

DE LA TERMODINÁMICA A LA INGENIERÍA ENERGÉTICA

Historia, metodología, recursos y tecnologías

DISCURSO PRONUNCIADO POR LA
EXCMA. SRA. DRA. D^a. BEATRIZ YOLANDA MORATILLA SORIA

EN EL ACTO DE SU TOMA DE POSESIÓN
COMO ACADÉMICA DE NÚMERO
EL DÍA 28 DE OCTUBRE DE 2015

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO DE NÚMERO
EXCMO. SR. DR. D. LUIS ALBERTO PETIT HERRERA
DE LA SECCIÓN DE INGENIERÍA



ISBN: 978-84-943893-5-1

Depósito Legal: BU-229. – 2015

Maquetación e impresión: Rico Adrados, S.L.

A Ignacio Javier y José Ignacio

Índice

Presentación	9
1. Introducción	11
2. Historia	15
2.1. Energía	15
2.2. Termodinámica	16
2.2.1. El Primer Principio	19
2.2.2. El Segundo Principio	20
2.2.3. La combinación del Primer y Segundo Principio	23
2.3. Termodinámica Técnica	25
2.4. Ingeniería Energética	27
3. Los recursos naturales	31
3.1. Recursos fósiles	31
3.2. Recursos nucleares	32
3.3. Recursos renovables	33
4. Nuevas tecnologías energéticas	35
4.1. Centrales térmicas fósiles	35
4.2. Centrales nucleares	36

4.3. Cogeneración	37
4.4. El sector residencial	38
4.5. Generación eléctrica a partir de energías renovables	39
4.6. El vector hidrógeno	40
4.7. El mix eléctrico y la política energética	41
4.8. Transporte	43
5. Conclusiones	45
6. Bibliografía	47
Discurso de contestación del Excmo. Sr. Dr. D. Luis Alberto Petit Herrera	53

Presentación

Excmo. Sr. Doctor Presidente de la Real Academia de Doctores de España,
Excmos. Señoras y señores Doctores Académicos,
Señoras y Señores

Deseo en primer lugar agradecer a la Real Academia de Doctores de España el recibirme como Miembro de Número en la Sección de Ingeniería. Es un honor formar parte de esta Real Academia, única que exige tener el máximo grado académico para poder pertenecer a ella y que con su específica peculiaridad de la perspectiva multidisciplinar y transversal del conocimiento es el equivalente español de la Academia Sueca.

Quisiera dedicar muy especialmente dentro de la Academia el primer reconocimiento a los Doctores Luis Alberto Petit Herrera, Blanca Castilla de Cortázar y Rafael Morales Arce por presentar mi candidatura, así como a los académicos que me concedieron su voto en reunión plenaria. Me permitirán que de forma más directa agradezca al Doctor Petit el haber aceptado contestar a mi discurso de ingreso.

Es difícil para mi poder mantener en estas palabras de agradecimiento, el tono Académico que dicho acto requiere por el cúmulo de sentimientos, alegría, emoción, responsabilidad y compromiso, que se agolpan en mí. Alegría por poder compartir con muchos amigos aquí presentes que son tan importantes en mi vida, emoción al ser consciente del alto honor que se me concede hoy, responsabilidad por ser la primera mujer académica de número

en la sección de ingeniería y compromiso el que manifiesto ahora en público para con mi trabajo y mi persona contribuir al mayor prestigio de esta institución, que debe ser principal órgano asesor del Estado en todo aquello en que se precise un alto grado de conocimiento y estar al margen de compromisos e intereses políticos.

Debo acordarme del Académico Javier Díaz-Llanos Sánchez, predecesor en la medalla que hoy recibo. No puedo dejar de agradecer a alguien a quien no conocí pero que ha sido muy importante en mi vida, el P. Rafael Mariño, jesuita, ingeniero de caminos y profesor de Termodinámica en el ICAI y que da nombre a la Catedra que dirijo en la Universidad. Espero llevar su nombre con dignidad y desde aquí honrar su memoria y su trabajo.

Agradezco a la Universidad Pontificia Comillas la confianza que depositó en mí para dirigir la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas, especialmente en la persona de su Rector, primero el P. Jose Ramón Busto que al comunicarme el nombramiento y pedirle directrices me dijo “sé tu misma” y es lo que siempre hago, ser fiel a los valores y a la formación que he recibido, y ahora al P. Julio Martínez que siempre me demuestra su confianza y apoyo.

Es muy fácil trabajar cuando tienes detrás el nombre del ICAI, o del Instituto de la Ingeniería de España. Espero poder llevar ahora también el nombre de la Real Academia de Doctores de España a muchos ámbitos del saber.

En el plano más personal quiero tener presente en este momento a mi familia, mis padres, mi hermano y por supuesto a mi hijo Ignacio Javier que es el mayor de mis logros y que ya es un éxito de proyecto de hombre, generoso, sólido, sensible, que da luz a cada día de mi vida.

A mi marido Jose Ignacio, que como ya le dije en la dedicatoria de mi tesis doctoral, sigue siendo la Roca donde me apoyo, es mi ejemplo de capacidad de trabajo y superación, incansable, que me motiva a ser mejor y a vivir desde la humildad todo lo que la vida nos va deparando.

Paso ya sin más demora a dar lectura a mi Discurso de Ingreso.

1

Introducción

El tema escogido para mi discurso es un viaje por el mundo de la Energía, que se inicia en la Termodinámica y culmina en la Ingeniería Energética. Me gusta establecer un paralelismo entre mi vida profesional en la Universidad y la evolución histórica de estas ciencias. Así, tras algunos años de impartir asignaturas tecnológicas relativas a mi experiencia profesional en Técnicas Reunidas, pasé a impartir Termodinámica. Para mí fue emocionante y todo un reto retornar a aquella asignatura que despertó mi vocación por la Energía cuando la estudié y que tantos quebraderos de cabeza y retos intelectuales me supuso. Más allá del desafío del redescubrimiento, pues cuando una asignatura se imparte por primera vez siempre provoca asombros en el profesor, me sentí rápidamente atraída por sus implicaciones prácticas. Esto es una paradoja con la que me he encontrado a menudo cuando digo que soy profesora de Termodinámica. Las reacciones que provoca esta afirmación van desde la cara de indiferencia, si el oyente carece de conocimientos científicos, a la de asombro si los tiene, surgiendo casi siempre en este segundo caso algún comentario del tipo “qué difícil, qué abstracta, yo no me enteré de nada, ...”. Al margen de la dificultad o no, que no deja de ser una apreciación, nunca he estado de acuerdo en que sea una asignatura abstracta, al menos impartida para ingenieros. En efecto, como iré desgranando en las siguientes páginas, el origen de la Termodinámica está en el intento de Carnot de resolver un problema práctico: la optimización de las máquinas de vapor. Curiosamente para resolverlo formuló el Segundo Principio, uno de los grandes arcanos de

la Física, con el que algunos autores pretenden demostrar la existencia de Dios y con el que los ingenieros, gracias a Carnot, buscamos en la actualidad la mejora de los procesos energéticos. Por otra parte, la Termodinámica en una Escuela de Ingeniería siempre termina tratando de las implicaciones prácticas, que desembocan en las máquinas y motores térmicos.

Pero he dicho que el discurso va a ser un viaje, por lo que no voy a quedarme sólo en la Termodinámica, sino que pretendo acercarme al mundo de la energía desde ella. Así, para mi fue un desafío diseñar, junto con otros compañeros de mi Departamento, la primera versión de la asignatura Tecnologías Energéticas, que en ICAI se impartió por primera vez a raíz de la implantación del título de Ingeniero Industrial de 1996, en sustitución del que yo estudié. En esta asignatura afrontábamos el reto de hablar sobre aplicaciones energéticas desde un punto de vista tecnológico, integrando tanto los recursos energéticos como las tecnologías de transformación, tratando de aportar al alumno las bases para que tuviese criterio sobre aspectos de política energética. Tras sucesivas modificaciones de la asignatura, en la actualidad, ya en los planes de estudio del Espacio Europeo de Educación Superior, la impartimos con el nombre de Ingeniería Energética, habiendo incorporado criterios para evaluar la viabilidad económica de proyectos energéticos y metodologías de análisis fuera del punto de diseño (off-design).

En paralelo con mi entrada en Tecnologías Energéticas tuve la oportunidad de pasar a dirigir la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas de la Universidad Pontificia Comillas. Esto me permitió entrar en contacto con diversos responsables del sector energético español que me aportaron nuevos horizontes en los que trabajar. Además de nuevos temas de investigación, la Cátedra me facilitó incorporar una nueva dimensión a mi trabajo: la creación de opinión y el estímulo del debate entre la sociedad en temas de energía, desde el rigor del mundo académico y contando con la opinión de las empresas. Al poco tiempo accedí al Instituto de la Ingeniería de España, desde cuyo Comité de Energía y Recursos Naturales continué con esta actividad, aumentando considerablemente la diseminación de los resultados.

Por todo lo anterior, me siento muy cómoda hablando sobre este tema y me gusta pensar que con mis reflexiones contribuyo a aportar criterios a la sociedad para enfrentarse de una manera objetiva al problema energético. Volviendo de nuevo a los orígenes, la Historia nos enseña que la Revolución Industrial fue posible por la crisis del carbón. En efecto, cuando tras siglos

de explotación en Inglaterra era preciso excavar pozos de carbón cada vez más profundos se alcanzaba con facilidad el nivel freático, y era preciso achicar el agua de las minas para seguir trabajando. Precisamente para tal achique es para lo que se inventaron las máquinas de vapor, es decir, para accionar de forma autónoma (sin depender de la propulsión de sangre de los animales) las bombas. De hecho, a alguna de las primeras máquinas de vapor se la denominaba “el amigo del minero”. Más recientemente, una nueva crisis, la del petróleo de los años 70 del siglo pasado, permitió un gran impulso a la investigación en renovables y sistemas de recuperación de calor, como los ciclos de Rankine orgánicos. Lamentablemente, la solución a aquella crisis hizo que el desarrollo de tales sistemas se ralentizase, hasta hace poco más de una década, donde de nuevo por un escenario de crisis y de cambio climático han recuperado su interés. Otro hito fue el uso civil de la energía nuclear, a partir de la búsqueda del incremento de la autonomía en los submarinos.

De todas las experiencias anteriores parece lógico plantearse si la actual situación logrará despertar de nuevo el ingenio humano y no estaremos realmente en lo que la Historia dentro de 100 años calificará como una nueva Revolución tecnológica. ¿Cuál será esa energía del futuro que se comenzará a desarrollar ahora? ¿La energía de fusión? ¿El uso energético del hidrógeno? ¿Las centrales nucleares de IV generación, con producción de hidrógeno para automoción? Todas estas preguntas constituyen unos desafíos ciertamente motivadores, y hemos de ser capaces de adquirir la suficiente formación para estar abiertos a nuevas ideas y desarrollos, siendo capaces de aprovechar los talentos que hemos recibido, y con ello de hacer uso de los recursos naturales de forma sostenible. En definitiva, como escribía el P. Mariño en su libro de Termodinámica en 1942: “... omnia in mensura, et numero et pondere disposuit”, es decir, “... todas las cosas las ha dispuesto en medida, número y peso” [Libro de la Sabiduría XI, 21]. El Creador ha dispuesto los medios. Al hombre le toca emplearlos de manera eficaz y sostenible para continuar la labor de la Creación.

2

Historia

2.1. Energía

La energía es un concepto familiar para la humanidad, forma parte de nuestras vidas, la empleamos habitualmente de varias formas: en el transporte, en nuestras viviendas, en el trabajo... Cada vez más tenemos conciencia de lo que cuesta y de las consecuencias de su empleo. Sin embargo, no resulta fácil dar una definición sobre la energía. Así, resulta especialmente llamativo la cantidad de circunloquios que Feynman (premio Nobel de Física en 1965 y un excelente profesor en el Caltech) da tratando de definir la energía en su Curso de Física [1]. Finalmente termina diciendo que no importa demasiado, pues es un concepto muy familiar para todos.

Se encuentran otras definiciones más formales en los textos clásicos de Termodinámica [2,3,4,5] donde se busca el apoyo del Primer Principio para definir el incremento de energía como el trabajo comunicado a un sistema cerrado en cualquier proceso adiabático entre dos estados dados. Esta formulación es conocida como el esquema de Carathéodory [6], existiendo también la formulación complementaria, conocida como esquema de Keenan y Shapiro [6], en la que el incremento de energía se formula como el calor aportado a un sistema cerrado que no puede intercambiar trabajo. En ambos casos el incremento de energía es una propiedad termodinámica de la sustancia contenida en el sistema cerrado lo que significa que existe en dicha

sustancia, es decir, se almacena en ella, y que su variación entre dos estados dados siempre es la misma independientemente del proceso empleado para llevarla a cabo, en el que pueden intervenir trabajo y calor. Por tanto, el trabajo y el calor son conceptos dinámicos, que sólo existen cuando se realiza un proceso, y mediante los cuales se puede intercambiar o transferir energía entre unos sistemas y otros.

Desde un punto de vista etimológico, el término “energía” procede del griego en-ergon, pudiendo traducirse como “dentro-trabajo”, que vendría a ser la capacidad contenida en los sistemas para realizar un trabajo. Esta interpretación coincide con el esquema de Carathéodory presentado previamente según el cual en un sistema cerrado adiabático la reducción de energía equivale al trabajo producido por el sistema. Ya en 1942 el jesuita Rafael Mariño escribía en su libro sobre Termodinámica Técnica [7] “Dios nuestro Señor ha puesto en los cuerpos que Él ha creado lo que se llaman actividades naturales. Por tales se entienden aquello que en sí tienen por lo que son capaces de producir un efecto sobre otros cuerpos. De estos efectos interesa sobre todo al ingeniero el movimiento de unos cuerpos por la acción de otros, produciendo lo que en Mecánica se llama trabajo. A aquella entidad que tienen los cuerpos, en la que reside inmediatamente su facultad de producir un trabajo es lo que se llama energía (del griego en-ergon, “fuerza en potencia” en la filosofía de Aristóteles).”

2.2. Termodinámica

Hoy en día la Termodinámica está considerada como la ciencia de la energía. Dentro de ella se establecen dos principios o leyes de aplicación general a todos los conceptos físicos tan importantes que con cierta frecuencia se dice que la Termodinámica representa el poder legislativo en la Física [2]. No en vano, Einstein afirmó sobre la Termodinámica en 1959: “Una teoría es más grandiosa cuanto mayor es la simplicidad de sus premisas, mayor número de fenómenos relaciona y más extensa es el área de su aplicación. Esta es la razón fundamental de la profunda impresión que me causa la Termodinámica. Es la única teoría física de contenido universal respecto a la cual estoy convencido de que dentro de la estructura de la aplicación de sus conceptos básicos, nunca será destruida.”

La Termodinámica es una disciplina que puede ser abordada desde un punto de vista microscópico, buscando relaciones entre las partículas que

constituyen un sistema para determinar las propiedades de las sustancias, o macroscópico, analizando cómo se transfiere la energía entre sistemas mediante masa, calor y trabajo. Este segundo enfoque se corresponde con la denominada Termodinámica Técnica o Ingeniería Termodinámica, como dicen los anglosajones, y fue el origen histórico de la Termodinámica.

Así, la Termodinámica se estructuró como ciencia en la primera mitad del siglo XIX a partir de los estudios de Joule, que estableció en 1843 la relación entre calor y trabajo tratado de forma integral en el Primer Principio, y Carnot, que estableció en 1824 los límites de funcionamiento de las máquinas térmicas, derivando luego hacia la dirección de ocurrencia de los procesos en el Segundo Principio [2]. Los ingenieros nos debemos de sentir muy orgullosos de que el origen de las leyes de la Termodinámica, especialmente de la segunda, se encuentre en la búsqueda de la mejora de la eficiencia de las primeras máquinas de vapor llevada a cabo por Carnot, un ingeniero militar francés, que culminó con su trabajo sobre “el poder del fuego” donde establece el Segundo Principio.

El término “Termodinámica”, que deriva del griego “thermos” y “dynamis”, etimológicamente significa la fuerza del calor y fue introducido por primera vez por Lord Kelvin a mediados del siglo XIX, probablemente influido por el título del tratado de Carnot. De hecho, el trabajo de Carnot le permitió establecer la escala termodinámica de temperaturas. El primer libro de Termodinámica fue escrito en 1859 por Rankine, también ingeniero. En 1865 Clausius introduce el concepto de entropía y condensa las dos leyes de la Termodinámica: “La energía del universo es constante; la entropía del universo tiende hacia un máximo”. En 1906 Nernst estableció el Tercer Principio, que fija un límite a la temperatura absoluta. Existe también un Principio Cero que permite fundamentar el uso del termómetro. La Termodinámica, por tanto, se fue construyendo en el siglo XIX a partir de las nuevas ideas de Carnot y superando antiguos errores, como el de considerar el calor un fluido llamado calórico, cuestionado ya por Benjamin Thomson (Conde de Rumford) en 1798 y por Davy en 1799, siendo totalmente desterrado en 1845 con la determinación del equivalente mecánico del calor (medida del calor específico del agua) llevada a cabo por Joule.

A través del Primer Principio se pueden cuantificar las variaciones de energía que tienen lugar en los procesos y a través del Segundo analizar los límites teóricos de funcionamiento de los dispositivos energéticos. Ambos principios son necesarios para analizar un proceso energético, siendo el pri-

mero una condición necesaria para su ocurrencia y el segundo una condición suficiente, dado que es posible plantear hipotéticamente procesos que verifiquen el Primer Principio pero no el Segundo, y por tanto no puedan existir, como por ejemplo “maximizar” el rendimiento de una central térmica suprimiendo la disipación de calor. De este modo, la energía primaria suministrada desde el foco caliente se convertiría íntegramente en electricidad, cumpliendo el Primer Principio pero yendo en contra del enunciado de Kelvin-Planck del Segundo.

La importancia de la Termodinámica para la ingeniería, y más aún, para la consolidación de los avances de la Revolución Industrial, radica precisamente en la mejora que se pudo llevar a cabo en las máquinas de vapor a partir de los estudios de Carnot. Ya en el siglo XII la pólvora llega a Europa procedente de China, permitiendo el desarrollo de las armas de fuego. Reynolds afirmó que la combustión, tal como se producía en los cañones, constituye la forma más antigua de motor térmico. Entre los siglos XIII a XV proliferaron diversas máquinas hidráulicas y se comenzó a vislumbrar la capacidad de la presión y del vacío, que culminó en 1657 con la popular demostración de los hemisferios de Magdeburg, que formaban juntos una esfera de 36 cm de diámetro en la que una vez extraído el aire eran precisos dos tiros de 8 caballos cada uno para separarlos. En 1698 Savery construyó el primer motor atmosférico, que sería la base para la máquina de Newcomen (1712) que ya empleaba el concepto de caldera y pistón en el interior de un cilindro donde se producía la condensación del vapor con un cierto nivel de vacío. Posteriormente Watt (1769) desarrolló su motor de vapor que ya incorporaba un condensador separado. Hasta la publicación del trabajo de Carnot en 1824 surgieron nuevos diseños de máquinas de vapor, que en los mejores prototipos apenas superaban el 6% de eficiencia (la máquina de Watt no superaba el 2%) [6]. Es a partir de la aplicación de los descubrimientos de Carnot cuando se comienzan a lograr mejoras de eficiencia y de prestaciones.

La contribución de los ingenieros del siglo XIX a la Termodinámica ha resultado a veces eclipsada por la contribución de otros científicos, más interesados en el enfoque microscópico que en el macroscópico. Esto ha sido así desde la antigüedad. Ya en 1859 Rankine se lamentaba de que los desarrollos mecánicos llevados a cabo por filósofos griegos han llegado a nosotros sin apenas detalle, en favor de sus cavilaciones filosóficas, pareciendo que la sociedad da mucho más valor a las reflexiones abstractas que a los desarrollos prácticos [6].

Hoy en día la Termodinámica Técnica ha superado el ámbito de las máquinas térmicas, siendo también aplicable a sistemas de conversión directa de energía, como los paneles fotovoltaicos o las pilas de combustible, donde se produce trabajo a partir de energía térmica pero sin la intervención de un ciclo termodinámico. Tales dispositivos no están sujetos al rendimiento de Carnot, pero sí a la limitación impuesta por el Segundo Principio que también pone un techo a su máxima eficiencia [8]. Otros campos de aplicación de la Termodinámica son los sistemas biológicos, como se mostrará más adelante.

2.2.1. *El Primer Principio*

Si bien el origen de la Termodinámica se produjo a partir de ciclos termodinámicos, sobre todo de vapor, y por tanto con sistemas cerrados, en ingeniería es fundamental la metodología de los llamados volúmenes de control, que permiten estudiar los sistemas abiertos, es decir, aquellos en los que se intercambia materia. Incluso en un ciclo termodinámico se puede hacer uso de la metodología de los volúmenes de control si se quieren estudiar de forma separada los diversos componentes, en los que entra y sale el fluido de trabajo del ciclo.

La formulación del Primer Principio para sistemas abiertos requiere resaltar que una parte del trabajo está asociada a la entrada o salida de la materia en el volumen de control, denominado trabajo de flujo (producto de la presión por el volumen específico), designando como trabajo del volumen de control o trabajo técnico al resto del trabajo, en definitiva asociado a ejes, pistones, elementos eléctricos, ... Si se añade el trabajo de flujo a la energía interna que transporta la masa que entra o sale del volumen de control se obtiene la entalpía, una nueva propiedad termodinámica. El uso de la entalpía en la formulación del Primer Principio para sistemas abiertos fue propuesta por Zeuner en 1859, quien como caso particular la aplicó también en Mecánica de Fluidos para obtener la extensión de la ecuación de Bernoulli al movimiento de un flujo compresible, aunque su nombre cayó en el olvido con el cambio de siglo. Bejan [6] indica en su libro de Termodinámica Técnica Avanzada que la última referencia que ha encontrado a la fórmula de Zeuner está en el tratado de Stodola sobre turbinas de vapor de 1903. Lamentablemente el profesor Bejan no debió tener acceso al libro de Termodinámica Técnica del P. Mariño [7] donde en 1942 expone las “ecuaciones de Zeuner” para describir el comportamiento de flujo compresible en toberas. En

cambio, Mariño en su libro no cita a Zeuner cuando introduce la entalpía en la ecuación del Primer Principio¹, designando la entalpía como “calor total a presión constante”. Esta designación fue introducida por Gibbs en alusión a que la variación de entalpía en un proceso internamente reversible a presión constante en un sistema cerrado determina el calor intercambiado. Posteriormente Mollier (profesor en la Universidad de Dresden, al igual que Zeuner) comprendió el importante papel desempeñado por la entalpía en el Primer Principio en sistemas abiertos al estudiar el comportamiento de las turbinas de vapor, unificando el Primer y Segundo Principio en el diagrama h-s que lleva su nombre. Hacia los años 30 del siglo pasado se dejó de usar el término “calor total a presión constante” en favor de “entalpía”, siendo éste introducido por Kamerlingh-Onnes (Universidad de Leiden) a partir del término griego *enthalpein*, que significa calentar.

Las peripecias descritas sobre la aparición de la entalpía ponen de manifiesto una vez más las diferencias entre el enfoque físico frente al ingenieril a la hora de formular la Termodinámica. Así, en los libros propios de Facultades de Ciencias, como por ejemplo el del profesor Aguilar [2] la formulación en sistemas abiertos no pasa de ser una pequeña referencia comparada con el resto de tratamientos matemáticos, siendo planteada la entalpía como el calor en un proceso a presión constante. Sin embargo, en los textos propios de Escuelas de Ingeniería, como por ejemplo el del profesor Pérez del Notario [9], se emplea tanto la formulación para sistemas cerrados como para abiertos, describiendo la entalpía tanto como calor a presión constante como energía transferida por un flujo al entrar o salir en un volumen de control (considerando tanto la energía almacenada en el flujo como el trabajo de flujo para atravesar la superficie de control).

2.2.2. El Segundo Principio

El Segundo Principio resulta mucho más complejo que el Primero, siendo además el que impone una restricción fuerte a los procesos energéticos, estableciendo en qué dirección deben transcurrir. La entropía permite cuantificar

¹ La ecuación del Primer Principio en esta época se denomina *ecuación de equivalencia*, y se plantea principalmente para sistemas cerrados. Su aplicación para sistemas abiertos se centra en corrientes fluidas en procesos internamente reversible de una sola entrada y una sola salida, relacionando el calor, la entalpía y el trabajo de expansión en sistemas abiertos ($-v \times dp$).

el Segundo Principio, siendo percibida ésta a menudo como una variable “sinistra”, como decía mi profesor de Termodinámica (el general Domingo Palacios, entonces coronel), si bien para el profesor Pérez del Notario es uno de los conceptos más bellos de la ciencia [9]. El término “entropía” procede del griego y se puede traducir como retorno, vuelta o ciclo. Fue acuñado por Clausius en 1854 probablemente a raíz de su famosa desigualdad que permitió definir la entropía a partir de un proceso cíclico internamente reversible. Nuevamente surge aquí la dicotomía entre la interpretación física e ingenieril. Así, en Física la entropía se asocia al desorden de un sistema, mientras que en ingeniería resulta mucho más útil como medida de la irreversibilidad de un proceso, debido a que la entropía no se conserva, como la energía, sino que se genera en los procesos irreversibles, tanto más cuanto mayor sea el grado de irreversibilidad del proceso (esta generación de entropía fue denominada por Clausius “calor no compensado” y la dedujo a partir de su desigualdad, aplicable a ciclos con irreversibilidades internas).

Aunque la entropía es una magnitud física, desde que la formuló Clausius ha tenido siempre implicaciones filosóficas debido a que el aforismo de Clausius sobre que la entropía del universo tiende a un máximo supone que debió existir un origen de los tiempos en que fue nula, cuando se creó el universo, lo que supondría una prueba de la existencia de Dios. A este respecto el P. Mariño parece mostrarse un tanto escéptico indicando que en esta ley algunos autores de Teodicea quieren ver una prueba de la existencia de Dios. En la misma línea se sitúa el también jesuita P. Mataix, que realizó la tesis de su licenciatura en Filosofía sobre la transcendencia filosófica del Segundo Principio [7]. El hecho de que la evolución de la entropía marque una dirección siempre creciente hacia el futuro, al igual que el tiempo, dio lugar a que Eddington la denominase la “flecha del tiempo”. Por supuesto, estas implicaciones transcendentales sobre la entropía encuentran objeciones en los filósofos materialistas, como Engels, que afirman que el razonamiento falla porque el universo no es un sistema aislado, y que tal suposición fue fruto del entusiasmo de Clausius, quien debió plantear su aforismo simplemente para un sistema aislado cualquiera (uno sin intercambio de materia ni energía). Stephen Hawking plantea que, además de la flecha entrópica existen otras dos flechas del tiempo: la psicológica, según la que recordamos el pasado y no el futuro y la cosmológica, que señala el tiempo marcado por la expansión del universo [2].

Otro aspecto que genera una cierta controversia tiene que ver con la interpretación microscópica de la entropía que la asocia con el orden de

un sistema. Según esto, los seres vivos que evolucionan desde compuestos muy simples en su estado embrionario, con gran desorden, hasta estructuras fuertemente ordenadas en su estado adulto, parecen contradecir el Segundo Principio, como ya señalaba el jesuita Teilhard de Chardin: “los seres vivos parecen desafiar la ley del crecimiento de la entropía, constituyendo en nuestro mundo islotes de entropía decrecientes”. Para dar solución a esta aparente paradoja es preciso recurrir de nuevo a la ingeniería y a la formulación del Segundo Principio para sistemas abiertos. En efecto, la entropía debe aumentar en un sistema aislado, siendo una consecuencia del Segundo Principio, que lo que realmente establece es que en todo proceso real (sea el sistema aislado o no) se debe generar entropía. Por tanto, la entropía de un sistema no aislado puede disminuir sin contradecir el Segundo Principio, simplemente porque ceda calor (y con ello entropía) al entorno en mayor medida que la exigida generación de entropía. Lo que debe ocurrir es que si se incluyen en el sistema los alrededores con los que intercambia calor o masa, creando así un sistema aislado, la entropía de este nuevo conjunto sí ha de aumentar.

Volviendo a los seres vivos, el Segundo Principio se cumple porque siempre están generando entropía, siendo esto compatible con que reduzcan su entropía, pues liberan calor y entropía en cantidades suficientemente altas. En concreto, durante el crecimiento se ingieren grandes cantidades de alimentos de baja entropía (estructuras sencillas) provocando la síntesis de grandes macromoléculas (ácidos nucleicos, pigmentos y hormonas) y la formación de células estructuradas supone una reducción en la entropía del ser vivo, que es sobrepasada por la entropía liberada al entorno debido al carácter exotérmico de la formación de proteínas, lo que en conjunto permite que la generación de entropía sea positiva, que es lo que exige el Segundo Principio. Durante la etapa de madurez (estado estacionario) la entropía del ser vivo permanece constante debido a que la actividad metabólica por unidad de masa disminuye con el desarrollo del individuo. Esto permite que la entropía generada sea compensada (no excedida) por el intercambio de materia con el entorno y el menor calor liberado. Una nueva paradoja aparece al pensar que esta situación podría perpetuarse indefinidamente, es decir, que podría evitarse la muerte al no exigir el Segundo Principio la desordenación masiva de los sistemas internos del individuo. Por tanto, la muerte biológica no es una consecuencia del Segundo Principio, sino de las leyes de la evolución. Así, cuando un individuo ha crecido, y ha engendrado descendientes, resulta más eficaz que estos descendientes, más evolucionados, continúen el proce-

so y que el individuo original desaparezca [2]. Para que la muerte se produzca la liberación de entropía por parte del individuo disminuye, permitiendo que la entropía generada por las irreversibilidades internas sea mayor, y con ello la entropía del individuo aumente, hasta que su nivel de desorden interno es tan alto que muere. Tras la muerte, el cuerpo se descompone en sistemas más simples, aumentando el desorden y con ello la entropía. Se desconoce el mecanismo que pone en marcha la reducción de la liberación de entropía. Quizás esté contenido en el ADN o en algún proceso degenerativo que no puede ser superado por la evolución, ya que de serlo sería dañino para la especie. Aportando aquí una visión trascendente, se podría decir que así el individuo retorna al Creador, habiendo sido Éste quien ha fijado en cada individuo el mecanismo de retorno.

2.2.3. La combinación del Primer y Segundo Principio

Como se deduce de la exposición previa la interpretación del Segundo Principio a partir de la entropía resulta bastante compleja. Sin ir más lejos, el hecho de que el incremento continuo de la entropía del universo deba suponer su muerte térmica no resulta evidente. En la misma línea, la entropía generada mide la degradación de la energía en los procesos, pero su valor no es comparable con la energía que se transforma ya que la entropía tiene unidades de energía por unidad de temperatura. Otra prueba más de que el Segundo Principio resulta complejo en su aplicación lo constituye el hecho de que los descubrimientos de Carnot no tuviesen eco en la comunidad científica de su época hasta diez años después de su publicación, cuando Clapeyron tradujo en ecuaciones las reflexiones de Carnot [6].

Tratando de superar estas dificultades, Rant en 1956 planteó la exergía, que conduce a la determinación de la energía disponible o utilizable de un sistema [3]. Como ya se ha dicho, el término energía procede del griego “en-ergon”, es decir, trabajo contenido en el interior del sistema. Por analogía con este concepto surge la exergía, del griego “ex-ergon”, que vendría a ser la energía que puede salir del sistema, o que se define a partir del exterior del sistema, de ahí que se llame también energía utilizable o disponible.

Hablar de energía utilizable de un sistema supone decir que no toda la energía contenida en el sistema está disponible para realizar un trabajo. La razón se debe a que el trabajo se realiza porque el sistema presenta unas propiedades diferentes del entorno. Cuando fruto del proceso las propiedades

del sistema igualan a las del entorno se dice que el sistema ha alcanzado el estado muerto, conteniendo entonces energía pero siendo incapaz de convertirla en trabajo. Un ejemplo sencillo de esto lo constituye el aire contenido en un recipiente a presión superior a la atmosférica. Si el aire se deja escapar del recipiente a través de un motor neumático se obtiene un trabajo, que desaparece no cuando todo el aire ha salido del recipiente, sino cuando en él queda tan solo el que mantiene una presión igual a la atmosférica. En ese caso el aire del recipiente tiene energía, pero no es utilizable por estar en las mismas condiciones que el ambiente. Es decir, el sistema ha alcanzado el estado muerto. Se sigue de lo anterior que la determinación de la exergía requiere establecer un ambiente de referencia, motivo por el que se dice que la exergía es una pseudopropiedad termodinámica.

Pese a que la exergía fue propuesta por Rant en 1956, en la década de los 80 del siglo pasado proliferaron los textos sobre medidas a aplicar en los procesos para “conservar la energía”, siendo esto improcedente al estar garantizado por el Primer Principio. Así por ejemplo, el parlamento español aprobó la ley 82/1980 sobre conservación de la energía. El título correcto debería haber sido “conservación de la exergía”, ya que ésta es la que no se conserva en los procesos reales, sino que se destruye debido a las irreversibilidades. De hecho, se demuestra que la exergía destruida en un proceso es igual al producto de la entropía generada por la temperatura termodinámica del ambiente de referencia, conocida esta ecuación como teorema de Gouy-Stodola, que da ya una herramienta para comparar las irreversibilidades de un proceso (exergía destruida) con la energía puesta en juego, al manejarse las mismas unidades.

Matemáticamente el balance exergético no constituye un tercer principio, sino que de hecho es una combinación lineal del Primero y del Segundo. Esto significa que el balance exergético no aporta nueva información, sino que facilita la interpretación del Segundo Principio. Así, las consecuencias negativas del aumento de la entropía del universo resultan evidentes cuando se expresan desde el balance exergético, que establece que la energía utilizable del universo cada vez es menor (debido a la destrucción de exergía por las irreversibilidades de los procesos reales), alcanzándose la muerte térmica cuando dicha energía utilizable alcance el valor nulo.

Otro ejemplo de la luz que arroja la exergía sobre el Segundo Principio se encuentra en la eficiencia exergética, que aplicada a ciclos termodinámicos de potencia viene dada como el cociente entre la eficiencia conseguida y la

máxima eficiencia posible, establecida por el límite de Carnot. De este modo, la eficiencia convencional (energética) en un motor térmico nunca alcanza el 100%, sino el rendimiento de Carnot, pero el máximo de la eficiencia exergética sí que alcanza el 100% en un motor ideal. De igual forma, en una bomba de calor el coeficiente de prestaciones (COP) siempre supera el 100%, estableciendo el Segundo Principio un valor máximo para el mismo. Por contra, la eficiencia exergética de una bomba de calor ideal alcanza el 100%.

2.3. Termodinámica Técnica

Tras la exposición anterior queda claro cuál es el marco de la Termodinámica Técnica: el estudio de los procesos energéticos buscando tres cosas: cuantificar los recursos requeridos y los productos obtenidos, medir la calidad de las transformaciones e identificar y cuantificar las fuentes de irreversibilidad para optimizar los procesos. Para ello la Termodinámica Técnica ha de tratar con rigor tanto el Primer como el Segundo Principio, prestando especial atención al análisis exergético como vía para concretar los a menudo oscuros planteamientos a los que conduce la entropía. Todo ello se ha de hacer principalmente con la metodología de los sistemas abiertos, si bien la de sistemas cerrados permite valorar adecuadamente el comportamiento global de ciclos de potencia y refrigeración. La Termodinámica Técnica no puede quedarse ahí, sino que ha de ser capaz de analizar sus aplicaciones tecnológicas, en lo que se ha venido en llamar Ingeniería Térmica. Así, ha de cubrir compresores, motores alternativos (de combustión interna y externa), turbinas de gas y vapor, centrales térmicas y procesos de climatización y producción de frío, sin olvidar fenómenos físicos relevantes como el movimiento de flujos compresibles en tuberías, toberas y difusores o la combustión. Esto es así desde los inicios del siglo XX, como se puede apreciar en el libro de Termodinámica Técnica del P. Mariño de 1942 [7].

En muy estrecha relación con la Termodinámica Técnica se encuentran la Mecánica de Fluidos y la Transmisión de Calor. Así, tras la reivindicación hecha previamente no se debe olvidar las ecuaciones de Zeuner, que vienen a constituir una generalización de la ecuación de Bernoulli para fluidos compresibles, ya recogidas por Mariño. En cuanto a la relación con la Transferencia de Calor, baste decir que en Termodinámica se calculan las prestaciones de los equipos sin tener en cuenta las dimensiones de las instalaciones necesarias para ello; es

con la Transmisión de Calor con lo que se asignan áreas a los intercambiadores de calor, que condicionan tanto la destrucción de exergía como la inversión de los equipos. Algo análogo podría decirse del papel de la Mecánica de Fluidos en la determinación de las secciones de los conductos.

La importancia de la optimización de los procesos térmicos fue puesta ya de manifiesto en 1986 por la American Society of Mechanical Engineers (ASME) en un documento titulado *Research Needs in Thermal Systems* [6]. Dentro de estas necesidades de los sistemas térmicos la optimización y la metodología de diseño en Termodinámica fueron identificadas como una prioridad para la investigación: “Se debe realizar investigación en métodos para aplicar el Segundo Principio con objeto de lograr la optimización termodinámica de los sistemas térmicos. Debe llevarse a cabo un análisis de los sistemas y componentes principales para identificar los objetivos sobre los que llevar a cabo la optimización. Es necesario el desarrollo de una metodología de diseño de sistemas térmicos, al igual que existe una para los sistemas mecánicos. Estos métodos deben incluir en primer lugar los procesos térmicos, así como nuevos planteamientos que contemplen las restricciones impuestas en las prestaciones por la economía, el Primer y el Segundo Principio. Tal metodología es importante tanto para la evaluación de los sistemas existentes como para el desarrollo de nuevos.” Otra prioridad identificada en este informe es la relativa al modelado, simulación y optimización: “Se requieren metodologías innovadoras en el diseño, la operación y el control adaptativo de los sistemas térmicos, las cuales conduzcan a una mejora en la predicción de las cargas y los recursos. Tales metodologías deben incluir explícitamente el Segundo Principio en la optimización de sistemas y subsistemas”.

Las prioridades establecidas por ASME condujeron al surgimiento de dos nuevas metodologías: la Termoeconomía, llamada también Exergoeconomía, y el método de la minimización de la generación de entropía (Entropy Generation Minimization, EGM). La Termoeconomía es una disciplina que combina el análisis exergetico con la economía, asignando costes económicos según las exergias de los recursos y productos. Su herramienta básica es la eficiencia exergetica, definida como la exergía de los productos entre la de los recursos². En España tenemos el privilegio de contar con uno de los principales representantes de esta metodología, el profesor Valero de la

² Nótese que esta definición puede conducir a resultados diferentes de la más técnica [3] consistente en comparar la exergía recuperada en el proceso con la suministrada al mismo.

Universidad de Zaragoza. En la actualidad esta corriente está perdiendo impulso debido a que existen varios parámetros sujetos a interpretación en su formulación, con lo que los resultados pueden diferir según cómo se aplique el método. En su lugar, parece que el análisis exergético convencional, con un estudio de costes clásico en paralelo, está ganando más aceptación.

En cuanto al método EGM, impulsado principalmente por el profesor Bejan de la Universidad de Duke [10], y basado en los primeros trabajos de Curzon y Ahlborn en 1975 [11], consiste en minimizar la generación de entropía teniendo en cuenta restricciones impuestas por la Mecánica de Fluidos, la Transferencia de Calor y otros procesos de transporte. Así, se tienen en cuenta conductancias térmicas, pérdidas de carga, etc, a modo de restricciones en el proceso de optimización, donde la función objetivo es la generación de entropía, que ha de ser mínima. En la actualidad esta metodología ha sido extendida a otros fenómenos físicos diferentes a la Ingeniería Térmica, como la optimización geométrica de las redes de fluidos, comprobando que las ramificaciones de los ríos o el crecimiento de las ramas de los árboles resultan adecuadamente explicadas por este procedimiento, lo que nos muestra que la Naturaleza sabe optimizar desde siempre, comenzando el hombre a vislumbrar estas técnicas ahora.

2.4. Ingeniería Energética

La Termodinámica Técnica o Ingeniería Térmica constituye el núcleo fundamental del análisis de los sistemas energéticos en unos estudios de Ingeniería. Esta disciplina ha de ser continuada con una más práctica que suele denominarse Ingeniería Energética o Tecnologías Energéticas, y que habitualmente se imparte con nivel de Máster. Esta materia ha de tener un carácter necesariamente tecnológico, siendo preciso abordar detalles constructivos y de operación, pero sin olvidar la componente económica inherente a los sistemas energéticos. Así, un ingeniero debe ser consciente de que las tecnologías que propone para resolver un problema han de tener una triple viabilidad: técnica, medioambiental y económica, siendo esto una condición necesaria para alcanzar el desarrollo sostenible. Por tanto, en Ingeniería Energética se deben incluir metodologías económicas que permitan identificar los costes en una forma global, como el coste normalizado [12], y técnicas que permitan dimensionar adecuadamente los equipos, como la del rectángulo máximo mediante la curva monótona de demanda [13].

Desde un punto de vista técnico, es necesario que en esta asignatura se preste atención no sólo al diseño de las instalaciones y al funcionamiento en su punto nominal, sino también a la operación fuera del mismo. La importancia de este hecho se pone de manifiesto en las modernas legislaciones relativas a la climatización de edificios, por ejemplo, donde se exige una evaluación anual de las cargas térmicas para conocer el consumo real de las instalaciones [14]. De igual modo, el cálculo de la producción eléctrica anual de una planta termosolar exige no sólo conocer el recurso sino la respuesta de la planta ante una entrada variable de calor y fluctuaciones en el foco frío. Esta necesidad se extiende también a los sistemas más habituales de regulación y control.

Otro aspecto importante de esta disciplina es la actualización permanente y la apertura a nuevos desarrollos, que han de ser presentados de forma sincera y objetiva a los estudiantes. Así, una Ingeniería Energética que no prestase importancia a la energía nuclear estaría igual de sesgada que otra que no tratase las energías renovables, por ejemplo. En cuanto a la actualización, puede servir como ejemplo el libro de Haywood [15] que ya en su tercera edición de 1985 recogía los ciclos termodinámicos de Brayton supercríticos con CO_2 que fueron propuestos por Feher en 1967 [16] y que tras el exhaustivo trabajo presentado por Dostal en su tesis doctoral en 2004 [17] donde los proponía para centrales nucleares avanzadas en fisión (generación IV) han despertado un nuevo interés tanto para futuras plantas de fusión [18] como para centrales termosolares de alto rendimiento [19]. Otro ejemplo de nuevas tecnologías que han de ser integradas en esta disciplina son los ciclos de Rankine orgánicos, planteados en los años 80 del siglo pasado a raíz de la crisis del petróleo y en auge actualmente para cogeneración en ciclo de cola [20], en ciclo de cabeza con biomasa [21] u otras aplicaciones que impliquen trabajar con una fuente térmica de baja o media temperatura [22].

Por otra parte, la Ingeniería Energética no puede quedar constreñida exclusivamente a la generación eléctrica, pues siendo muy importante no agota el escenario de los procesos energéticos. Así, se deben estudiar las soluciones energéticas para el sector industrial y muy especialmente para el residencial y edificatorio, habida cuenta de su relevante papel en el consumo de energía primaria. Incluso, aunque no suele ser habitual, sería conveniente que presentase soluciones actuales para problemas en el transporte, ya sea a través de vehículos eléctricos, híbridos, de pila de combustible,...

Finalmente, en la disciplina de Ingeniería Energética se deben incluir aspectos geoestratégicos y sociopolíticos, de cara a que los futuros ingenieros no vivan de espaldas a la sociedad sino que sean conscientes de la necesidad de proponer soluciones adaptadas al marco que presenta el país, así como de comunicar de manera objetiva las diversas soluciones tecnológicas, dando así elementos de juicio a los futuros ejecutivos de políticas energéticas.

3

Los recursos naturales

3.1. Recursos fósiles

Los recursos fósiles están sometidos hoy día a una fuerte controversia. Por una parte, se les considera uno de los responsables del cambio climático; por otra parte, la experiencia en su manejo y su facilidad de uso aconseja su mantenimiento, al menos temporalmente. Hasta hace pocos años se pensaba que el dilema anterior sería resuelto por la vía de los hechos, al menos con el petróleo y el gas natural, dado que sus reservas eran finitas en el corto plazo; el problema con el carbón se plantea en el medio-largo plazo por la mayor abundancia de reservas, de ahí que hayan surgido ya tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2 para tratar de compatibilizar su uso con la ausencia o reducción drástica de emisiones. Sin embargo, desde hace unos pocos años la viabilidad económica de los llamados hidrocarburos no convencionales (tanto gas natural como petróleo) ha hecho plantearse estos dos combustibles en un escenario de medio plazo, cercano al del carbón, pues se estima que las reservas de gas natural no convencional podrían duplicar las reservas actuales [23].

En este nuevo marco podría ser razonable la inversión en nuevas plantas de ciclo combinado junto con la repotenciación de antiguas plantas de carbón como un escenario de mitigación de costes de las nuevas tecnologías de captura de CO_2 o incluso hasta que las curvas de aprendizaje de tecnologías renovables las hagan viables sin necesidad de subsidios.

La nueva oportunidad que brinda la aparición de los hidrocarburos no convencionales ha de aprovecharse mediante tecnologías avanzadas que permitan una transición hacia nuevas fuentes o vectores energéticos. Un ejemplo sería la gasificación integrada en ciclo combinado (GICC), que reduce las emisiones ácidas, permite la captura del CO₂ e incluso la producción de hidrógeno. Como se dijo previamente, es preciso aprovechar las experiencias previas de este tipo de plantas (y en España tuvimos una de las más innovadoras de su época, en Puertollano) para alcanzar un equilibrio entre integración y viabilidad económica, como ha ocurrido en otros países.

3.2. Recursos nucleares

Es difícil encontrar un tema que despierte más controversia que la energía nuclear. Con la sucesiva entrada en el mercado de las tecnologías renovables a gran escala, respaldadas por grandes grupos empresariales, cada vez se ha “profesionalizado” más el lobby antinuclear. Esta energía, ciertamente, no está exenta de riesgos, pero las experiencias adquiridas hacen que dichos riesgos se conozcan cada vez mejor y se controlen cada vez más. Desde que yo estoy trabajando en temas energéticos he podido ver tres fases en la lucha antinuclear. Inicialmente se ponía el acento en los accidentes y la seguridad, pero conforme se fueron justificando los controles de diseño, los estándares de cálculo, etc, este enfoque se quedó sin argumentos; posteriormente llegó el turno a los residuos, su herencia para las generaciones futuras, etc. Estos argumentos se rebaten explicando los sistemas de gestión y los avances en el ciclo del combustible. Finalmente, las críticas se focalizaron en la rentabilidad, aduciendo que las centrales eran rentables porque no invertían lo suficiente en seguridad y tratamiento de residuos.

La energía nuclear presenta un elevado componente de I+D+i, así como uno de los marcos de vigilancia y seguimiento más exigentes. Sus ventajas, en estos tiempos de calentamiento global son evidentes, siendo una energía altamente concentrada, con un recurso muy repartido a nivel mundial y con muy baja influencia en el coste de generación. Conlleva una gran cantidad de industrias auxiliares asociadas, por lo que es un fuerte impulso a la industrialización de un país, siendo todas empresas de alta tecnología, con personal altamente especializado.

Ciertamente sería necesario mejorar el uso del combustible nuclear en los reactores, pues con el actual las reservas se estiman de unos 80 ó 100 años,

escenario claramente insuficiente si se quiere contar con esta tecnología en el futuro. Hasta que la IV generación de reactores nucleares que permita extender las reservas de combustible nuclear sea una realidad, se cuenta a día de hoy con las tecnologías de reprocesado y reciclado de combustible nuclear gastado que contribuirían a la preservación de las reservas de uranio, disminuyendo al mismo tiempo el volumen de residuos a almacenar. Por otra parte, la fusión se presenta como otra fuente nuclear a mucho más largo plazo, con una muy baja producción de residuos y una reserva de combustible muy elevada.

3.3. Recursos renovables

Las energías renovables suelen presentarse al gran público como la solución de los problemas energéticos. Sin embargo, cada vez resulta más claro que son una solución, sí, pero no exenta de problemas. Por otra parte, cada fuente presenta una problemática específica. Así, la solar y la eólica comparten problemas similares, como pueden ser el bajo número de horas de producción anual. Este seguramente sea uno de los grandes misterios que el público no experto no entiende, y es que cómo es posible que si el “combustible” no cuesta sean tan caras. La explicación viene de los costes normalizados comentados antes: el coste de inversión se reduce con las horas de funcionamiento. Así, si éstas son pocas y la inversión es elevada, la rentabilidad se ve comprometida. Otro problema común a estas dos energías es la intermitencia en su funcionamiento, que exige la disponibilidad de otras centrales para actuar como respaldo, lo que también encarece el coste global de la electricidad. La solar fotovoltaica presenta también problemas de integración en red por generar en continua y no disponer de inercia, lo que debe ser tenido en cuenta en la regulación.

Existen también renovables que no son intermitentes, como la biomasa o la geotermia. Sin embargo, la disponibilidad del propio recurso suele hacer que estas plantas no puedan ser muy grandes, lo que dificulta el acceso a economías de escala y provoca unos costes elevados.

Lamentablemente en España siempre tendemos a olvidarnos de una energía renovable muy importante, exenta de muchos de los problemas anteriores, como es la gran hidráulica. Este olvido es debido a que las renovables se asocian al Régimen Especial, y la gran hidráulica esta fuera del mismo

precisamente por ser rentable a precios de mercado. En España ya están agotados los emplazamientos de este recurso, aunque se está volviendo a él en tanto a su capacidad de almacenamiento masivo de energía con las centrales hidráulicas de bombeo, que facilitarían la integración de las renovables con intermitencia (solar y eólica).

4

Nuevas tecnologías energéticas

4.1. Centrales térmicas fósiles

La innovación en las centrales fósiles es muy elevada, comprendiendo los sistemas de captura y almacenamiento de CO_2 y la repotenciación de antiguas centrales de carbón, además de novedosas técnicas de control de emisiones ácidas. Las tecnologías de captura de CO_2 presentan diferente nivel de madurez, siendo la menos madura la oxicomcombustión y la más madura la postcombustión; en cuanto a la captura en precombustión a partir de la tecnología GICC se encuentra en un estado intermedio, no tanto por la madurez sino por los costes en los que puede derivar la planta GICC si no se eligen bien los modos de funcionamiento. Todas las tecnologías de captura presentan el mismo cuello de botella: el transporte y el posterior almacenamiento de CO_2 . Este aspecto es tan importante que el emplazamiento del almacenamiento de CO_2 habría de considerarse un recurso minero, estableciendo las nuevas centrales cerca del mismo, y no de las minas de carbón como hasta ahora. En cuanto a la capacidad de dichos emplazamientos, se estima que en acuíferos salinos podría llegar hasta 10.000 Gt, siendo la emisión anual de unas 27 Gt de CO_2 , aunque es preciso conocer la ubicación de estos sumideros en cada país (nuevo recurso minero).

Desde el punto de vista económico las tecnologías de captura siempre incrementan el coste de generación, tanto por el aumento de la inversión

como por la reducción del rendimiento. Esto hace que no se pueda plantear, como se proponía hace algunos años, que el carbón con captura de CO₂ sería una alternativa a la energía nuclear pues aunque las prestaciones son similares en cuanto a disponibilidad y operación los costes harían inviable un mix de generación basado masivamente en carbón, si bien sí sería muy interesante su combinación con la nuclear, como desarrollaré más adelante.

4.2. Centrales nucleares

Si la investigación en centrales fósiles es elevada, lo es mucho más en energía nuclear, que se podría resumir en 4 frentes: gestión del combustible, generación III, generación IV y fusión. En cuanto a la gestión del combustible se considera cada vez más el ciclo cerrado, sobre todo desde el nuevo marco impositivo a la generación nuclear (Ley 15/2012) y al combustible gastado. El combustible procedente del reprocesado (los óxidos mixtos) viene empleándose desde hace años en Francia, manteniendo un fuerte nivel de investigación. No se pierde de vista la transmutación, que permitiría un ciclo cerrado avanzado.

La generación III con sus diseños evolutivos busca incrementar la seguridad con la integración de sistemas pasivos, así como la modularidad para reducir los costes de inversión. Siendo esto importante y perteneciente al corto plazo, es mucho más decisiva la investigación en generación IV, que permitirá extender la vida del combustible nuclear con el empleo de reactores reproductores, además del incremento de eficiencia de las centrales, con nuevos ciclos de potencia basados en el ciclo Brayton, tanto con helio (para reactores VHTR) [24] como con CO₂ supercrítico, para reactores de media temperatura (SFR principalmente) [25].

La energía de fusión está aún muy abierta, presentando todavía problemas de Física. Existen varios diseños de envoltura regeneradora en estudio, desde los muy conservadores, con serios problemas de explotación, hasta los más innovadores, con problemas de diseño. Además de los retos en materiales, control de la reacción, etc, será preciso dar respuesta a la disponibilidad del litio, material del que se produce el tritio necesario para la reacción de fusión en la que se trabaja en la actualidad. Curiosamente, esta restricción en el litio podría entrar en conflicto con el uso de este elemento para las baterías, aspecto clave en el motor del vehículo eléctrico. Adicionalmente al problema físico, que pretende ser estudiado y resuelto con ITER, está el diseño de la

planta de conversión termoeléctrica, que será resuelta con DEMO, el primer reactor comercial de fusión, previsto para 2050. En el diseño de estos sistemas de conversión la Cátedra Rafael Mariño, en colaboración con CIEMAT, participa activamente en el consorcio EUROfusion de la Unión Europea desde 2013, y anteriormente en el diseño español de envoltura regeneradora de doble refrigerante a través del proyecto TECNO_FUS, dentro del programa CONSOLIDER-INGENIO finalizado en 2013.

4.3. Cogeneración

La cogeneración es una tecnología de alta eficiencia conocida desde los años 90 del siglo pasado y cuya aplicación en España ha estado condicionada a los sucesivos marcos regulatorios de apoyo a las renovables, conocidos como Régimen Especial. La cogeneración consiste en recuperar el calor disipado en un ciclo de potencia (ciclo de cabeza) o en convertir en electricidad el calor residual de un proceso térmico para activar con él un ciclo de potencia (ciclo de cola). De los dos procedimientos, el segundo resulta rentable sin subsidios o muy pocos, de ahí que en el RD 661/2007 apenas estuviese retribuido: sencillamente no lo necesitaba. No es éste el caso de los ciclos de cabeza, que sí han necesitado de apoyo económico.

La cogeneración por ciclo de cola es una tecnología que puede presentar una muy alta eficiencia cuando se dimensiona el grupo por lo que se conoce como demanda térmica, es decir, con un tamaño tal que el calor recuperable del motor siempre es consumido por la demanda. En esos casos es fácil obtener unos ahorros de energía primaria respecto a la producción separada de calor y electricidad de más del 15% (por encima del 10% se considera alta eficiencia). Sin embargo, si el régimen retributivo no tiene en cuenta los ingresos por venta de calor, sino que establece el subsidio a partir de la electricidad producida, suele ocurrir que el mercado se orienta diseñando grupos grandes, que producen mucha electricidad y que recuperan sólo el mínimo calor exigido (disipando gran cantidad del calor disponible). En estas condiciones el grupo sale rentable con subsidios altos y siempre que el combustible no se encarezca, pues su consumo es elevado. Esta situación es la que ha ocurrido en España con la aparición del último marco regulatorio (RD 413/2014), en el que se ha tenido en cuenta que la cogeneración ha de tener unos ingresos por venta del calor recuperado, necesarios para alcanzar la rentabilidad, con lo que el nivel de subsidio se ha reducido. Dicho de otro

modo, que se ha obligado por la vía de los hechos a dimensionar, por fin, por demanda térmica, lo que ha provocado que los grupos sobredimensionados no alcancen rentabilidad, con las consiguientes quejas del sector acostumbrado a recibir subsidios a la ineficiencia.

La cogeneración tradicionalmente se ha aplicado al sector industrial, pero son cada vez más interesantes las aplicaciones al sector residencial, especialmente en entornos rurales o de ciudades pequeñas con recursos de biomasa, donde la tecnología de ciclos de Rankine orgánicos se ha mostrado ya competitiva en Europa y parece serlo en España, a la luz de los trabajos que estamos realizando en la Cátedra [21].

Otro aspecto relevante de la cogeneración es que permite con frecuencia rentabilizar instalaciones que sólo con generación eléctrica no serían viables. Así ocurre con la biomasa ya comentada, y las pilas de combustible estacionarias [26].

4.4. El sector residencial

El consumo energético del sector residencial resulta muy elevado, siendo objeto desde hace unos años de nuevas regulaciones que tratan de limitar su demanda [27] y mejorar su eficiencia [14]. Con estas nuevas regulaciones se ha abierto una nueva oportunidad de negocio, las denominadas empresas de servicios energéticos (ESEs), que integran el suministro de todas las formas de energía demandada por la vivienda, a menudo proponiendo medidas de ahorro con los cuales logran sus beneficios. Además de las mejoras de aislamiento y el desarrollo de nuevos materiales, existen nuevas instalaciones de climatización, como las bombas de calor geotérmicas que están llamadas a desempeñar un importante papel en las instalaciones futuras. En efecto, las bombas de calor geotérmicas, o de fuente-suelo como dicen los anglosajones, permiten tomar calor del suelo en invierno, elevando la temperatura a través de un compresor y suministrarlo al hogar. También es posible su operación reversible, de modo que en verano retiren el calor del hogar y lo disipen en el suelo. En ambos casos, al ser la temperatura del suelo menos extrema que la del ambiente (más cálida en invierno y más fresca en verano), el consumo energético del compresor es menor que con los equipos tradicionales (bombas aerotérmicas). Lo más interesante es que aunque se llamen geotérmicas no requieren de la presencia de una manifestación de este tipo, sino que cualquier terreno es válido, actuando incluso como un almacén estacional.

Aunque las inversiones son más elevadas, si las horas de funcionamiento son suficientemente altas el proyecto puede ser viable incluso en climas mediterráneos [28], si bien en aplicaciones ordinarias se requieren apoyos a la inversión hasta que se mejore la curva de aprendizaje, o bien recurrir a sistemas híbridos con aerotérmica para reducir la inversión.

Otra novedad importante son las instalaciones de micro-cogeneración para producción de calefacción, cuya rentabilidad en baja potencia requiere subsidios a día de hoy o las instalaciones de cogeneración para redes de distrito basadas en biomasa con ciclo ORC, que pueden ser rentables en España sin recurrir a subsidios, y que acumulan una gran experiencia en Centroeuro-pa [21]. Sea con este sistema o con otros, las redes de distrito, tan frecuentes en otros países, están comenzando a despegar en España, dado que han demostrado su eficiencia y ahorro de costes en otros países. Esas redes de distrito pueden combinarse con las microrredes y redes inteligentes, si se integra un sistema de generación eléctrica distribuida y un control inteligente de la demanda.

Finalmente, en el sector residencial queda mucho por hacer en cuanto al tratamiento de los residuos y su valorización energética, llevada a cabo desde las clásicas incineradoras con central térmica hasta las modernas instalaciones de plasma, capaces de transformar los residuos en gas de síntesis y vitrificados [29].

4.5. Generación eléctrica a partir de energías renovables

Las energías renovables presentan elevados potenciales de recurso. Sin embargo, esos potenciales tan altos requieren de soluciones tecnológicas capaces de gestionar su intermitencia. Esto supone sobredimensionar la red para disponer de la suficiente potencia de respaldo en tanto que se desarrollan sistemas eficientes de almacenamiento masivo de energía. Lamentablemente, las renovables que no presentan intermitencia (biomasa y geotermia para generación eléctrica) no permiten grandes instalaciones por razón del recurso.

Conscientes de la necesidad de mejorar el desarrollo de las renovables se ha recurrido en España a sucesivos marcos regulatorios que han subvencionado este tipo de generación eléctrica, con desigual resultado. Así, en la energía eólica se ha logrado una buena adaptación entre los subsidios y

la curva de aprendizaje, estando en la actualidad el coste de generación cerca de la paridad con el mercado. Sin embargo, en otras tecnologías como la fotovoltaica, se han vivido ejemplos de cómo el mercado se ha ido adaptando a la prima, y no al revés, contribuyendo al déficit de tarifa que obligó a un cambio drástico de política. Es importante para que esto no se repita la aplicación de la ética empresarial, y que la sociedad exija no solo soluciones respetuosas con el medio ambiente, sino una gestión económica responsable de las mismas.

4.6. El vector hidrógeno

Dentro de las tecnologías más innovadoras no podemos olvidarnos de los usos energéticos del hidrógeno, que despertaron una fuerte expectación a principios de este siglo, tanto por parte de la Unión Europea, con la creación del High Level Group, asesor del Consejo de Europa, como de Estados Unidos, cuando George W. Bush aseguró en el Discurso del Estado de la Unión de 2003 que “el primer coche conducido por un niño nacido hoy podría ser propulsado por hidrógeno y libre de emisiones” [30]. Lo cierto es que la energía a partir del hidrogeno siempre ha fascinado al hombre, como muestran las indicaciones al respecto de Julio Verne en *La Isla Misteriosa* (1847): “¿Qué es lo que van a quemar en lugar de carbón? Agua, respondió Pencroft. El agua, descompuesta en sus elementos por la electricidad. Sí, amigos míos, creo que algún día se empleará el agua como combustible, que el hidrógeno y el oxígeno de los que está formada, usados por separado o de forma conjunta, proporcionarán una fuente inagotable de luz y calor. El agua será el carbón del futuro.” Es decir, Verne ya hablaba de producir hidrógeno por electrólisis y vaticinaba que eso sería el sustituto del carbón, con lo que se adelantaba en más de un siglo a la progresiva descarbonización de la energía.

El hidrogeno no es un recurso natural, sino que ha de ser producido a partir de ciertas energías primarias. Afortunadamente, existen muchos procedimientos que permiten convertir en hidrógeno gran cantidad de energías primarias, aunque a día de hoy con diferentes costes. Así, el hidrógeno puede obtenerse de combustibles fósiles como el gas natural o el carbón, de renovables, como la energía solar, la eólica o la biomasa, e incluso a partir de energía nuclear. Esta gran diversidad de fuentes naturales permite ver al hidrógeno como un vector o portador energético, siendo posible con él llevar estas fuentes, por ejemplo, al sector transporte.

Otro aspecto relativo al hidrógeno es su dificultad de almacenamiento. Al tratarse de un gas tan ligero, presenta una problemática similar al gas natural, pero mucho más acentuada. Así, se puede almacenar comprimido, pero con grandes presiones (entre 300 y 700 bar), que suponen un gasto energético en la compresión importante. También es posible licuarlo, lo que técnicamente es muy interesante al maximizar su densidad, pero económicamente resulta muy caro, además de dificultar el manejo por las temperaturas criogénicas alcanzadas. Existen otras alternativas como la adsorción en hidruros metálicos, que presenta la ventaja de requerir menores presiones a costa del elevado peso de la instalación, lo que lo imposibilita para aplicaciones que no sean estacionarias. Una alternativa aún en desarrollo son las llamadas pilas de metanol directo (DMFC), capaces de aprovechar de forma directa el hidrógeno contenido en el metanol. Cuando este desarrollo sea viable se tendrá probablemente una nueva revolución en el transporte, pues el suministro de combustible y su almacenamiento en el vehículo serían muy similares a los actuales [30].

Los usos finales del hidrógeno se encuentran en el sector transporte, la generación eléctrica y los dispositivos de gran consumo. Sin embargo, su uso requiere sopesar las diferentes opciones tecnológicas desde un sentido integral, que contemple los costes económicos y medioambientales desde la cuna hasta la tumba, debido a que es preciso incluir tanto el proceso productivo como el almacenamiento en los balances energéticos y de CO₂. Sirva como ejemplo de estos análisis que la generación eléctrica mediante pilas de combustible, a modo de central térmica convencional, no resulta rentable salvo que incluya la recuperación térmica mediante cogeneración [26], o que en automoción a día de hoy es preferible emplear como vector energético la electricidad (vehículos eléctricos) que el hidrógeno (vehículos con pila de combustible) [30].

4.7. El mix eléctrico y la política energética

De todo lo anterior se deduce que existen muchas tecnologías para aprovechar los recursos energéticos disponibles. La elección de unas u otras ha de hacerse con criterios siempre técnicos y objetivos, lejos de apasionamientos o fundamentalismos, dado que existen restricciones tecnológicas que condicionan las decisiones. Así, parece claro que con el actual problema de cambio climático no se puede desarrollar la generación eléctrica a partir sólo

de carbón, por ejemplo. Este escenario ni siquiera sería viable recurriendo a las tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2 , pues el coste de generación se encarecería enormemente, siendo preciso además evaluar el potencial para el almacenamiento del país. Un escenario basado totalmente en renovables tampoco es viable, aunque se culminase la curva de aprendizaje y se lograsen reducir los precios de generación dado que los problemas de intermitencia requieren de potencia de respaldo y grandes sistemas de almacenamiento, problemas a los que se unen la dificultad en la regulación de la red con una entrada masiva de generadores asíncronos y de corriente alterna procedente de inversores [31]. En cuanto a la nuclear, si bien sería posible técnicamente su entrada masiva en el mix, como ocurre en Francia, no sería sostenible con el uso que la tecnología actual (II y III generación) hace del combustible, pues conllevaría el agotamiento del combustible en el corto plazo.

Como se ha visto en las consideraciones previas ninguna tecnología puede, por si sola, cubrir la generación eléctrica de un país. La solución ha de venir por una combinación de varias de ellas, de forma que cada una contribuya dentro de sus posibilidades tanto potenciales como técnicas, económicas y medioambientales. Así, las renovables deben aprovecharse al máximo posible dentro de los costes que permitan sus curvas de aprendizaje (la regulación de la red permitiría hasta un 40% de penetración [31]); el carbón debe combinarse con la nuclear actual de modo que se compatibilicen los recursos de almacenamiento de CO_2 con los reducidos costes de la nuclear actual hasta que esté madura la IV generación y pueda realizarse un uso racional del combustible nuclear; los ciclos combinados con gas natural podrían incrementarse (aumentando el hueco térmico al moderar la penetración de renovables) debido a la potencial duplicación de recursos que han supuesto los hidrocarburos no convencionales. Finalmente, el petróleo quedaría para los usos imprescindibles, es decir, toda la petroquímica (plásticos, fibras,...), reduciendo su papel en la automoción.

No se debe olvidar en una planificación sostenible la eficiencia energética, abordándola tanto desde el punto de vista de medidas de ahorro (como se viene haciendo en Europa con las regulaciones de los códigos de edificación) como de instalaciones más eficientes, como la cogeneración en sus diversas formas. Aquí es preciso recordar que los grupos de cogeneración se deben dimensionar correctamente para maximizar el ahorro de energía primaria, y que los mayores potenciales de penetración se encuentran hoy en el sector

residencial y edificatorio en general y en la recuperación de calores por ciclo de cola en la industria.

Aunque todas las medidas enunciadas antes han de tomarse con criterios técnicos y responsabilidad política, no debe olvidarse que en una sociedad democrática no se han de imponer las medidas, aunque sean correctas. En este sentido, es necesaria una mejor educación en temas energéticos, que acompañe a las futuras generaciones en todas las etapas de su formación. Esa es una responsabilidad de la que el mundo académico no puede desentenderse y en la que creo que esta Real Academia de Doctores de España, como depositaria de Todos los Saberes, ha de jugar un papel fundamental, asesorando a las más altas instancias del Estado en planes de estudio y cualquier otro tipo de iniciativas que permitan que la sociedad futura sea más madura y esté mejor informada a la hora de tomar decisiones.

4.8. Transporte

Al igual que el sector residencial, el transporte es un gran consumidor de energía primaria y generador de emisiones. Limitándonos a la automoción, existen a día de hoy diversas alternativas tecnológicas: biocarburantes, hidrógeno, vehículo eléctrico puro o híbrido y combustible fósil de alto rendimiento. Cada una de estas soluciones presenta su problemática, siendo necesarios estudios pozo-ruedas para comparar adecuadamente unas soluciones con otras. En estos estudios pozo-ruedas se calculan las emisiones y la energía primaria consumida no sólo en el uso del vehículo, sino en la producción del combustible. Esto resulta especialmente importante pues algunos combustibles, como el bioetanol o el hidrógeno, presentan elevados consumos energéticos en su proceso de obtención. Así, se encuentra que un vehículo con pila de combustible en el que el hidrógeno se obtenga a partir de gas natural (como se hace a escala industrial en la actualidad) presenta unas emisiones de CO_2 un 20% menores que los vehículos convencionales y consumo de energía primaria similar; por contra, si el hidrógeno procediese de renovables (biomasa o eólica) el consumo se mantendría pero las emisiones serían casi nulas. Si el vehículo consumiese biocarburantes (bioetanol o biodiesel) presentaría emisiones negativas de CO_2 , pero un consumo un 80% mayor que en el vehículo convencional. Finalmente, si el hidrógeno se suministrase a un motor térmico, produciendo una combustión, el consumo sería un 95% superior al del vehículo convencional, con unas emisiones de

CO₂ 44% mayores si el hidrógeno procede del gas natural o nulas si procede de renovables [32].

No quiero dejar de aprovechar esta oportunidad para poner luz sobre un debate ciertamente demagógico que se cierne sobre los biocarburantes. Si bien es cierto que se consume mucha energía en su producción, como se ha visto en los datos previos (en pozo-ruedas supone un consumo del 80% mayor que la solución convencional), no parece justa la crítica de que entran en competencia con los cultivos para la alimentación. Este es un ejemplo que, como ocurre con la energía nuclear, es preciso abordar desde la máxima objetividad. Por una parte, se desarrollan ya biocarburantes de segunda generación, es decir, que las plantas que sirven de materia prima para el etanol ya no son cereales como antes, sino cultivos leñosos o de otro tipo, y por tanto, no comestibles. Pero es que además, respecto al uso del suelo, es decir, a la posibilidad de dejar de cultivar alimentos para producir bioetanol, el análisis resulta cuando menos hipócrita: ¿cuántas veces desde la Unión Europea con la famosa PAC se ha obligado a dejar extensiones de terreno sin cultivar, simplemente para evitar que se desplomasen los precios? Entonces a nadie se le ocurría decir que esos alimentos no producidos no contribuirían a paliar el hambre en países subdesarrollados.

Otro aspecto importante es la integración del vehículo eléctrico o el híbrido enchufable en las redes inteligentes, contribuyendo al almacenamiento energético. Los vehículos híbridos unen además el interés de resolver los problemas de autonomía de los eléctricos con las reducidas emisiones cuando circulan en ciudad en modo eléctrico puro. Por otra parte, la tecnología híbrida permite resolver los problemas de gestión energética en general, siendo posible en el futuro sustituir el motor térmico por una pila de combustible, con lo que pueden actuar como una tecnología de transición.

Conclusiones

Hemos llegado al final del viaje que me propuse emprender al comenzar este discurso. Se ha recorrido la historia de la Termodinámica Técnica, desde sus orígenes en 1824 con Carnot, hasta las metodologías de optimización de la Termoeconomía y la minimización de la generación de entropía, pasando por la propuesta de Rant de la exergía. Desde la Termodinámica llegamos a la Ingeniería Energética, que nos ha permitido valorar los procesos energéticos y adentrarnos en las tecnologías que nos permiten aprovechar los recursos naturales.

Nos encontramos en una encrucijada histórica en la que confluyen las restricciones medioambientales relativas al cambio climático, nuevas tecnologías que permiten aprovechar mejor los recursos naturales, demandas crecientes, aunque mitigadas por los años de crisis, y acceso desigual a la energía por parte de la población mundial. Ante esta situación es preciso mantener la mente abierta a las nuevas posibilidades que ofrecen las tecnologías energéticas, puesto que el ingenio humano siempre ha sabido encontrar soluciones ante las crisis energéticas: la máquina de vapor, la energía nuclear, la diversificación de las energías renovables,... Evidentemente, esto no significa que debemos mantener una despreocupación irresponsable al problema energético. Mientras que los científicos e ingenieros hacen viables las nuevas tecnologías la sociedad debe modificar sus hábitos de consumo, no para volver a las cuevas, sino para utilizar los recursos de una manera responsable y eficiente, compatibilizando el desarrollo económico con la herencia a las futuras generaciones.

Los Estados crean regulaciones energéticas que parecen ir por el buen camino, estableciendo criterios de eficiencia. Se deben apoyar las nuevas tecnologías en su proceso de aprendizaje, pero cuidando de evitar perversiones que alarguen ineficazmente dichos procesos. La educación energética de la sociedad debe incrementarse para que no haya recelos injustificados a nuevas fuentes energéticas. Los tecnólogos debemos trabajar de manera constante para resolver los problemas que nos demanda la sociedad, siendo capaces de transferir estos avances tanto al primer mundo como a los países subdesarrollados y a las economías emergentes, pues de la dirección que tomen estas últimas, con sus altas poblaciones, dependerá la eficacia global de las medidas adoptadas por los demás países.

Soy consciente que con mi ingreso en esta Real Academia de Doctores de España adquiero una gran responsabilidad, pero también esta magna institución me brinda nuevas posibilidades para contribuir al desarrollo de las tecnologías energéticas y a su despliegue en la sociedad. Desde la satisfacción que no puedo negar me produce este ingreso me comprometo a trabajar en esta nueva etapa como siempre he hecho, con ánimos renovados y poniendo lo mejor de mi para que esta Real Academia siga contribuyendo al desarrollo de España.

A.M.D.G.

Bibliografía

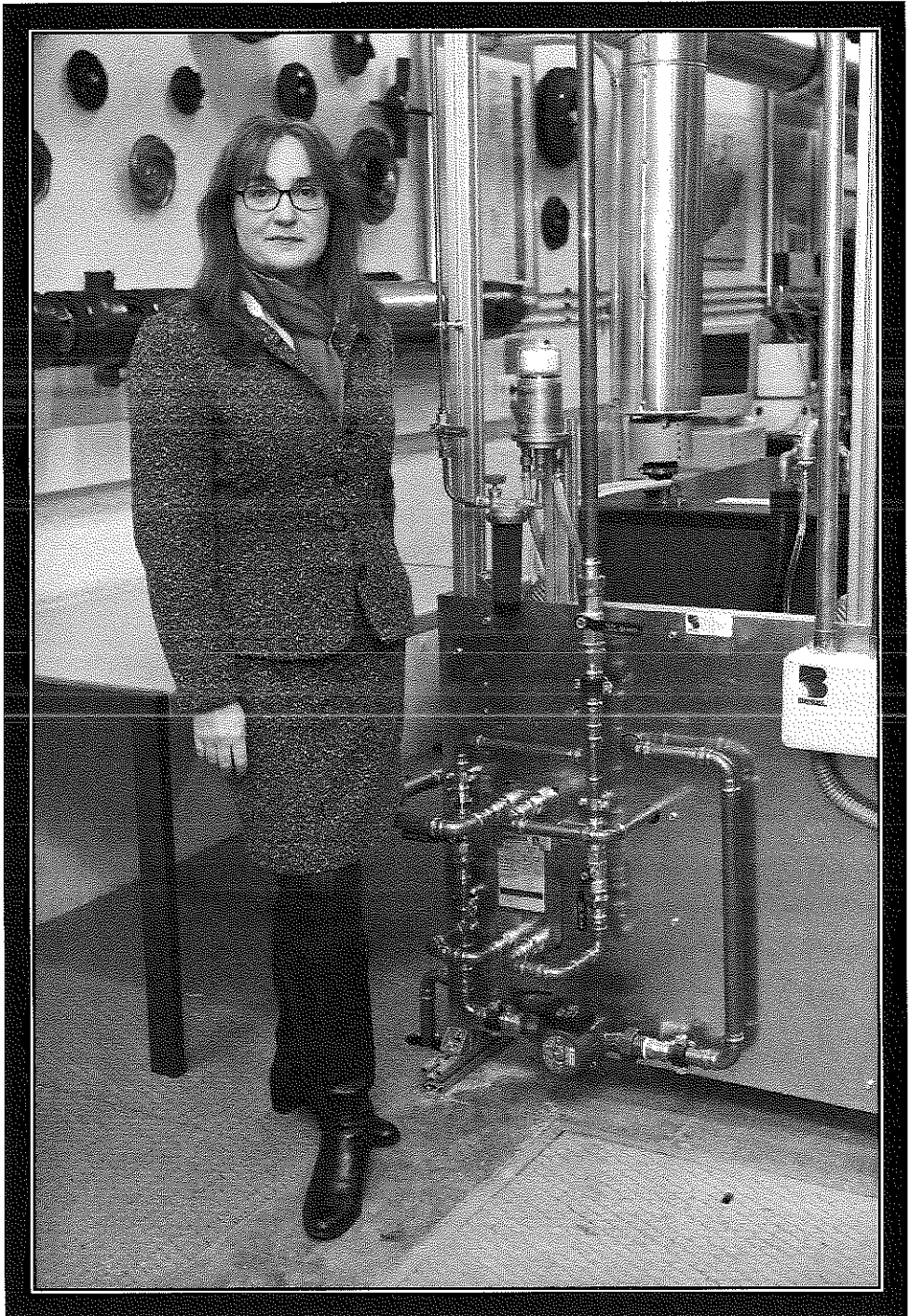
- [1] R.P. Feynm.B. Leighton, M. Sands, Física. Volumen I:Mecánica, radiación y calor. Addison Wesley, México 1998
- [2] J. Aguilar, Curso de termodinámica. Alhambra Longman, Madrid 1989
- [3] H.D. Baehr, Tratado moderno de Termodinámica. Montesó, Barcelona 1979
- [4] M.J. Moran, H.N. Shapiro, Fundamentals of Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons, Chichester 1998
- [5] Y.A. Çengel, M-A- Boles, Thermodynamics. An engineering approach. McGraw-Hill, Boston 1998
- [6] A. Bejan, Advanced Engineering Thermodynamics. John Wiley & Sons, New York 1997
- [7] R. Mariño, Termodinámica Técnica. SAETA, Madrid, 1942
- [8] J.I. Linares, L.E. Herranz, B.Y. Moratilla, Maximum efficiency of direct energy conversion systems. Application to fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy 36 (2011) 10027-10032
- [9] P. Pérez del Notario, Termodinámica. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Madrid 1966
- [10] A. Bejan, Entropy Generation Minimization. The Method of Thermodynamic Optimization of Finite-Size Systems and Finite-Time Processes, CRC Press, Boca Raton 1996

- [11] F.L. Curzon, B. Ahlborn, Efficiency of a Carnot engine at maximum power. *American Journal of Physics* 43 (1975) 22-24
- [12] A. Bejan, G. Tsatsaronis, M. Moran, *Thermal Design & Optimization*. John Wiley & Sons, New York 1996
- [13] A. Algieri, P. Morrone, Energetic analysis of biomass-fired ORC systems for micro-scale combined heat and power (CHP) generation. A possible application to the Italian residential sector. *Applied Thermal Engineering* 71 (2014) 751-759
- [14] RD 1027/2007, de 20 de julio, por el que aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios. BOE 207 (2007) 35931-35984
- [15] R.W. Haywood, *Analysis of engineering cycles*. 3rd Edition, Pergamon Press, Oxford, 1985
- [16] E.G. Feher, The supercritical thermodynamic power cycle, Douglas Paper No. 4348, presented to the IECEC, Miami Beach, Florida, August 13-17 (1967)
- [17] V. Dostal, A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors. Ph. D. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2004
- [18] J.I. Linares, L.E. Herranz, I. Fernández, A. Alexis, B.Y. Moratilla, Supercritical CO₂ Brayton power cycles for DEMO fusion reactor based on Helium Cooled Lithium Lead blanket. *Applied Thermal Engineering* 76 (2015) 123-133
- [19] J.I. Linares, V. Martín, Ciclos de Brayton con CO₂ para centrales termosolares. IX Congreso Nacional del Ingeniería Termodinámica. Cartagena (España), 3-5 de junio de 2015
- [20] J.I. Linares, Valorización de calores residuales en aplicaciones industriales mediante ciclos de cola con tecnología ORC. *Anales de Mecánica y Electricidad* 90 (2013) 33-37
- [21] M. Uris, J.I. Linares, E. Arenas, Techno-economic feasibility assessment of a biomass cogeneration plant based on an Organic Rankine Cycle. *Renewable Energy* 66 (2014) 707-713
- [22] A. Schuster, S. Karellas, E. Kakaras, H. Spliethoff, Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1809-1817
- [23] A. Cámara, F. Pendás, Gas no convencional en España, una oportunidad de futuro. Consejo Superior de Ingenieros de Minas, 2013
- [24] L.E. Herranz, J.I. Linares, B.Y. Moratilla, Power cycle assessment of nuclear high temperature gas-cooled reactors, *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1759-1765

- [25] G.D. Pérez-Pichel, J.I. Linares, L.E. Herranz, B.Y. Moratilla, Thermal analysis of supercritical CO₂ power cycles: Assessment of their suitability to the forthcoming sodium fast reactors. *Nuclear Engineering and Design* 250 (2012) 23-34
- [26] B.Y. Moratilla, J.I. Linares, L.E. Herranz, J. Caballero, A PAFC-TCORC Combined Cycle: Technical and Economic Enhancement of Fuel Cell Technology. *International Congress on Energy and Environmental Engineering and Management*. Badajoz (España), 6-8 de junio de 2007
- [27] RD 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *BOE* 74 (2006) 11816-11831
- [28] M. Zamora, Bombas de calor geotérmicas, en J.I. Linares y B.Y. Moratilla, Eficiencia energética en la edificación. *Biblioteca Comillas Ingeniería*, Vol. 3. Universidad Pontificia Comillas, Madrid 2008
- [29] G. Moreno, Sistema de producción de hidrógeno mediante convertidor de plasma PCS y un filtro STARCEL, en J.I. Linares y B.Y. Moratilla, Hidrógeno y pilas de combustible: estado actual y perspectiva inmediata. *Colección Avances de Ingeniería. Serie Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas*, Vol. 6. Universidad Pontificia Comillas, Madrid 2010
- [30] J.I. Linares, B.Y. Moratilla, El hidrógeno y la energía. *Colección Avances de Ingeniería. Serie Análisis de situación y prospectiva de nuevas tecnologías energéticas*, Vol. 2. Universidad Pontificia Comillas, Madrid 2007
- [31] V. Casajús, Estructura del sistema de generación a medio plazo, en B.Y. Moratilla y M.M. Cledera, *Planificación Energética Sostenible. Biblioteca Comillas Ingeniería*, Vol. 10. Universidad Pontificia Comillas, Madrid 2012
- [32] J.I. Linares, La pila de combustible en automoción. *Luces y sombras. Anales de Mecánica y Electricidad* 85 (2008) 32-37



P. Rafael Mariño en el laboratorio de Fluidos y Calor del ICAI hacia mediados del Siglo XX. (Archivo del laboratorio de Fluidos y Calor del ICAI. Univ. P. Comillas).



Yolanda Moratilla en el laboratorio de Fluidos y Calor del ICAI a principios del Siglo XXI. (Archivo del laboratorio de Fluidos y Calor del ICAI. Univ. P. Comillas).

DISCURSO DE CONTESTACIÓN
DEL
EXCMO. SR. DR. D. LUIS ALBERTO
PETIT HERRERA

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia de Doctores de España,
Excmas. y Excmos. Doctores Académicos,
Señoras y Señores,
Queridos amigos,

La Real Academia de Doctores de España celebra con gran placer un acto solemne: recibir a un nuevo miembro: la Dra. Beatriz Yolanda Moratilla Soria. Viene a ocupar la medalla nº 118 que dejó vacante el Dr. Ingeniero Javier Díaz-Llanos Sánchez y al rendirle el merecido recuerdo, la Academia se felicita del ingreso de la Doctora Moratilla.

Pertenece a ese grupo selecto de ingenieros que antes de cumplir con su vocación docente e investigadora en el campo de la energía y los recursos naturales, abandonó las aulas para palpar lo que es nuestra vida cuando ejercemos nuestra labor en una Empresa, en este caso de Ingeniera, donde intervino en 18 proyectos en relación con la industria petroquímica y la metalurgia. Consciente como dijo Cicerón en *De Finibus*: “no basta sabiduría si no se sabe usar de ella”.

Tal fue su prestigio que no tardó, después, en ocupar la dirección de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas. Las múltiples actividades que así llevó a cabo llamaron la atención del Instituto de la Ingeniería de España y de su Comité de Energía y Recursos Naturales, que rápidamente fue llamada a presidirlo. Ello con independencia de las tesis dirigidas, de sus publicaciones y de su participación en proyectos de I+D+i. Es de destacar su actividad en el ámbito de la gestión y coordinación de eventos: seminarios y aulas de tecnología. Ello le permitió, además, demostrar la parte humana subyacente en sus relaciones con otros expertos.

Esta es la persona definida por esas tres coordenadas que tanto nos gusta a los geómetras recordar como necesarias para la determinación de un plano. Empezando por el final, su componente humanística se manifiesta por

sus valores como la integridad y el altruismo, como corresponde a su Licenciatura en Estudios Eclesiásticos. En el marco de la enseñanza, tan característico del Doctorado, es reconocida por su pedagogía y por su dedicación a la innovación que comprende las tecnologías capaces de transformar el conocimiento científico en valor añadido. Y no menos importante es su tercera dimensión como Gestora –algo no siempre explícito en el cuerpo doctoral– al presidir uno de los Comités del Instituto de la Ingeniería de España.

Cargada de méritos nos llega la Doctora Moratilla. Quieren los usos Académicos que la presentación de un nuevo miembro englobe una contestación a su Discurso. Mi respuesta pretende ser un complemento de la disertación principal, cuyo texto asumo implícitamente. Eso son mis silencios referentes a cuanto Yolanda ha expuesto al iniciar su nueva andadura. Cabría, y yo así se lo sugiero, seguir ahondando (y sé que a ella le gusta), sobre siete puntos de reflexión que me ha sugerido su sapiente discurso.

La primera reflexión gira en torno a la solidaridad. Tenemos interiorizada hoy una cultura que está como diluída en esta Sociedad a la que criticamos como insolidaria y que nos ha modelado en el sentido de preocuparnos de nosotros sin mirar a ese rededor al que nos ha acercado la técnica. Somos insolidarios cuando sabemos que casi la mitad de los 7.000 millones de habitantes del planeta no tienen acceso a ninguna fuente de energía, incluida la electricidad. En ello va el agua, el riego, el alumbrado, la industria alimenticia a funcionar con energías renovables.

Esa insolidaridad lleva a que 3.500 millones de personas con rostro humano, con nombre y apellido no alcanzan las 2.900 kcal necesarias para cualquier ciudadano. La situación actual no es admisible, ya que, como escribía Schiller en su “Oda a la alegría”, a la que Bethoven puso música en el último tiempo de su Novena Sinfonía: “Alle Menschen werden Brüder” (Todos los hombres son hermanos).

Mi segunda reflexión se refiere a la necesidad de un consumo energético responsable. Para la sostenibilidad, es imprescindible disminuir el consumo energético con un control adecuado. Así podremos salvaguardar el imprescindible medio ambiente. En expresión de Gandhi “nuestro planeta ofrece a todos los hombres lo que necesitan, pero no lo que codician”. Los transportes, las fábricas, la vida doméstica, las oficinas, pueden sin duda limitar sus consumos gracias a sistemas emergentes más y más eficientes y creando una conciencia ciudadana que evite las luces que no iluminan a nadie, etc.

Se puede utilizar el calor, la energía que se desperdicia en los trenes cuando descienden en su recorrido. Dos ejemplos de campos inmensos para la aplicación del talento –esa moneda imaginaria en la Grecia clásica– por parte de todos los ciudadanos. Estamos llamados los Ingenieros –y esta es mi tercera reflexión– en el marco de la I+D+i a innovar en los productos, los materiales, los procesos o las cadenas de valor, recurriendo a usar energías limpias.

La demanda de energía requiere combustibles limpios para no incurrir en el aumento de CO₂ en la atmósfera. Algo que, en cambio, no preocupa a nuestros países ricos cuando sabemos que se consumen ya 14.600 millones de tep anualmente que desprenden 30.000 millones de toneladas de CO₂ ¡entre petróleo y carbón! en el mismo período.

La innovación no tendrá límites y ahí está la cantidad de energía que se pierde con las pisadas de los viajeros que circulan por el interior del aeropuerto de Heathrow. El talento puede discernir el uso de energías limpias, de la biomasa, de la energía termosolar y la fotovoltaica, la eólica y la microhidráulica, las micredes y los sistemas domésticos, el biogás y los biocombustibles –dependiendo éstos del tipo de terreno–, o los sistemas híbridos que se deben utilizar.

La generalización del uso de microturbinas, la superación del reto del de la captura y del almacenamiento de energía, mientras se pone de manifiesto el matrimonio entre redes y energías renovables o se industrializa el uso de la energía cinética de los mares para generar electricidad gracias a las boyas son otros tantos retos en los que habrá que profundizar. Y es que, como dijo Sócrates: “Nuestro Universo sería una cosa muy distinta si no ofreciera a cada época algo que investigar”.

Mi cuarta reflexión se relaciona con las TIC. Las infraestructuras de la información y las comunicaciones favorecen el desarrollo de las redes inteligentes para la distribución de la energía eléctrica, etc. Estamos en los albores cuando se va a generalizar el “Internet de las cosas” y el Internet de velocidad 5G para llevar información a cualquier confín del planeta. Y –frío me da pensarlo– llegará a conectar directamente el cerebro con cualquier dispositivo electrónico vinculado a actividades energéticas.

Si Keynes y el propio Ortega (en su “Rebelión de las masas”) pensaban que “el alud de bienes (como la información hoy) iba a tener que convivir con un incremento de la incultura colectiva”, esa supuesta incultura no ha evitado

que hayan quedado arrumbados, las consolas portátiles, los teléfonos fijos, los DVD's y los GPS's, las tarjetas de crédito y los reproductores de música.

Mi quinta reflexión está relacionada con el uso de los recursos naturales a que se ha referido el Papa Francisco en su reciente Encíclica. Se ha iniciado ya una catástrofe como consecuencia del cambio climático inducido, en gran parte, por la actividad humana que llevará a la destrucción de los ecosistemas.

En el horizonte 2030 las emisiones de CO₂ serán 37% más importantes que hoy. Si esto no disminuyera, la temperatura media aumentaría entre 1,7 y 2,4°C con las consiguientes sequías e inundaciones. En contra de la biodiversidad, motor de la resiliencia ecológica, asistimos ya a la destrucción de los corales que protegen las costas de los maremotos e impiden la proliferación de algas que intoxican a los peces. En el Océano Índico y en el Caribe los corales están ya perdidos y en 10 años los peces se habrán degradado en Australia. Esto amenaza a todos los arrecifes, lo que supone grandes dificultades de supervivencia.

Es necesario que limitemos el uso de los recursos naturales para que las generaciones siguientes disfruten de ellos. Como diría Pedro Salinas, es menester que cada uno actúe con "su mejor yo". Occidente no puede ahora pedir al tercer mundo que los emergentes actúen de forma distinta a como lo hicimos nosotros.

También tenemos que tener presente –y esta es mi sexta reflexión– la situación de la globalización respecto al medio ambiente. Como describe Henry Bergson "Il est plus important de bien poser les problèmes que de les résoudre" (Es más importante plantear bien los problemas que resolverlos).

¿Con qué nos encontramos? De los cuatro tipos de Instituciones de la ONU, ni "las mundiales multilaterales" (UNESCO, FMI, etc.) ni entre "las privadas reguladas" (profesionales, sindicales, etc.), figura este problema. Entre "las mundiales no reguladas" (ONGs) se incluye la cumbre de Río que dio origen al protocolo de Kyoto (¡no firmado por USA!) relativo a las emisiones de gases de efecto invernadero. Y entre "las públicas no reguladas" solo es relativamente eficaz el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre la Evolución del Clima (GIEC), creado en 1988 por el G7.

El GIEC está encargado de operar una síntesis de los trabajos científicos en el mundo sobre el cambio climático y su impacto en la biosfera y en los

sistemas socio-económicos. Sería necesario tener un consenso científico y político. Lamentablemente los expertos discuten como científicos pero votan en orden a los políticos.

Es una pena ya que disponemos de grandes conocimientos, recursos financieros, empresarios, emprendedores. Solo falta organización. Pero no será fácil organizarse, aunque ello produciría un incremento económico y socialmente sostenible.

Finalmente, mi última reflexión se refiere a mi esperanza en la humanidad. La situación mundial es de creciente interdependencia entre los seres humanos. Las cadenas de fabricación están integradas mundialmente. Los langostinos de los británicos de Seafood, pescados en Escocia, se pelan en Tailandia y se comercializan en Europa.

Esta interdependencia lleva a incrementar la cooperación y la esperanza en una humanidad donde se produzca la igualdad de derechos y la solidaridad entre sus miembros. Si Einstein decía: "The future of mankind will be what the mankind deserves" (el futuro de la humanidad será lo que la humanidad merezca), los ingenieros, en especial, hemos de colaborar a resolver el grave problema de la energía y el uso racional de los recursos naturales.

Esto nos debe sensibilizar. Tenemos que superar nuestro individualismo posesivo que induce a eludir responsabilidades y a conseguir que caiga el desarrollo exclusivamente en nuestros propios intereses, mientras asistimos al holocausto global de los países pobres.

Estos son los puntos de reflexión que propongo a Yolanda seguir ahondando.

Con la Medalla 118 que te va a ser impuesta así como con el Diploma que te va a ser entregado, se te dará posesión de tu plaza.

Con motivo del nombramiento, me parece justo agradecer a quienes han soportado, al menos, la tensión que en derredor ocasiona siempre el esfuerzo. Ellos, especialmente tu hijo y José Ignacio, deben tener mención en este acto.

Te expreso nuestro placer puesto que eres recibida con gran afecto y respeto, así como esperanza por tu colaboración en la Academia, ya que como bien dice Cervantes "Tú misma te has forjado tu ventura".

La Academia, esta tarde, se viste de gala puesto que con tu ingreso se incrementa, si cabe, su prestigio. No quiero terminar sin invitarte cordialmente

a que sigas prestando tu esfuerzo y tus saberes a la ingente tarea que supone adecuar la energía al desarrollo sostenible de la Sociedad. La tarea es ardua pero, como decía Antonio Machado:

“¿Dices que nada se crea?
alfarero a tus cacharos,
haz tu copa y no te importe
si no puedes hacer barro”

Muchas gracias por su atención.

