , es la distancia promedio que tiene que recorrer una partícula o un sistema para cambiar sustancialmente su energía, momento, o producir un proceso como, por ejemplo, el descrito en (8), y se puede definir como el inverso del producto de la sección eficaz por la densidad de partículas de dicho material. Conociendo la densidad del agua, y usando el número de Avogrado y $\sigma = 10^{-48} m^2$, se obtiene $\lambda \approx 1.5 \times 10^{21} cm$, lo que equivale a unos 1600 años luz en agua. Este valor indica, por tanto, que la distancia media que recorre un haz de neutrinos de 2 MeV de energía antes de interactuar es de 1600 años luz en agua. Si en vez de considerar agua, consideramos medio

interestelar, dada la baja densidad de partículas con las que los neutrinos podrían interactuar en este caso, λ sería nada menos que de $\approx 10^{44} cm$, o 10^{26} años luz, lo que en ambos casos muestra la dificultad de detectar neutrinos dada la enorme distancia que recorren sin interactuar.

En la Física de neutrinos actual, parte de la Astronomía de “multimensajeros”, los neutrinos son considerados, precisamente por sus enormes recorridos libres, como uno de los “medios de transmisión” que proporcionan información más fiable sobre el comportamiento de las fuentes que los producen, tanto dentro como fuera de nuestra galaxia. La detección de neutrinos y la determinación de las fuentes que los han producido son uno de los mejores medios que tenemos en la actualidad para conocer una gran variedad de aspectos sobre el origen y evolución del Universo, siendo una herramienta fundamental tanto en Física de Partículas como en Astrofísica y Cosmología.

El primer físico que comenzó a pensar que sí era posible la detección de neutrinos fue Bruno Pontecorvo (1946) quien propuso el método de detección de neutrinos basado en la reacción:



Aunque comenzando en la década de 1960, no fue hasta bastantes años después, en 1998, que este método permitió a R. Davis confirmar definitivamente la observación de neutrinos cósmicos, solares en realidad, en el primer experimento llevado a cabo para detectar este tipo de neutrinos. R. Davis recibió el premio Nobel de Física en 2002 tras más de 40 años realizando experimentos de detección de neutrinos.

La idea clave para la detección de neutrinos consiste en contar con fuentes que produzcan grandes flujos de estas partículas, y disponer de grandes cantidades de núcleos con las que se pueda producir la interacción. De esta manera, se consigue que el producto del flujo (número de neutrinos producidos por unidad de área y tiempo por el número de blancos) por la sección eficaz y por el tiempo en que se tomen los datos, produzca un número medible de interacciones inducidas por los neutrinos.

Las dos fuentes de neutrinos más evidentes en esos momentos, y también en la actualidad, son el Sol y los reactores nucleares cuando se encuentran en operación. El flujo de neutrinos solares es de $\approx 6 \times 10^{10} cm^{-2}s^{-1}$. El primer reactor utilizado, Savannah River, producía un flujo de antineutrinos de $2.3 \times 10^{20} cm^{-2}s^{-1}$ mientras los que llegaban al experimento donde se querían detectar era de $10^{13} cm^{-2}s^{-1}$.

La primera prueba real de la existencia de neutrinos fue obtenida en el periodo 1953-59 en los experimentos de F. Reines y C.L. Cowan. En dichos experimentos los antineutrinos procedentes del reactor de Savannah River se detectaron a través del proceso:



En los reactores, los antineutrinos se producen en las cadenas de desintegración β de núcleos ricos en neutrones, que son los

productos de la fisión del uranio y del plutonio, siendo sus energías menores de 10 MeV.

El blanco utilizado en el experimento era un centelleador⁵ líquido de unos 1.400 litros, que contenía CdCl₂. El e⁺ producido en el proceso (10) se frenaba en el centelleador y se aniquilaba con un e⁻ produciendo dos γ de energías alrededor de 0.51 MeV, es decir m_e, y momentos opuestos, como se describe en la Figura 10. Un neutrón producido en el mismo proceso va perdiendo energía en el blanco y es capturado por el núcleo de

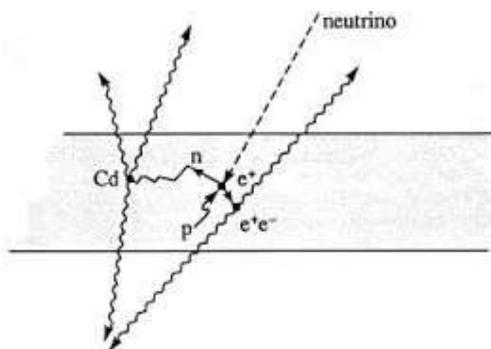


Figura 10. Esquema del experimento de Cowan y Reines, donde se pueden observar los dos fotones que se producen en direcciones opuestas como consecuencia de la aniquilación de un e⁺ con un e⁻ en coincidencia temporal con los producidos en la desexcitación del Cd.

Cd dentro de un intervalo temporal de unos 5 μs, produciendo al menos un γ a través del proceso: n + ¹⁰⁸Cd → ¹⁰⁹Cd + γ.

Por tanto, la primera detección de neutrinos se realizó midiendo en los 110 fotomultiplicadores del experimento de Reines y Cowan (1953, 1956, 1959) dos γ de la aniquilación e⁺e⁻ en coincidencia con al menos otro γ (Figura 10) procedente de la captura del neutrón por el núcleo de Cd.

El descubrimiento no fue realmente una enorme sorpresa, ya que la teoría de Fermi tuvo tanto éxito en la descripción de la desintegración β nuclear que la comunidad científica tenía pocas dudas sobre la existencia de los neutrinos. Se puede decir que Reines y Cowan cerraron brillantemente un capítulo, tras 25 años de la primera idea de Pauli. Ambos enviaron un telegrama a Pauli comunicándole la noticia, y éste contestó escuetamente: “Gracias por el mensaje. Todo llega al que sabe cómo esperar”. Fred Reines recibió el premio Nobel en 1995, casi 35 años después de la realización del experimento, “por la detección del neutrino”, Glen Cowan había fallecido en 1974.

Inicialmente, ambos habían considerado realizar el experimento de detección con neutrinos procedentes de la explosión de una bomba atómica, aunque entendieron que realizarlo con un reactor era más simple y factible. Escribieron a Fermi con la propuesta y éste los animó a realizar el experimento respondiéndoles además que “el nuevo método tenía la ventaja de que la medida podía ser repetida cualquier

número de veces”. Reines, en la lectura del Nobel, recordó que “le sorprendía lo que tardaron en darse cuenta de una conclusión tan obvia, y cómo no se les ocurrió a otros científicos con quienes habían comentado la posibilidad de realizar los experimentos con reactores en vez de con explosiones atómicas”.

A partir del momento en que se publicaron los resultados del experimento de Reines y Cowan, y que fueron ampliamente aceptados por la comunidad científica, se puede considerar que los neutrinos empezaron a ser considerados parte fundamental en la Física de Partículas.

Davis, en 1955, instaló un experimento en un reactor en Brookhaven, sensible a la reacción descrita por la ecuación (9), sin obtener ningún resultado. La idea era que los antineutrinos, producidos en reactores, podían ser detectados usando la reacción mencionada, pero no ocurrió así, pues no se observó ningún núcleo de Ar, y se trató de la primera prueba de que dicho proceso no podía ser producido por antineutrinos. En otras palabras, quedó establecido que los antineutrinos producidos en reactores pueden producir positrones, como muestra el experimento de Reines y Cowan, pero no pueden producir electrones, como se concluye del experimento de Davis.

Davis continuó estudiando los neutrinos situando el mismo experimento en la mina Homestake, muy profunda, para evitar la posible contaminación que podrían introducir procesos producidos por radiación cósmica. Davis fue la primera persona capaz de detectar, usando el proceso descrito en la ecuación (9), directamente los neutrinos producidos por el Sol. Sin embargo, solo observó 1/3 de la cantidad que se esperaba, llevando a lo que se conoció como el problema de los neutrinos solares, y la explicación del mismo a la oscilación de neutrinos, de donde se deduce que éstos tienen masa no nula.

Este problema fue resuelto bastantes años después, utilizando técnicas experimentales similares, pero detectores mucho más

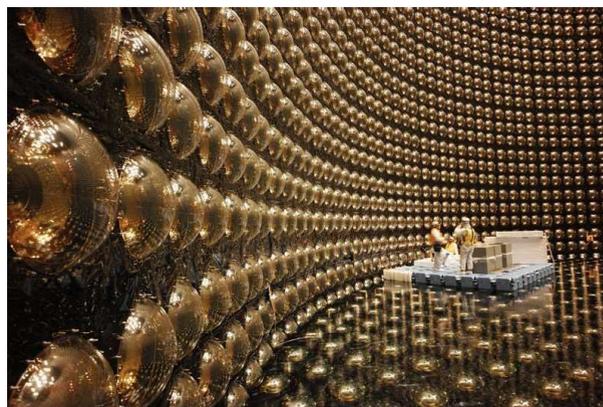


Figura 11. Fotografía de los fotomultiplicadores que se utilizan en el experimento SuperKamiokande para la detección de neutrinos. Imagen: Kamioka Observatory, ICRR, Univ. Tokyo

⁵ Un centelleador es un material que transforma la energía depositada en producir transiciones entre estados del sistema que conllevan la emisión de fotones de energías medibles por fotomultiplicadores. Reines y Cowan fueron los primeros que

entendieron que el fenómeno de centelleo en líquidos orgánicos, descubierto en esa época, podía emplearse en construir un detector del tamaño del m³ necesario para detectar neutrinos.

grandes, como SNO o SuperKamiokande que se muestra en la Figura 11.

Recordemos que el experimento de Reines y Cowan poseía un tanque de poco más de 1 m^3 y 110 fotomultiplicadores. SuperKamiokande consiste en un tanque cilíndrico de unos 40 m de altura, 50.000 Toneladas de agua ultrapura y está equipado con más de 13.000 fotomultiplicadores. Este detector opera en la actualidad y se espera una actualización del mismo para finales de esta década, HyperKamiokande, que será aproximadamente 20 veces mayor que el actual. Se está planeando otro gigantesco detector, DUNE, en la mina de Sandford, en Dakota del Sur, Estados Unidos, que poseerá un volumen de unas 70.000 toneladas de Argon líquido y que también comenzará a operar a finales de la presente década.

Es claro que esta partícula propuesta por Pauli, descrita por Fermi, y detectada por primera vez por Reines y Cowan, casi sin masa, sin carga eléctrica, y que interacciona solo débilmente, es uno de los sistemas claves en Física. Determina, por una parte, el futuro de la Física Nuclear, que está dominada en muchos aspectos por la enorme cantidad de transiciones β entre especies nucleares. Se están construyendo experimentos gigantes para entender sus todavía poco entendidas propiedades dentro de la Física de Partículas, tales como su masa o si es su propia antipartícula, además de los mecanismos de mezcla de especies o fenómenos de oscilación. Y estos mismos experimentos son igualmente fundamentales para entender el papel que juegan los neutrinos en muchos aspectos en Astrofísica y Cosmología.

VI. MÁS PIEZAS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR

Como ya hemos mencionado, además de las partículas, elementales o no, entendidas como las piezas a partir de las que se va estructurando la materia, la idea de fuerza o interacción ha evolucionado durante el tiempo en que se ha ido estableciendo el ME.

En la Figura 12 se muestra un esquema de los dos modos de describir las fuerzas que se utilizan habitualmente en Física. En un caso, la descripción clásica de las fuerzas, éstas “empujan” a los cuerpos y cambian su estado de movimiento, dando lugar a la idea de “acción a distancia”. En el segundo caso, basado en la Relatividad y en la Mecánica Cuántica, es otra partícula la que transfiere energía y momento entre las dos partículas que sufren la interacción y que da lugar a la fuerza que se ejerce entre las mismas.

Esta idea fue propuesta por primera vez por Yukawa en 1933, en cierto modo especulando con la naturaleza de la fuerza nuclear. Combinando Relatividad y Teoría Cuántica, intentó describir esta interacción nuclear entre protones y neutrones como debida al intercambio de una nueva partícula, llamada genéricamente mesón. A partir del valor estimado y medido del

tamaño del núcleo, del orden de fm , Yukawa concluyó que la masa de esta partícula que proponía debía ser de unas 200 veces la masa del electrón, de ahí el nombre de mesón, cuyo origen es griego y significa partícula de masa “intermedia”. Esto representó el comienzo de la teoría de intercambio de mesones en Física Nuclear, que aún hoy se utiliza en multitud de estudios de fenómenos a esa escala, por la que recibió el premio Nobel en 1949. Además, indica también el comienzo del estudio de las interacciones entre partículas desde el punto de vista de su descripción debida al intercambio de otras partículas, lo que en

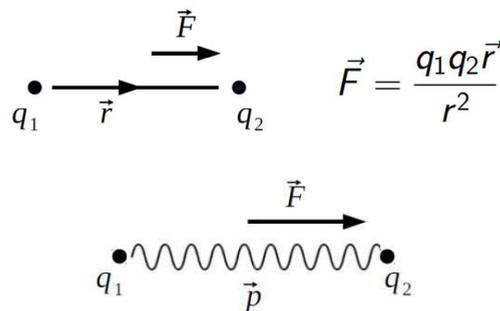


Figura 12. Esquema de la descripción de las fuerzas o interacciones, (arriba) clásicamente y (abajo) como debida al intercambio de partículas. La fórmula es genérica para la fuerza newtoniana o coulombiana por lo que no se utilizan las correspondientes constantes G_N o $1/4\pi\epsilon_0$.

cierto modo podemos decir que ha caracterizado la construcción y desarrollo del actual ME.

En 1937 se encontró una partícula de masa como la mencionada, unas 200 veces m_e , en radiación cósmica por Neddermeyer y Anderson (1937) y por Street y Stevenson (1937). Debido a su masa, se pensó inicialmente que podía tratarse del mesón predicho por Yukawa, pero no podía ser tal, pues no interaccionaba de modo suficientemente “fuerte” al atravesar la materia. Era una partícula que no sufría dicha interacción. Se trataba de una partícula enteramente nueva y que se comportaba como el electrón, excepto que tenía un poco más de 200 veces su masa y, además, era inestable. Su vida media es $\tau_\mu = (2.1969811 \pm 0.0000022) \times 10^{-6}s$ (Zyla *et al.*, 2020).

Esta partícula, que llamamos *muon* y se representa por la letra griega μ^6 , es la primera partícula de lo que hoy conocemos como segunda generación o segunda familia, que corresponde a la segunda columna de la Figura 1. Se trata del primero de un amplísimo conjunto de descubrimientos inesperados de nuevas partículas. I.I. Rabi comentó, como un comensal en un restaurante que recibe un plato inesperado, “¿Quién ha pedido esto?”. Se introdujo el término leptón, para los objetos que no sufren interacción fuerte, como el electrón, el muon y el neutrino,

⁶ El μ como otras partículas se representa genéricamente por un símbolo, y cuando no es necesario no se especifica su carga eléctrica, aunque existen el μ^- y su antipartícula el μ^+ . En el caso de las partículas que no tienen carga eléctrica, como el ν ,

su antipartícula se denota por $\bar{\nu}$. Esta notación también se utiliza para los quarks y hadrones donde no se hace explícita su carga eléctrica. Por ejemplo, tenemos p para denotar el protón y \bar{p} para el antiprotón.

y el de hadrón para partículas que sí la sufren, como el protón, el neutrón y la partícula de Yukawa que aún no había sido descubierta.

Actualmente es bien conocido, que los muones cósmicos que llegan a la tierra se producen en la parte alta de la atmósfera, típicamente unos 15 Km por encima del nivel del mar, cuando los protones, uno de los principales componentes de la radiación cósmica, comienzan a colisionar con las partículas que componen la atmósfera. Podría parecer que el μ sería una partícula difícilmente detectable dada su corta vida media y que no serían detectables en un laboratorio en la Tierra. Sin embargo, cuando hablamos de vida media nos referimos al tiempo promedio que tarda en desintegrarse la partícula en su propio sistema de referencia, mientras que típicamente la observaremos desde nuestro sistema de referencia en un laboratorio al nivel del mar o a unas decenas o centenares de metros de altura. La energía media de los μ detectados a nivel del mar es de $\approx 4 \text{ GeV}$. Si consideramos el factor de dilatación relativista $\gamma = E_\mu / (m_\mu c^2)$ para un μ de esta energía resulta de ≈ 38.1 , y su velocidad en unidades de la velocidad de la luz es de $\beta = v/c \approx 0.999$, prácticamente c . La distancia que recorrería entonces un μ de esta energía, en promedio, antes de desintegrarse en el sistema de referencia en que la observamos es de $d_\mu = \beta \gamma c \tau_\mu \approx 25 \text{ Km}$. Con estas distancias promedio, es fácil comprender que si los μ tienen energías como las mencionadas, o superiores, no presentan ningún problema experimental en su detección por el hecho de que su vida media sea tan pequeña.

Al poseer carga eléctrica, antes de sufrir el proceso de desintegración, los μ , así como cualquier otra partícula cargada, van desplazando electrones de los átomos, moléculas u otras estructuras, de los materiales que atraviesan, lo que se llama proceso de ionización. Esta energía que pierde el μ , u otra partícula cargada al atravesar la materia y que se deposita en la misma, es la que se aprovecha para detectar su paso a través de la materia, y constituye el fundamento en que se basan los detectores de partículas cargadas. Normalmente se construyen detectores con materiales que afectan lo menos posible a la energía y momento de la partícula que se desea medir, o se colocan pequeñas cantidades de material si esto no es posible, y se someten a campos eléctricos que permiten transportar los electrones y los iones producidos por la partícula cargada cuando atraviesa el material, que son recogidos en dispositivos electrónicos, de tal manera que la carga depositada medida permite determinar la energía depositada por la partícula considerada.

La relación entre la vida media de una partícula, en su sistema de referencia propio con la energía que posee, con la distancia recorrida en el sistema desde el que se la observa, que habitualmente llamamos sistema de laboratorio, gobernada por las leyes de la Relatividad Especial, es fundamental para detectar e identificar las partículas que se producen en los diferentes procesos físicos de interés.

Los detectores actuales son capaces de observar partículas cuyas vidas medias son 6 órdenes de magnitud inferiores a las del μ .

El proceso de desintegración del μ es un proceso dinámico que explica la Mecánica Cuántica y está gobernado completamente por la interacción débil (Figura 13), en el que

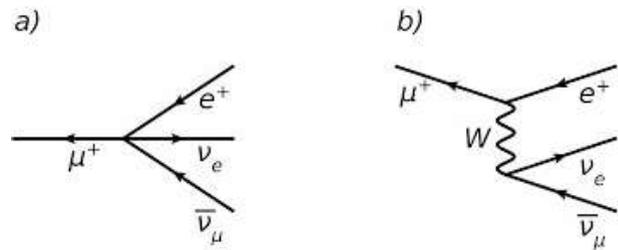


Figura 13. Diagramas que representan la desintegración del μ , a) en la teoría de Fermi, b) en el ME donde ya aparece la partícula mediadora de la interacción débil, el W.

para un μ^+ se produce un e^+ y dos clases de ν , el que se producía en la desintegración β nuclear, el ν_e , y una nueva especie que recibe el nombre de neutrino de muon ν_μ .

No fue hasta 1962 cuando se comenzó a desarrollar, en el laboratorio Brookhaven, un experimento similar al de Cowan y Reines, pero esta vez con haces de ν_μ como partículas incidentes, con el objetivo de probar que este ν_μ es una partícula diferente al ν_e . Leon Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger utilizaron haces de estas partículas para probar que podían producir el proceso $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X$, pero no el $\nu_\mu + N \rightarrow e^- + X$, donde X representa cualquier partícula o conjunto de partículas que se puedan producir en el proceso. Lo que observaron fue, efectivamente, que solo el primer proceso tenía lugar, ya que se detectaban μ en el estado final pero no se observaban e , como hubiera ocurrido de ser ν_μ la misma partícula que el ν_e .

En 1988 se concedió el premio Nobel a L. Lederman, M. Schwartz y J. Steinberger “por el método de construcción de haces de neutrinos y la demostración de la estructura en dobletes de los leptones con el descubrimiento del neutrino del muon”.

El descubrimiento del segundo tipo de neutrino fue un gran acontecimiento, pues demostró claramente que ambos neutrinos correspondían a dos diferentes leptones, e y μ , y que por tanto existían dos familias diferentes de partículas con las mismas propiedades salvo su masa. Dicho de otro modo, el mundo que conocemos tiene una copia casi idéntica, constituida por partículas con las mismas propiedades que las que conocemos, pero con mayor masa y por supuesto inestables. Cuando estas partículas de la segunda familia se producen, en aceleradores naturales como en la radiación cósmica, o artificiales, construidos en laboratorios en la Tierra, siempre se desintegran en partículas de la primera familia que son las que observamos en la Naturaleza. La Física actual no puede explicar cuál es la razón de la existencia de esta segunda familia. En realidad, no solo existen esta copia, sino que hay otra copia formada por partículas aún más pesadas, las de la tercera columna de la Figura 1, que se transforman o desintegran igualmente en partículas de la primera o segunda familia también por

interacción débil. Lo que la Física actual sí puede explicar es que no hay más que tres copias, la de las partículas que forman el mundo que conocemos, el Universo visible, y dos más que sabemos que existen, pero a pesar de los esfuerzos, todavía no se conoce su papel en este aspecto.

Estas desintegraciones o procesos de transformación cuántica entre dos sistemas diferentes siempre tienen lugar por interacción débil, y de hecho esta propiedad es única para esta interacción. El proceso en el que un leptón como el μ se transforma en otra especie diferente, el e , se conoce como proceso de cambio de sabor y nunca se ha observado en procesos fuertes ni electromagnéticos.

Esto hace que las tres interacciones que se pueden cuantificar, que son las tres mencionadas⁷, jueguen un papel diferente en los procesos que estructuran la materia. La interacción electromagnética es responsable de producir estructuras a escala atómica y mayor. La interacción fuerte es responsable de producir estructuras a escala hadrónica y nuclear. La interacción débil no es responsable, hasta donde sabemos, de producir ninguna estructura estable a ninguna escala. Sin embargo, es la responsable de muchas de las transformaciones que tienen lugar entre núcleos, entre hadrones, y entre partículas elementales, y en estas transformaciones siempre tiene lugar un cambio de una partícula de la segunda o tercera familia en otra especie correspondiente a una de las familias de masa más baja.

Existe aún otra diferencia trascendental entre las tres interacciones. Se dice que en un proceso dado se conserva la paridad cuando dicho proceso no cambia, o es invariante, mediante una transformación en que pasamos de un sistema (x, y, z) a otro $(-x, -y, -z)$. En el caso de los procesos gobernados por la fuerza electromagnética o la fuerte nunca se ha observado ninguna modificación en tales procesos al realizar este cambio de coordenadas. Sin embargo T.D. Lee y C.N. Yang (1956) propusieron, a la vista de ciertos aspectos experimentales, que esto no estaba garantizado en el caso de procesos débiles como la desintegración β nuclear y otros. Casi inmediatamente, C.S. Wu (1957), e independientemente L. Lederman (ver Garwin *et al.*, 1957), probaron de forma experimental que, efectivamente, en procesos β de desintegración del ^{60}Co , la paridad no se conservaba. Esto permitió construir una teoría de la desintegración β nuclear y de la interacción débil basada en este hecho, que en la actualidad es parte fundamental del ME y fue esencial en su construcción teórica.

La idea de simetría en Física y en la descripción de los fenómenos entre partículas ha jugado, y juega, un papel esencial para construir modelos y teorías que expliquen los fenómenos que ocurren entre las mismas. Aunque antigua, esta idea quedó plenamente formalizada en el momento en que en 1918 la física y matemática alemana Emmy Noether publicó el teorema que lleva su nombre, uno de los que más impacto ha tenido posteriormente en el desarrollo de la Física Nuclear y de Partículas y en el entendimiento de las interacciones fundamentales. Aunque no es ni mucho menos la formulación

exacta del mismo, el teorema de Noether nos explica que si tenemos un sistema físico gobernado por una cierta energía potencial que matemáticamente posee una cierta simetría, entonces existe una cantidad conservada que se puede derivar de esta simetría. Los ejemplos más comunes son, por ejemplo, si el sistema físico tiene el mismo comportamiento en cualquier punto del espacio, o se comporta del mismo modo cuando se realiza una traslación espacial del mismo, el momento lineal se conserva. Igualmente, si el sistema se comporta del mismo modo con independencia del instante de tiempo en que midamos sus propiedades, podemos decir que la energía total del mismo se conserva. Hasta que Noether enunció su teorema, el principio de conservación de la energía era realmente de origen desconocido, y hasta un poco “misterioso”. La formulación matemática simple y profunda de este teorema ha realizado un gran trabajo en “desmitificar” la Física.

Hasta donde sabemos, el proceso de desintegración del μ es el único proceso en la Naturaleza completamente gobernado por la interacción débil. Es, por tanto, el proceso que nos permite medir sin ambigüedad las características intrínsecas de la interacción débil, en particular su intensidad. Esto sería equivalente al valor de $Q_e^2/4\pi\epsilon_0$ que caracteriza la intensidad intrínseca de la interacción electromagnética, siendo Q_e la carga del electrón o carga unidad, y ϵ_0 la permitividad eléctrica del vacío. Aunque el proceso representado en la Figura 9 es similar, sin embargo, dado que aparecen el n y el p , aunque está principalmente gobernado por la interacción débil, también hay que considerar la interacción fuerte que enlaza a las partículas no elementales que aparecen en dicha figura, el protón y el neutrón en la caracterización cuantitativa del mismo.

Cuando se pueden separar las contribuciones de la interacción fuerte en los procesos gobernados por la interacción débil, se ha observado claramente que en todos los procesos débiles la intensidad de la interacción es la misma, lo que se conoce como Universalidad de la interacción débil. Esta propiedad es fundamental dentro del ME, pues implica que en todos los procesos débiles la fuerza que actúa es la misma.

Hay que mencionar que, muy recientemente, a partir de 2018, esta propiedad se ha visto en tensión con datos obtenidos del experimento LHCb del LHC del CERN, como por ejemplo los últimos resultados en la referencia del LHCb Ccollaboration (2021), siendo en la actualidad uno de los campos de mayor interés en la comunidad de Física de Partículas. Se trabaja para confirmar si la observación experimental es estadísticamente significativa y, como consecuencia, determinar si el efecto es genuino o no. Ya se ha comenzado a proponer modelos que, en caso de confirmarse esta observación, permitiesen explicarla.

Estas propiedades tan especiales de la interacción débil nos llevan a pensar que quizá nos tenga guardadas algunas sorpresas a medida que se vaya comprendiendo mejor y dispongamos de experimentos más precisos, como los de neutrinos mostrados previamente u otros, en esta y en las próximas décadas.

⁷ Desafortunadamente, como es bien conocido, la cuarta interacción fundamental, la gravitatoria, aún no se puede describir en términos cuánticos, siendo éste quizá el problema

más importante con el que se encuentra la Física actual al nivel de las partículas elementales y las interacciones fundamentales.

VII. EL MODELO QUARK

En 1947 C.F. Powell y colaboradores, comenzaron a utilizar emulsiones nucleares, que permitían registrar, con un procedimiento similar al de una fotografía, el paso de partículas a través de las mismas, y las expusieron a radiación cósmica, descubriendo una nueva partícula de masa ligeramente superior a la del μ y que sí interactuaba fuertemente al atravesar la materia. Además, se pudo comprobar, utilizando estas técnicas, que se desintegraba en un μ y un ν_μ . Esta nueva partícula que hoy conocemos como pion, representada por la letra griega π , se comprobó que era efectivamente el mesón propuesto por Yukawa. Muy poco después, en 1950, C.F. Powell recibió el premio Nobel por el desarrollo del método fotográfico basado en emulsiones nucleares y por el descubrimiento del π . En 1949 se observó, utilizando técnicas similares, un nuevo mesón, que ahora conocemos como K^+ por el grupo de Powell, Rochester y Butler (1947) usando una cámara de niebla, descubrieron, en un proceso iniciado por radiación cósmica, trayectorias de dos partículas cargadas en forma de “V” procedentes de una partícula neutra que no dejaba rastro en la cámara, pero cuya masa se puede determinar reconstruyendo la energía y momento de las trayectorias de las partículas que formaban la “V”. Estas nuevas partículas, eléctricamente neutras, se llamaron en primer lugar partículas-V, pero actualmente se denominan K^0 y Λ^0 . La Λ^0 fue la primera partícula neutra que se descubrió y que era más pesada que el neutrón. A comienzos de 1953 se produce “una explosión” de descubrimiento de nuevas partículas, una verdadera proliferación. Comienza el proceso ocurrido en otras muchas ramas de la Ciencia de tratar de clasificar en base a alguna propiedad distintiva estas partículas. Un buen ejemplo de un proceso similar fue la clasificación de la tabla periódica de los elementos en Química. En este caso, las partículas comenzaron a clasificarse en base a su vida media, y se dividieron entre aquellas que se desintegraban por interacción fuerte con vidas medias del orden de 10^{-24} s y las que lo hacían por interacción débil con valores de 10^{-13} s o más largos. Por supuesto, también se consideró la división entre las partículas en base a la interacción en que participan, leptones que solo sufren la interacción débil, y hadrones que además sufren la interacción fuerte. Por supuesto, dependiendo de su carga eléctrica, adicionalmente sufren la interacción electromagnética si su carga eléctrica no es nula. También comenzaron a clasificarse en función de su espín. Si este es semi-entero, $1/2$ como e y μ , las partículas se denominan fermiones, y si es 0 o 1 como el γ , se denominan bosones.

T. Nakano y K. Nishijima (1953) y M. Gell-Mann (1956) introdujeron el concepto de “extrañeza” para explicar cómo las partículas como K^0 y Λ^0 se producían copiosamente y se desintegraban “lentamente” por interacción débil. La interpretación moderna de este hecho es que ambas partículas poseen un quark s (ver tabla 1), y un anti-quark del mismo tipo, de tal manera que el par s anti- s se produce por interacción fuerte, pero cada uno de ellos se desintegra individualmente por interacción débil.

A partir de los años 50 se comienza a disponer de aceleradores de partículas de altas energías, superiores al GeV , que permiten acumular y acelerar, por ejemplo, electrones que

pueden ser lanzados sobre blancos que contengan fundamentalmente protones, aunque también neutrones, para explorar su estructura, de acuerdo con el principio de de Broglie. Se comienza a observar, que la distribución de carga eléctrica del protón, e incluso del neutrón, no es uniforme, y la descripción de esta estructura electromagnética de ambas partículas empieza a sugerir que ambas poseen algún tipo de estructura interna, pues los electrones se desvían de forma diferente a como lo harían por una carga “puntual” como ocurría en los experimentos pioneros de Rutherford y colaboradores a comienzos del siglo XX. Robert Hofstadter recibió el Nobel en 1961 por sus estudios pioneros respecto a los procesos de colisión de electrones con núcleos atómicos, que condujeron a la evidencia de que tanto protón como neutrón poseían estructura interna.

Este tipo de experimentos continuaron en el laboratorio SLAC durante casi tres décadas, utilizando cada vez mayores energías de los electrones iniciales y detectores más sofisticados, con el objetivo de tratar de entender en detalle la estructura del protón y del neutrón como se puede ver en la Figura 14.

Utilizando el dispositivo de la Figura 14, se pudo comprobar que la distribución de energías de los electrones que se observaban a ángulo fijo, del detector, reflejaban que estaban colisionando con objetos “dentro” del protón que formaban parte de él, y que no colisionaban con el protón como un todo.



Figura 14. Fotografía de los detectores de SLAC que median los electrones que salían desviados tras colisionar con los protones del blanco en los experimentos que ayudaron a establecer el modelo quark. Imagen: SLAC National Accelerator Laboratory, Archives and History Office.

Estos objetos, en la interpretación de Bjorken y Feynman, son lo que hoy conocemos como quarks, partículas elementales de spin $1/2$, que constituyen el protón y el neutrón, así como el resto de los hadrones conocidos.

Unos pocos años antes, Gell-Mann (1964) e independientemente Zweig (1964) habían propuesto un modelo de clasificación de los hadrones de tal manera que todos ellos estaban compuestos por tres quarks u , d y s , y los correspondientes anti-quarks, que poseían spin $1/2$ y cargas fraccionarias $\pm 1/3$, $\pm 2/3$ en unidades de la carga del electrón. Los mesones estaban compuestos por dos quarks y los bariones

por tres. Estas cargas fraccionarias no se habían observado nunca experimentalmente, por lo que se consideraba más un modelo matemático, que permitía clasificar con tres partículas los centenares de hadrones que ya se habían observado por entonces. Es fácil ver, por ejemplo, que el protón que tiene la misma carga que el electrón en valor absoluto, se puede entender como compuesto por el sistema $(u u d)$, ya que $Q_u = +2/3 Q_e$ y $Q_d = -1/3 Q_e$ siendo Q_e la carga eléctrica del electrón. Al estar formado por 3 partículas de spin $1/2$ las reglas de conservación de momento angular determinan que el protón también tiene spin $1/2$. En el caso del neutrón, la composición sería $(u d d)$ con carga eléctrica nula, que es lo que se observa experimentalmente. El π^- , sería un mesón formado por $(u \bar{d})$ para el π^+ , pudiendo formar también estados π^- y π^0 con las antipartículas correspondientes.

El conjunto de los piones constituye el de los hadrones más ligeros, y son en cierto modo, el equivalente en estructura debida a interacción fuerte, al átomo de Hidrógeno unido por la interacción electromagnética. Aunque la energía de enlace del átomo de Hidrógeno ha sido determinada experimentalmente hace más de un siglo, y su determinación teórica también tiene más de un siglo, en el caso del π , el valor experimental no es conocido con suficiente precisión, y las teorías actuales de interacción fuerte, fundamentalmente la Cromodinámica Cuántica o QCD por sus siglas en inglés, no lo pueden predecir partiendo de primeros principios, ni utilizando los cálculos de lo que se llama “*lattice QCD*”, que es la teoría computacional más potente que se conoce para realizar este tipo de cálculos. Esto da una idea de la complejidad de la descripción matemática y física de la interacción fuerte.

O. Greenberg (1964) y M.Y. Han y Y. Nambu (1965) propusieron, independientemente, la idea de carga de color como un grado de libertad adicional para los quarks. Podemos decir que una partícula interacciona electromagnéticamente si tiene carga eléctrica diferente de 0. Análogamente, una partícula interacciona fuertemente si tiene carga de color diferente de 0. La diferencia entre ambas interacciones es que, en el caso de la interacción fuerte, los quarks poseen carga de color diferente de 0, pero los hadrones, hasta donde sabemos, poseen todos ellos carga de color 0, de tal manera que, como ya hemos mencionado, interaccionan unos con otros como lo hacen los átomos para formar las moléculas, y así se puede describir la estructura y propiedades de los núcleos, pero solo los quarks tienen carga de color diferente de 0, y por tanto, son los que verdaderamente interaccionan fuertemente como lo hacen protón y electrón para formar el átomo de H.

Una propiedad esencial de las partículas que tienen carga de color diferente de 0 es que están confinadas en los hadrones, o si se prefiere, no se observan en libertad.

La teoría de la interacción fuerte, QCD, fue formulada matemáticamente en 1972, es ahora parte del ME, y se construyó en analogía a la teoría cuántica de la interacción electromagnética, QED, por sus siglas en inglés. La idea fundamental es que la interacción fuerte entre quarks que poseen color tiene lugar de modo análogo a lo que ocurre entre un

electrón y un positrón o un protón, que intercambian fotones cuando interaccionan. En el caso de QCD, las partículas mediadoras reciben el nombre de gluones. Aunque existen muchas similitudes entre estas dos teorías cuánticas, hay una diferencia fundamental: mientras que los fotones no poseen carga eléctrica, los gluones si poseen carga de color. Este hecho tiene consecuencias de todo tipo para entender los fenómenos originados por la interacción fuerte. En primer lugar, su rango, la interacción fuerte es de corto alcance, del orden del fm , precisamente por esa razón. Aunque los gluones son partículas sin masa, y viajan a la velocidad de la luz, igual que los γ , poseen la carga que transmiten y eso hace que interaccionen consigo mismas mientras transmiten energía y momento entre los quarks. Es difícil imaginar cómo sería el Universo, y el mundo que conocemos, si los γ tuviesen carga eléctrica diferente de 0. La otra consecuencia es la del confinamiento. No obstante esta propiedad, aunque observada en todos los fenómenos que se producen -puesto que nunca se ha observado un quark en libertad- en la actualidad no se puede derivar matemáticamente de modo preciso de la teoría de QCD.

La otra propiedad, radicalmente diferente en la teoría de interacción fuerte respecto a la electromagnética, es lo que se conoce como libertad asintótica. Esto significa que, cuanto más energía se comunica a un quark más libre parece estar, justo al contrario de lo que ocurre con la interacción electromagnética, en la que cuanto más acercamos dos partículas, de acuerdo con la ley de Coulomb, más intensa es la interacción entre las mismas. En la Figura 15 se muestra una cantidad α_s , similar a lo que es $Q_e^2/4\pi\epsilon_0$ en el caso de la interacción electromagnética, es decir, la intensidad intrínseca de la interacción, o intensidad de la interacción entre las partículas que poseen carga unidad de la misma.

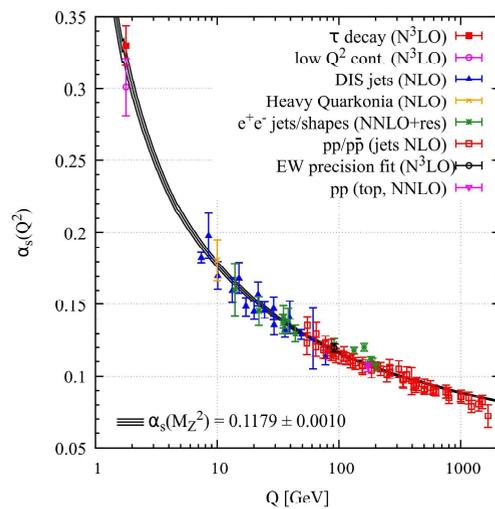


Figura 15. Variación de la intensidad de la interacción fuerte con la energía intercambiada. Imagen: Particle Data Group (Zyla et al., 2020)

Como se puede observar, en el caso de la interacción fuerte, esta intensidad varía muy fuertemente con la energía, lo que

también ocurre en el caso electromagnético, aunque en mucha menor medida. Cuanto mayor es la energía que se intercambia, denotada Q , menor es la intensidad de la interacción, se da el fenómeno de la libertad asintótica, en cambio cuanto menor es Q , mayor es la intensidad de la interacción, es decir, cuanto más se separan los quarks mayor es la fuerza que se ejerce entre los mismos, lo que da lugar al fenómeno de confinamiento. David J. Gross, H. David Politzer y Frank Wilczek recibieron el premio Nobel en 2004 por "el descubrimiento de la libertad asintótica en la teoría de la interacción fuerte". El gluon fue descubierto en 1979 en el laboratorio alemán DESY, estudiando procesos de aniquilación e^-e^+ dando lugar al fenómeno de confinamiento.

La segunda generación o segunda familia, y en parte una buena confirmación del modelo quark, se completó con el descubrimiento del quark c o *charm*, a través de la observación del mesón J/ψ . Sin embargo, como ya ocurriera con el μ , en 1976 se observó un tercer leptón, llamado τ , con una masa de 1.777 GeV , casi dos veces la masa del protón, que constituía la primera partícula de la tercera generación, con la idea de llevar otro neutrino asociado, el ν_τ , que se descubrió finalmente en el año 2000.

En 1977 se descubrió una nueva partícula llamada Y que contenía aún un quinto quark, el quark b , *bottom* o *beauty*, con masa entre 4 y 5 GeV . El descubrimiento de este quark, el primer miembro de su especie de la tercera generación, proporcionó nuevos ímpetus en la búsqueda de un sexto quark que completase, con un patrón similar, el comportamiento de los leptones, es decir la existencia de 3 leptones y 3 neutrinos, y de 6 quarks.

En 1995, tras 18 años de búsqueda de la existencia del sexto quark en diferentes aceleradores de partículas, pero principalmente en el Tevatron de Fermilab, los experimentos CDF y D0 descubrieron el quark top. La masa del quark top medida en la actualidad es de $172.8 \pm 0.3 \text{ GeV}$ tras las últimas medidas realizadas en el LHC del CERN por los experimentos ATLAS y CMS (ver Zyla *et al.*, 2020). Esta masa es muy difícil de entender, es más de 170 veces superior a la masa del protón y más de 30 veces mayor que la del quark b . No se entiende hoy en día por qué su masa es tan distinta a la de los otros 5 quarks, ver Figura 1. En realidad, no se entiende aún el patrón de masa de los leptones y de los quarks. El ME a través del mecanismo de Higgs puede acomodar dichas masas, pero no las puede predecir.

VIII. LOS BOSONES W Y Z

Hacia 1957, separadamente, J. Schwinger (1957), S. Bludman (1958) y S. Glashow (1959) sugirieron que la interacción débil estaba mediada por bosones cargados, muy pesados, que después comenzaron a denominarse W^\pm , como se muestra en el diagrama b) de la Figura 13. Esta idea es similar a la de Yukawa cuando introdujo la idea de que la interacción entre protones y neutrones en el núcleo estaba mediada por π , que también son bosones.

Diez años después, S. Weinberg (1967) y A. Salam (1968), propusieron, separadamente, una teoría que unificaba las interacciones débil y electromagnética. Esta teoría requería la

existencia de un bosón neutro, que ahora es conocido como Z^0 , que mediaba ciertas interacciones débiles que no habían sido observadas en ese momento. También contenía la idea de otro bosón adicional, el bosón de Higgs, para explicar la masa de los bosones W^\pm y Z^0 , además de las de los leptones y los quarks. La idea es casi ignorada entre 1967 y 1971 por la comunidad científica (la publicación de Weinberg solo es citada 8 veces). En la actualidad, el número de citas de esta publicación es de 5498, una de las publicaciones más citadas en la historia de la Física de Partículas, si no la más.

La Figura 16 muestra el diagrama de uno de los posibles procesos mediados por la nueva partícula propuesta por Weinberg y Salam, en el que no hay cambio de carga eléctrica ni de sabor entre el estado inicial y el estado final. Dado que antes de la predicción este proceso no debería existir, ninguno de los experimentos en curso en ese momento puso atención para observar estados finales de ese tipo. Sin embargo, la colaboración Gargamelle, una cámara de burbujas, hoy en exposición en el CERN como se muestra en la Figura 17, reanalizó datos antiguos encontrando indicaciones de la presencia del proceso descrito en la Figura 16 (Hasert *et al.*, 1973).

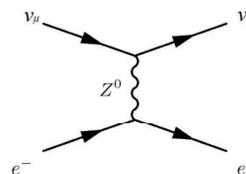


Figura 16. Diagrama que ilustra un proceso débil mediado por un Z^0 .



Figura 17. La cámara Gargamelle, considerada el primer detector en que se observó el bosón Z^0 .

Los esfuerzos por descubrir directamente los bosones W y Z se intensificaron desde este momento, situando dos experimentos diferentes y complementarios llamados UA1 y UA2 en el acelerador $S\bar{p}\bar{p}S$ del CERN (ver Figura 7). En realidad, este acelerador necesitó una gran transformación para poder alcanzar las condiciones necesarias para producir ambas partículas (Rubbia *et al.*, 1977). Se pasó de un acelerador de protones a alta energía, a un acelerador colisionador de protones frente a antiprotones, de tal manera que la energía producida en el centro de masas (CM) era prácticamente dos veces la energía de colisión, de unos 540 GeV . Hay que considerar que, en

realidad, a esos valores de energía, ya son los quarks y anti-quarks constituyentes del protón y antiprotón los que realmente colisionan, por lo que la energía efectiva en CM es menor, como ocurre en todos los colisionadores hadrónicos, ya que la fracción de momento y energía que poseen los quarks y anti-quarks es menor que la del protón o antiprotón que son las partículas que realmente se aceleran. El problema principal de este acelerador fue la acumulación de antiprotones, pues como toda la antimateria, no existe de modo natural, y para que sea efectivamente utilizable, hay que producirla, acumularla y acelerarla. Simon van der Meer (1972, 1985) inventó una técnica, llamada enfriamiento estocástico, que permitió el desarrollo de este acelerador y colisionador. Los resultados de los experimentos entre 1982 y 1983 eran esperados con enorme expectación, pero no solo por toda la comunidad científica. La primera ministra británica en aquel momento, Margaret Thatcher, pidió al director general del CERN estar informada personalmente de los avances y posible descubrimiento de los bosones W^\pm y Z^0 antes de que se hicieran públicos.

Ambas partículas fueron observadas y, además, los valores de las masas medidas estaban en un acuerdo excelente con las predicciones teóricas. Tanto UA1 como UA2, en febrero y marzo de 1983 presentaron un número de candidatos (Arnison *et al.*, 1983a, Banner *et al.*, 1983) suficiente como para estar seguros de la presencia, primero del W^\pm y después del Z^0 (Arnison *et al.*, 1983b, Bagnaia *et al.*, 1983). En la Figura 18 se muestra el primer suceso candidato a Z^0 recogido por el detector UA1. Los valores de las masas de estos dos bosones al final de 1985 fueron medidas como:

$$m_W = 80.2 \pm 0.8 \pm 1.3 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 91.5 \pm 1.2 \pm 1.7 \text{ GeV}$$

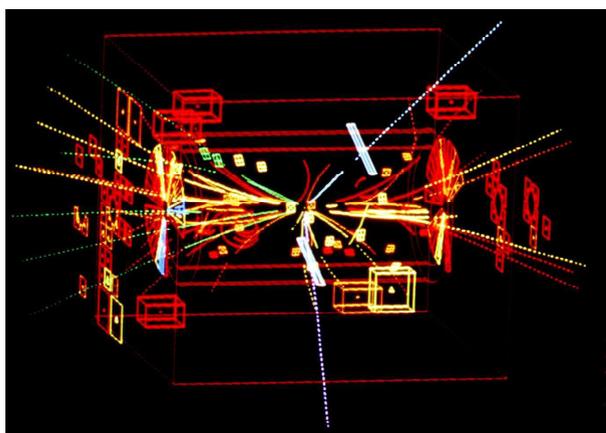


Figura 18. El primer suceso Z^0 . Recogido por la colaboración UA1. Imagen: CERN.

Donde el primer número es el valor central de la masa, el segundo la incertidumbre estadística y, el tercero, la incertidumbre sistemática. Como se puede ver, los valores obtenidos son de más de 80 y 90 veces la masa del protón, y

hasta donde sabemos ambas partículas son elementales, no tienen estructura interna, no existen componentes “dentro” de las mismas ni, por tanto, ninguna energía de enlace que participe en este valor de su masa.

El descubrimiento de los bosones W^\pm y Z^0 , ha determinado una buena parte de la Física de Partículas desde entonces. En primer lugar, por supuesto, son la prueba de la unificación de la fuerza electromagnética y débil, propuesta por Glashow, Weinberg y Salam (GSW), premio Nobel de Física en 1979. Por otra parte, suponen la culminación de esfuerzos experimentales enormes, como los llevados a cabo en el acelerador $Spp\bar{p}S$ del CERN y en la construcción, operación y explotación científica de los datos, en los experimentos gigantescos utilizados para la detección de estas partículas a primera vista tan extrañas, pero que en realidad, configuran mucho más de lo que pensamos, el mundo que vemos y el Universo en su conjunto. Estos esfuerzos experimentales condujeron al premio Nobel de Carlo Rubbia y Simon van der Meer en 1984 casi inmediatamente después del descubrimiento experimental del W^\pm y del Z^0 .

La enorme masa de los bosones W^\pm y Z^0 ayudó a comprender también que la interacción débil, podríamos decir que es “mal llamada” débil. Su intensidad intrínseca es muy similar, si no incluso ligeramente mayor, que la de la interacción electromagnética. Lo que sucede es que cuanto tiene lugar un proceso gobernado por interacción débil, bien mediada por un W^\pm o por un Z^0 , el proceso que se observa ocurre con una probabilidad proporcional no solo a la carga débil de las partículas, sino que esta está dividida por la masa de estos bosones, lo que hace que cuando medimos procesos mediados por esta interacción, aparezcan como si fueran débiles, cuando en realidad la razón es que, para que tengan lugar, se produce el intercambio de una partícula casi 80 o 90 veces más pesada que el protón.

Tras las primeras medidas realizadas sobre los bosones W^\pm y Z^0 comenzó el proceso de entender esta nueva interacción unificada, la interacción electrodébil. Para ello se utilizaron otros dos grandes aceleradores de partículas, el SLC en SLAC y el LEP en el CERN, que operaron, en el caso de LEP desde 1989 hasta el año 2000, y en el caso del SLC mucho menos tiempo, debido a que fue afectado por un terremoto en las cercanías de San Francisco que impidió su funcionamiento durante una buena parte de la última década del siglo pasado. Ambos colisionadores utilizaban electrones y positrones a energías en CM cercanas a las necesarias para producir Z^0 . Si en UA1 se recogieron unos pocos centenares de este tipo de partículas, en LEP, los 4 detectores que operaron en él, ALEPH, DELPHI, L3 y OPAL recogieron más de 16×10^6 Z^0 , lo que permitió una determinación de su masa con una precisión enorme, además de obtener, a través de la misma y de las predicciones de la propia teoría, el número de familias que componen el ME y, por tanto, el Universo estable que conocemos. El resultado se puede observar en la Figura 19, donde se representa la sección eficaz de producción del Z^0 en función de la energía en CM junto con las predicciones del modelo de Glashow, Weinberg y Salam para diferentes números de familias de partículas.

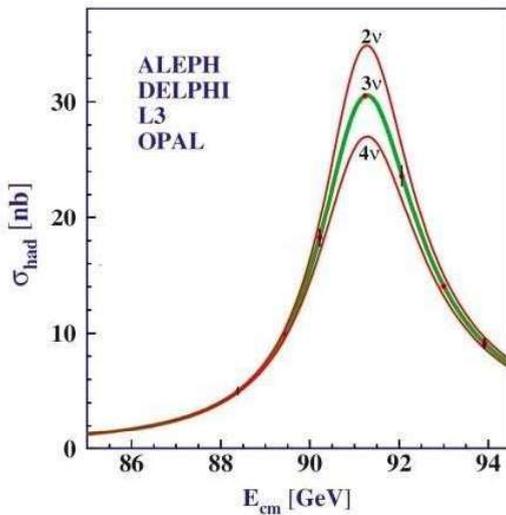


Figura 19. La resonancia que corresponde al Z^0 . Los datos experimentales aparecen como puntos negros, y las predicciones de la teoría electrodébil para 2, 3 o 4 familias se presentan superpuestas. Imagen: CERN.

El resultado es compatible con la existencia de 3 familias de partículas, y la medida más actual de N , en realidad el número de especies de neutrinos que interactúan con el Z^0 es de:

$$N_\nu = 2.9963 \pm 0.0074$$

Los resultados finales de los estudios sobre la teoría electrodébil en el LEP están descritos en las referencias (The ALEPH DELPHI, 2006) y (The ALEPH DELPHI, 2013). Además del estudio sistemático de la fuerza electrodébil en sí misma, el otro aspecto fundamental de LEP fue la búsqueda del bosón de Higgs.

IX. EL BOSÓN DE HIGGS

A partir de 1995 el acelerador LEP comenzó a aumentar la energía en CM con el objetivo fundamental de buscar el bosón de Higgs. Tras establecer la teoría electrodébil, con la presencia del γ y de masa nula, pero con el W^\pm y Z^0 , de masas no nulas, la cuestión fundamental, que ha determinado y determina en gran medida los esfuerzos de la comunidad de Física de Partículas, es comprender cuál es el mecanismo que permite explicar que dichas masas sean diferentes de 0, así como las de los leptones y quarks. La idea predominante, propuesta en parte en la teoría de GSW, era y es, que la masa de las partículas elementales puede explicarse gracias al mecanismo de Higgs, que como mínimo predice la existencia de una nueva partícula como excitación del campo de Higgs que es el propio bosón de Higgs. Hay que tener cuidado en este punto. La masa de “las cosas que vemos” se atribuye a su peso, y en cierto modo, a la fuerza gravitatoria. La masa de un núcleo es la suma de las masas de los protones y neutrones que lo constituyen y la energía de enlace que obtienen debido a la interacción que sufren para formar el núcleo. La masa de un hadrón es la suma de las masas

de los quarks que lo constituyen y la energía de enlace debida a la interacción entre estos quarks. En cambio, la masa de una partícula elemental, sin estructura, como en el caso de los leptones y los quarks y los bosones responsables de las diferentes interacciones, se obtiene por un procedimiento completamente diferente, que es hasta donde sabemos, por interacción con un campo, que es el campo de Higgs.

Este aspecto tiene mucho que ver con las simetrías que caracterizan las diferentes interacciones, y el campo de Higgs rompe espontáneamente la simetría dinámica general de la teoría, y ello permite que los bosones W^\pm y Z^0 adquieran masa, así como las partículas de spin 1/2, leptones y quarks. En este punto hay que mencionar que, aunque actualmente es bien conocido que los neutrinos tienen masa, parece también claro que no la adquieren debido a este mecanismo. Por el momento la Física no puede explicar cómo los neutrinos adquieren masa.

El resultado del LEP en la búsqueda del bosón de Higgs fue, desafortunadamente, negativo, en el sentido de que no pudo ser observado. Estudiando los resultados de los 4 experimentos, sin embargo, se llegó a la conclusión de que la masa de dicha partícula debía ser superior a los 114.4 GeV , y por tanto, ese es el valor a partir del cual tanto el Tevatron como posteriormente el LHC comenzaron su búsqueda. Hay que mencionar que el ME permite conocer todas las propiedades de esta partícula excepto su masa, por lo que había que realizar su búsqueda a medida que aumentaba la energía en CM.

Durante la primera década de este siglo el único acelerador a alta energía en funcionamiento fue el Tevatron, donde como hemos indicado, se produjo el descubrimiento del quark top. Desde marzo de 2001 a septiembre de 2011 los experimentos CDF y D0 estuvieron dedicados, en gran medida, a la búsqueda del bosón de Higgs. Tras este largo periodo de toma de datos y análisis de los mismos, se pudo excluir la presencia del mismo en el rango de masa entre 149 y 182 GeV , observándose indicios de la presencia de esta partícula en el entorno de 125 GeV (CDF and D0 coll., 2013).

El LHC comenzó a funcionar en 2011 a una energía en CM de 7 TeV (7.000 GeV) y en 2011 a 8 TeV . Durante esos dos años se realizó una búsqueda de esta partícula, por parte de las dos colaboraciones que operan los experimentos ATLAS y CMS, hasta que el 4 de julio de 2012 se anunció conjuntamente el descubrimiento de una partícula con todas las propiedades compatibles con el bosón de Higgs (ATLAS coll., 2012, CMS coll., 2012). El valor medido actualmente (ver Zyla *et al.*, 2020) de la masa del bosón de Higgs, con increíble precisión es de:

$$m_H = 125.25 \pm 0.17 \text{ GeV}$$

El descubrimiento del bosón de Higgs, en 2012, fue seguido en 2013 por la concesión del premio Nobel a Peter Higgs y Francois Englert. En la mención del premio Nobel se tuvo también en cuenta, de modo bastante excepcional, a las dos colaboraciones ATLAS y CMS: “... el descubrimiento del mecanismo que contribuye al entendimiento del origen de la masa de las partículas subatómicas, y que recientemente fue confirmado a través del descubrimiento de la partícula fundamental predicha,

por los experimentos ATLAS y CMS del *Large Hadron Collider* del CERN”. La Figura 20 muestra el resultado de una colisión protón-protón en la que se habría producido un bosón de Higgs que se desintegra en dos bosones Z^0 , considerado el proceso más claro de observación del Higgs.

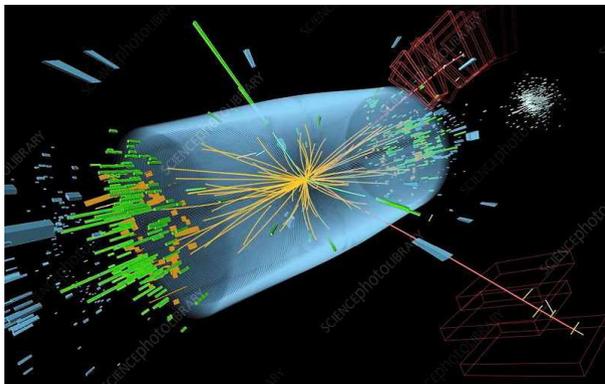


Figura 20. Imagen reconstruida de los productos de una colisión protón-protón que han producido con alta probabilidad un bosón de Higgs que se ha desintegrado en dos bosones Z^0 , que posteriormente se desintegran en 4 leptones. Imagen: CERN.

Además de Higgs y Englert, otros muchos científicos han contribuido a entender cómo el mecanismo de generación de masa de bosones y fermiones podía incorporarse al ME. Entre ellos, cabe destacar a Tom Kibble, Gerald Guralnik y Carl R. Hagen, además de Glashow, Weinberg y Salam. Un mecanismo de rotura espontánea de la simetría no relativista fue desarrollado por P.W. Anderson en el contexto de la Física de la Materia Condensada.

En la Figura 21 Peter Higgs aparece fotografiado junto al detector CMS, qué, junto con ATLAS, realizaron el descubrimiento de la partícula que lleva su nombre.

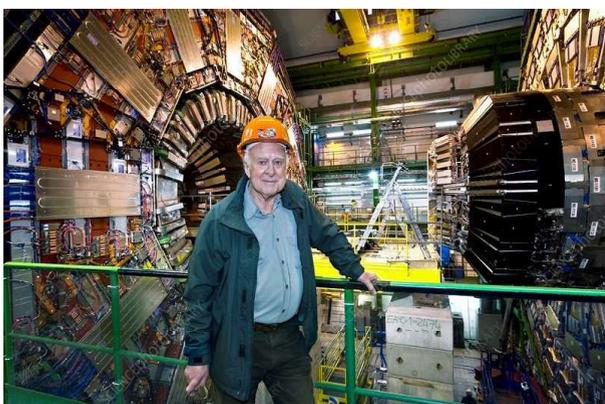


Figura 21. Peter Higgs junto con el detector CMS que fue uno de los dos en los que se descubrió el bosón que lleva su nombre en 2012. Imagen: CERN.

El bosón de Higgs no tiene carga eléctrica y su spin es 0. Es la primera partícula elemental escalar que existe en la

Naturaleza. En realidad, todos sus números cuánticos son 0 excepto su masa. Todo ello es lo esperado, pero muchas veces en Física, una propiedad nula de algún sistema lo es por compensación, como la carga eléctrica nula del átomo, que posteriormente se entendió era debido a su estructura interna. Esto, por supuesto, ha conducido a proponer muchas alternativas y extensiones del ME que, por el momento, cuando se han intentado contrastar en el LHC no se han observado, estando todos los resultados experimentales obtenidos en excelente acuerdo con las predicciones del ME.

Una consecuencia directa del descubrimiento del bosón de Higgs es la comprensión real del tamaño del átomo, y por tanto, de las estructuras que observamos en el día a día que se derivan del tamaño mismo.

En el átomo de Hidrógeno, el valor medio de la distancia entre el electrón y el protón está dado por el radio de Bohr. Esta magnitud tiene un valor:

$$a_0 = (\hbar/2\pi) / (m_e \alpha_{em} c)$$

donde tanto la constante de Planck dividida por 2π , también conocida como \hbar , como c , son constantes de la Naturaleza, y $\alpha_{em} = (1/\hbar c)(e^2/4\pi\epsilon_0)$, es “casi” una constante. Por tanto, el radio de Bohr y como consecuencia el tamaño del átomo de H, y del resto de estructuras atómicas, moleculares y compuestas por éstas, tienen un tamaño que depende casi únicamente de la masa del electrón, y por tanto, de la intensidad de la interacción de esta partícula con el campo de Higgs. En otras palabras, el campo de Higgs es el responsable del tamaño de los sistemas que conocemos.

El programa del LHC, que se reanuda en 2022, y está previsto que continúe hasta cerca de 2040, está dominado por el estudio de las propiedades de esta partícula, con un objetivo esencial: entender la forma del potencial de Higgs así como comprobar si el propio campo de Higgs es el responsable de proporcionar masa al bosón de Higgs, propiedad extremadamente difícil de probar. Para conseguirlo, es posible que sean necesarios nuevos aceleradores de partículas, que además deberían funcionar durante largos periodos de tiempo, quizá hasta finales del presente siglo.

X. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO DE LA FÍSICA DE PARTICULAS

Los siglos XX y XXI han sido extremadamente fructíferos en la comprensión del mundo a la escala subnuclear y de las partículas elementales, así como de las interacciones que lo gobiernan. Se ha construido una teoría, el Modelo Estándar, que describe de modo unificado la interacción electromagnética y la débil y, hasta cierto punto, la fuerte. Se sabe que existen tres generaciones de leptones y quarks, y se conocen los bosones que explican los tres tipos de interacciones entre las mismas y, finalmente, se ha descubierto el bosón de Higgs. Su descubrimiento marca una nueva etapa en la Física de Partículas, y, como hemos mencionado, muchos de los esfuerzos de la comunidad en las próximas décadas se dedicarán a entender con detalle sus propiedades, y su interacción con el resto de

partículas del ME, sin descartar posibles interacciones con las partículas que forman, por ejemplo, la Materia Oscura del Universo y que aún son desconocidas, así como la posibilidad de que juegue algún papel en la expansión del Universo, y por tanto en Cosmología.

Lo que hoy consideramos los principales problemas abiertos que tienen que ver directamente con la Física de Partículas, aunque con relaciones con otros campos científicos son:

- Cuantificación de la Gravedad.

Una idea de la dificultad que presenta este problema puede obtenerse comparando la fuerza electrostática y la fuerza gravitatoria entre un protón y un electrón. Estas fuerzas vienen dadas en aproximación clásica por las fuerzas de Coulomb y de Newton, y como ambas presentan la misma dependencia con la distancia, el cociente entre ambas no depende de ella y viene dado por la expresión siguiente en unidades del sistema internacional:

$$R = \frac{F_G}{F_{EM}} = \frac{G_N m_e m_p 4\pi \epsilon_0}{Q_e^2}$$

$$= 6,674 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2} \times 9,109 \times 10^{-31} kg$$

$$\times 1,673 \times 10^{-27} kg$$

$$\times 4 \times 3,14 \times 8,854 \times 10^{-12} f m^{-1} / (1,602 \times 10^{-19} C)^2$$

donde G_N es la constante de gravitación universal, m_e y m_p las masas de electrón y protón y Q_e la carga eléctrica del electrón, que como sabemos es idéntica a la del protón aunque no conocemos exactamente por qué. Se obtiene entonces, que el cociente entre las dos fuerzas, gravitatoria y electrostática, entre electrón y protón, a cualquier distancia, es de $4,4 \times 10^{-40}$. Esta enorme diferencia entre la intensidad relativa de las dos interacciones hace enormemente difícil describir la interacción gravitatoria cuánticamente a escala nuclear o subnuclear. El efecto que tiene es tan pequeño que resulta prácticamente imposible diseñar o realizar experimentos en los que pudiera tener alguna influencia en la medida.

Se trabaja intensamente en el problema de cuantificar la Gravitación desde hace décadas. Actualmente, las mejores indicaciones llevan a pensar que las energías a las que se podría lograr, son muy superiores a las que se manejan en la Física de Partículas elemental actual, y a las que se pueden alcanzar en un futuro razonable con aceleradores de partículas. Se piensa que dichas energías podrían estar cercanas a la energía de Planck que es de alrededor de $10^{19} GeV$, 15 órdenes de magnitud superior a la que se produce en el LHC. Quizá a esos valores será posible entender y describir el comportamiento cuántico de la interacción gravitatoria.

- La masa de los neutrinos que no se puede explicar con el mecanismo de Higgs, y que parece ser un problema que implica directamente la necesidad de extender el ME.
- La Asimetría materia anti-materia. Aunque desde hace muchos años existen indicios relacionados con la violación de simetrías relacionadas con la conservación

de la carga eléctrica y la paridad, todavía no existe una explicación satisfactoria de la prevalencia de la materia sobre la antimateria a escala universal.

- El origen, en términos de partículas, de la materia oscura y la dinámica que la gobierna. Lo que llamamos materia visible del Universo es solo el 5% del total del contenido del Universo, la materia oscura es entre 5 y 6 veces más numerosa, y por el momento, desconocemos completamente su origen.
- Estabilidad del campo de Higgs hasta las más altas energías, cercanas a las que presumiblemente ocurrieron cerca del Big-Bang.
- Desde un punto de vista científico, económico y político, el diseño y construcción de las siguientes instalaciones experimentales, tanto en el campo de la Física con aceleradores como en el de los neutrinos y materia oscura. Estos instrumentos, cada vez más globales requieren de esfuerzos económicos inabordables por un solo país o una organización como el CERN y, por tanto, requieren establecer un conjunto de acuerdos entre países e instituciones que permitan el desarrollo de estas a lo largo del presente siglo. La Figura 22 muestra un esquema del tamaño y localización donde podría construirse el futuro acelerador del CERN, el “Future Circular Collider”, FCC.



Figura 22. Esquema de una posible localización del “Future Circular Collider” comparado en tamaño con el actual LHC. Imagen: CERN.

Existen también algunas cuestiones que, en el momento actual, preocupan a la comunidad científica, debido a que existe cierta tensión entre las predicciones teóricas y los resultados experimentales, las dos más importantes son:

- La Universalidad leptónica. Existe cierta tensión entre la observación realizada por el experimento LHCb del CERN y la predicción teórica, en la desintegración de algunos mesones y bariones conteniendo quarks b en estados finales que contienen electrones y muones. Las tasas de desintegración deberían ser idénticas en los dos modos, pero estos resultados experimentales recientes, no concluyentes al nivel requerido estadísticamente, indican ciertas diferencias cuya comprensión, con alta probabilidad, marcará parte del desarrollo de este campo en la presente década.

- El momento dipolar magnético del μ : $(g - 2)\mu$. En las últimas décadas, se han realizado experimentos extremadamente precisos para comprobar el comportamiento de la interacción electromagnética y de la noción de partícula elemental en el caso del μ . Se trata de una cuestión muy relacionada con la comprensión que tenemos de los estados fundamentales de los sistemas, o del llamado “vacío cuántico”. Los últimos valores medidos están bastante distantes, 4 desviaciones estándar, respecto a las predicciones teóricas.

No cabe duda, en definitiva, de que los resultados de la investigación que se llevará a cabo en estos campos, en los próximos años y décadas, nos proporcionarán respuestas a algunas de las preguntas más importantes relacionadas con el Universo como un todo, su origen y su evolución y con sus componentes elementales. Además, son de esperar desarrollos tecnológicos muy importantes, relacionados entre otros, con la construcción de dispositivos experimentales, aceleradores de partículas y detectores electrónicos, con muy diversas características, o con el tratamiento de las enormes cantidades de datos que proporcionan estos experimentos. También es posible que se produzcan avances inesperados. Un buen ejemplo lo tenemos en la aparición del lenguaje html, o el más conocido www, que nació como una necesidad para intercambiar fluidamente información relacionada con el LHC en el CERN. Este desarrollo, relacionado con investigación en Ciencia Básica, ha producido una profunda transformación en la sociedad, por supuesto unido al desarrollo tecnológico de las modernas redes de comunicaciones.

REFERENCIAS

Abbott, B.P. *et al.* (2016) Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys. Rev. Lett.* 116: 061102.
 Arison, G. *et al.* (UA1 Collaboration) (1983a). Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $s = 540 \text{ GeV}$. *Phys. Lett. B* 122: 103-116.
 Arison, G. *et al.* (UA1 Collaboration) (1983b). Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around $95 \text{ GeV}/c^2$ at the CERN SPS collider. *Phys. Lett. B* 126: 398-410.
 ATLAS coll. (2012). Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys. Lett. B* 716 (1): 1-29.
 Bagnaia, P. *et al.* (UA2 Collaboration) (1983). Evidence for $Z^0 \rightarrow e^+ e^-$ at the CERN $\bar{p} p$ collider. *Phys. Lett. B* 129: 130-140.
 Banner, M. *et al.* (UA2 Collaboration) (1983). Observation of single isolated electrons of high transverse momentum in events with missing transverse energy at the CERN $\bar{p} p$ collider. *Phys. Lett. B* 122: 476-485.
 Bethe, H. and Peierls, R. (1934). The 'neutrino'. *Nature* 133: 532.
 Bludman, S. (1958). On the universal Fermi interaction. *Il Nuovo Cimento* X (3): 433-445.
 CDF and D0 coll. (2013). Higgs Boson studies at the Tevatron. *Phys. Rev. D* 88 (5): 052014
 Chadwick, J. (1932). Possible existence of a neutron. *Nature* 129: 312.
 CMS coll. (2012). Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys. Lett. B* 716 (1): 30-61.
 Davis, R. Jr. (1955). Attempt to detect the antineutrinos from a nuclear reactor by the $\text{Cl}^{37}(\bar{\nu}, e^-)\text{A}^{37}$ reaction. *Phys. Rev.* 97: 766-769.
 Ellis, C.D. and Wooster, W.A. (1927). *Proc. Roy. Soc. A* 117 (776): 109-123.
 Englert, G. and Brout, R. (1964). Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons. *Phys. Rev. Lett.* 13: 321-323.

Fermi, E. (1934). An attempt of a theory of beta radiation. I. *Z. Phys.* 88: 161-177.
 Garwin, R.L., Lederman, L.M. and Weinrich, W. (1957). Observations of the failure of conservation of parity and charge conjugation in meson decays: the magnetic moment of the free muon. *Phys. Rev.* 105: 1415-1417.
 Gell-Mann, M. (1956). The interpretation of the new particles as displaced charge multiplets. *Il Nuovo Cimento* 4 (S2): 848-866.
 Gell-Mann, M. (1964). A schematic model of baryons and mesons. *Phys. Lett.* 8 (3): 214-215.
 Glashow, S.L. (1959). *The Vector Meson in Elementary Particle Decays*. Harvard University Thesis.
 Glashow, S.L. (1961). Partial-symmetries of weak interactions, *Nucl. Phys.* 22: 579-588.
 González, F.M. *et al.* (UCN τ Collaboration) (2021). Improved neutron lifetime measurement with UCN τ . *Phys. Rev. Lett.* 127 (16): 162501.
 Greenberg, O.W. (1964). Spin and unitary-spin independence in a paraquark model of baryons and mesons. *Phys. Rev. Lett.* 13 (20): 598-602.
 Guralnik, G.S., Hagen, C.R. and Kibble, T.W. (1964). Global conservation laws and massless particles. *Phys. Rev. Lett.* 13 (1964) 585-587.
 Han, M.Y. and Nambu, Y. (1965). Three-triplet model with double SU(3) symmetry. *Phys. Rev. B.* 139 (4): 1006-1010.
 Hasert, F.J. *et al.* (1973). Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the gargamelle neutrino experiment. *Phys. Lett. B* 46 (1): 138-140.
 Heisenberg, W. (1932). Über den bau der atomkerne. I. *Z. Phys.* 77 (1-2): 1-11; English translation (1965). On the structure of atomic nuclei, I. In: Brink, D.M. (ed.) *Nuclear Forces*, Pergamon, Oxford, 144-154.
 Higgs, P.W. (1964). Broken symmetries, massless particles and gauge fields. *Phys. Rev. Lett.* 12: 132-133.
 Higgs, P.W. (1966). Spontaneous symmetry breakdown without massless bosons. *Phys. Rev. Lett.* 145: 1156-1163.
 Larmor, J. (1897). LXIII. On the theory of the magnetic influence on spectra and on the radiation from moving ions. *Philos. Mag.* 44 (271): 503-512.
 LHCb collaboration (2021). Tests of lepton universality using $B^0 \rightarrow K_S^0 \ell^+ \ell^-$ and $B^+ \rightarrow K^{*+} \ell^+ \ell^-$ decays. <https://arxiv.org/abs/2110.09501v2>.
 Lee, T.D. and C. N. Yang, C.N. (1956). Question of parity conservation in weak interactions. *Phys. Rev.* 104: 254-258.
 LHC (1984). Large Hadron Collider in the LEP tunnel. *Proceedings of the ECFA-CERN Workshop*. CERN, Geneva. <http://cdsweb.cern.ch/record/154938/files/CERN-84-10-V-1.pdf>.
 Maxwell, J.C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, Oxford.
 Nakano, T. and Nishijima, K. (1953). Charge independence for V-particles. *Prog. Theor. Phys.* 10 (5): 581-582.
 Neddermeyer, S.H. and Carl D. Anderson, C.D. (1937). Note on the nature of cosmic-ray particles. *Phys. Rev.* 51: 884-886.
 Pontecorvo, B. (1946). Inverse β process. *National Research Council of Canada. Division of Atomic Energy Report PD-205*, Chalk River, 21-26.
 Reines, F. and Cowan, C.L. (1953). Detection of the free neutrino. *Phys. Rev.* 92: 830-831.
 Reines, F. and Cowan, C.L. (1956). The neutrino. *Nature* 178: 446-449.
 Reines, F. and Cowan, C.L. (1959). Free antineutrino absorption cross section. I. Measurement of the free antineutrino absorption cross section by protons. *Phys. Rev.* 113: 273-279.
 Rochester, G.D. and Butler, C.C. (1947). Evidence for the existence of new unstable elementary particles. *Nature* 160: 855-857.
 Rubbia, C., McIntyre, P. and Cline, D. (1977). In: Faissner, H. Reither, H. and Zerwas, P. (eds.). *Proc. Int. Neutrino Conference*. Vieweg, Braunschweig, 683.
 Salam, A. (1968). Weak and electromagnetic interactions. In: Svartholm, W., Ed., *Elementary Particle Theory*, Almquist and Wiksell, Stockholm, 367-387.
 Schwinger, J.S. (1957). A Theory of the Fundamental Interactions. *Annals Phys.* 2: 407-434.
 Street, J.C. and Stevenson, E.C. (1937). New evidence for the existence of a particle of mass intermediate between the proton and electron. *Phys. Rev.* 52: 1003-1004.
 The ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, SLD Collaborations, the LEP Electroweak Working Group, the SLD Electroweak and Heavy Flavour Groups (2006). Precision electroweak measurements on the Z resonance. *Phys. Rept.* 427: 257-454.

- The ALEPH, DELPHI, L3, OPAL Collaborations, the LEP Electroweak Working Group (2013). Electroweak measurements in electron-positron collisions at W-boson-pair energies at LEP. *Phys. Rept.* 532: 119-244.
- van der Meer, S. (1972). Stochastic damping of betatron oscillations in the ISR. CERN-ISR-PO 72-31.
- van der Meer (1985). Stochastic cooling and the accumulation of antiprotons. *Rev. Mod. Phys.* 57 (3): 689-697.
- Weinberg, S. (1967). A model of leptons. *Phys. Rev. Lett.* 19:1264-1266.
- Wu, C.S. *et al.* (1957). Experimental test of parity conservation in beta decay. *Phys. Rev.* 105: 1413-1415.
- Zweig, G. (1964). An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking. *CERN Report No.8182/TH.401*.
- Zyla, P.A. *et al.* (Particle Data Group) (2020). Review of Particle Physics. *Prog. Theor. Exp. Phys.* 083C01, and 2021 update.

rAACI



AACI

ACADEMIA ASTURIANA
DE CIENCIA E INGENIERIA

ISSN 2792-9302



9 772792 930001



2792-9302