

Energías Alternativas

Dr. Roberto Suárez Ántola

Profesor de Ingeniería y Matemática Aplicada, Facultad de Ingeniería y Tecnologías

Universidad Católica del Uruguay

Asesor Físico, Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear

Ministerio de Industria, Energía y Minería

Introducción:

Tal vez la única propiedad que se puede considerar presente en toda clase de materia es la propiedad extensiva conocida como energía. Cada vez que un sistema material interactúa con otro, esa interacción se manifiesta a través de cambios en el estado de los sistemas. Se puede asegurar que éstos han intercambiado energía.

Como la energía se conserva, lo único que se puede hacer es convertirla de una forma a otra, comenzando a partir de las así llamadas fuentes primarias.

Entre esas fuentes primarias se tienen los combustibles fósiles convencionales (petróleo, carbón y gas natural) y no convencionales (combustibles nucleares), así como la luz solar que alcanza el suelo, los vientos, los ríos, las corrientes oceánicas incluyendo las mares, y la biomasa, entre otras. En la presente era tecnológica las fuentes primarias se utilizan mayoritariamente (aunque no exclusivamente) para convertir su energía en energía eléctrica.

En última instancia todas las fuentes de energía primaria están relacionadas con, se originan o se originaron a partir de la energía solar.

La energía de los combustibles fósiles convencionales es energía solar almacenada como energía química por la actividad metabólica de seres vivos desaparecidos hace centenares de millones de años. Teniendo en cuenta el incremento del consumo de energía por una población mundial creciente, no cabe esperar que las reservas de combustibles fósiles convencionales duren más que unos cientos de años si continuaran siendo la fuente primaria dominante, como lo han sido hasta el presente (más del 80% del consumo se asocia con combustibles fósiles, menos de un 10% se asocia con el consumo de energía hidráulica). A este agotamiento que en la escala de tiempo de las sociedades humanas es de corto plazo, se añade el impacto ambiental de la quema de combustibles fósiles: el incremento del efecto invernadero y el cambio climático, al parecer debidos en gran parte a la contaminación asociada a la conversión y el uso de la energía obtenida a partir de combustibles fósiles convencionales¹. Desde la perspectiva de la conversión en energía eléctrica, **las energías alternativas se definen como alternativas a los hidrocarburos**. En consecuencia la energía hidráulica, la solar, la eólica, la obtenible de biomasa, la geotérmica, la oceánica y la nuclear se consideran energías alternativas.

¹ El consumo de energía tal como se lleva a cabo en las sociedades humanas hoy no solamente no es compatible con la preservación del ambiente, sino que no es compatible con la supervivencia de la especie. Una coexistencia aceptable entre energía y ambiente solo es posible introduciendo cambios profundos en la organización socio-económica.

Cabe preguntarse acerca del incremento posible en el uso de la energía hidráulica para convertirla en energía eléctrica, y en sus posibles impactos ambientales. Pese a que en algunas regiones de nuestro planeta todavía se puede aumentar mucho la energía obtenible del caudal de los ríos, las investigaciones realizadas muestran que en las actuales condiciones de incremento poblacional y de consumo de energía, la energía hidráulica está condenada a permanecer como una fracción pequeña dentro de las fuentes primarias de energía eléctrica, con independencia de cualquier consideración relacionada con el ambiente. Además de las limitaciones relacionadas con el número de cursos de agua disponibles para la conversión en gran escala, hay una limitación relacionada con las variaciones más o menos aleatorias del caudal de los ríos. Estas variaciones se pueden resumir y caracterizar utilizando el índice de Hurst. No son muchos los ríos cuyo caudal permanece relativamente estable y que además permiten obtener cantidades significativas de potencia eléctrica.

Por otra parte, si bien los embalses permiten regular los flujos hídricos, y esta regulación puede disminuir las fluctuaciones en la conversión hidroeléctrica², ser beneficiosa para la agricultura y utilizable para la navegación fluvial, también producen importantes impactos negativos sobre los ecosistemas. En principio sería posible duplicar la cantidad de energía eléctrica que actualmente se obtiene en nuestro planeta a partir de la energía hidráulica, pero a costa de destruir una fracción muy significativa de poblaciones animales y vegetales, con las consecuencias que esto trae aparejadas para el ambiente.

El combustible nuclear que se emplea en las centrales de potencia basadas en la energía liberada durante la fisión de núcleos atómicos, consiste en ciertos elementos químicos de número atómico elevado que se formaron con la Tierra. Aún teniendo en cuenta la posibilidad de implementar reactores reproductores³, a la larga los elementos fértiles se agotarán. En el mejor de los casos, en varios miles de años. Con la tecnología actual de reactores puestos en servicio en forma permanente, el agotamiento se produciría mucho antes.

Los combustibles fósiles pueden considerarse, desde una perspectiva económica, como un capital que se va consumiendo hasta agotarse, puesto que no se renueva o lo hace con una velocidad despreciable comparada con la velocidad con la que es consumido.

Es importante tener en cuenta que las centrales que parten de combustibles fósiles, convencionales o nucleares, transforman la energía del combustible en calor y emplean ese calor para transformar agua líquida en vapor. El vapor se emplea luego para mover la turbina de un grupo turbo-generator (es decir, con una turbina y un generador eléctrico montados sobre un eje) que es el encargado de convertir la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Este pasaje desde las energías química o nuclear al calor disminuye la eficiencia del proceso (aumenta las pérdidas de energía)⁴. Esta situación no se debe a restricciones impuestas por principios físicos a una conversión directa, sino que responde al estado actual de los conocimientos científicos, de la

² Permitiendo superar dentro de ciertos límites las consecuencias de un índice de Hurst desfavorable.

³ Que producen, a partir de elementos denominados fértiles, elementos combustibles fósiles cuyos núcleos son capaces de fragmentarse liberando energía y formando cadenas auto-sostenidas de reacciones nucleares, en las máquinas conocidas como reactores nucleares.

⁴ Desde el punto de vista físico el rendimiento de un proceso de conversión se puede medir por el cociente entre la cantidad de energía convertida a una forma que en el marco de ese proceso se considera final (por ejemplo, energía eléctrica) y la cantidad de energía extraída de la fuente para efectuar esa conversión (por ejemplo, energía química, si se tratara de una celda de combustible). Este número, positivo e inferior a 1, se suele expresar como porcentaje y se denomina **eficiencia**.

tecnología y de los costos de explotación, pero es deseable que se modifique en un futuro no muy lejano.

Como la tercera parte del consumo de energía mundial se utiliza en calefacción y otros usos domésticos, es conveniente la recuperación del calor disipado en las centrales térmicas⁵, puesto que esto permite aplicarlo en usos domésticos e industriales. Se lleva a cabo en forma todavía muy limitada.

Como al pasar por calor como forma de energía intermedia, disminuye necesariamente el rendimiento de los procesos de conversión, parecería que los procesos de conversión directa son siempre preferibles. No obstante, no todos los procesos de conversión directa alcanzan las eficiencias elevadas que ahora se pueden obtener en celdas de combustible (más de 75 %) que convierten directamente energía química en energía eléctrica. La conversión directa, fotovoltaica, de la radiación solar en electricidad difícilmente alcanza el 25 %.

Unidades

Para comparar procesos de conversión de energía se utilizan diferentes unidades.

La unidad del sistema internacional, el Julio (J), es conmensurable con las variaciones de energía gravitatoria obtenibles fácilmente a partir del trabajo muscular humano: si una masa de 1 kg se eleva 1 m por sobre el nivel del mar se le suministran 9.8 J. El kilo-Julio (kJ) es igual a 1000 J.

Para describir consumos hogareños se utiliza el kilo-vatio-hora (kWh), siendo 1 kWh=3600 kJ. La combustión de 1 litro de gas natural produce aproximadamente 12 kWh de energía. La combustión de una tonelada de petróleo produce aproximadamente 12 MWh, siendo 1 MWh=10⁶ Wh, y 1 Wh es igual a 3.6 J.

Se continúa utilizando (sobre todo en termoquímica) la kilo-caloría (kcal): 1 kcal=4185 J=1.2 Wh.

En microfísica se usa el electrón-voltio (eV) y sus múltiplos (MeV y GeV): 1eV=1.6×10⁻¹⁹ J.

Los economistas continúan utilizando la tonelada equivalente de petróleo (tep), que es la energía desprendida durante la combustión de una masa de tonelada de petróleo (se toma, como dijimos, igual a 12 MWh, aunque el valor exacto depende de la calidad del petróleo). Nótese que 1 MWh=0.086 tep.

Los economistas también utilizan la tonelada equivalente de carbón (tec). 1 tec=0.7 tep. Para describir desde una perspectiva económica la conversión en energía eléctrica de otras formas de energía en algunos casos (por ejemplo, centrales térmicas) se usan factores de conversión que tienen en cuenta el rendimiento del proceso y en otros casos (por ejemplo, aerogeneradores) a veces no se los utiliza. Esto junto con las variaciones que vienen sufriendo los factores de conversión enturbia la comparación entre las diferentes fuentes y formas de energía y dificulta el debate sobre los problemas relacionados con la energía. Aunque inconveniente, esto ocurre y es preciso tenerlo en cuenta, sobre todo al estudiar trabajos multidisciplinarios que involucran componentes económicas.

⁵ Cuando resulta posible porque las diferencias de temperatura son lo bastante grandes, esta recuperación ya se realiza en las centrales de generación eléctrica por ciclo combinado, convirtiendo calor en electricidad en dos etapas consecutivas, la primera calentando un gas, a temperaturas muy elevadas, para usarlo como fluido de trabajo, y la siguiente involucrando la producción y empleo de vapor de agua.

Las energías renovables: aspectos generales.

A diferencia de los combustibles fósiles convencionales y del combustible nuclear, las fuentes primarias tales como la radiación solar que incide sobre la superficie del planeta, los vientos, la biomasa, el vapor de agua natural asociado a procesos geotérmicos, el caudal de los ríos y las corrientes oceánicas, desde el punto de vista económico se pueden considerar como un ingreso, en la medida en que se estén renovando en forma permanente, compensando totalmente el consumo que de ellos se realice.

Exceptuando los procesos de combustión de biomasa, el empleo de energías renovables casi no produce emisiones de gases de efecto invernadero u otros gases contaminantes⁶. En el caso de la biomasa, el anhídrido carbónico emitido por combustión se puede compensar por una fijación equivalente de anhídrido carbónico que se produce durante el crecimiento de biomasa de reemplazo.

Si bien el hecho que una fuente de energía primaria sea renovable no significa que sea no contaminante y que se preste sin más para un desarrollo sostenible, por lo general su uso no produce residuos de tratamiento difícil (como es el caso de los residuos de las plantas nucleares actuales).

En el caso de los países que no disponen de petróleo, gas natural, ni yacimientos de uranio o torio, el uso de las energías renovables les permite evitar costosas importaciones y aprovechar recursos autóctonos. Además, en promedio, la explotación de las energías renovables genera cinco veces más puestos de trabajo que la explotación de las energías no renovables (con excepción de la energía nuclear, que crea puestos de trabajo al nivel de las renovables).

Un buen ejemplo de la situación actual se tiene en el consumo anual de energía en la Unión Europea. Este año se prevé que el consumo total va a ser de unos 1500 millones de tep, de los cuales unos 180 millones de tep (12 %) corresponden a las energías renovables: 30 millones de tep de hidroeléctrica, 130 millones de tep de biomasa, 4 millones de tep de solar térmica, 0.30 millones de tep de solar fotovoltaica, 5 millones de tep de geotérmica y 6.5 millones de tep de eólica.

El resto del consumo anual, o sea un 88 % se cubre con combustibles fósiles (la mayor parte) y con una modesta contribución de la energía nuclear (menos del 20 % del total de energía eléctrica).

Breve descripción de las fuentes primarias renovables:

Se pueden retrotraer al sol, exceptuando la energía geotérmica que se debe a la desintegración de núcleos radioactivos en la corteza terrestre⁷.

A profundidades comprendidas entre los 3 y los 5 km circulan corrientes de agua naturales (o artificiales obtenidas mediante inyecciones de agua a presión) rodeadas de rocas calientes. Se puede obtener agua para calefacción o en situaciones favorables vapor para alimentar un grupo turbogenerador destinado a producir potencia eléctrica.

La radiación solar que alcanza el suelo puede utilizarse para producir calor adecuado para calentar agua e incluso producir vapor con el propósito de alimentar la turbina de un grupo turbogenerador en las centrales térmicas solares.

⁶ Aunque se producen residuos contaminantes en los procesos de producción de los equipos, dispositivos y sistemas utilizados en la conversión de energías renovables, así como en los procesos de transporte por vehículos con motores de combustión interna.

⁷ Como estos núcleos van desapareciendo, parecería que la energía geotérmica no debería clasificarse entre las renovables. No obstante los períodos luego de los cuales la población de núcleos se reduce a la mitad son del orden de los billones de años, así que para fines técnicos y teniendo en cuenta la escala de tiempo de las sociedades humanas, la energía geotérmica puede considerarse inagotable.

En las plantas fotovoltaicas la radiación solar incidente sobre celdas de semiconductores de silicio genera directamente diferencias de potencial eléctrico capaces de sustentar corrientes continuas. La eficiencia de este proceso de conversión directa es un poco mayor al 20 %. Los paneles de las plantas fotovoltaicas⁸ no poseen partes móviles y no requieren mucho mantenimiento, y su confiabilidad es elevada. Pero la producción de semiconductores genera residuos de metales pesados tóxicos. Una alternativa más barata, eficiente y ambientalmente más benigna puede ser el uso de semiconductores orgánicos en dispositivos conocidos como celdas de Grätzel, inspirados en un estudio cuidadoso de los mecanismos físicos de la fotosíntesis.

La energía solar que incide sobre la atmósfera terrestre provoca gradientes de temperatura que a su vez inducen las corrientes de aire que denominamos vientos. La energía cinética del viento se transforma en energía mecánica de rotación cuando el viento incide en las palas de un generador eólico. En el eje de éste se encuentra montado un generador de inducción para obtener energía eléctrica. En 1927 el ingeniero alemán Betz demostró que la potencia máxima que se puede extraer del viento es apenas menor que el 60 % de la potencia teóricamente disponible (límite de Betz= $16/27=0.59259$). Los diseños modernos operan con una eficiencia del 40 %, bastante inferior al límite de Betz, siendo las causas principales de disipación de energía la resistencia aerodinámica y los vórtices producidos por la rotación de las palas del aerogenerador.

La radiación solar evapora agua del océano que luego retorna a tierra firme en forma de lluvia, lluvia que forma ríos y retorna al océano. Mediante embalses se pueden generar diferencias de energía potencial gravitatorias que se convierten en energía cinética a medida que las masas de agua caen a través de tuberías que las conducen hacia turbinas acopladas con generadores eléctricos y así producen electricidad. Las centrales hidroeléctricas grandes pueden presentar eficiencias algo mayores al 90 %.

Los gradientes de temperatura a través de columnas de agua de 500 u 800 m en el océano, así como la energía asociada a los cambios de nivel del agua debidos a las mareas (siempre que los cambios de nivel sean de 5 m o más), la energía del movimiento de las olas y las corrientes marinas se pueden convertir en electricidad mediante dispositivos apropiados. Las tormentas, las variaciones estacionales en la altura de las olas y las mareas meteorológicas (debidas a los vientos soplando sobre el mar) por lo general dificultan la conversión de la energía de los océanos en energía eléctrica.

El crecimiento y renovación de la biomasa vegetal requiere de la radiación solar. El crecimiento y renovación de la biomasa vegetal hace a su vez posible el crecimiento y la renovación de la biomasa animal. Para fines energéticos la biomasa se puede obtener en estado sólido, (por combustión: carbón vegetal), en estado líquido (por fermentación de azúcares) o gaseoso (por descomposición anaeróbica de materia orgánica).

El uso de la biomasa va desde cortar árboles para después quemarlos hasta cosechar caña de azúcar para convertir sus azúcares en combustible líquido.

Las eficiencias de los procesos de conversión a partir de la biomasa son bajos (del orden de 1 a 2 %) pero cabe esperar que actividades de I+D bien encaminadas puedan mejorar significativamente esta situación. En principio sería posible cuadruplicar la energía actualmente convertida a partir de la biomasa, a nivel mundial. Pero debe tenerse en cuenta que este incremento conduciría a competir por la tierra arable y fértil, con la producción de alimentos destinados a una población creciente y en una significativa fracción, hambrienta.

⁸ Se instalan en marcos móviles para maximizar la captación de radiación solar.

Esto, junto con la necesidad de estimar la capacidad real del ambiente para procesar y transformar en materiales inofensivos los residuos de los procesos de conversión de energía, muestra la importancia de los estudios de planificación energética a largo plazo, basados en un enfoque lo bastante comprehensivo, con bases científicas sólidas, e involucrando la previsión de posibles escenarios alternativos para el futuro.

El establecimiento de escenarios futuros

El aporte de la Física es fundamental para aclarar y ayudar a plantear bien los problemas económicos, sanitarios, geopolíticos, ambientales y tecnológicos asociados con el uso de la energía en las sociedades humanas. En particular corresponde a la enseñanza, en todos sus niveles, familiarizar a los educandos, según su nivel de madurez intelectual, con los diferentes aspectos del concepto de energía, concepto abstracto y multiforme como pocos. Esta formación, en una sociedad democrática, es esencial a nivel de la enseñanza media, porque contribuye a que los ciudadanos puedan pensar racionalmente y decidir correctamente sobre los problemas relacionados con la energía.

Junto con las demás ciencias y las tecnologías, los aportes de la Física pueden utilizarse para plantear diferentes escenarios futuros y posibles. Estos ejercicios de prospectiva no permiten propiamente efectuar predicciones, sino que están destinados a suministrar herramientas para pensar en forma rigurosa.

En particular es conveniente plantar dos tipos de escenarios, y compararlos entre sí.

En un tipo de escenario se pone énfasis en la disponibilidad de la energía y bienes conexos, ya sea extrapolando el crecimiento histórico sobre la base de una tasa mínima y una tasa máxima de crecimiento anual posible, de dos formas diferentes: sin asumir que las tecnologías de ahorro de energía van a tener un impacto significativo, por un lado, y asumiendo por el otro que los esfuerzos en incrementar la eficiencia energética en los procesos de conversión y uso de la energía pueden hacer una diferencia considerable. En ambos casos la idea subyacente es “más es mejor”.

En el otro tipo de escenario se pone énfasis en la durabilidad, no en la disponibilidad de la energía y los bienes conexos. Ahora la idea subyacente es “suficiente es mejor”. Se pone énfasis en el empleo de las fuentes renovables y en reducir las demandas sobre las fuentes tradicionales, eliminando paulatinamente la quema de derivados del petróleo, gas natural y carbón, y siempre que resulte necesario, utilizando la energía nuclear como bisagra entre la matriz energética actual, no sustentable, y una matriz futura que sí pueda serlo. Para los países centrales implica una política de crecimiento cero per cápita. Si esto es acompañado con políticas de eficiencia energéticas lo bastante radicales como para involucrar modificaciones drásticas en el diseño en ingeniería, permite un margen de crecimiento económico en esos países, mientras que habilita a los países periféricos a acortar significativamente la brecha que los separa de los países centrales.

El uso creciente de energías alternativas, de naturaleza intermitente, a menudo en unidades pequeñas, y conectadas en forma más o menos dispersa en las partes de un sistema eléctrico que tienen como función primaria la distribución de la potencia eléctrica entre los consumidores, plantea numerosos problemas de ingeniería. Esto se debe a que la mayor parte de los sistemas actuales de generación, transmisión, distribución y consumo se diseñaron y se optimizaron para operar con un número relativamente pequeño de unidades generadoras grandes. La Agencia Internacional de la Energía recomienda que cuando la contribución de las fuentes renovables e intermitentes se aproxime al 12 % de la potencia total suministrada, y no se dispone de un sistema de almacenamiento, se debe comenzar a planificar uno. Cuando ese porcentaje alcanza el 20 %, es indispensable contar con uno bien implementado. Así

pues hay un límite a la incorporación de energías renovables intermitentes a la una red central de potencia eléctrica, si esa incorporación se hace en forma directa, sin contar con una forma de almacenamiento. Se ha gestado un cierto consenso a nivel internacional acerca de que en el largo plazo se utilizará el hidrógeno producido por electrólisis del agua como almacén de energía. Teniendo esto en cuenta, el desarrollo de celdas de combustible que puedan transformar la energía química del hidrógeno directamente en electricidad es una actividad complementaria al desarrollo de las fuentes renovables que debe ser tenida en cuenta en los procesos de planificación energética.

La formulación de escenarios se puede llevar a cabo a nivel mundial, a nivel regional y a nivel de país. En la página web de la dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear del Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay, se pueden encontrar algunos de estos ejercicios para nuestro país.

De lo revisado hasta este momento se desprende que tres factores condicionan el empleo de la energía y deben ser tenidos en cuenta en todo proceso de planificación: su concentración, sus posibilidades almacenamiento, y su inevitable degradación durante los procesos de conversión. Veámoslos entonces, en ese orden.

La física de la conversión de energía (I): la concentración en las fuentes primarias.

Para analizar la concentración de la energía conviene determinar qué masa de materia se pone en juego para extraer una energía de 1 kWh.

Las energías más diluidas son la gravitatoria y la mecánica, porque para obtener 1 kWh es necesario emplear masa del orden de las 10 toneladas. Así, en una central hidroeléctrica cuyo rendimiento físico es del 85 %, se obtiene esa cantidad de energía eléctrica a partir de una caída de 40 m de una masa de agua de 10 t. Un generador eólico produce 1 kWh de electricidad extrayendo la energía cinética de 20 000 m³ de aire (27 toneladas en condiciones normales) que se desplaza a 60 km/h. Finalmente, 1 kWh es la energía cinética de un vehículo de 10 t que se mueve a 100 km/h.

Las energías de naturaleza electromagnética ocupan un lugar intermedio. Para ellas el kWh se asocia con masa del orden de 1 kg. La energía química de un carburante se desprende en reacciones que en la medida en que consisten en rupturas y formaciones de enlaces moleculares y otros reordenamientos electrónicos, son interacciones electromagnéticas. Suministra calor a razón de 1 kWh por cada 0.1 kg de combustible, en promedio. Una comida nos aporta 1kWh. Nuestros aparatos electrodomésticos consumen entre W y kW. La potencia de la radiación electromagnética solar a nivel del suelo es del orden del kW/m² perpendicular a los rayos incidentes.

Las energías más concentradas son las de origen nuclear, basadas en la interacción fuerte entre los componentes del núcleo atómico. En este caso se obtiene 1 kWh a partir de una masa de 1 mg o menos. Se precisan 10 mg de uranio conteniendo solamente un 0.7 % del isótopo ²³⁵U que entra en las reacciones en cadena que liberan la energía nuclear de fisión para producir 1 kWh de energía eléctrica en una central nuclear común. El empleo de centrales basadas en reactores nucleares reproductores permite ganar un factor de 100, de modo que ahora se precisan solo 0.1 mg para producir el kWh. En el Sol, 5 µg de hidrógeno son suficientes para producir 1 kWh de energía radiante por medio de reacciones de fusión nuclear. Comparando masa, la fusión

nuclear es más eficaz que la fisión nuclear para la conversión de la energía. Aquí en la Tierra es un objetivo que todavía parece lejano.

Las diferencias en la concentración de la energía tienen consecuencias prácticas importantes. Un reactor nuclear de fisión, no reproductor, de 1000 MW eléctricos, con una eficiencia del 33 %, consume **por año** 27 toneladas de uranio enriquecido al 3.2 %. Una central térmica convencional, de 1000 MW eléctricos, con una eficiencia de 38 %, consume **por hora** 170 toneladas de petróleo o 260 toneladas de carbón. Una central hidroeléctrica de 1000 MW eléctricos precisa **por segundo** la caída a través de 100 m de 1200 toneladas de agua. Para obtener los 1000 MW de una planta fotovoltaica se precisarían, en promedio, 30 km² de paneles solares semiconductores.

La energía eólica está todavía menos adaptada a la producción de grandes cantidades de electricidad: en promedio se necesitan 3000 generadores de 1 MW eléctrico para producir durante un año la misma energía que una central térmica o nuclear de 1000 MW eléctricos, y eso suponiendo que la totalidad de los generadores funcionen a pleno un tercio del año (caso que no necesariamente ocurre) y despreciando las pérdidas debidas al almacenamiento si la potencia producida en los picos (cerca de 3000 MW) no se puede consumir totalmente y se debe almacenar.

Parecería entonces que las formas muy diluidas de energía (que emplean dispositivos tales como generadores eólicos, micro-centrales hidráulicas, y paneles solares), cuando se emplean para convertirlas en energía eléctrica, deberían reservarse para usos especiales tales como vehículos solares, alimentación de regiones tan remotas que sería muy costoso vincular a las redes de transporte y distribución de potencia eléctrica, generación domiciliaria o para pequeños conjuntos habitacionales inclusive en posesión de otras alternativas de suministro, etc. Los países que más se han esforzado por equiparse con generadores eólicos obtienen un porcentaje modesto de la energía eléctrica que consumen por año, generalmente inferior al 20 %. Por este motivo deben recurrir a los combustibles fósiles o a importar energía eléctrica de los países vecinos.

La física de la conversión de energía (II): el almacenamiento de la energía.

Cuando la conversión de energía supera al consumo, así como cuando el consumo supera las posibilidades de conversión, se produce un desbalance. Este desbalance podría ser compensado, al menos parcialmente, si el exceso de energía que se produce en el primer caso se almacenara para emplear la energía acumulada en el segundo caso.

Dos formas de energía se prestan para el almacenamiento en gran escala: la energía potencial de grandes masa de agua bombeada en contra del campo gravitatorio durante las horas de menor consumo en los embalses de las centrales hidroeléctricas y la energía química almacenada en forma de hidrógeno, o en acumuladores electroquímicos.

El hidrógeno puede ser producido a partir del agua por electrólisis o descomposición térmica. Mientras que el petróleo posee una energía química promedio de 12 kWh/kg el hidrógeno posee una energía química de 32 kWh/kg, bastante mayor. La energía química así almacenada en forma de hidrógeno se puede recuperar parcialmente, ya sea como energía mecánica en un motor de combustión interna (presentando pérdidas significativas de energía en forma de calor en la etapa intermedia de combustión del hidrógeno), o ya sea en una celda de combustible, produciendo electricidad en forma directa y mucho más eficiente.

Los acumuladores de plomo almacenan una energía del orden de los 30 Wh/kg mientras que las pilas de litio son capaces de almacenar 150 Wh/kg. Parece difícil mejorar sustancialmente este último valor de la capacidad de almacenamiento en una pila, pese a que 1 kg de átomos de litio pueden almacenar 10 kWh de energía electroquímica, porque los átomos estructurales son necesarios porque crean el potencial electrostático visto por los iones de litio, forman un medio poroso a través de cuyos poros se desplazan los iones de litio y delimitan dos regiones de diferente potencial electroquímico para esos iones, esencial para el funcionamiento de la pila.

Otra forma de almacenamiento, para fines específicos y en pequeña escala, es un volante en rotación. La energía máxima que se puede almacenar por unidad de masa en el volante es inversamente proporcional a la densidad del material y directamente proporcional al esfuerzo máximo de tracción que éste soporta. La constante de proporcionalidad depende de la distribución de la masa. En algunos diseños se aproxima al valor máximo 1. Los conocimientos actuales de ciencia de los materiales permiten lograr valores muy elevados de energía cinética por unidad de masa utilizando capas concéntricas de materiales compuestos de fibras conectadas por una matriz tenaz, unidas por tubos radiales al eje de rotación. Resortes, elastómeros orgánicos y capacitores son otros tantos medios de acumular energía en pequeña escala. En recipientes de presión se puede almacenar energía en forma de gases comprimidos, preferiblemente bajo tierra.

La física de la conversión de energía (III): la disipación y la eficiencia termodinámica.

Aplicando la primera ley de la termodinámica se pueden establecer balances energéticos comparando el estado final con el estado inicial de un sistema.

La segunda ley suministra desigualdades que permiten establecer cotas superiores al rendimiento de los procesos. Por ejemplo, para un motor térmico funcionado en un ciclo de Carnot se establece un límite superior a la eficiencia en función del cociente entre las temperaturas absolutas de la fuente fría y de la fuente caliente. En la práctica esto conduce a eficiencias termodinámicas muy inferiores a las que se pueden alcanzar con celdas de combustible. Puesto que la cuarta parte de la energía que se consume en el mundo se destina al transporte, y vista la eficiencia tan elevada (más del 90 %) de los motores eléctricos actuales, parecería razonable sustituir los ineficientes y contaminantes motores de combustión interna de los vehículos por una combinación eficiente y ambientalmente más amigable de celdas de combustible suministrando electricidad a motores eléctricos de corriente directa.

Pero la termodinámica clásica no suministra indicación alguna sobre el rendimiento real de un proceso, que depende de la disipación de la energía química, eléctrica o mecánica en calor. Más aún, al analizar los procesos de conversión de energía interesa la velocidad con la que esa conversión se produce: la potencia. La termodinámica clásica, debido a que es termo-estática, no nos puede decir nada al respecto. Para dilucidar estos aspectos dinámicos es preciso recurrir a la termodinámica de los procesos irreversibles. En esta última las desigualdades que involucran a la entropía se transforman en igualdades que permiten calcular la potencia disipada en calor en términos de sumas cuyos términos son a su vez productos de flujos J_i y fuerzas X_k termodinámicos. Se pueda representar así:

$$D = \sum_{i=1}^n J_i \cdot X_i \quad [1]$$

La potencia disipada D es siempre positiva, excepto en un estado de equilibrio, para el cual se anula. Es importante notar que **eso no implica que todos los términos $J_i \cdot X_i$ tengan que ser siempre positivos en un sistema fuera del equilibrio**: alcanza con que la suma siempre lo sea.

En principio cada flujo J_i se relaciona no solo con su fuerza conjugada X_i sino también con todas las demás fuerzas termodinámicas mediante expresiones que, si los estados del sistema termodinámico no se alejan demasiado del equilibrio, son lineales e invertibles:

$$J_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} \cdot X_j \quad [2a] \quad X_j = \sum_{k=1}^n R_{jk} \cdot J_k \quad [2b]$$

Los coeficientes fenomenológicos L_{ik} (conductancias generalizadas) verifican ciertas relaciones conocidas como **relaciones de reciprocidad de Onsager**. Para todo $i \neq j$, cuando el sistema está inmerso en un campo magnético de inducción \vec{B} :

$$L_{ij}(\vec{B}) = L_{ji}(-\vec{B}) \quad [3]$$

Además, para todo i se verifica: $L_{ii} > 0$ $R_{ii} > 0$ [4]

Los coeficientes R_{ik} se pueden interpretar como resistencias generalizadas y se obtienen en función de las conductancias L_{ij} resolviendo [2a] para obtener [2b].

Si un proceso de conversión posee una duración τ cabe esperar que los valores promedio de los flujos sean inversamente proporcionales a τ , y como las fuerzas son combinaciones lineales de los flujos con coeficientes que cabe esperar no dependan de la duración de los procesos, las fuerzas mismas deben ser inversamente proporcionales a τ . En consecuencia la potencia disipada debe ser proporcional a $\frac{1}{\tau^2}$ y la energía total disipada $D \cdot \tau$ durante el proceso de conversión debe ser proporcional a $\frac{1}{\tau}$. Así pues, cuanto más rápido sea un proceso de conversión de energía, tanto mayor va a ser la energía disipada en calor y tanto menor va a ser la eficiencia del proceso: celeridad y eficiencia incrementada son requerimientos que, en igualdad de las demás condiciones, se contraponen entre sí y exigen soluciones de compromiso.

Para ver esto más en detalle, consideremos un modelo simple de un **convertidor de energía generalizado**. Supondremos que opera en régimen estacionario. Si $P_e = J_e \cdot X_e$ es la potencia de entrada (no necesariamente una energía primaria), y $P_s = J_s \cdot X_s$ la potencia de salida de la energía convertida, entonces:

$$D = P_e - P_s = J_e \cdot X_e - J_s \cdot X_s = J_e \cdot X_e + J_s \cdot (-X_s) \quad [5]$$

Para los fines del presente análisis, ambas potencias se consideran positivas.

La **eficiencia** del proceso de conversión es $\eta = \frac{P_s}{P_e}$ [6]

Las relaciones [2a] entre flujos y fuerzas se escriben para este caso así:

$$J_e = L_{ee} \cdot X_e + L_{es} \cdot (-X_s) \quad [7a] \quad J_s = L_{se} \cdot X_e + L_{ss} \cdot (-X_s) \quad [7b]$$

Las relaciones [2b] se obtienen de [7a] y [7b]:

$$X_e = \frac{L_{ss}}{\Delta} \cdot J_e - \frac{L_{es}}{\Delta} \cdot J_s \quad [8a] \quad X_s = \frac{L_{se}}{\Delta} \cdot J_e - \frac{L_{ee}}{\Delta} \cdot J_s \quad [8b]$$

Aquí Δ es siempre positivo. Por definición $\Delta = L_{ee} \cdot L_{ss} - L_{es} \cdot L_{se}$ [9]

Se pueden distinguir dos clases de convertidores de energía: los **pares** y los **impares**. Esta distinción refleja el comportamiento de los **coeficientes cruzados** L_{es} y L_{se} en un campo magnético: si son funciones pares, $L_{es} = L_{se}$ y el convertidor es par; si son funciones impares, $L_{es} = -L_{se}$ y el convertidor es impar. Como en este último caso, si el campo magnético es nulo también se anulan los coeficientes cruzados, en ausencia de campo magnético los flujos se desacoplan y desaparece la posibilidad de conversión: los convertidores impares funcionan solamente en presencia de un campo magnético.

En los convertidores pares, la fuerza X_e origina a la fuerza X_s . En este caso conviene expresar X_s y J_e en función de X_e y J_s . A partir de las ecuaciones [7] se obtiene:

$$X_s = \alpha_1 \cdot X_e - R_1 \cdot J_s \quad [10a] \quad J_e = C_1 \cdot X_e + \alpha_1 \cdot J_s \quad [10b]$$

Por definición: $\alpha_1 = \frac{L_{es}}{L_{ss}} = \frac{L_{se}}{L_{ss}} \quad [11a] \quad R_1 = \frac{1}{L_{ss}} \quad [11b] \quad C_1 = \frac{\Delta}{L_{ss}} \quad [11c]$

En [11a] aplicamos la relación de reciprocidad de Onsager para convertidores pares:

$L_{es} = L_{se}$ Esto reduce a tres el número de parámetros que caracterizan al convertidor: una resistencia generalizada R_1 , una conductancia generalizada C_1 y un coeficiente de acoplamiento α_1 .

De [5] y [10] se desprende la siguiente fórmula para la potencia disipada en un convertidor par:

$$D = C_1 \cdot X_e^2 + R_1 \cdot J_s^2 \quad [12]$$

Un ejemplo de convertidor par es una turbina hidráulica. Despreciando la energía cinética de salida del agua, si la altura desde la que cae es H la energía potencial por unidad de masa de agua $X_e = gH$ produce el torque de salida en el eje de la máquina $X_s = \mathcal{T}$. En este caso $J_e = \dot{m}$ es la masa de agua que atraviesa la turbina por unidad de tiempo y $J_s = \omega$ es la velocidad angular de rotación del eje de la turbo-máquina.

Las ecuaciones [10] adoptan la forma siguiente:

$$\mathcal{T} = \alpha_1 \cdot (gH) - R_1 \cdot \omega \quad \dot{m} = C_1 \cdot (gH) + \alpha_1 \cdot \omega$$

La potencia disipada es $D = \dot{m} \cdot (gH) - \mathcal{T} \cdot \omega = C_1 \cdot (gH)^2 + R_1 \cdot \omega^2$

El término de potencia disipada $C_1 \cdot (gH)^2$ representa la energía de la masa de agua que por unidad de tiempo no se convierte en trabajo mecánico porque se fuga a través de los resquicios entre las palas y la carcasa de la máquina. Entonces $C_1 \cdot (gH)$ representa la parte del flujo de masa que se fuga, mientras que $\alpha_1 \cdot \omega$ representa la parte del flujo de masa cuya energía cinética (igual a la energía potencial gH) se convierte en trabajo mecánico. Así pues, como $\alpha_1 \cdot \omega = (2\pi \cdot \alpha_1) \cdot \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)$ y $\frac{\omega}{2\pi}$ es el número de revoluciones del eje por unidad de tiempo, resulta que $2\pi \cdot \alpha_1$ es la masa, desplazada por la máquina en cada revolución de su eje, que se emplea en producir trabajo mecánico. La potencia disipada $R_1 \cdot \omega^2$ se origina en la fricción mecánica en el interior del dispositivo. El término $R_1 \cdot \omega$ se resta del torque $\alpha_1 \cdot (gH)$ que se generaría si no hubiera fricción.

En un convertidor impar conviene expresar ambas fuerzas generalizadas en función de los flujos, utilizando las ecuaciones [8]:

$$X_e = C_2 \cdot J_e + \alpha_2 \cdot J_s \quad [13a] \quad X_s = \alpha_2 \cdot J_e - R_2 \cdot J_s \quad [13b]$$

La potencia disipada es: $D = J_e \cdot X_e - J_s \cdot X_s = C_2 \cdot J_e^2 + R_2 \cdot J_s^2 \quad [14]$

En este caso $\alpha_2 = -\frac{L_{es}}{\Delta} = +\frac{L_{se}}{\Delta}$ debido a que las relaciones recíprocas de Onsager para un convertidor impar son $L_{es} = -L_{se}$.

Un ejemplo de convertidor impar es un generador de corriente continua. En este caso $X_e = \mathcal{T}$ $J_e = \omega$ $X_s = \Delta V$ y $J_s = i$ siendo ahora \mathcal{T} el torque aplicado al eje de la máquina, ω su velocidad angular y ΔV la subida del potencial eléctrico en el sentido de la corriente eléctrica i . Las ecuaciones [13] adoptan la forma:

$$\mathcal{T} = C_2 \cdot \omega + \alpha_2 \cdot i \quad \Delta V = \alpha_2 \cdot \omega - R_2 \cdot i$$

La disipación de potencia en la máquina viene dada por

$$D = \mathcal{T} \cdot \omega - i \cdot \Delta V = C_2 \cdot \omega^2 + R_2 \cdot i^2$$

La potencia disipada se obtiene como suma de un término de fricción mecánica $C_2 \cdot \omega^2$ y un término de pérdida óhmica $R_2 \cdot i^2$. Si los devanados no tuvieran resistencia óhmica R_2 , el voltaje de salida del generador sería $\alpha_2 \cdot \omega$. En realidad resulta disminuido en una caída de voltaje interno $R_2 \cdot i$. El coeficiente α_2 es proporcional al

flujo magnético en la máquina. El término $\alpha_2 \cdot i$ representa la parte del torque aplicado que se emplea en la producción de potencia eléctrica.

Tanto en el modelo de la turbo-máquina como en el modelo del generador de corriente continua, el significado físico de los coeficientes C y R sugiere que son independientes entre sí: en principio se pueden disminuir ambos en forma simultánea con lo cual la disipación de potencia en el convertidor se puede aproximar a cero. Este es el motivo de las eficiencias elevadas (superiores al 90%) que se pueden alcanzar con estos convertidores, denominados **convertidores desacoplados**.

Existen otros convertidores, pares o impares, en los cuales C y R son interdependientes. En este caso las modificaciones tendientes a aumentar C tienen como consecuencia un aumento de R , por lo cual la potencia disipada no se puede aproximar a cero. Se denominan **convertidores acoplados**.

Además de la turbo-máquina, otros ejemplos de convertidores pares desacoplados son el fotovoltaico de los paneles solares, y el electroquímico de las celdas de combustible. El convertidor termo-iónico⁹, el termoeléctrico¹⁰, y el electro-cinético¹¹ son convertidores pares acoplados, con eficiencias que generalmente no pueden superar el 50 %.

Son convertidores impares acoplados el magneto-hidrodinámico¹² y el que funciona en base al efecto Nernst¹³.

Consideremos ahora la eficiencia de los convertidores en el marco de la teoría generalizada. De la ecuación [6] y de las fórmulas [10a] y [10b] se obtienen las eficiencias de los convertidores pares:

$$\eta_{par} = \frac{(\alpha_1 \cdot X_e - R_1 \cdot J_s) \cdot J_s}{(C_1 \cdot X_e + \alpha_1 \cdot J_s) \cdot X_e}$$

En este caso para una fuerza de entrada X_e dada buscamos el valor del flujo de salida J_s para el cual la eficiencia $\eta_{par}(J_s)$ es máxima. Introduciendo el parámetro sin dimensiones $\beta_1 = \frac{\alpha_1^2}{R_1 \cdot C_1}$ se obtiene un flujo óptimo $(J_s)_{opt} = \left[\frac{C_1 \cdot X_e}{\alpha_1} \right] \cdot [\sqrt{1 + \beta_1} - 1]$ y

la eficiencia máxima $(\eta_{par})_{max} = \frac{\sqrt{1 + \beta_1} - 1}{\sqrt{1 + \beta_1} + 1}$

Procediendo en forma análoga para los convertidores impares se obtiene:

$\eta_{impar} = \frac{(\alpha_2 \cdot J_e - R_2 \cdot J_s) \cdot J_s}{(C_2 \cdot J_e + \alpha_2 \cdot J_s) \cdot J_e}$ En este caso para un flujo de entrada J_e dado buscamos el flujo de salida óptimo, que maximiza la eficiencia del convertidor. Introduciendo $\beta_2 = \frac{\alpha_2^2}{R_2 \cdot C_2}$ se obtiene $(J_s)_{opt} = \left[\frac{C_2 \cdot J_e}{\alpha_2} \right] \cdot [\sqrt{1 + \beta_2} - 1]$ y $(\eta_{impar})_{max} = \frac{\sqrt{1 + \beta_2} - 1}{\sqrt{1 + \beta_2} + 1}$

En los convertidores no acoplados en principio se puede aumentar $\beta = \frac{\alpha^2}{R \cdot C}$ sin límite pre-establecido, lo cual a su vez tiene como consecuencia que la eficiencia tienda a uno. En los convertidores acoplados el producto $R \cdot C$ no se puede disminuir más allá de una cota inferior, por lo cual la eficiencia no se puede hacer tender a uno.

⁹ Que usa un gas como fluido de trabajo electrónico producido por efecto termoiónico.

¹⁰ Que emplea la diferencia de potencial eléctrico producida en la unión entre dos materiales diferentes a temperaturas diferentes.

¹¹ Genera una diferencia de potencial eléctrico entre los extremos de un tubo capilar a través del cual se fuerza la circulación de una solución electrolítica.

¹² Induce un campo eléctrico en una corriente de gas caliente ionizado que atraviesa un campo magnético.

¹³ Acoplamiento entre una diferencia de temperatura y una diferencia de potencial eléctrico en presencia de un campo magnético.

Energías alternativas para Uruguay

La mayor parte de la energía convertida en nuestro país, destinada al consumo en transporte, iluminación, acondicionamiento térmico de interiores, y producción industrial, se obtiene de:

- (a) Combustibles fósiles (fundamentalmente derivados del petróleo) que son quemados en centrales termo-eléctricas o en motores de combustión interna.
- (b) Recursos hídricos empleados para la conversión hidroeléctrica.
- (c) La importación de energía eléctrica desde Argentina y Brasil.

Las energías alternativas a las ya mencionadas, tales como la solar, la eólica, la que se puede obtener a partir de la biomasa, la geotérmica, la oceánica y la nuclear, se encuentran todavía escasamente desarrolladas en nuestro país (caso de la solar, la eólica y la biomasa), o bien no se encuentran desarrolladas (caso de la nuclear, la oceánica y la geotérmica). Se ha previsto la posibilidad de que todas ellas, en menor o mayor medida, se puedan integrar a la matriz energética nacional en los próximos 20 años. La manera de hacer esto requiere todavía mucho estudio y discusión, incluyendo la participación de la población, teniendo en cuenta que los gobiernos en las democracias se organizan a partir de suponer que los ciudadanos pueden y deben pensar racionalmente y tomar decisiones en consecuencia, muchas veces desagradables. Para que todo esto funcione bien, **la importancia de la educación es fundamental.**

Limitaciones impuestas por el tamaño de la red eléctrica uruguaya a la instalación de una central de potencia: el ejemplo nuclear

Una regla aproximada relacionada con la buena gestión técnica de un sistema de generación, transmisión, distribución y consumo de potencia eléctrica, establece que ninguna unidad generadora debería superar el 10% del máximo de la potencia generada. En 2007 la potencia media demandada fue de 1014 MW, mientras que la máxima fue de 1654 MW. En ese momento apenas podíamos admitir una unidad de 200 MW (tendría que ser algo menor) si aceptamos la regla mencionada. En realidad las cosas pueden ser bastante diferentes: esa regla resulta ser por lo general conservadora en la mayoría de los casos, pero podemos tomarla por buena con el fin de simplificar las cosas.

Este último dato es importante para un país como el Uruguay, si decide dimensionar su parque generador teniendo en cuenta su red nacional exclusivamente, descartando la posibilidad de pasar de ser un importador a ser un exportador de energía eléctrica, y descartando la posibilidad de integrar la gestión de la red en el marco de una gestión de un sistema regional unificado.

Veamos, a vía de ejemplo, el problema que plantea la integración de una central nuclear a nuestro parque generador. Supongamos que se lograra suficiente consenso, que se pudieran tomar las decisiones con la suficiente rapidez y que se pudieran implementar las medidas necesarias en tiempo y forma como para iniciar un programa nuclear civil, y que por alguna razón se pudiera instalar una central nuclear en un plazo de unos cinco años a partir del día de hoy. En este momento se montan centrales con reactores nucleares de 70 MW eléctricos en barcos. Los barcos navegan hasta su lugar de destino con los operadores de la central, que permanecen viviendo a bordo, para cumplir su tarea, aún en el puerto de destino. Éste es un puerto especialmente acondicionado para albergar la central flotante, recibir, convertir voltaje y transportar la potencia eléctrica hacia la red. Cada tres años el barco regresa a su país de origen para tareas de mantenimiento. Lo único que debe poner el país anfitrión, además de la infraestructura

eléctrica y portuaria es una Autoridad Reguladora Nacional capacitada para actuar como tal¹⁴.

Si el país decidiera involucrarse más en lo que concierne a su programa electro-nuclear, se requerirían unos 15 años para preparar una infraestructura adecuada. En el caso de que la central comenzara a operar luego de 15 años la limitación en la potencia se afloja bastante. Si no se produce un crecimiento muy significativo en el consumo nacional de energía eléctrica, es altamente probable que aún en 2030 éste no sea suficiente como para que la red pueda admitir las grandes unidades que en este momento ofrecen los países centrales. Según el Organismo Internacional de Energía Atómica, una central de hasta 300 MW (e) es pequeña, una central entre 300 y 700 MW (e) es mediana, y las demás son grandes. Pero siempre se podría proceder en escalones sucesivos.

Para el año 2025, con una tasa de crecimiento del 3%, la demanda media se situaría en 1716 y la máxima en 2816 MW. Con una tasa del 4.5% la demanda media pasaría a ser de 2239 MW y la máxima 3653 MW.

Hasta este momento no se ha completado un estudio de factibilidad adecuado para la toma de decisiones. No obstante desde hace mucho tiempo se vienen sucediendo aportes valiosos en los que se señalan los elementos a favor y en contra de la alternativa electro-nuclear. Para enterarse del último trabajo realizado sobre la alternativa electro-nuclear para el Uruguay se sugiere consultar el informe al Presidente de la República mencionado en la bibliografía al final del artículo sobre energía nuclear. Allí se recomienda pasar a una nueva fase de estudio y otras actividades: esto se está llevando a cabo en la actualidad. La coordinación se realiza desde el Ministerio de Industria, Energía y Minería.

Limitaciones impuestas por la intermitencia en la conversión y los puntos de conexión de los generadores a la red de transmisión y distribución: el ejemplo de los pequeños convertidores basados en energías renovables.

En los lugares donde cabe esperar que se conecten los pequeños convertidores basados en energías renovables (con potencias por lo general inferiores a 10 MW eléctricos), por lo general las redes no disponen de muchos sensores de los que se emplean en los sistemas de control y adquisición de datos (SCADA) del tipo utilizado para gestionar el flujo de potencia eléctrica entre los puntos en los que ingresa en forma activa a la red y los puntos en donde es consumida. Esto ocurre porque la mayoría de las mediciones directas se hacen en las partes que operan a alta tensión, y se mide menos en las partes de media y baja tensión. Si se conectan fuentes activas a nivel de las redes de distribución, y si esas fuentes son intermitentes, pueden aparecer varios problemas de estabilidad, control de voltaje, control de frecuencia y en general de calidad de la energía eléctrica disponible. No obstante, los convertidores basados en la biomasa son indistinguibles de los generadores térmicos convencionales, por lo cual no presentan las intermitencias de otras fuentes renovables (como la eólica) y pueden operar con grupos turbo-generadores bastante grandes. Los problemas de estabilidad se relacionan con la pequeña inercia de rotación de algunos de los generadores basados en renovables que no les permite absorber las perturbaciones como lo hacen los grandes grupos turbo-

¹⁴ Por supuesto es preciso desarrollar una infraestructura legal y otras herramientas necesarias como paso previo. En cuatro años se puede conformar, partiendo de físicos e ingenieros graduados y bien formados a nivel de grado, un grupo competente como para integrar la Autoridad Reguladora, contando con algún asesoramiento externo en forma esporádica.

generadores de las centrales térmicas convencionales. Al conectarse o desconectarse un generador en un punto de una red de distribución aparecen problemas locales de control de voltaje y calidad de energía. Para mantener todos los parámetros dentro de los límites exigidos es necesario elevar el nivel de exigencia sobre los dispositivos reguladores por encima de los límites establecidos al diseñarlos, construirlos e instalarlos. Debe tenerse en cuenta que la mayoría de las redes de transmisión y distribución de potencia eléctrica se pensaron para operar a partir de un conjunto relativamente pequeño de grandes unidades de generación, sin tener en cuenta la conexión de un gran número de fuentes activas de energía distribuidas por la red. Por este motivo adoptan las configuraciones radiales a partir de las centrales que permiten economizar en cables, y en equipos de protección y conmutación. Si las centrales nucleares o las granjas de aerogeneradores, o generadores hidráulicos que emplean corrientes oceánicas, se encuentran muy alejados de los puntos de consumo, se necesita reforzar y expandir la red de transmisión. En general, entonces, hay que rediseñar y reconstruir las redes existentes, lo cual es perfectamente posible pero no exento de costos significativos.

La conversión para uso individual

Sin presentar los problemas mencionados previamente, la generación mediante pequeños convertidores para uso individual (familiar o de pequeños grupos) plantea nuevos desafíos al mismo tiempo que abre numerosas oportunidades para la producción local con creación de numerosos puestos de trabajo. El pre-calentamiento de agua y otros líquidos en colectores solares ya se está aplicando, aunque todavía en pequeña escala, lo mismo que el uso de pequeños aerogeneradores, y la implementación de convertidores micro-hidráulicos. Desde hace varios años hay desarrollo local de tecnología de celdas de combustible en base a productos obtenibles de la biomasa. Si se generalizara impulsaría nuevamente la producción local de máquinas eléctricas, inclusive exportables.

Bibliografía:

Además de las publicaciones de la Agencia Internacional de la Energía (www.iea.org) y de la información disponible en la página web de la Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear (www.dnetn.gub.uy) , se sugiere ponerse en contacto con la biblioteca especializada en temas de energía (biblioteca@dinamige.miem.gub.uy) donde se puede hallar un variado material adecuado a todos los niveles de enseñanza y en general suficiente para la mayoría de las necesidades de los profesionales.

El capítulo 27, sobre energías alternativas del “Electrical Engineer’s Reference Book”, editado por M. Laughton y D. Warnes, Newnes, Oxford, 2003, presenta una información balanceada y muy completa, exceptuando lo referente a la energía nuclear, que no la trata.

Sobre los fundamentos físicos de los convertidores directos de energía se sugiere consultar el libro de S. Angrist, “Direct energy conversión”, Allyn and Bacon, Boston, 1976.

La teoría termodinámica de los convertidores de energía generalizados se puede hallar en el apéndice del libro de Angrist y en el artículo de J. Osterle, “A unified treatment of

the thermodynamics of steady-state energy conversion”, Applied Scientific Research, Section A, vol 12, 1964, pp. 425-434.

Los fundamentos de la termodinámica de los procesos irreversibles puede hallarse en el libro de H. Callen, “Termodinámica”, Editorial AC, Madrid, 1981.

Un enfoque amplio, socio-económico, histórico y geopolítico, además de técnico, muy ameno y accesible aunque a veces impreciso y algo vago, se encuentra en el libro de J. Rifkin, “La economía del hidrógeno”, Paidós, Buenos Aires, 2004.

Una obra notable, que enfatiza los aportes y el punto de vista de los físicos sobre los problemas ambientales, incluyendo secciones detalladas sobre energías renovables y energía nuclear es la de E.Boeker y R. van Grondelle, “Environmental Physics”, Wiley, Chichester, 2ª edición, 1999.

Para los que leen francés, es altamente recomendable consultar la obra colectiva, moderna y exhaustiva, y que abarca la totalidad de los problemas más importantes que se plantean en torno a la energía, editada por J.Bobin, E. Huffer y H.Nifenecker, “L'Énergie de Demain: Techniques, Environnement, Économie”, EDP Sciences, Grenoble, 2005.