

LA ENERGÍA DE LOS FLUIDOS

FRANCISCO GALÁN SORALUCE

PRÓLOGO: MARIO ONZAIN
EPÍLOGO: CÉSAR LANZA



FUNDACION
ESTEYCO

Para la difusión y el progreso de la Ingeniería y la Arquitectura



FUNDACION
ESTEYCO



En mayo de 1991 se constituyó la Fundación Esteyco con la finalidad de contribuir al progreso de la ingeniería y de la arquitectura en nuestro país.

La situación de precariedad e incertidumbre en que se ha estado desarrollando la ingeniería española independiente, ha exigido hasta ahora actitudes básicamente de supervivencia.

El esfuerzo de un creciente colectivo de profesionales y de órganos de la Administración ha ido, sin embargo, consolidando un sector cuyos servicios son considerados indispensables en una sociedad moderna y eficiente.

Es tiempo de pensar en el futuro, confiando en que no tardará en hacerse presente.

Fomentemos, para ello, un clima propicio para la creatividad, en el que se exija y se valore el trabajo bien hecho.

Contribuyamos a una sólida formación de los profesionales de la ingeniería, conscientes de que las organizaciones valen lo que valen sus miembros y de que en la ingeniería el valor de las personas se mide por el nivel de sus conocimientos.

Alentemos mejores y más frecuentes colaboraciones interprofesionales, eliminando fronteras innecesarias.

Reivindiquemos un espacio cualitativamente destacado de la ingeniería en la sociedad e impulsemos la evolución de la imperante cultura del hacer hacia la cultura del hacer pensando.

Consideremos las ingenierías como una prolongación de la Universidad, en la que se consolida la formación de los jóvenes titulados, en los años que serán decisivos para su futuro.

Sintámonos involucrados con la Universidad y centros de investigación.

Aseguremos la estabilidad y pervivencia de nuestras organizaciones y establezcamos los medios para que su vitalidad, garantía de futuro, no se encuentre lastrada.

Valoremos nuestra independencia, no como un arma contra nadie, sino fundamentalmente como un atributo intelectual inherente a quienes tienen por oficio pensar, informar y decidir libremente.

Javier Rui-Wamba Martija
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de la Fundación Esteyco

LA ENERGÍA DE LOS FLUIDOS

© 2007 Fundación ESTEYCO

© 2007 2007 Francisco Galán Soraluze, César Lanza Suárez, Mario Onzain Gutiérrez y Javier Rui-Wamba.

Editado por Fundación Esteyco

Impreso en España I.S.B.N.: 978-84-933553-2-1

Depósito Legal: M-52519-2007

1ª Edición. Diciembre 2007

C O N T E N I D O

JAVIER RUI-WAMBA	PRESENTACIÓN	9
MARIO ONZAIN	PRÓLOGO	16
FRANCISCO GALÁN	LA ENERGÍA DE LOS FLUIDOS	
1	EL AGUA Y LA ENERGÍA	33
2	EL VIENTO Y LA ENERGÍA	91
3	EL VAPOR Y LA ENERGÍA	131
CÉSAR LANZA	EL ÚLTIMO SUSPIRO	164

PRESENTACIÓN

No podría existir en otra ubicación. Nuestra Tierra está donde tenía que estar, en el lugar preciso, a ocho minutos-luz del Sol, (la luz hace distancia al tiempo). Por eso hay vida en nuestra Tierra y, por eso, es planeta que, obedeciendo a Newton, gira incansablemente alrededor del astro rey. Sin perderle de vista ni un instante, repartiendo su benéfica influencia entre hemisferios que se alternan para mirarle de frente por el día y darle la espalda por la noche. Alejándose y acercándose sutilmente a su superficie a lo largo del año, provocando así, gradientes de temperaturas que son causa de vientos y aguaceros y explican la diversidad esencial de la vida en una Tierra de tres reinos: el mineral, el vegetal y el animal, del que ha brotado una especie superior –aunque a veces no lo parezca–, la del ser humano.

La energía del Sol, la madre de todas las energías, alimenta de vida nuestro planeta. Por ello, la historia de la Energía es, también, una historia de la Tierra, como es asimismo, capítulo fundamental de la historia de la Humanidad.

Siempre ha estado la Energía entre las preocupaciones relevantes de los seres humanos, o al menos de los más conscientes de entre ellos. Ahora se ha puesto de actualidad y, tal vez, hasta un tanto de moda. La Energía ha saltado a la palestra encendiendo debates energéticos, que, insoslayablemente, tienen por protagonista al futuro de la vida y en los que se abordan, implícitamente cuando menos, cuestiones como las de la supervivencia y el progreso de quienes habitamos el presente, pero sobre todo, de quienes habitarán el porvenir. Bienvenidos sean dichos debates, sobre todo los que discurren por cauces serenos y rigurosos como los que debían tener lugar hace 2.500 años en aquellas palestras griegas, en los que no cabían ni frivolidades ni demagogias.

En esta sociedad imperfecta en la que tenemos el privilegio de vivir (entre otras cosas porque la Tierra es muy grande y variada y nos permite escoger lugar y forma de vida en mucha mayor medida de lo que nos quieren hacer creer aquellos sedentarios viscerales que pretenden que todo siga igual en su entorno para que, ellos, no se tengan que desplazar ni tengan que esforzarse por cambiar) existe un evidente déficit cultural que continuará creciendo en la medida que no se valore el conocimiento ni se estimule la curiosidad, valores esenciales que caracterizan a los seres humanos.

La ciencia y la técnica han determinado la evolución de la sociedad y configuran el mundo que dejaremos como legado a las generaciones que lo habitarán en el futuro. A pesar de ello, se puede constatar que la cultura de la ciencia y de la técnica, ingrediente esencial de la cultura en general, es prácticamente inexistente. Un gran déficit dentro de otro déficit. Porque incluso en virtuales círculos intelectuales –encerrados en sí mismos como su nombre indica–, la ciencia y la técnica tienen, en todo caso, una presencia marginal. Los auto-titulados “intelectuales” renunciaron en su formación universitaria y post-universitaria a comprender un lenguaje, el de la ciencia y el de la técnica, lleno de riqueza, de utilidad y de belleza. Y sin la llave del lenguaje no se puede penetrar en un mundo dispuesto a recibir a todos y, sobre todo, a los que en su periferia sólo se pueden comunicar por señas.

No somos pocos, como contraste, los que teniendo “carné de ciencias” nos aproximamos y nos enriquecemos con el arte, la literatura, el lenguaje, la música, la filosofía... Y dicho contraste exigiría, acaso, plantear si en la formación preuniversitaria, la única en la que se inculca cultura en su sentido más amplio, no deberían reforzarse las enseñanzas de carácter científico y técnico, aún a costa, que el tiempo es limitado, de otras enseñanzas que tienen tantos defensores y bien está, que los tengan. Porque si se acude a la Universidad para especializarse en ramas de conocimiento como la abogacía, o la filosofía, o la sociología, o el periodismo o la historia, sin conocer los rudimentos siquiera de campos esenciales como los de las matemáticas, física, química, difícilmente se podrán adquirir más adelante. Y no es éste, inadecuado lugar para lamentar, por ejemplo, el sinnúmero de vocaciones de abogados que han creado los malos profesores de matemáticas en la enseñanza pre-universitaria. Lamentos discutibles, en fin, sobre cuestiones importantes en cuyo contexto ha nacido este libro que se encuadra en lo que podríamos llamar la “cultura de la energía”, escrito por quien sabe de verdad de aquello que ha escrito. Obsérvese que no me refiero, ¡faltaría más!, a una “nueva cultura de la energía”, porque cuando los sustantivos se adjetivan suele ser para desvirtuar su significado. Recordar, si no, la famosa “democracia orgánica” acuñada en tiempos felizmente pretéritos.

Todo libro suele ser una biografía de su autor y “La Energía de los fluidos” lo es en grado sumo. Francisco Galán Soraluze, navarro de pura cepa, de menguada corpulencia, nariz apuntada, cabeza despoblada de cabellos, y con frecuencia protegida con una boina vasca, sienes y cuello revestidos de plata, recuerda a uno de esos entrañables personajes dibujados por la mejor pluma de Baroja.

Juntos estudiamos en la única Escuela de Caminos de la época: la de Madrid. Él, un excelente alumno, se sentía atraído, además, por la Física en cuya Facultad, finalmente, no se llegó a matricular. Coincidimos también dos veranos, en el campamento de milicias de Montelarreina, a orillas del Duero y junto a Toro, que todavía no era ciudad de vinos prestigiosos. Dormíamos, doce en total, en una tienda que compartíamos con divertidísimos asturianos que estudiaban, muy esporádicamente, técnicas mineras. En aquel campamento, nos ejercitábamos desfilando por una explanada interminablemente, al son de músicas nazis (“Soy un hombre al que la suerte hizo nacer zapador”) y de otras, más festivas, como aquella que decía

*“El campamento es un jardín,
los alféreces las rosas
y nosotros mariposas
que vamos tras de ellas
en este campamento
de todos los cojones
el cura es un borracho...”*

Y continuaba la canción, que nos marcaba el ritmo de la marcha en la que nos acompañaba descansando en el hombro izquierdo, el mosquetón (que junto al palo de la enorme bandera preconstitucional que presidía el campamento, era lo único enhiesto que se podía apreciar, pues, a lo que parece, las dosis de bromuro que constituía uno de los ingredientes del menú cuartelero evitaba toda competencia con aquellos símbolos viriles):

*“Ahora que somos pequeñitos
y de pueril inteligencia
no podemos darnos cuenta
del bien que se nos hace
en este campamento
de todos los cojones
el cura es un borracho...”*

Y así solíamos llegar al final de la explanada, donde dábamos la vuelta sin deshacer la formación, ejercitándonos, para poder culminar el campamento veraniego, con un festivo desfile dominguero delante de autoridades, familiares y amigos desocupados, en el que a modo de postmodernas “majorettes” lucíamos nuestras mejores galas, fusiles,

botas y cinchos limpios y relucientes. Probablemente Francisco, desde las últimas filas de una compañía, jerarquizada por la altura de sus componentes, vería, adelantados unos pasos, a los “gastadores” que portaban la bandera de la compañía y que habían sido seleccionados por su apariencia y sus aptitudes castrenses. Francisco era la antítesis del “gastador”. Su desapego por las artes marciales, era ya, por entonces, rasgo distintivo de su carácter. Como lo era, también, y lo es ahora también, su finísimo sentido del humor, su “socarronería” que era en él manifestación de su inteligencia y de su bondad. Francisco era, y es, un hombre, “*en el buen sentido de la palabra bueno*”, que nos hizo disfrutar, muchas veces, con ocurrencias inesperadas llenas de ingenio.

Francisco, tras breve experiencia profesional en Agromán, se trasladó a Pamplona para trabajar en el Servicio de Aguas de la ciudad. Debía tener por entonces 24 años. Gracias a él, Pamplona cuenta con un Servicio ejemplar que estuvo avanzado a su tiempo.

También intervino en el urbanismo de la Comarca, consciente de que las ordenaciones territoriales –coherentes con redes de infraestructuras que han de preceder cualquier honesto desarrollo urbanístico– deben estar concebidas en un marco mucho más amplio que el estrictamente municipal.

Sus niveles de exigencia (pretendía ¡nada menos! que las obras se construyeran tal como habían sido proyectadas por él, con calidades equiparables a las que eran habituales, por ejemplo, en Suiza) le hicieron incómodo. Y se le arrinconó un tiempo para que la empresa que tenía contratada una importante depuradora pudiese campar a sus anchas y recuperar la baja desmesurada que había ofertado para quedarse con la obra. Francisco es el paradigma de la austeridad gastronómica. Es el único defecto que yo le conozco. Pero, a pesar de su ignorancia en estas cuestiones esenciales, no era ni es fácil darle gato por liebre.

Su desocupación forzosa tuvo unas consecuencias inesperadas. Por entonces, estaba planteada la polémica sobre el legado del gran Jorge Oteiza, que, había decidido donar su obra a la Diputación de Navarra, a condición de que se reuniera en un edificio en condiciones. La Diputación encomendó tal misión, a nuestro poco ocupado Francisco. No encontró en Pamplona uno adecuado para rehabilitarlo y convertirlo en el Museo de Oteiza. Los solares en los que hubiera podido construirse un Museo de nueva planta escaseaban y tenían, además, precios prohibitivos.

Francisco vive en el pequeño municipio de Alzuza, de 23 vecinos, que se encuentran a un paso de Pamplona. Y surgió la posibilidad –sugerida por Jorge

Oteiza quien para entonces ya había conocido e iniciado una amistad con Francisco que no dejaría de crecer con el tiempo— de construir el Museo en Alzuza aprovechando un edificio difícil de adquirir, porque la propiedad era compartida por varios herederos con intereses o deseos contrapuestos. Francisco —que recuerda a Oteiza como “un genio que vivía como si no existiese Hacienda y, lo que es mucho más complicado, como si no existiese Administración”— encontró una solución que exigía modificar el plan de ordenación de Alzuza para declarar el edificio bien de interés público haciendo posible su expropiación. Para facilitar la que podría ser compleja tramitación, decidió presentarse a alcalde del pueblo en las elecciones municipales que iba a tener lugar por aquellas fechas. Informó a los convecinos de sus intenciones y de sus motivos. No hubo, claro está, otros candidatos. Francisco fue elegido alcalde del pueblo, modificó los planos urbanísticos, declaró el edificio en cuestión “bien de interés general” y promovió y logró su expropiación. Allí está hoy el precioso Museo de Oteiza, proyectado por Javier Sáenz de Oiza, que también acogía el taller de trabajo y la vivienda del artista y su mujer, Itziar.

Concluidos los 4 años de legislatura y con los deberes hechos, Francisco quiso dejar la Alcaldía y renunció a presentarse a las elecciones. Pero nadie en el pueblo, quería ocupar el lugar de alcalde tan excelente. Eran tiempos de milis obligatorias. De manera que para solventar el problema que tenía planteado, Francisco se reunió con dos jóvenes del pueblo que iban a ser llamados a filas y les explicó que si se presentaban y ganaban las elecciones para Alcalde y Teniente de Alcalde, como cargos electos, se librarían de la mili. Como así ocurrió. Francisco volvió a sus trabajos profesionales. El museo se construyó. La privilegiada relación con Jorge Oteiza se mantuvo, hasta el punto que cuando falleció Itziar Carreño, su mujer, Francisco fue el primero en saberlo porque Oteiza le telefoneó para solicitar su apoyo.

Quien visite el museo de Oteiza, si es posible de la mano de su director Pedro Manterola, (yo he tenido el privilegio de hacerlo) que no deje de asomarse a la vecina iglesia, donde están enterrados en un rincón del huerto Itziar y Jorge Oteiza, que sobrevivió pocos años a su ausencia. Dos sencillos promontorios de tierra ocultan los restos de aquella pareja tan unida. Las dos tradicionales cruces de madera, que hubieron coronado tumbas convencionales se han unido con un dintel y se han transformado en un delicado puente que une los restos del genio y de una mujer, sin duda excepcional, que hizo feliz y posible su existencia.

Después de tan singular y tan significativa experiencia, Francisco volvió a lo suyo: construir infraestructuras que mejorarían la cantidad y calidad de vida de las generaciones de hoy, pero sobre todo, de generaciones que aún están por nacer. Y se encontró, ¡cómo no! con quienes desde sus cavernas intelectuales, se oponen a toda iniciativa de futuro y lo hacen, desde la impunidad, tratando de amedrentar, y en algunos casos eliminar, a quienes, desde la función pública hayan asumido la responsabilidad de llevar a cabo obras que son de interés general.

Francisco ha colaborado en obras esenciales para Navarra como embalses, canales, redes de saneamiento y depuración y muchas otras, y ha tenido que pagar por ello un precio que a muchos, menos tenaces que él, les hubiese llevado a abandonar. Él no lo hizo. Y sacó adelante, por ejemplo, con mínimo apoyo institucional, el detestado por algunos trogloditas, vertedero controlado de Góngora, hoy considerado un equipamiento ejemplar.

Hace unos meses, con motivo de que, tardíamente, el Colegio Nacional de Ingenieros de Caminos le distinguiese en Madrid con la Medalla al mérito profesional, le hicieron en el Diario de Navarra una extensa entrevista que no tiene desperdicio y de la que me decido a transcribir solamente una pregunta y su respuesta:

- Por ser el Ingeniero del vertedero de Góngora aguantó presiones, piquetes, le arrojaron basura en casa... ¿Cómo se administra esa situación?

- Esas, concretamente, eran folklore. Pero en cuanto al vertedero hubo un tema especialmente grave. Estaba trabajando en las obras cuando no había móviles y llamó una mujer a mi esposa diciendo que era la jefa de la UVI del hospital y que fuese, que yo me estaba muriendo, que había habido un accidente. Insistió y le dije que estaba muerto. Así que mi mujer estuvo dos o tres horas de viuda. Los vecinos consiguieron llamarme a través de los guardias de seguridad que teníamos allí y me dijeron: vaya a su casa que su mujer necesita verle. Fui a casa sin darle importancia y me encontré con mi mujer viuda. Realmente fue una indignidad. Pero poca gente tiene la ocasión de ver cómo se comporta su mujer cuando se queda viuda. Y yo quedé muy satisfecho de ella y emocionado de la actuación de los vecinos.

En los últimos años, este personaje excepcional, conocedor de los secretos de la energía hidroeléctrica –la energía ideal–, que ha sido y es decisiva en el progreso de nuestro país, se ha interesado por las energías alternativas. Y, muy próximo a Esteban Morrás, navarro esencial, ha contribuido al extraordinario impulso que recibió la energía eólica en Navarra, y a la que ha tenido con posterioridad en otros lugares. Ahora se ocupa también de los bio-combustibles y se mueve por un entorno que apuesta por la generación de energías alternativas y eficientes.

Nadie mejor que él para escribir un libro como éste. De hecho decidimos editarlo porque le teníamos cerca, y sospechábamos que estaba razonablemente bien dispuesto a escribirlo. Como así ha sido. Algunos de sus amigos, de vez en cuando, le hemos escuchado hablar con conocimiento, serenidad y rigor de cuestiones relacionadas con muy diversas formas de energía, con la depuración y el tratamiento de aguas, con redes de abastecimiento y saneamiento, de canales de regadío, de aprovechamientos hidráulicos, de tantas y tantas cosas del mayor interés. Ahora, a través del libro que ha escrito, dialoga con los lectores y tutela el recorrido que propone por fluidos cauces por los que circula la vida.

Otros dos ingenieros de caminos heterodoxos, Mario Onzain escritor de talento y César Lanza rebelde con causa al que le gusta pasar desapercibido, sin conseguirlo, prologan y clausuran, cada uno a su modo, un libro amigo que, creo yo, merece la pena leer y conservar para ser releído.

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA

PRÓLOGO

PRÓLOGO DEL PRÓLOGO

La Fundación Esteyco convoca, el 22 de abril, una reunión presidida por Javier Rui-Wamba en la que participan además de los patronos otros destacados profesionales, muy mayoritariamente ingenieros de caminos. La intención de esta especie de sanedrín, es aplicarse a si mismo el primer principio de la termodinámica. O sea, transformar la difusa energía del grupo en un libro sobre la energía. En toda reunión de sanedrín hay un reo potencial y en este caso se trata de Paco Galán al que se acusa de saber del tema, más en concreto de la energía generada utilizando los fluidos, e incluso de ser un gran experto, que lo es, en energía cólica. El acusado asume estoicamente la inutilidad de su defensa y aún sabiendo que no es culpable acepta el papel de redentor. El título del libro podría ser “Los hitos de la energía”, dice sin inmutarse provocando un silencio reflexivo. Una vez asimilada por el grupo la enormidad de su propuesta, el que más y el que menos se brinda a ayudar, a conseguir información, a aportar su granito de arena. Es Paco Rodríguez, consciente de lo que se le viene encima a su tocayo, quien propone aliviar la carga delimitando el contenido, puesto que a poco que se profundice en la materia, la tarea a desarrollar puede ser abrumadora, a no ser que se desarrolle en varias etapas. A mí el título me parece de lo más sugerente, y en mi inevitable diletancia, tan próximo a la ingeniería como a la poesía. Por tanto defendiendo con entusiasmo la propuesta de Galán, por la curiosidad que me produce la idea y con la despreocupación de que será él quien la va a desarrollar.

Sigue el debate sobre la cuestión, imponiéndose, como no podía ser de otra forma, la mentalidad ingenieril. En el estado actual de la tecnología y la ciencia, para hacer algo que no resulte demasiado superficial, el contenido parece excesivo. El consenso se extiende y finalmente se acuerda que serán las energías producidas mediante los fluidos, el tema a desarrollar en el libro. Javier Rui-Wamba propone que yo me encargue del Prólogo y Cesar Lanza del Epílogo, tarea que ambos aceptamos.

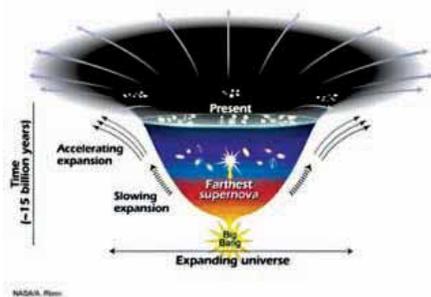
Posteriormente seguimos precisando conceptos y fechas, y en el curso de la charla, de todos contra todos, se desliza un comentario del Rui-Wamba, algo así como: “Cuando uno escribe sobre algo que conoce bien el resultado es bueno”. Esta frase, soltada al vuelo en el tira y afloja de la conversación, me produce inquietud, la cual se intensifica unos días después, cuando recibo un mail en el que se me propone que el prólogo lleve por título “Los hitos de la energía”. Yo no debo realizar esta tarea, me digo, puesto que no sé del tema. Nada menos que los hitos de la energía. Pero además todo es energía, creo yo. ¿Cómo voy a escribir sobre esto? La confusión se apodera de mí. No debía haberme embarcado en este asunto pero soy un tío responsable y si he aceptado debo hacerlo. Pero si escribo sobre algo que desconozco soy un irresponsable. No sé, no sé. Por otra parte caigo en la cuenta de que yo siempre he escrito de lo que no sé. Esta idea me tranquiliza un poco. Lo haré, lo voy a hacer, ahí va.

PRÓLOGO PROPIAMENTE DICHO.

LOS HITOS DE LA ENERGÍA

EL COMIENZO DE LA ENERGÍA

El comienzo de la Energía



En el principio era Dios, o una mota de luz inconmensurablemente caliente, o un punto de masa infinita, o una mente pletórica de amor, pero en todo caso en el principio era la energía, porque antes de que ésta se manifestase con el “Haya luz” del Génesis, con el Big-Bang, o con el Orgasmo primigenio, no existían ni el tiempo ni el espacio. Entonces el gran hito de la energía, el comienzo de todo, tuvo lugar hace 6.000 años, según la Biblia (5.800 precisa la Tora) o hace 15 mil millones de años según opinión mayoritaria de la comunidad científica. Como los 6.000 años y los seis días del Génesis admite múltiples interpretaciones, vamos a tomar como referencia primigenia, como origen de todo el Big-Bang cuya duración al parecer fue de tan sólo 10^{-33} segundos.

Para establecer los posteriores hitos de la energía vamos a echar mano de la primera ley de la Termodinámica (que utilizada alegremente sirve para casi todo, como veremos): La energía ni se crea ni se destruye solamente se transforma. Por la cantidad de energía transformada, estos hitos, a partir del Big-Bang, serían los grandes cataclismos del universo que han dado lugar a las galaxias, a los agujeros negros, a miles de sistemas solares y tal vez a mundos mucho más desarrollados que el nuestro, pero que aún no han podido o no han querido darse a conocer. Pero como los seres humanos tenemos la inveterada costumbre de mirarnos al ombligo y hacer de él el centro del universo, entre los muchos caminos por lo que esa energía primigenia se ha ido transformando, vamos a rastrear aquel cuya meta se alcanza precisamente en este momento y que, como no, somos nosotros mismos o más precisamente yo, o tú, si estás leyendo.

Así pues viajemos en el tiempo desde nuestro ombligo hasta el Big-Bang y regresemos por la vía que podríamos llamar antropocéntrica.

El siguiente gran hito de la energía que encontramos después de comenzar el retorno hacia nosotros mismo, es la configuración del sistema solar con el sol como principalísima fuente de energía más o menos en su centro, y que tuvo lugar hace aproximadamente 5.000 millones de años. Parece ser que aún le queda cuerda para otros tantos, brillando con la misma intensidad, pero cuando alcance los 11.000 millones habrá agotado todo el hidrógeno que está utilizando como combustible, pasando a ser una “gigante roja” que engullirá todos los planetas hasta Marte incorporándolos en su masa.

La aparición de la tierra bien diferenciada dentro del sistema solar data de hace 4.650 millones de años; y la roca más antigua que se conoce tiene unos 3.750 millones de años.

LA VIDA. UNA CLASE MUY ESPECIAL DE ENERGÍA

En el agua que cubre una gran parte de la superficie de la tierra, surge, hace más o menos 3.800 millones de años, la primera bacteria, es decir la vida. Antes de que existiera sobre la tierra ninguna planta, las cianobacterias, a partir de la luz solar transformaban ya el agua y el dióxido de carbono en moléculas orgánicas, liberando oxígeno en el proceso, es decir, se produjo la fotosíntesis llenando de oxígeno una primitiva atmósfera que permitió la aparición de formas más complejas de vida. La evolución de la fotosíntesis hizo posible la aparición de las primeras plantas sobre la Tierra, hace unos 450 millones de años. No obstante, se considera que al final del Precámbrico, hace unos 600 millones de años, tiene lugar en el agua la aparición de otros seres vivos más complejos que las plantas, con una organización celular eucarionte (con núcleo, citoplasma y membrana), nutrición heterótrofa por ingestión, metabolismo aerobio (consumen oxígeno) y reproducción por partenogénesis, al principio, y sexual después, con gametos y cigotos.

Hace 500 millones de años, la vida bulle en el agua y aparecen los primeros peces. Al parecer todos los organismos, cuando la capacidad de su medio ambiente se agota, tienden a reproducirse fuera de éste, (la energía de la vida no respeta fronteras); así es que de alguna manera la necesidad propició el salto de los primeros peces emigrantes a tierra dando lugar a la aparición de los anfibios hace unos 400 millones de años, evolucionando, algunos, y dando lugar a unos animales vegetarianos y que ponen sus huevos en la tierra llamados reptiles que ocupan la superficie no inundada. Estos primeros invasores de un mundo atestado de plantas, crecen en número y tamaño. En el Parque Jurásico podemos contemplar los monstruos de mayor tamaño jamás habidos, que acaban muriendo de hambre hace unos 65 millones de años.

Pero antes de su desaparición, un “dino” de tipo pequeño, sumamente activo, carnívoro y saltarín, había evolucionado dando lugar al mamífero placentario que se adapta perfectamente a la nueva situación.

La energía sigue transformándose por muy diversos caminos y hace unos dos millones de años un mamífero de cuatro patas, comienza a intentar ver más allá de sus narices, consiguiendo mantenerse erguido sólo sobre sus patas traseras (un “piernas”), dando lugar al Homo Erectus.

LA APARICIÓN DE LA ENERGÍA MENTAL

El siguiente hito de la energía, el más trascendental para nosotros y quizá para el resto del universo conocido, después del Big-Bang, se produjo anteaayer (hace 160 mil años). Se trata de la aparición del denominado “Homo Sapiens”, cuyos restos, los cráneos fosilizados de dos adultos y un niño, fueron encontrados el 16 de agosto de 1997 en la depresión de Afar en Etiopía, junto con múltiples herramientas de piedra, lo que demuestra que entre los primeros “*sabibondos*” había algún ingeniero.



Homo sapiens

A partir de la aparición del Homo Sapiens, en el proceso imparabile de transformación de la energía, las descomunales explosiones que se producen en las galaxias vecinas, o los cataclismos que proliferan por otras zonas del universo en los que la cantidad de energía transformada resulta inconmensurable, pierden importancia.

Los citados cráneos albergaron en su día y protegieron una masa absolutamente vulnerable y complejísima, el cerebro, que transformaba la energía bioquímica procedente del metabolismo celular y desencadenaba reacciones neuronales que permitieron entre otras cosas, pensar, imaginar, recordar... Así pues pasados 15.000 millones de años desde el Big Bang, una parte de lo que podríamos llamar energía bruta se ha transformado en energía mental.

Dada la trascendencia de esta peculiar clase de energía, al menos para nosotros (quizá también para el resto del universo ya que de momento estamos en condiciones de destruir varios mundos, y esto no ha hecho más que empezar), vamos a seguir el rastro de esta energía, pequeña en kilowatios pero que, como veremos, capaz de utilizarlos en cantidades inmensas.

La energía mental se manifiesta principalmente mediante fenómenos como la religión, el arte y la ciencia, y los hitos de la energía mental serían más o menos los correspondientes a estos fenómenos.

Tal vez, hasta ahora, sea la religión la forma de energía mental que mayor influencia ha tenido en la humanidad, la que ha movilizadado a más seres humanos, en definitiva la que ha canalizado, transformado y expandido, más cantidad de energía mental.

El fenómeno religioso

Algunos mensajes religiosos han sido en el pasado auténticas explosiones ideológicas cuya honda expansiva se ha propagado en el espacio y en el tiempo hasta nuestros días. En la actualidad algunas religiones (cristianismo, islamismo, budismo, etc.) siguen mostrando un enorme potencial; por tanto, Reveladas o “creadas” por la mente humana, la fundación de las grandes religiones son hitos de la energía mental. Curiosamente en la raíz de muchas de ellas aparece el concepto de energía de una u otra forma. Veamos algunos de esos hitos.

Unos 3.000 años a.C. Krishana, que como Jesucristo nació de una madre virgen y su alumbramiento también fue anunciado por la aparición de una nueva estrella, funda el hinduismo. Para él Dios es la *Fuerza Universal*, el poder matriz que controla todo el universo, y el amor divino es la luz fundamental que da vida eterna a las almas.

Unos 1.500 años a.C. con la aparición de la Biblia se produce otro hito trascendente de la energía mental. En el Génesis Jehová ordena “Haya Luz”. De alguna manera transforma la energía que sólo podía ser él mismo en luz y después continúa con la Creación. Las estrellas, el sol, la tierra, el agua, las plantas, etc., hasta llegar al hombre; es decir de forma muy similar a lo que aquí hemos señalado. Como sabemos la Biblia es origen y fundamento del Cristianismo y el Islam.

Unos 1.000 años a.C., nace Zoroastro en Persia, también de una madre virgen, y, tras siete años de habitar solo en una cueva, recibe la iluminación convirtiéndose en el mensajero de la *Energía Inteligente*. A partir de los 30 años regresa a su ciudad y para predicar la revelación recibida. A los 77 años fue asesinado mientras oraba frente al fuego (símbolo de la divinidad de la *Energía Inteligente*). Como se sabe la influencia de esta religión fue importante en Grecia y Roma. Pitágoras, Sócrates y Platón estudiaron dicho mensaje religioso.

Unos 560 años a.C. la hermosa Maya Elebi vio descender entre nubes de incienso un elefante blanco sosteniendo en su trompa una flor de loto, la flor tocó suavemente su costado derecho. Su esposo fue advertido de que su mujer había concebido el Divino Espíritu y que el fruto bendito de su vientre estaba destinado a ser luz y guía de la India y de todo el Oriente. Cuando Maya Elebi había cumplido diez meses de embarazo surgió la criatura de su costado. Su esposo anunció a su pueblo que su mujer había alumbrado un hijo de la *Energía Cósmica*. A los 35 años sentado bajo un árbol, cerca de un río recibió la iluminación. Durante 45 años recorrió el norte de la India predicando y ganando adeptos.

Sin duda, la fundación de estas religiones son hitos de la energía mental, entre otras razones porque en la actualidad podemos considerar que sus ideas básicas son seguidas por más de 4.000 millones de seres humanos. Y por otra parte, aún cuando en ellas se presupone una causa primigenia (Fuerza Universal, Dios, *Energía Cósmica*, etc.) anterior al Big-Bang y en todo caso causante del mismo, que es quien revela a los hombres a través de profetas la “verdadera religión”, no deja de sorprender la relación de ese Ser con la energía tal y como la entiende la ciencia.

El principio de conservación de la energía tiene bastante que ver con el concepto de un Dios Eterno y que por tanto ni se crea ni se destruye y sufre tantas transformaciones como religiones “verdaderas” hay, siendo el Cristianismo la que llega más lejos al transformarse Dios en hombre, en la persona de Jesucristo.

Alguien dijo que son los poetas los que mueven a los pueblos, repasando la historia más bien parece que, hasta hora, lo han sido las religiones.

La senda del arte

La manifestación de la energía mental a través del arte, su trascendencia para la humanidad es más difícil de cuantificar. No se puede hablar de millones de creyentes, ni tampoco de los beneficios materiales que nos han reportado, como sucede con la ciencia y la tecnología. Su influencia en los cambios sociales e incluso en la conciencia personal es menos directa, más sutil. Por otra parte la aportación de esta clase de energía mental, se puede considerar, simplificando mucho, individual. El genio crea en soledad (otra cosa es la succión y asimilación cultural que lo hace posible). Así es que puesto que no vemos forma de “medir” la repercusión del arte en la sociedad, renunciaremos a marcar hitos “energéticos”. Se podría quizá marcar hitos cualitativos que serían las grandes obras de arte reconocidas por todos.

Cabe otra posibilidad; si como afirma Borges, la religión, más concretamente la teología, es una parte de la literatura, más concretamente de la novelística, podríamos integrar en el fenómeno artístico el religioso y tomar como hitos de la energía mental, vía artística, los citados anteriormente.

En todo caso es indiscutible la relación entre religión y arte, los grandes libros que están en el origen de algunas de las religiones más importantes: Los Vedas, La Biblia, El Tao Te Ching, o el Coran son extraordinarias obras literarias. Por otra parte si las cumbres del sentimiento religioso son los místicos, su obra inspirada por Dios o no, no deja de ser gran literatura.

El árbol de la Ciencia

Ahora vamos a perseguir la transformación de la energía mental por el camino de la ciencia, para lo cual debemos regresar de nuevo al hito del Homo Sapiens (160.000 años atrás) o de forma más imaginativa instalarnos en el Jardín del Edén. “Y como viese la mujer que el árbol era bueno para comer, hermoso a la vista y deseable para alcanzar la sabiduría, tomó su fruto y comió...” dice la Biblia. (Tal vez el Homo Sapiens era una mujer y además negra)

Tengo que reconocer que mi argumentación para “demostrar” la afirmación de partida: Todo es energía, resulta muy peculiar. He jugado con las palabras, manipulado conceptos, discriminado hechos etc. No estoy muy seguro de que este método no haya sido utilizado por algunas “autoridades” en ciencias como la política, la historia, la filosofía, la teología o la sociología, pero nunca por las autoridades en ciencias en las que la verificación empírica resulta determinante. Por esta razón prefiero considerar la ciencia como un gran árbol “hermoso a la vista y deseable para alcanzar la sabiduría”, pero en el que unas ramas son más robustas y fiables que otras, y entre estas últimas está la que podríamos llamar tecnológico científica. Al utilizar esta rama y ser más rigurosos, por coherencia con ella, en vez de hablar de los Hitos de la Energía debemos hablar de los:

HITOS DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA

Hemos visto, hasta ahora, como la energía bruta del Big Bang (con o sin soplo divino) dio lugar a la energía mental, y ahora, vamos a ver como ésta, por medio de la tecnología y la ciencia, nos permite transformar la energía bruta en nuestro provecho, estableciéndose además lo que podríamos denominar un sistema interactivo, de manera que ese aprovechamiento, al liberarnos del trabajo mecánico, nos permite dedicar más tiempo a desarrollar energía mental (pensar, imaginar, crear...), es decir progresar.

Aunque, como he reconocido, mi afirmación de que todo es energía, es muy discutible, no parece serlo la fórmula de Einstein $E = m c^2$, de la que se deduce que toda la materia es energía. Pues bien aún cuando “toda” sea energía, no toda la energía es aprovechable. Una forma de seleccionar la energía aprovechable, es hablar de las Fuentes de la Energía; y una forma de explicar ese aprovechamiento es hablar de consumo. Ahora bien, teniendo en cuenta el principio de conservación de la energía, sólo hay transformación no consumo, y por tanto, las facturas de la luz y del gas serían algo así como un impuesto revolucionario. Pero ésta es ya otra historia.

Las fuentes de la energía

Las principales fuentes de la energía son las siguientes:

- Los combustibles
- La energía hidráulica
- La energía eólica
- La energía del mar
- La energía solar
- La energía nuclear

Aún cuando algunas de estas fuentes de energía han sido utilizadas por el hombre desde el principio, de una forma que podríamos denominar pasiva o natural (el calor y la luz del sol, la corriente de los ríos etc.) el gran salto en dicha utilización tendría lugar con la aparición de algún artificio.

Tal vez el hacer chocar dos piedras para producir una chispa y quemar una porción de yesca podría ser el comienzo de la tecnología y esto ocurrió, al parecer, hace tan sólo 10.000 años (anteriormente el fuego se conservaba). Así es que vamos a empezar por la yesca, es decir por los combustibles, para rastrear los hitos del aprovechamiento energético ya que, además, esta fuente de energía produce más del 65% de la consumida.

Por tanto el orgulloso hombre moderno obtiene la mayor parte de la energía de forma similar (en lo básico) a como lo hacía el del paleolítico, es decir quemando. El reconocimiento de lo primitivos que aún somos en determinadas cosas debería “bajarnos los humos” (en sentido figurado y literal), lo que tendría la virtud de aumentar nuestra humildad y de disminuir la contaminación atmosférica.

Una vez hecha nuestra contribución a la mejora del medio ambiente, reconozcamos que la máquina de vapor es un hito fundamental en el aprovechamiento de la energía. En su versión fija es el precedente de las centrales térmicas y, hasta cierto punto, de las nucleares, cuyo proceso básico utiliza un circuito de vapor. En su versión móvil, auto-transportada, hace posible el ferrocarril y los buques de vapor.

El siguiente hito, fundamental para lo que podríamos llamar *Energía del Transporte*, fue el motor de combustión interna, un ingenio mucho menos voluminoso y pesado que el motor de vapor y que permite el desarrollo de la “carroza sin caballos”, es decir, el automóvil. También el motor de explosión hace posible el empeño de los hombres pájaro por volar, a partir del artificio que el ingeniero aventurero Clement Ader llamó avión.

Para el transporte aéreo sería determinante otro tipo de motor, el turbo reactor, cuyo desarrollo permitió la construcción de cohetes y misiles.

Transporte de la energía. El rayo que no cesa

Como hemos visto, la generación de la Energía del Transporte, se produce a partir del combustible que a su vez es transportado. De alguna manera los oleoductos, gasoductos, y el propio butanero, con sus bombonas, transportan energía pero en su estado elemental de materia prima, sin embargo, el verdadero hito del aprovechamiento energético, se produce con el descubrimiento o invento o hallazgo, de la electricidad, en cuya gestación vamos a detenernos.

Pocos espectáculos tan imponentes como una tormenta, sin duda, la manifestación más natural de la electricidad. El rayo (algo que sucede en el cielo, que deslumbra, que emite un ruido sobrecogedor, que mata, incendia etc.), tuvo que ser percibido como la manifestación más explícita de la furia divina inspirando un gran temor. Ahora, “el rayo que no cesa”, es la forma de energía más útil y más extendida que se conoce, y cada vez, más imprescindible: luz, industria y transporte, dependen en gran parte de este tipo de energía, y es necesaria para las comunicaciones audiovisuales y para la informática.

Así es que el terrible rayo de Júpiter, una vez domesticado, es un gran aliado del hombre y tal vez el principal impulsor de la modernidad.

600 años a.C., Tales de Mileto, seguramente sin relacionarlo para nada con el rayo, experimentaba frotando una varilla de ámbar creando pequeñas cargas que atraían livianos objetos y consiguiendo, al frotar con mayor energía, hacer saltar alguna chispa.

Ámbar en griego se dice elektron, de donde deriva la palabra latina electricus, utilizada por William Gilberte en 1.600 en su libro “De Magnete”.

En 1752 Benjamin Franklin demostró que el relámpago es debido a la electricidad e inventó el pararrayos. En 1777 Coulomb, consiguió mediante una balanza de torsión medir la fuerza de atracción y repulsión eléctrica; observando que dicha fuerza era directamente proporcional a la magnitud de las cargas e inversamente a la distancia entre ellas, dando lugar a la ley de Coulomb. En 1821 Georg Simon Ohm, enunció su famosa ley que liga la tensión de una corriente con su intensidad y define la resistencia eléctrica. El mismo año el danés Oersted descubre el fenómeno del electromagnetismo. En 1831 el químico, pensador y teólogo a su manera, Michael Faraday enuncia como conclusión de sus célebres experimentos su ley de inducción y sienta las bases que hacen posible la formulación matemática de James C. Maxwell mediante sus cuatro ecuaciones que permiten el desarrollo de la electrodinámica. En 1841 James Prescott Joule desarrolla su ley para obtener la cantidad de calor que produce en un conductor el paso de la corriente. En 1887 Edison construye la primera lámpara incandescente.

Como hemos dicho la electricidad fue la solución para el transporte de la energía, pero el gran hallazgo que lo hizo posible fue la Corriente Alterna. Nikola Tesla, construyó en 1882 el primer motor de inducción de C.A. Nacido en 1856 en Smiljan (Croacia) en 1884 se incorporó al laboratorio de Edison en Nueva York donde ambos desarrollaron la corriente alterna. En 1891 en Colorado se realizó la primera transmisión interurbana de corriente alterna. Para entonces ya había estallado la llamada “guerra de las corrientes”. Edison intentó demostrar los peligros de la C.A., construyendo y patentando una silla eléctrica, con demostraciones públicas en las que se electrocutaban perros y caballos. Tesla, respondió con una exhibición en la Feria Mundial de Chicago 1893, exponiéndose a una corriente alterna que atravesó su cuerpo sin causarle daño alguno. Finalmente fue este último quien ganó la guerra cuando el industrial George Westinghouse compró su patente comercializando a gran escala la distribución en Corriente Alterna. Tesla fue también el inventor de la radio en 1895, pero fue Marconi, que usó uno de los osciladores de Tesla para enviar señales a través del Canal de la Mancha, quien presentó la patente en 1904 obteniendo poco después el Premio Nobel. En 1899, experimentando en una alta meseta de Colorado, Tesla creyó recibir señales de radio de los alienígenas, lo que le proporcionó un gran descrédito, pero en 1930 se descubrió que algunas estrellas (los pulsares) emiten señales de radio. En 1943 este genio murió pobre y solo en un hotel de Nueva York; este mismo año el Tribunal Supremo de EE.UU. otorgó la patente de la radio a Tesla (postmortem). Actualmente, en la orilla canadiense de las Cataratas del Niágara se ha erigido una estatua en honor del hombre cuyo trabajo permitió la construcción de la primera planta hidroeléctrica en corriente alterna.

El transporte de la Energía



Centrales

Una vez resuelto el problema del transporte de la energía desde el lugar de generación al de consumo, empezaron a proliferar centrales de producción eléctrica utilizando las diferentes fuentes de energía con rendimientos cada vez mayores. Dado que Paco Galán trata el tema de las centrales basadas en la energía hidráulica, eólica y térmica, yo me limitaré a decir algo sobre las que utilizan energía marítima, solar y nuclear, curiosamente fuentes con potencial energético incomparablemente superior a las más tradicionales y que sin embargo apenas producen el 16% de la consumida.

La energía del Mar

“... Las olas al chocar con el dique se elevaban 20 metros, y arrancaron de cuajo los últimos doce metros de la obra. Una masa de 800 metros cúbicos y unas 1.800 toneladas fue arrastrada a 32 metros de distancia”. En mi libro “La Ría de Bilbao”, (perdón por la autocita) “valoraba” así el formidable temporal ocurrido el 30 de diciembre de 1891 que hizo modificar a Churruca su proyecto de cerramiento del Abra, para domesticar, con mas ingenio, la impresionante energía del mar.

En la costa del Cantábrico he contemplado temporales similares a éste, incluso he sufrido en carne propia la brutal energía de las olas (he sido naufrago durante una larguísima hora, después de que un golpe de mar hiciese volcar nuestra embarcación). Y sin embargo, toda esta energía tan “palpable” (unos 8 kw por metro lineal de costa) apenas es aprovechada a pesar de que en el mundo hay unos 336.000 kilómetros de costa.

En 1985 se puso en funcionamiento en Bergen una instalación que utiliza el llamado convertidor de Kvaerner: un tubo vertical de hormigón de 10 metros de largo situado en un hueco del acantilado. Las olas penetran por la parte inferior y desplazan hacia arriba la columna de aire lo que impulsa una turbina instalada en el extremo superior. La potencia de esta instalación es de 500 kilovatios y abastece una aldea de cincuenta casas.

Otro prototipo experimentado es la Balsa de Cokerell. Un conjunto de plataformas articuladas que ascienden y descienden con las olas impulsando un fluido hasta un motor que mueve un generador. Nos limitaremos a nombrar otros sistemas como, el Pato de Salter, el Rectificador de Russell o la Boya de Nasuda.

En la actualidad la potencia instalada en los diseños más modernos varía entre 1 y 2 MW, pero todos ellos deben considerarse experimentales.

Mayor importancia, en cuanto a aprovechamiento de la energía maremotriz, tienen las instalaciones basadas en la carrera de mareas. Tengo ante mí un mapa en el que se señalan las localidades en las que se producen las mayores oscilaciones de las mareas: 19 metros en la Bahía de Fundy (Canadá), 18 m en Río Gallegos (Argentina), 15 m en

La Energía del mar



Mont Saint Michel (Francia) etc. Estas magnitudes como “saltos” son modestas y exigen utilizar grandes y costosos equipos para manejar enormes masas de agua salada.

En 1967 en el estuario de Río Rance en la Bretaña francesa se construyó la mayor central maremotriz hasta la fecha. Consta de un dique de 700 metros que cierra una superficie de agua de 17 km². Entre la pleamar y la bajamar se movilizan 184 millones de metros cúbicos, siendo el salto aprovechable de 8 metros. Tiene 24 grupos de los llamados tipo “bulbo” que generan una potencia de 220 megavatios. Estos grupos consisten básicamente en una turbina cuya rueda motriz tiene cuatro paletas orientables, lo que le permite funcionar con el flujo y reflujo de la marea, y va acoplada directamente a un alternador. Funcionan ambos dentro de un carter metálico.

Esta central, además de producir energía, representa un importante centro de investigación para las estructuras de hormigón dentro del mar y para el estudio de la corrosión marina en los elementos metálicos.

En 1984 se puso en funcionamiento en la citada Bahía de Fundy, una planta maremotriz con una innovadora turbina denominada “Straflo”, en la que el generador, en lugar de ir ensamblado a continuación del eje de la turbina, circunda sus alabes, con lo que se aumenta el rendimiento, ya que aquél no se interpone en el flujo del agua. La potencia instalada en esta central es de 18 megavatios.

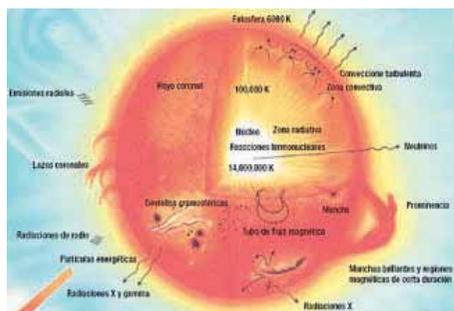
El antecedente histórico de estas centrales es el molino de mareas que se utilizó en las costas de Inglaterra en el siglo XI y proliferó en las de Bretaña en el XII.

Para terminar con la energía de las mareas, un testimonio personal. En la ría de Plencia (Bizkaia), se construyó un molino de mareas que estuvo en funcionamiento más de dos siglos. En 1998 fue primorosamente reconstruido como aportación tecnológico-cultural para ilustrar a la ciudadanía. Tuve el placer de verlo funcionar en repetidas ocasiones, ya que en verano soy asiduo paseante en su idílico entorno, que por cierto, discurre entre dos puentes proyectados por Javier Manterola. Al cabo de un año, después de su inauguración, sus mecanismos fueron destruidos como consecuencia de una imprevista marea de “kalimotxo” provocada por un macrobotellón multitudinario. “Sic transit gloria mundi”.

La energía del cielo

Aún cuando al principio de este prólogo habíamos establecido que el centro del universo es nuestro ombligo, debemos reconocer que históricamente tenemos un serio rival en el sol. De una u otra forma el sol ha sido, real o metafóricamente, figura central de casi todas las religiones. No es de extrañar. Nos ilumina, nos calienta, hace posible la vida etc. Además después de “Eppur si muove” de Galileo, la tierra, y con ella nuestros ombligos, fueron relegados a comparsas del llamado astro rey. Por otra parte al hablar de centrales energéticas, algunas de ellas formidables obras de ingeniería y con

La Energía del cielo



producciones elevadísimas, de las que tan orgullosos nos sentimos, la llegada del sol cada mañana nos envía con sus rayos una implícita lección de humildad. Él es la central de energía por antonomasia, ante la cual las demás resultan irrelevantes. Si todas las centrales que los humanos hemos construido en la tierra desapareciesen, podríamos subsistir, de hecho, hasta hace poco hemos vivido sin ellas, pero sin el sol...

En fin, recordar estas obviedades creo que no viene mal de vez en cuando, pero ahora vayamos al grano, vayamos al centro de la central.

En el interior del sol se genera energía como consecuencia de la denominada *fusión nuclear*. Este fenómeno parece que de cara al futuro que vendrá después del futuro inmediato, puede ser la solución definitiva, según los optimistas, del problema de la energía; por si fuese así vamos a detenernos un poco en él.

Dos núcleos atómicos se unen, *se fusionan*, para formar uno de mayor peso atómico. El nuevo núcleo tiene una masa inferior a la suma de las dos primitivas. Esta diferencia de masa es liberada en forma de energía según la fórmula de Einstein, $E=mc^2$. Pero resulta que los núcleos atómicos tienden a repelerse debido a que están cargados positivamente. Esto hace que la fusión sólo pueda darse en condiciones de temperatura y/o presión muy elevadas, de manera que compensen la fuerza de repulsión. Ocurre que en el interior del sol la temperatura es de 15 millones de grados centígrados y la presión es de 340 millardos de veces la del aire. Cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio. Esta central lleva funcionando 4.600 millones de años y parece que tiene correa para otros 5.000 ó 6.000 más, así que tranquilos. De la energía producida por esta portentosa central nos llega a la tierra una pequeñísima parte en forma de radiación, lo que supone 1.395 Watios por metro cuadrado en la atmósfera y unos 1.000 en la superficie de la tierra.

Esta energía se aprovecha en su inmensa mayoría de forma pasiva; aprovechamos la luz y el calor del sol sin necesidad de artificio alguno.

Paradójicamente, el aprovechamiento que podríamos llamar *activo* de la fuente suprema de energía es muy pequeño. Todas las fórmulas se basan en paneles solares. Los llamados térmicos son prácticamente de uso doméstico y aprovechan la radiación solar para calentar agua. Más importancia tienen los llamados paneles fotovoltaicos que están formados por dispositivos tipo diodo, que al recibir la radiación solar se excitan y provocan saltos electrónicos, generando una pequeña diferencia de potencial en sus extremos. El acoplamiento en serie de varios de estos fotodiodos permite la obtención de voltajes mayores. La corriente eléctrica continua se puede transformar en corriente alterna e incorporarla a una red eléctrica. Esto es lo que se hace en las centrales.

La mayor central energética del mundo hasta 2004 se encontraba en la ciudad de Espenhain, cerca de Leipzig, con 33.500 paneles solares monocristalinos. El funcionamiento básicamente es el siguiente: se genera energía en corriente continua y con una tensión de 800 voltios que mediante un centro de transformación se convierte

en alterna y se aumenta la tensión a 25 kilovoltios, en estas condiciones ya se puede inyectar en las redes de transporte.

Recientemente ha sido construida en Erlasse, también en Alemania, una enorme “huerta solar” con una potencia instalada de 12 megavatios.

Y en la actualidad Acciona ha inaugurado una planta solar termo eléctrica en Estados Unidos con 64 Megavatios de potencia.

Existe un llamado Mapamundi Solar en el que los colores indican la radiación solar media entre 1991 y 1993, en este mapa se señalan seis puntos. Si en ellos se estableciesen centrales de energía solar, se produciría algo más que la energía actualmente consumida, asumiendo una eficiencia de conversión energética del 8%.

La energía del infierno

Yo espero que el infierno no sea una central energética real, aún cuando en los ejercicios espirituales de San Ignacio, había un día dedicado al infierno y el Padre Serrano, con su formidable dramatización, casi nos hacía sentir realmente el efecto del fuego eterno.

Una buena metáfora de la eternidad sería la siguiente: Si el infierno fuese una central energética y estuviese funcionando a pleno rendimiento hasta consumir toda la materia existente en el universo según la $E = mc^2$, todo ese tiempo sería apenas un instante comparado con la eternidad. De ser cierta la existencia de esta fantástica central, habría que preguntarse que consumiría a partir de ese instante. En todo caso parece claro que las Calderas del Pedro Botero más bien serían los reactores, al estar asociadas a la energía nuclear por razones de producción, pero también, porque quizás, lo más parecido al hipotético infierno que ha conocido la humanidad, sería, lo ocurrido en Hiroshima y Nagasaki, tras la primera “aplicación” de la energía nuclear.

Esperemos que aquel importantísimo hito, no sólo de la energía bruta, brutísima, sino también de la energía mental, no vuelva a repetirse.

Pero veamos los precedentes históricos de uno de los mayores descubrimientos del siglo XX y de cómo la impenitente curiosidad del ser humano y el talento de algunos de sus ejemplares lo hicieron posible.

En 1934 Enrico Fermi al bombardear (mal empezamos) con neutrones el uranio, cuyo número atómico 92 es el más alto que existe, con la esperanza de obtener átomos del elemento 93, ocurrió, sin embargo, que se produjo una emisión de cuatro clases de partículas beta de diferente contenido energético. Había descubierto Fermi un fenómeno que más tarde se denominaría *fisión nuclear*.

Después de publicar su informe, otros físicos empezaron a investigar sobre el tema. Entre ellos estaban el alemán Otto Hahn y la austriaca Lisa Meitner. En 1938 el ejército alemán ocupó Austria y Meitner, que era judía, perseguida por los nazis, se refugió en

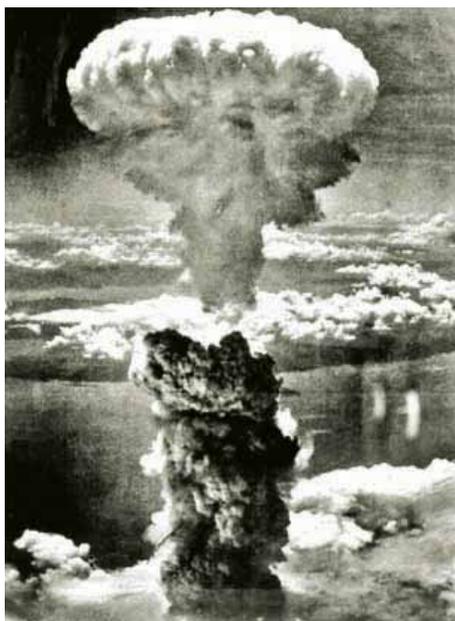
Suecia. Hahn permaneció en Alemania por el momento trabajando con el físico Firtz Strassman. Ese mismo año Fermi se trasladó a Estados Unidos para seguir investigando en la Universidad de Columbia.

En marzo de 1939 el ejército alemán entra en Praga declarando a Bohemia, Moravia y Eslovenia como protectorados. Por estas fechas, un estrecho colaborador de Fermi, el húngaro Leo Szilard, conocedor del inmenso poder destructivo que la reacción nuclear en cadena entrañaba, caso de ser utilizada como explosivo en una bomba, y temeroso de que Hitler consiguiese su fabricación, recurrió, junto con otros científicos, a Albert Einstein, el más prestigioso de todos ellos, para que advirtiese al presidente de los Estados Unidos.

El 2 de agosto de 1939 Einstein envía una carta de Roosevelt apercibiéndole de la situación. El 1 de septiembre de 1939 el ejército nazi invade Polonia y comienza la Segunda Guerra Mundial. Poco después se reúne en los Estados Unidos tal vez el mayor equipo de físicos de la historia (Fermi, Bohr, Compton etc.) entre los que se encuentran los alemanes Hahn y Strassman, quienes lógicamente habrían dejado en su país de origen discípulos aventajados.

Quiero suponer que fue la situación de riesgo la que puso en marcha una frenética, brillante y siniestra carrera, para conseguir el más formidable artificio destructor jamás conocido. No estoy tan seguro de que la citada situación justificase la utilización por decisión del presidente Harry Truman.

Hiroshima, 6 de agosto de 1945



El 6 de agosto de 1945, al dejar caer sobre Hiroshima la bomba denominada “Little Boy”, se marca un nuevo hito de la energía. Así mismo, y ante las decenas de miles de muertos, se podría establecer, en paralelo con la termodinámica, un principio para la energía mental aplicable a guerras, y similares que diría algo así como “La energía ni se crea ni se destruye, pero a veces se *trastorna*”

Afortunadamente aquel trastorno transitorio no ha vuelto a repetirse, por ahora, y en 1954, en la ciudad rusa de Obninsk, comenzó a funcionar la primera planta nuclear con 5 MW de potencia. En 1956 se inaugura la de Calder Hall en Gran Bretaña con 50 KW. En la actualidad la mayor central nuclear existente es la de Crys-Malville (Francia) con 1200 MW de potencia instalada.

De cara al porvenir el gran salto cualitativo de la energía nuclear sería, como hemos indicado al hablar del sol, producirla mediante la fusión nuclear, lo que ya se ha conseguido en laboratorio, algo que se espera lograr con la construcción del ITER (Internacional Termonuclear Experimental Reactor). Los socios que han firmado el 24 de mayo de 2006 en Bruselas llevar a cabo el proyecto con un presupuesto de 4.500 millones de euros, son, la Unión Europea, Japón, Estados Unidos, Corea del Sur, India, Rusia y China. La fusión nuclear hace posible que brillen las estrellas, pero ojo, también es uno de los procesos de la bomba de hidrógeno.

EPÍLOGO DEL PRÓLOGO

La interpretación de la palabra energía, que se desprende de lo escrito hasta aquí, tiene un sentido mucho más amplio (y mucho más superficial) que el utilizado por Paco Galán y Cesar Lanza en sus respectivos trabajos. Paco Galán, como experto en las materias de las que nos habla, partiendo por tanto de sólidos cimientos, ha realizado un trabajo enormemente ilustrativo y con el encanto de las referencias concretas a cosas que le son muy familiares.

Cesar Lanza pone un a vez más de manifiesto su enorme bagaje cultural, esta vez en el registro de la energía. Y en el apartado “El último suspiro”, nos muestra conocer bien el tema, aún cuando la atribución a Unamuno de la frase “Me cago en el vapor, la electricidad y en los sueros inyectables” debe ser contrastada.

Yo, aún cuando empecé por confesar que iba a escribir sobre lo que no sabía, me he preocupado de aprender algo para no desvirtuar demasiado la razón de ser de este libro. A pesar de este esfuerzo de erudición, no tengo claro haberlo conseguido. En todo caso pienso que las divagaciones y conclusiones superficiales, poco rigurosas o incluso torticeras, como se dice ahora, pueden resultar un divertimento para el lector, al crear una dinámica interactiva que le permita refutar muchas o todas las “tesis” que subyacen en este escrito y que resumo a continuación.

En el principio fue la energía. La energía cósmica se transforma con el tiempo, a lo largo y ancho del Universo. Una de esas transformaciones da lugar a la vida en un “punto” al que llamamos La Tierra. Es probable, por razones estadísticas, que también existan otros puntos en los que se haya producido algo similar, o aún más trascendental, para el conjunto del universo y a la larga para nosotros. Con el “homo sapiens” aparece la energía mental, una mezcla, a veces explosiva, de lo que podríamos llamar energía pasional (amor, odio, deseo, ambición, etc.) y energía inteligente. Esta última, entre otras cosas, nos permite aprovechar la energía “bruta” para el “progreso” de la humanidad, pero también para el crecimiento de la propia energía inteligente, la cual en su punto culminante hace posible la *creación* (con minúsculas por respeto a las creencias religiosas).

El arte, la ciencia y la tecnología, son productos del cerebro humano que a la vez actúan sobre otros cerebros, los cuales al asimilar, en todo o en parte, este sutil, pero intenso, flujo de energía inteligente, se enriquecen y transforman. El conocimiento, la impenitente curiosidad, el amor, los recuerdos, las imágenes, son fenómenos tan intensos que actúan produciendo reacciones químicas y electromagnéticas que modifican la propia estructura del cerebro haciéndolo más complejo, de manera que también sus “creaciones” serán cada vez más potentes y sutiles.

Aún cuando la energía del Universo sea una constante, puede no ocurrir lo mismo con la energía inteligente, puede esta ir en aumento, consumiendo otras de rango inferior como alimentación, y asimilando diversidad cultural. Tenemos mucho tiempo por delante hasta que se apague el sol. Tal vez antes de que esto ocurra, lo que comenzó siendo el homo-sapiens, haya evolucionado lo suficiente para campar a sus anchas por otras galaxias en plena eclosión energética. Si esto fuese así ¿hasta donde podría llegar esa tan especial clase de energía, minúscula en kilowatios, pero cualitativamente potentísima, que llamamos inteligente. Si el cerebro humano durante su periodo de existencia ha generado energía inteligente capaz de producir la música de Bach, las obras de Shakespeare, el Quijote, la Piedad de Miguel Ángel, la física de Einstein o la tecnología para llegar a Venus, ¿qué puede hacer en un periodo 37.500 veces mayor? ¿y si este período de desarrollo es mayor, caso de escapar al colapso solar y residir en otra galaxia?

Hay palabras como espíritu, que nadie sabe muy bien su significado, es en realidad una intuición sobre la que los filósofos y las religiones siguen debatiendo. Una de las características del espíritu es su inmaterialidad, no consumir energía. La energía inteligente, por ahora, consume muy poca, pero consume.

Los científicos contemplan tres hipótesis para el final de universo: el Big Crunch (gran colapso), el Big Rip (gran dispersión) y el Gran Apagón (tinieblas y frío con la inconmensurable entropía como testigo mudo). Para que esto ocurra han de pasar más de un trillón de años. ¿Cómo se irá transformando la energía mental durante todo ese tiempo? ¿Será cada vez más sutil, más inmaterial, consumirá menos energía bruta? ¿Dejará de consumirla transformándose en espíritu y subsistiendo después del Big Crunch, o del Big Rip, o escapando de la entropía? Si es así el tiempo habrá sido un paréntesis y continuaremos en la eternidad como al principio. Este sería el último gran hito de la energía que al cerrarse el círculo coincidiría con el primero.

Y ahora basta de elucubraciones, pongamos los pies en el suelo y escuchemos a Paco Galán.

MARIO ONZAIN GUTIÉRREZ

LA ENERGÍA DE LOS FLUIDOS



1. EL AGUA Y LA ENERGÍA



- 1.1 ENERGÍA DE LOS RÍOS COMO MEDIO DE TRANSPORTE
- 1.2 EL USO DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
- 1.3 EVOLUCIÓN Y TIPOS DE MOLINOS DE AGUA
- 1.4 OTRAS INSTALACIONES INDUSTRIALES MOVIDAS POR EL AGUA
- 1.5 PLANTEAMIENTOS TEÓRICOS
- 1.6 EL PASO A LA TURBINA
- 1.7 EL USO DEL AGUA PARA LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS
- 1.8 EVOLUCIÓN DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS
- 1.9 GRANDES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS ESPAÑOLAS
- 1.10 GRANDES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS MUNDIALES
- 1.11 AFECCIONES AMBIENTALES

1. EL AGUA Y LA ENERGÍA

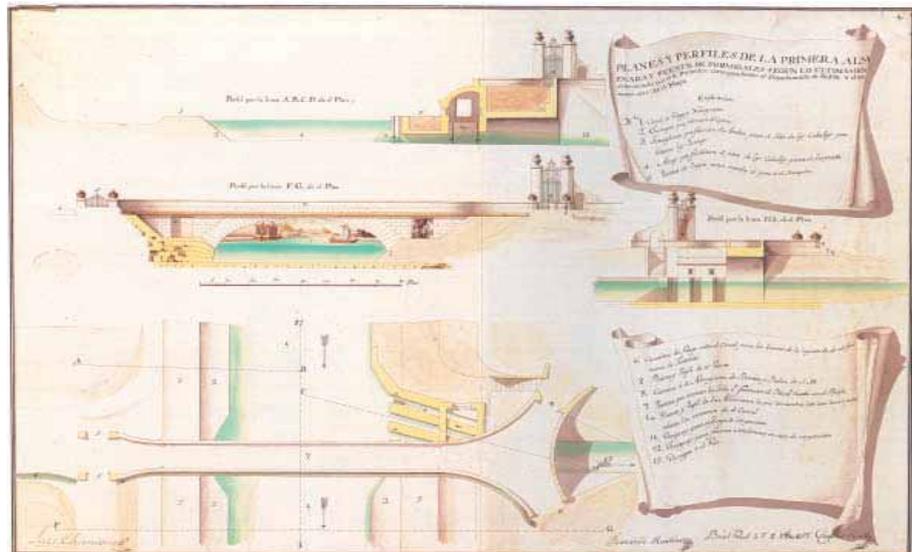
A lo largo de la historia, el agua ha sido una importante fuente de energía, probablemente la primera utilizada. En los apartados siguientes vamos a describir como ha sido el desarrollo de su utilización.

1.1 ENERGÍA DE LOS RÍOS COMO MEDIO DE TRANSPORTE

La energía del movimiento del agua en los ríos se ha usado como medio de transporte, para canoas y barcos. Muchas civilizaciones se han desarrollado a lo largo de grandes ríos, que usaban como medio de tránsito. En los países del norte y centro de Europa los grandes ríos se han usado como medios de transporte, complementados por grandes canales que los conectaban. En España, sin grandes ríos, se puso en marcha, en el siglo XVIII, un plan de construcción de canales para la navegación cuyos mayores exponentes fueron el Canal Imperial, que iba de Tudela a aguas abajo de Zaragoza y el Canal de Castilla, proyectado para conectar la meseta con el mar. Se usaba la corriente del agua para el movimiento, y las velas para navegar en contra de la corriente. En algunos casos, para navegar contra corriente y sin viento se usaban sirgas que tiraban de los barcos desde las orillas como puede verse en las fotos antiguas de la ría de Bilbao o en los planos proyecto del Canal Imperial en el que había caminos a ambos lados para tirar de los barcos. En este canal se proyectaron esclusas para los cambios de rasante, en las que su llenado, con agua del tramo alto, y su vaciado, vertiendo al bajo, permitía el paso de los barcos.

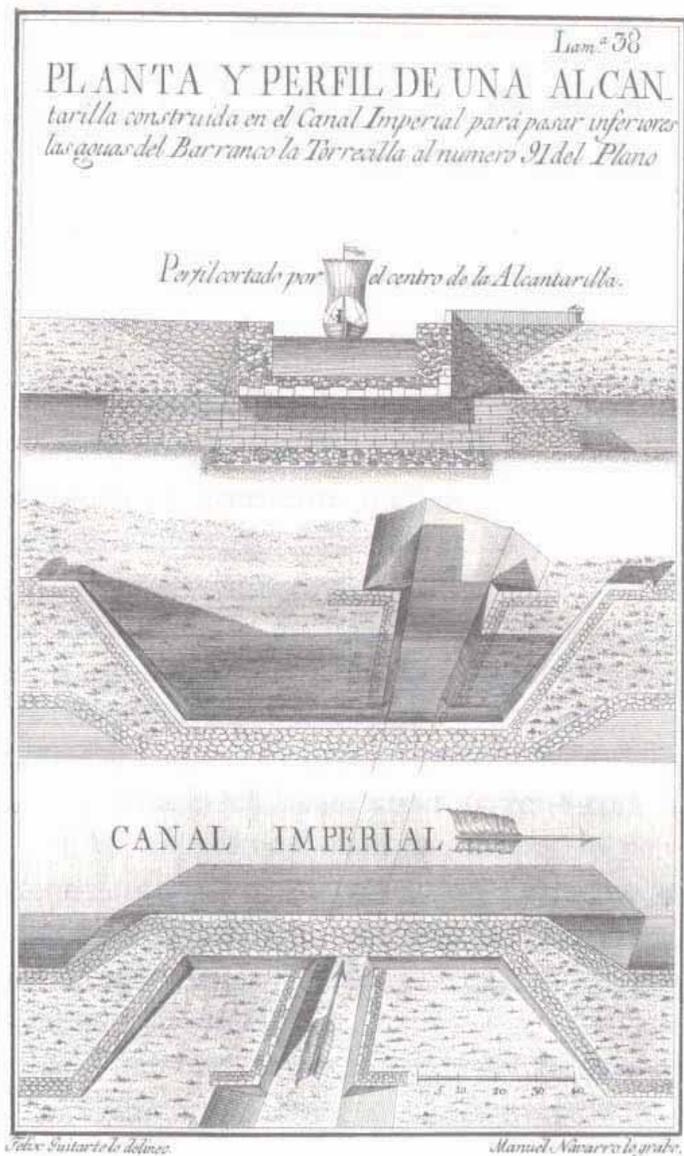
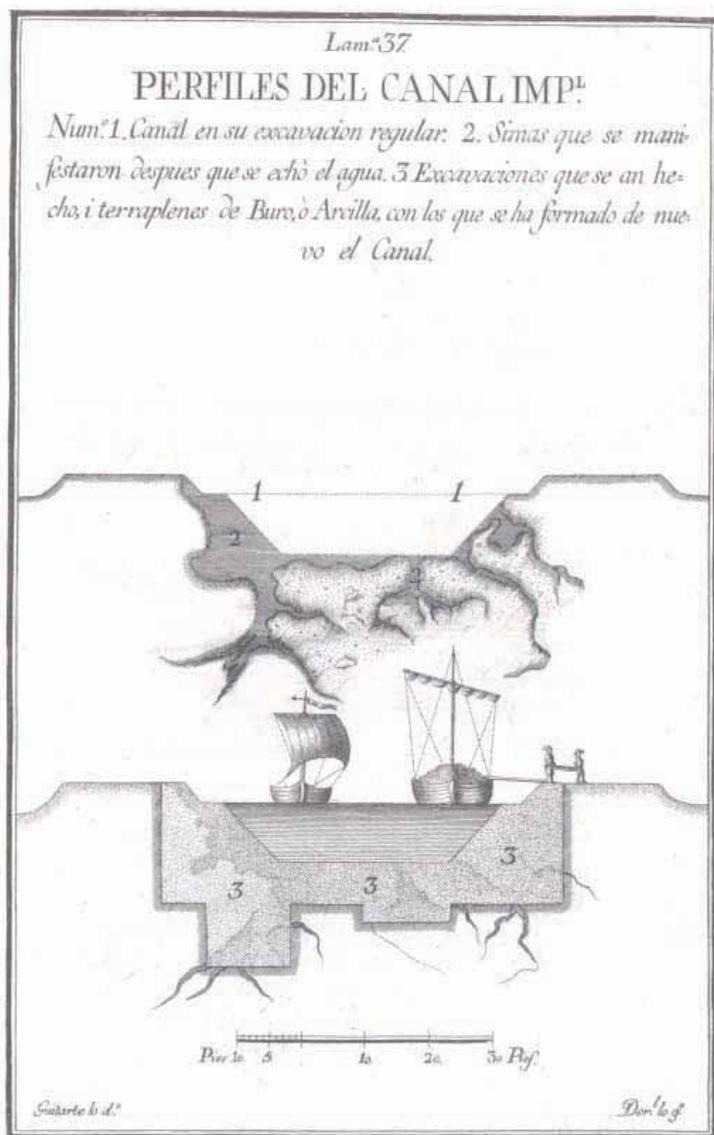
Cuadro de la Sirga.

Planos y perfiles de la primera Almenara y puente de Formigales.

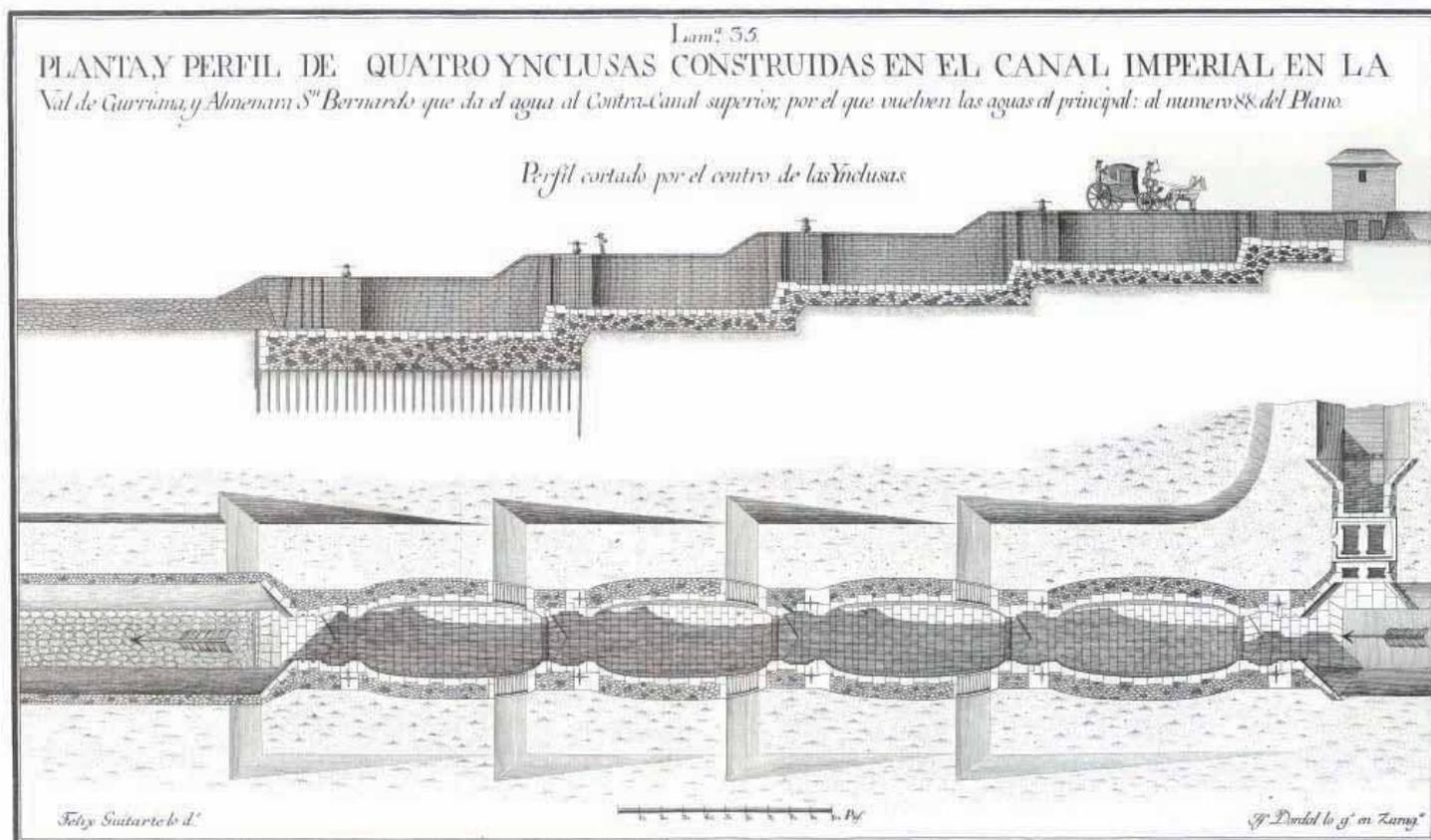


Perfiles del Canal Imperial.

Planta y perfil de una alcantarilla construida en el canal Imperial.



Planta y perfil de cuatro inclusas construidas en el Canal Imperial.



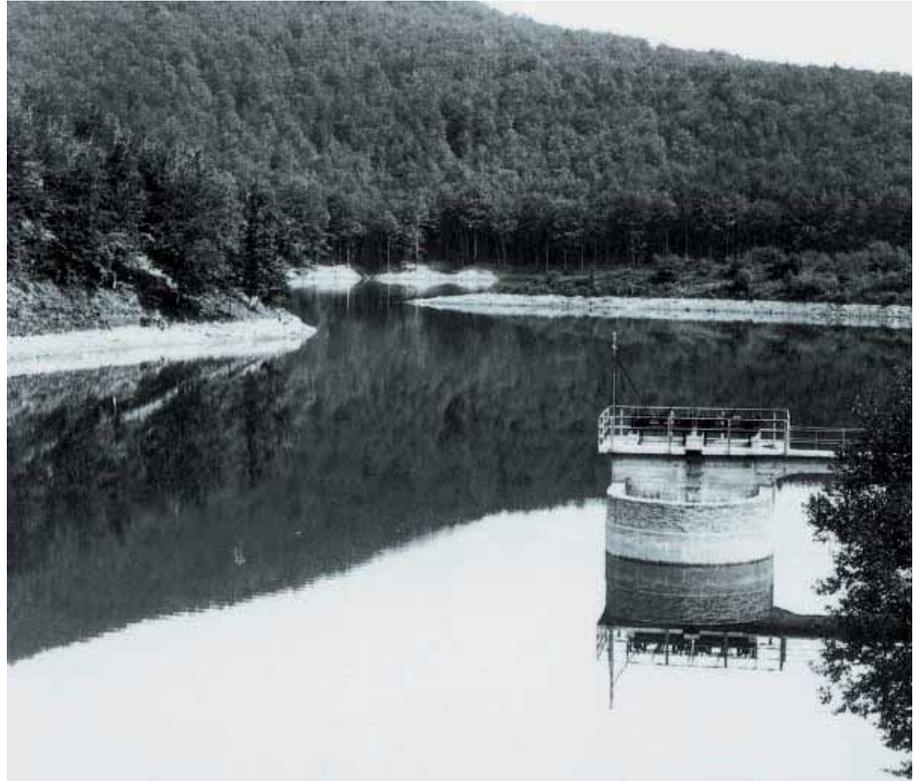
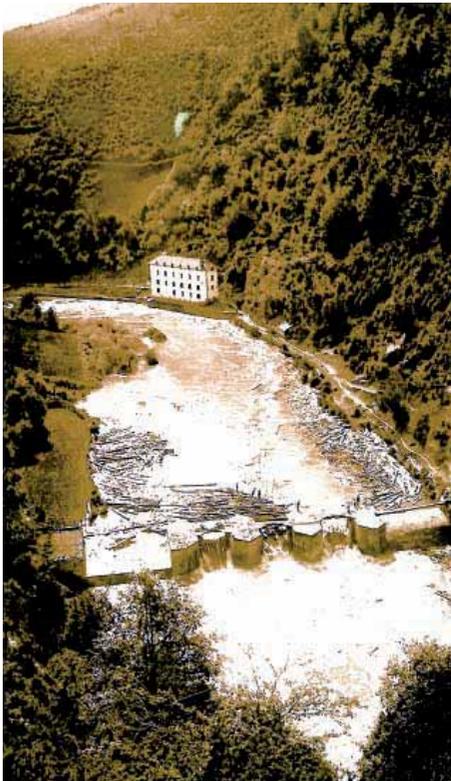
BAJADA DE TRONCOS POR LOS RÍOS

En Navarra un uso especial de la fuerza de la corriente ha sido la bajada de troncos por los ríos.

Cuando las distancias de transporte eran cortas los troncos bajaban sueltos, dirigidos por operarios llamados barranqueros, los cuales acercaban al centro del cauce los troncos que se iban quedando en las orillas. En ocasiones, se construía una presa para almacenar agua que se vertía para asegurar el caudal que garantizase la bajada de los troncos. Tal es el caso de la Presa de Irabia, en la cabecera del Río Irati, construida en 1923 en el bosque del Irati (Navarra), para mediante las “pantanadas”, poder llevar en cualquier época del año, los troncos de hayas del bosque a la planta de su utilización, situada unos 40 kilómetros aguas abajo. La capacidad de transporte del agua requiere un caudal mínimo que se garantiza mediante la acumulación en el embalse de cabecera. Es un caso claro de acumulación de energía.

Bajada de troncos por el río Irati, aguas abajo de Ariebe.

Embalse de Irabia en 1930.



Almadía en el río Esca en 1930. Marqués de Santa María del Villar.



1.2 EL USO DEL AGUA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

BOMBAS Y MOLINOS ROMANOS

El uso del agua fluyente para la generación de energía se remonta a los romanos. En el capítulo X de “*Los diez libros de Arquitectura*” de Marco Vitrubio, escrito hacia el año 25 a.C., hay una explicación del sistema de funcionamiento, tanto de bombas como de molinos, que pone de manifiesto el conocimiento de ambas soluciones:

“Del modo mismo se hacen también azudas en los ríos, acompañando las volanderas en la circunferencia exterior, las cuales impelidas al ímpetu de la corriente, giran perennemente la rueda, que tomando el agua con caxoncillos y llevándola a lo alto, hacen el efecto deseado sin impulso humano y sólo con la corriente misma.

También giran así las ruedas en las haceñas, las cuales en nada se diferencian de estas, excepto en que a un cabo del eje llevan unido un tímpano dentado, puesto verticalmente, que gira con la rueda: junto a ese tímpano se coloca horizontalmente otro mayor, cuyo eje tendrá en su tope superior la grapa de hierro que rige la muela. De esta forma los dientes del tímpano que tiene el eje, mordiendo los del horizontal, hacen girar la muela, y suministrando la tolva templadamente su cibera el giro mismo despide la harina”

Puede verse que el primer párrafo corresponde a las norias de elevación de agua y el segundo a los molinos de agua, tal como han venido funcionando hasta la actualidad, resaltando el efecto permanente y sin trabajo humano de las soluciones.

En “*Los veintidós libros de los ingenios y máquinas de Juanelo Turriano*” (libro 13, páginas 347 y 348) figuran dibujos de cómo pudieron ser las ruedas comentadas por Vitrubio.

El agua entraba en la rueda por unas ranuras situadas en la circunferencia exterior y salía por unos agujeros laterales que la vertían al canal superior. A este modelo Vitrubio lo llama de tímpano que “no eleva mucho el agua, pero la saca expeditamente y en abundancia” ya que la deja a una altura poco mayor que el radio de la rueda. Para los casos en que se requiere mayor altura Vitrubio plantea que:

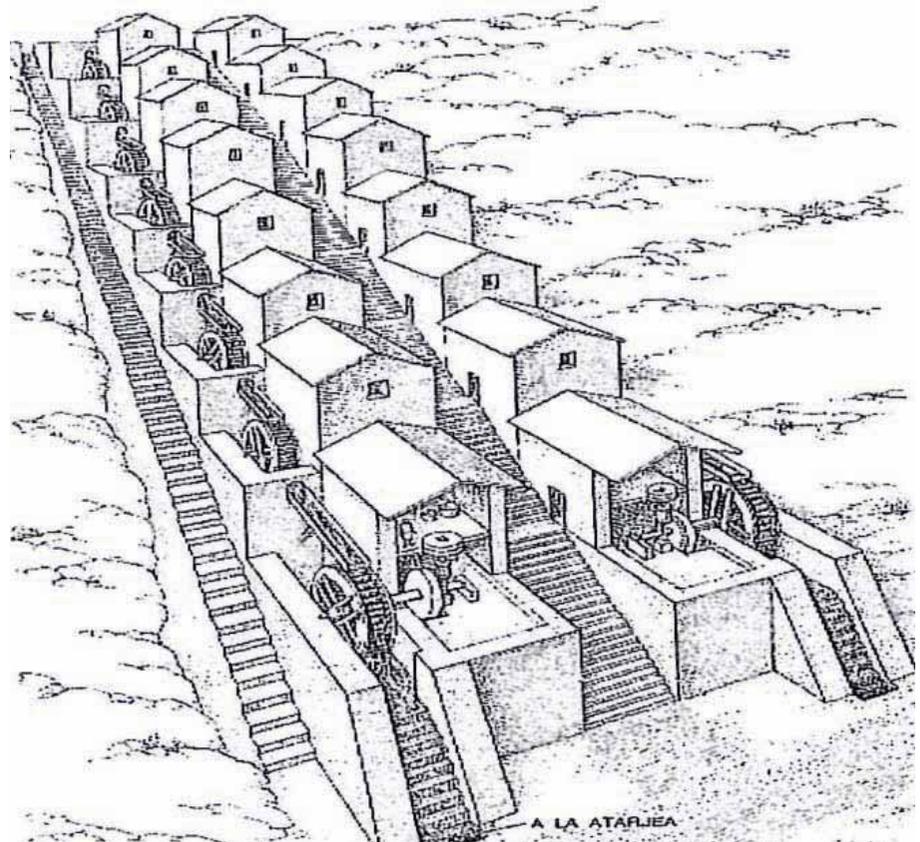
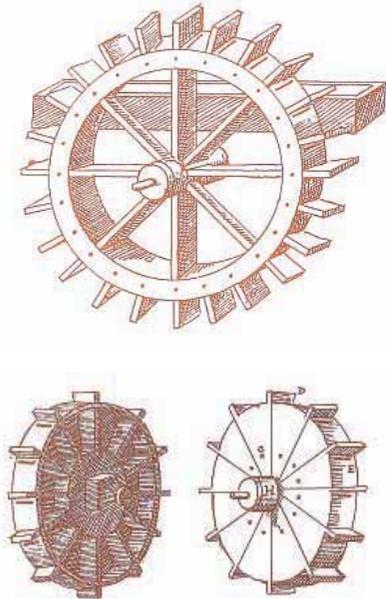
“Si debiere subir el agua a mayor altura, se mudará la máquina de esta forma. Ajustese al eje una rueda que llegue donde hubiere de llegar el agua, y a toda su circunferencia en el lado se adaptará una serie de cangilones cuadrados, que se embrearán con mezcla de pez y cera: así cuando gire la rueda, viniendo los cangilones llenos a lo alto y empezando a declinar, vierten por si mismos en el artesón el agua que tomaron”.

Una vez encontrada la solución es probable que hubiese numerosos bombeos y molinos movidos por el agua de los ríos a lo largo del imperio, Entre ellos cabe destacar el molino de Barbegal, cerca de Arlés en Francia, construido hacia el siglo IV d.C. y del que quedan algunos restos. El agua llegaba por un acueducto y tenía, en dos líneas, ocho molinos que aprovechaban todo el desnivel. Se trata de una instalación industrial, extraordinaria para la época.

A pesar del invento del molino movido por el agua en el imperio romano siguió habiendo molinos accionados por animales y por esclavos, pero se consideró a este invento como una liberación del trabajo manual, tal como lo refleja la poesía de Antipater de Salónica:

Dejad de moler, oh mujeres que trabajáis en el molino
Seguid durmiendo, aunque los gallos canten la llegada del alba.
Démeter ha ordenado a las ninfas del agua
Que hagan ellas vuestra tarea.
Saltando en la rueda, hacen girar el eje
Que hace moverse las grandes piedras trituradoras

Figuras de ruedas de molinos romanos.
Reproducción del molino de Barbegal (derecha).

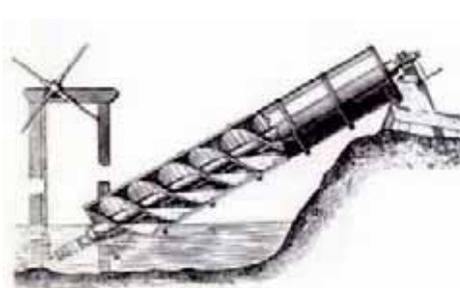
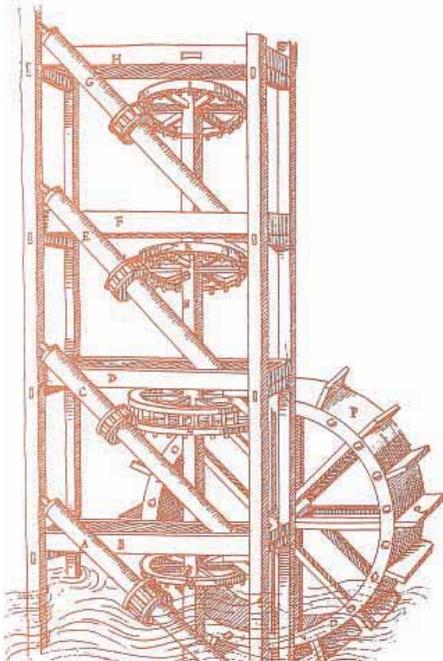


BOMBEOS ACCIONADOS POR EL AGUA FLUYENTE

Las norias situadas en los ríos permiten elevar una parte del caudal circulante, usando para su accionamiento, la energía de la corriente del cauce principal. De esta forma es posible regar terrenos situados a mayor cota que el río. Es una forma muy ingeniosa de aprovechar la energía del agua del río. Se ha usado desde muy antiguo existiendo referencias a ellas, como ya hemos indicado en el libro de Vitrubio.

Noria en el río Segura (Murcia).

Tornillos de Arquímedes.



TORNILLO DE ARQUÍMEDES

Una bomba muy especial es el llamado tornillo de Arquímedes, que puede verse en figuras tomadas de “*Los veintidós libros de los Ingenios y Máquinas de Juanelo Turriano*” (en el que se le llama cóclea de Pitágoras). Están accionados por una rueda movida por el agua del río mediante unos dientes colocados en su superficie que actúan sobre otros perpendiculares situadas en el exterior del tornillo. Para alturas importantes de elevación se divide el bombeo en varios tramos colocados en serie.

En el texto se describe el sistema de fabricación, clavando la espiral a un tronco redondeado y cubriéndola después.

Esta bomba es muy usada en depuradoras de residuales porque permite elevar aguas con materias en suspensión. Su funcionamiento puede verse en la figura siguiente, en la que se ve el avance del agua a lo largo del tornillo.



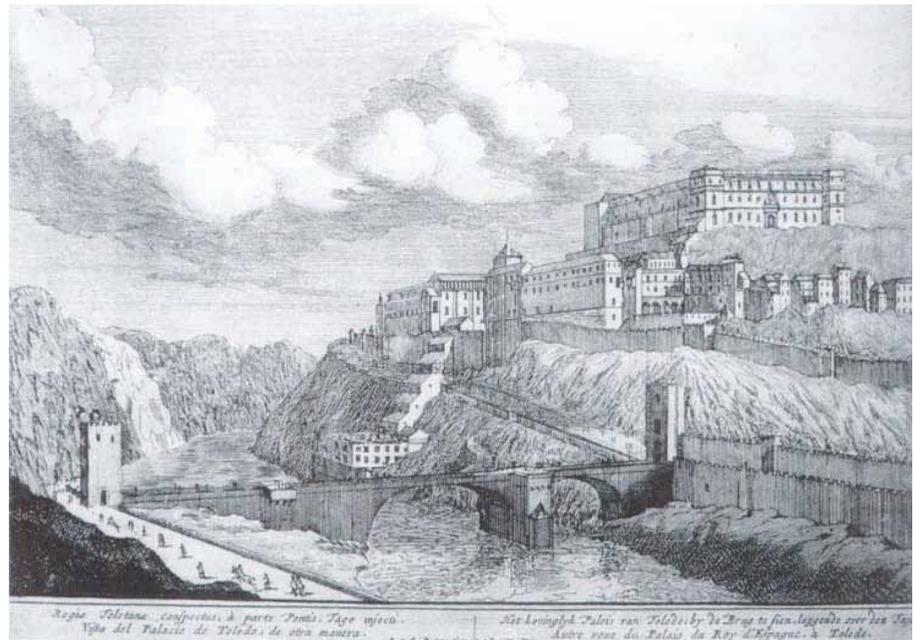
ARTIFICIO DE JUANELO

En 1565 Juanelo Turriano, relojero e ingeniero del Emperador Carlos V, construyó un bombeo, que se ha llamado artificio de Juanelo, para elevar el agua del río Tajo hasta el Alcázar. La altura de elevación era de 100 metros y el caudal de 17.000 litros diarios.

El sistema consistía en dos grandes ruedas que giraban movidas por la corriente del río. La primera elevaba el agua hasta 14 m de altura y la segunda accionaba, con un sistema de bielas, unos cazos oscilantes, cada uno de los cuales, al girar, elevaba el agua hasta el siguiente, de este modo el funcionamiento se basaba en mantener la presión atmosférica, ya que años antes se había intentado un sistema de bombas de pistones pero las tuberías no pudieron resistir la enorme presión del agua y reventaron. Los cazos estaban dispuestos en grupos para adecuarse a la topografía del terreno. En el esquema, puede verse el sistema de funcionamiento.

Constituyó un hito para su época. En el *Amante Agradecido* (1602) Lope de Vega escribe: “[...] a Toledo volveremos. Veré la iglesia mayor, de Juanelo el artificio”. No obstante, el funcionamiento era complicado, requería mucho mantenimiento, por lo que dejó de usarse hacia 1620.

Hay un grabado holandés del siglo XVII en el que se ve el conjunto desde aguas abajo y dos fotografías de Clifford del estado de la instalación en 1858.



Grabado holandés del siglo XVII.

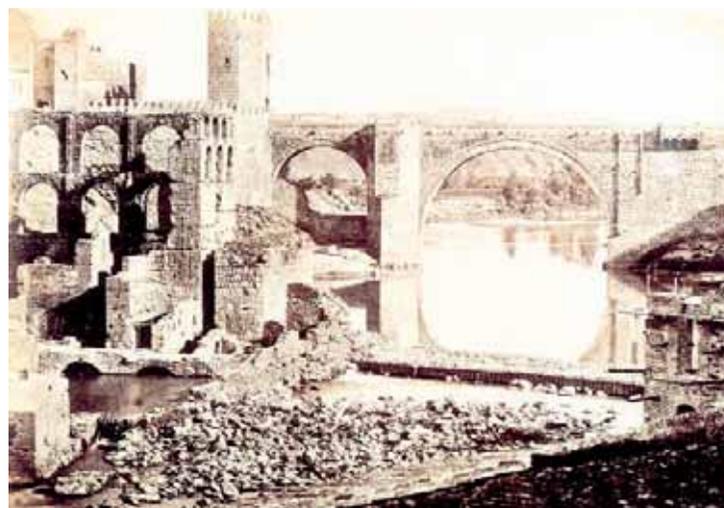
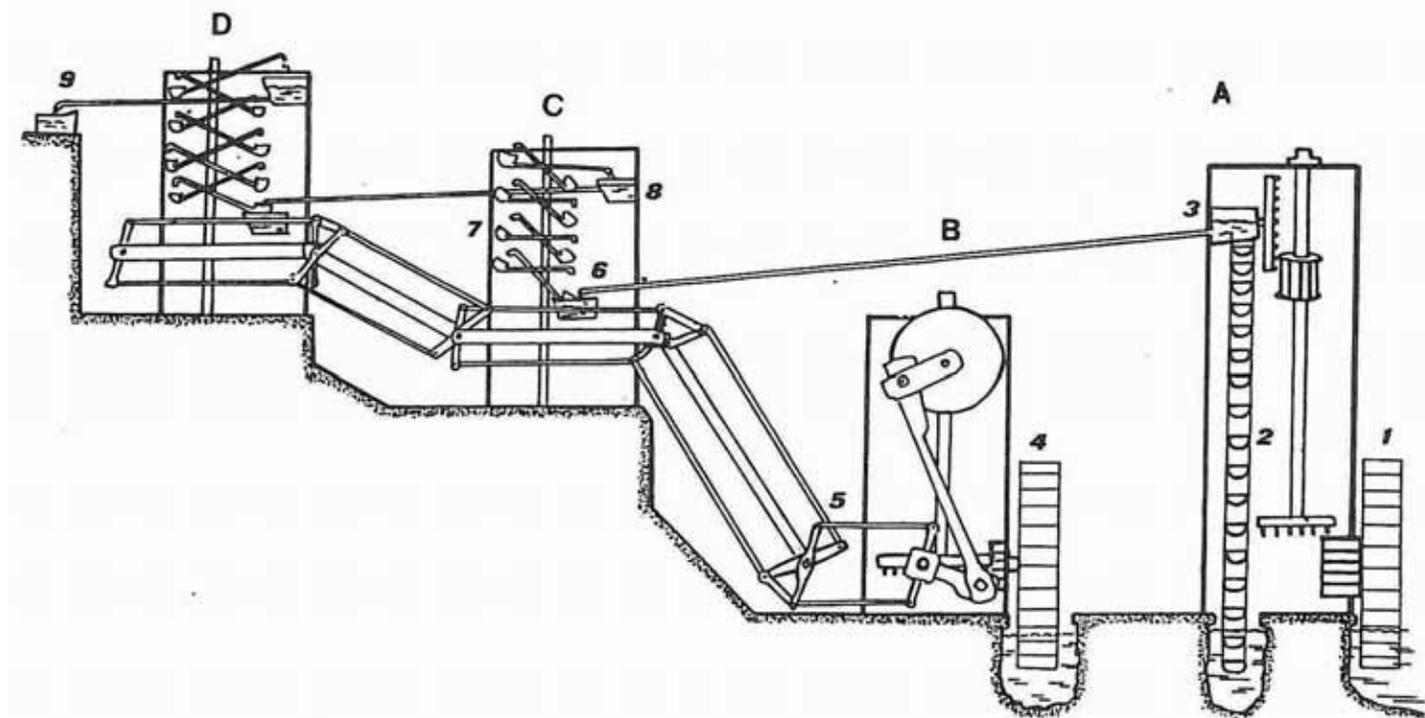
(página derecha)

Croquis de funcionamiento del artificio de Juanelo.

Puente de Alcántara y artificio de Juanelo, fotografía de Clifford de 1859.

Artificio de Juanelo y puente de Alcántara, fotografía de Clifford de 1858.

1. EL AGUA Y LA ENERGÍA



BOMBEO DE MARLY

El bombeo de Marly es uno de los más espectaculares ingenios construidos para elevar agua, basado en un sistema de elevación parecido al artificio de Juanelo. Fue inaugurado por Luis XIV el 13 de junio de 1684. Su finalidad era subir agua desde el Sena hasta los castillos de Marly y Versalles. En aquella época se consideró una de las maravillas del mundo. Su estampa y extraordinario funcionamiento llamó la atención de muchos artistas coetáneos.

Los artífices fueron el barón Arnold de Ville y el audaz carpintero Renkin Sualem. Los primeros trabajos se iniciaron en el año 1681. En total, el ingenio contaba con 14 grandes ruedas de 9,14 metros de diámetro que accionaban al menos 221 bombas dispuestas ladera arriba. Estas se comunicaban entre sí con un sistema de transmisión de energía de cadenas suspendidas que se agitaban sobre balancines unidos a las bombas. El complejo hidráulico se completaba con una presa, un cerramiento de madera para proteger la maquinaria, tuberías de plomo, tanques, depósitos, etc. Hasta llegar a la cima del desnivel, situada a 162 metros sobre el nivel del Sena y a una distancia de 1.200 metros. Desde este punto partía un largo acueducto que repartía el agua a los diferentes destinos.

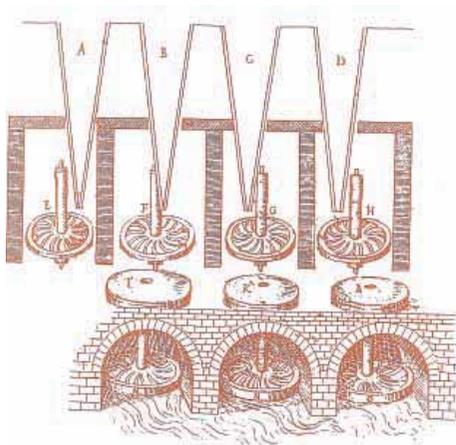
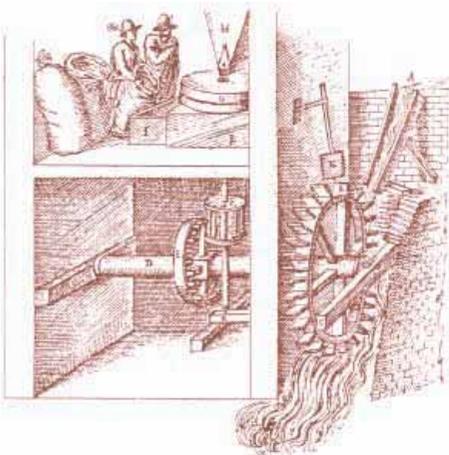
La máquina de Marly constituyó un rotundo éxito, capaz de elevar más de 5.000 metros cúbicos diarios. En contrapartida, la documentación del momento refiere el estridente ruido que producía. Afortunadamente, existe un cuadro de Pierre Denis Martin, “El Joven”, que se conserva en Versalles, y que da una idea del conjunto.

Pierre Denis Martín, "El Joven". Vista de la máquina del acueducto de Marly.



1.3 EVOLUCIÓN Y TIPOS DE MOLINOS DE AGUA

Molino con rueda de eje horizontal.
Molinos con rodeznos de eje vertical.



Los primeros molinos eran accionados por ruedas con paletas, del tipo de los descritos por Vitrubio, sobre las que caía el agua desde arriba produciendo el giro, tal como se ve en la figura del libro “Los veintidós libros de los Ingenios y Máquinas de Juanelo Turriano”. Este sistema da lugar a un giro del eje horizontal, que debe trasladarse al vertical con unos engranajes. En el eje vertical se sitúan las dos piedras, la solera fija y la volandera móvil, cuyo movimiento relativo produce la trituración del grano.

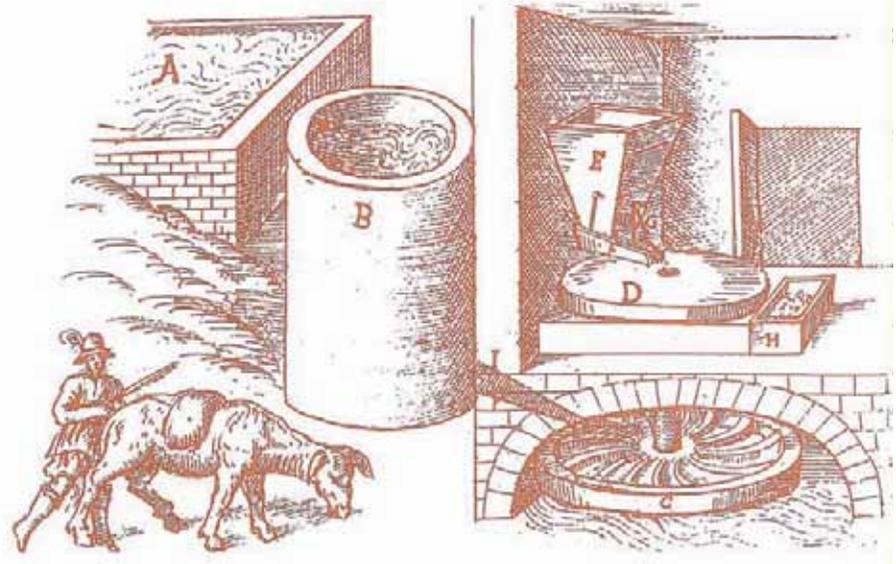
El cambio del giro se hace con los engranajes propios de la época. Una rueda de gran diámetro, llamada catalina, construida con piezas de roble y cuyos dientes de madera de encina situados en su superficie engranan con los dientes de otra más pequeña, llamada linterna, construida con madera de olmo y con dientes de encina. La relación de diámetros se traduce en un aumento de las revoluciones del eje de las piedras, con lo que se mejora su funcionamiento.

Este sistema de accionamiento es el más intuitivo, pero tiene muchos problemas. No tiene buen rendimiento, requiere los engranajes de cambio de dirección, que deben estar situados en la cota del eje de la rueda, etc.

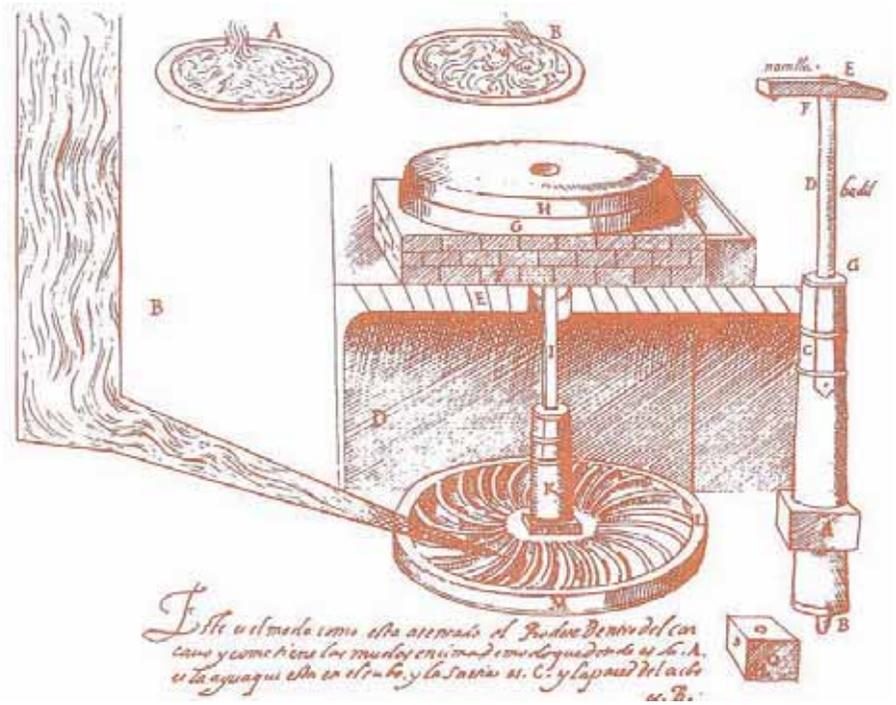
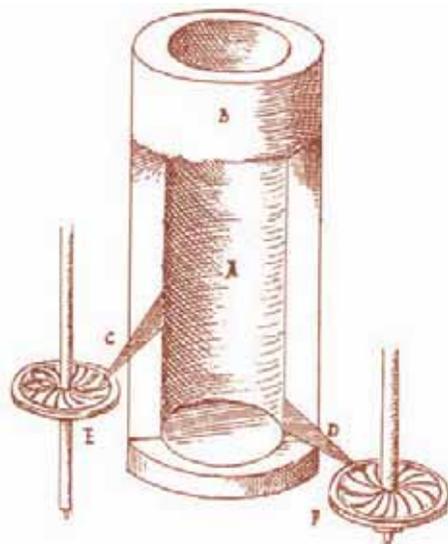
Por eso se generalizó el molino llamado de rodezno que tiene una rueda horizontal que gira por el chorro de agua que se le hace llegar con situación e inclinación adecuadas. En el eje se acoplan las piedras de moler. Este sistema es más sencillo, no necesita engranajes, requiere menores caudales de agua y el eje gira a mayor velocidad, lo que facilita la molienda, constituye una importante mejora hidráulica sobre el anterior.

En “Los veintidós...” se describen estos molinos apreciándose en las figuras la forma de los rodetes, la llegada del agua inclinada, para incidir adecuadamente en los álabes y la situación del eje con las piedras de moler.

Una mejora en estos molinos la constituyó la construcción de un cubo que aseguraba una presión, y por tanto, una velocidad en el agua que incidía en el rodezno. Estos molinos se llamaban de balsa y cubo porque constaban de una balsa para acumular el agua y un cubo en el que se conseguía la presión. En las figuras puede verse el conjunto y el detalle de la incidencia del chorro que sale del cubo sobre los álabes del rodezno. Incluso había casos en que de un mismo cubo salían dos chorros para accionar a dos rodeznos.



Cubo de regulación que alimenta a dos rodeznos.
Molino con cubo de regulación. Esquema hidráulico de molino con cubo de regulación.



EL MOLINO DE ZUBIETA

Molino de Zubieta. Cámara de carga (derecha).
A la derecha de la cámara puede verse la rejilla de entrada del agua al molino de regolfo.
Recinto de los tres rodeznos del molino.

(en página derecha)
Barras de accionamiento para la válvula de Touse y husillos para ajustar la posición de la rueda volandera.
Tuberías de toma de agua de dos rodeznos y eje de giro.
Vista general de los molinos.
Apoyo del rodezno ajustable.
Barras de apertura de válvula y de ajuste de la posición de la piedra.
Detalle de un molino y de la grúa para levantar la piedra.
Vista general de dos rodeznos y las barras de compuertas y de posición de las piedras.

Un conjunto muy ilustrativo de molinos de este tipo es el Molino de Zubieta (Navarra) recientemente restaurado. En las tres primeras fotos se ve cómo al llegar el canal al molino aumenta la profundidad para que los tubos de paso del agua a los rodeznos estén en la cota adecuada para que el desagüe se realice con el salto disponible. En la foto se ve la salida del agua después de accionar los rodeznos. Los tres rodeznos están situados en un recinto en la parte baja del edificio, terminado en un arco que lo delimita. La cota de la solera del recinto está algo más baja que el terreno, a fin de dejar calado para la lámina de agua. En las fotos puede verse con detalle el rodezno, la posición del chorro de agua, el detalle de los álabes, el eje de roble terminado abajo en dos piezas de hierro y arriba en otra pieza de hierro que atraviesa la piedra fija. Puede verse también el sistema de cierre de las entradas de agua a los rodeznos, que se accionan desde el recinto de los molinos, tal como se aprecia en las fotos, en las que también se aprecia el husillo con el se fijaba la altura del madero de apoyo del eje y por tanto la separación entre las piedras de moler, lo que condiciona la finura de la molienda. Este molino podría llamarse de cubo, por tener el depósito de agua con los tres chorros, parecido al del grabado de la página anterior, “Molino con cubo de regulación...” Dado que se encuentra operativo constituye un buen ejemplo del aprovechamiento del agua para este fin.



1. EL AGUA Y LA ENERGÍA

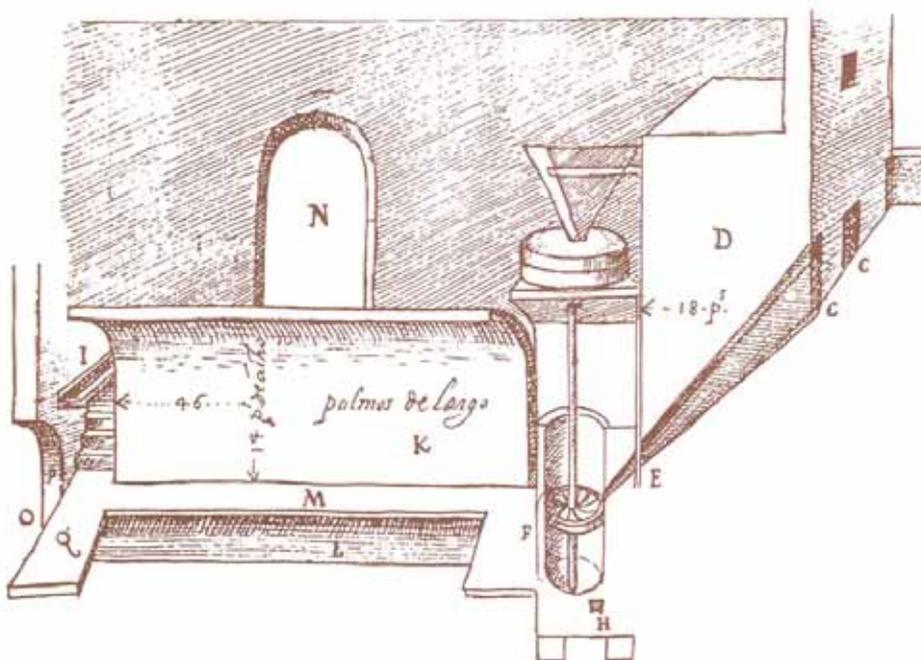
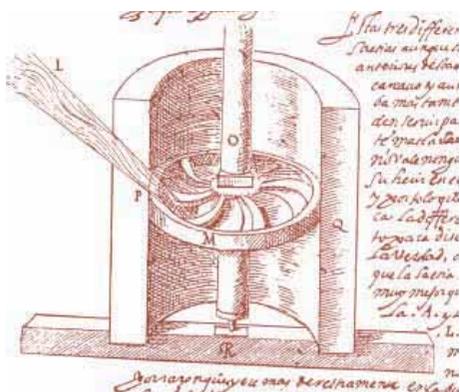


La siguiente mejora hidráulica de los molinos fueron los llamados de regolfo, en los que la rueda se sitúa en el interior de un recinto cilíndrico en el que el agua entraba desde el cubo y giraba en su interior arrastrando la rueda por efecto de la fuerza centrífuga, que se aprovechaba mejor curvando los alabes del rodezno, con lo que se conseguía un efecto de reacción. Pueden verse en las figuras siguientes.

Estos molinos de regolfo constituyen una mejora energética muy importante porque en vez de atacar al rodezno con un chorro de agua se actúa con toda la masa de agua que llena el tubo por encima de la rueda con el consiguiente efecto multiplicador. La energía que se consigue es similar a la que se produce en un vaso de agua cuando se revuelve con una cucharilla. Lógicamente este sistema es posterior al del rodezno normal y por eso en algunos molinos, como el de Zubieta, se encuentra en la ampliación del molino y se destina a la generación de energía eléctrica. En las fotos puede verse la pieza de eje vertical arrastrada por el eje del molino que tiene dientes de madera de acacia para atacar al engranaje de eje horizontal, en el que se sitúa la polea que accionaría el generador, el volante de inercia y el cojinete de apoyo. Puede verse el tubo que rodea la rueda de la turbina con la salida del agua por la parte de abajo. El agua entra por la reja del tubo que se aprecia en la foto de la página 48 y que está situada en la parte alta del canal para que el agua entre al tubo por encima del rodezno.

Detalle de la entrada de agua sobre la rueda en un molino de regolfo.

Vista general de un molino de regolfo.



El primer molino datado de este tipo fue construido en Pina (Aragón) en 1555. Estos molinos, al tener un mejor aprovechamiento de la energía, obtenían un mayor rendimiento y fueron un precedente de las turbinas hidráulicas posteriores.

Constituyen el primer paso hacia las turbinas de reacción que se caracterizan porque el paso de la energía en forma de presión a velocidad de giro se produce en la parte giratoria. En el siguiente croquis puede verse claramente la diferencia entre las turbinas de acción, en las que el agua llega como un chorro a presión atmosférica a la parte móvil y las de reacción en las que el agua llega a presión.

La ventaja de las turbinas de reacción es que, en muchos casos, permiten un mejor aprovechamiento de la energía. Además, al no romperse la presión, permiten utilizar las turbinas como centrales de bombeo reversibles.

Turbina Pelton ejemplo de turbina de acción.

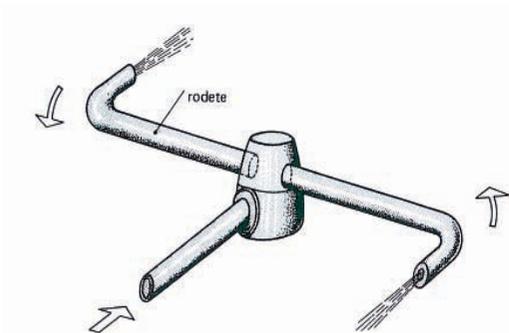
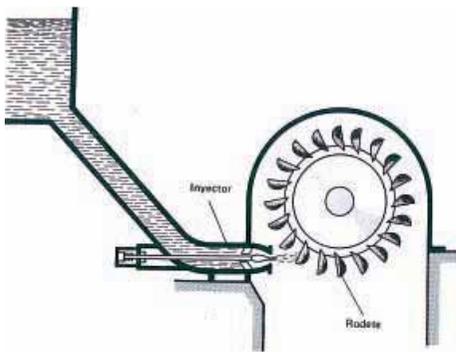
Croquis ejemplo de turbina de reacción.

Detalle de la tubería, con salida sumergida.

Engranajes y eje de la toma para el generador.

Detalle de la rueda con dientes de madera.

Eje horizontal con volante de madera para la polea que accionaba el generador.

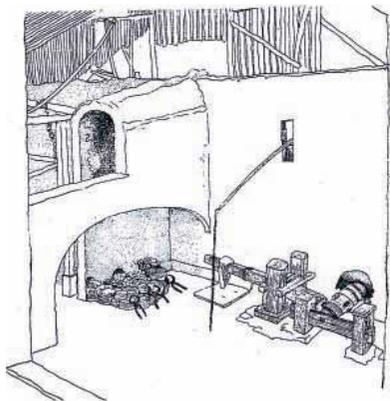


Dibujo del martinete de Lebario.

Batán.

Mecanismo para el picado de la pólvora con rueda de eje horizontal.

Molino de caña, con rodezno de eje vertical.



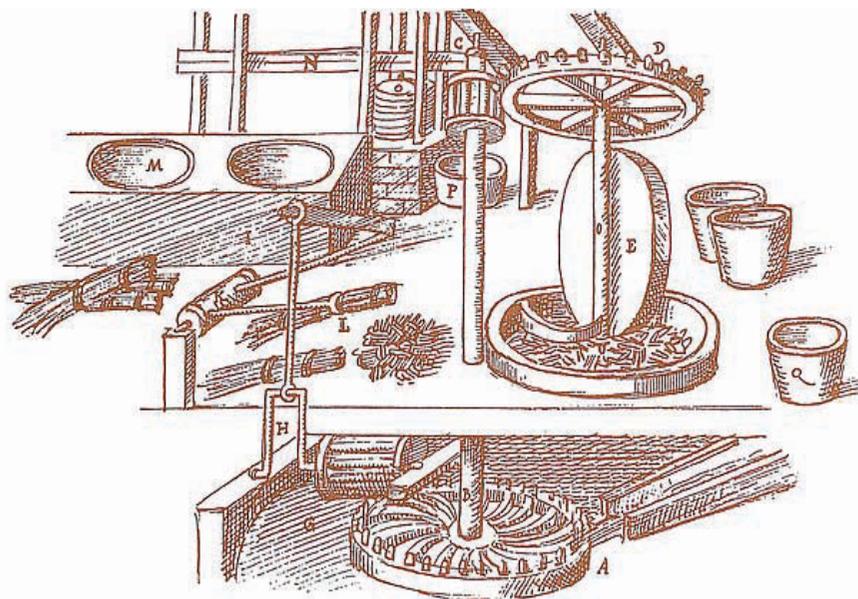
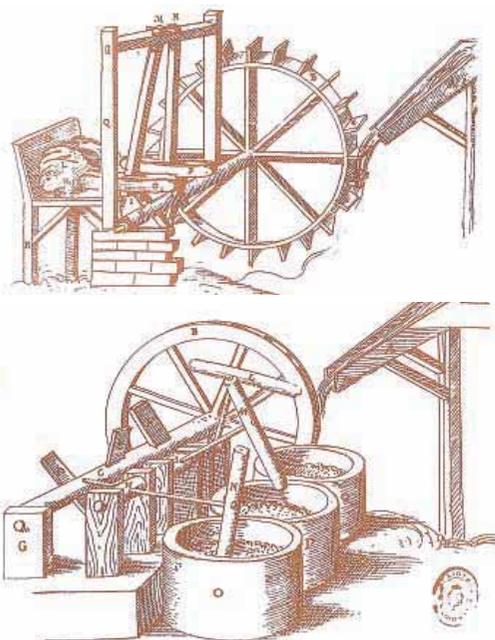
1.4 OTRAS INSTALACIONES INDUSTRIALES MOVIDAS POR EL AGUA

El empleo de la fuerza del agua se generalizó para otras aplicaciones y así se construyeron batanes, ferrerías, molindas de aceitunas, molinos de pólvora, instalaciones de acuñar moneda, etc.

En estas instalaciones industriales el agua movía una rueda cuyo eje accionaba las máquinas. A diferencia de los molinos, el eje horizontal era la forma idónea para el funcionamiento. En muchos casos, como los batanes, el eje accionaba una masa que golpeaba la tela mediante unas excéntricas. En otros casos la fuerza del agua se usaba para “el picado” de la pólvora. O para la molienda de la caña de azúcar.

En las ferrerías con un sistema parecido se tenía un martinete que golpeaba el hierro que se quería trabajar. También se accionaban los fuelles para el aire de las fraguas.

Una instalación singular industrial accionada por agua fue el Real Ingenio de la Moneda de Segovia, construido a finales del siglo XVI en un antiguo molino de papel y harina, en el río Eresma. Funcionó hasta 1868 en que se abandonó y volvió a funcionar como molino en 1879.



1. EL AGUA Y LA ENERGÍA

En Villava (Navarra) se ha reconstruido recientemente un antiguo batán. En las fotos puede verse el eje de giro con las excéntricas que actúan sobre los mazos que golpean la tela para darle apresto.

En ocasiones el agua movía una turbina, normalmente una Francis sumergida, como la de la central de Miranda, que accionaba un eje que movía toda la maquinaria de la fábrica. Un ejemplo de esto es el molino de Ilundain, que se construyó a principios del siglo XX en Pamplona. La maquinaria actual de este molino es de 1959.

En las siguientes fotos del molino de Ilundain (Navarra), puede verse el eje vertical arrastrado por la turbina que, con un giro de 90°, accionaba una polea que movía el eje energético principal de la fábrica y, en cada piso de la instalación estaban los diferente equipos accionados por poleas conectadas al eje correspondiente.



Eje del Batán de Villava con las excéntricas que accionan la maza.

Extremo inferior del eje de la turbina con salida a 90° para la polea.

En cada piso las máquinas toman la energía con poleas desde el eje principal.

Detalle de los mazos que golpean la tela, accionadas por las excéntricas del eje.

La polea mueve el eje principal de energía de la harinera.

1.5 PLANTEAMIENTOS TEÓRICOS

Llegados a este punto de exposición de la utilización del agua es obligado hacer un apartado en el que se exponga el desarrollo teórico de la hidráulica. Es un pequeño homenaje a los pensadores, que son los que cambian el mundo.

PRESIÓN HIDROSTÁTICA

En la hidráulica ha habido varios hitos científicos. El primero es el barómetro de Torricelli, descubierto por este científico italiano en 1643, y que puso de manifiesto que una columna de mercurio, colocada dentro de un tubo cerrado invertido, quedaba estable por encima del nivel del mercurio de la vasija en la que estaba introducida. La mejor explicación de este ensayo y el descubrimiento del concepto de la presión atmosférica se deben a Blas Pascal, filósofo y científico francés del siglo XVII, que realizó ensayos y escribió numerosos artículos y tratados sobre el tema entre los años 1646 y 1652.

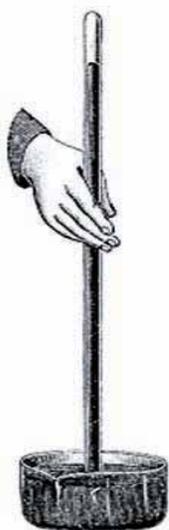
Hoy día es conocido que el aire pesa, es decir, que tiene una masa que está sometida a la fuerza de la gravedad. Debido a esto, el aire produce una presión sobre todas las superficies situadas en la atmósfera, y esa presión es la explicación de innumerables efectos, como por ejemplo, el hecho de que la presión del aire sobre la superficie del mercurio de una vasija (en la que se encuentra el tubo invertido) equilibra el peso del mercurio del tubo. También es la causa de que el agua suba en las bombas de émbolo:

Al subir el émbolo la presión del aire empuja el agua hacia la parte superior del émbolo consiguiendo su elevación.

Aunque las bombas se conocían desde muy antiguo, ya que se han encontrado restos de bombas romanas de bronce, hasta el siglo XVII se desconocía la causa de este fenómeno físico, y se atribuían esos resultados a que “la naturaleza tenía horror al vacío” y que por eso llenaba con agua el espacio que quedaba libre al subir el émbolo y ocupaba con mercurio el tubo que sobresalía de la vasija.

Pascal, en el artículo “*Nuevos experimentos respecto al vacío*”, describe extraordinariamente bien ambos experimentos:

“Cuando introducimos en mercurio una jeringa con un pistón perfectamente ajustado, de suerte que su abertura se sumerja en él por lo menos una pulgada y elevamos el resto de la jeringa perpendicularmente a las superficies, si hacemos retroceder el pistón y dejamos la jeringa en esta posición, el mercurio que penetra por la abertura de la jeringa sube y queda unido al pistón hasta llegar a elevarse en la jeringa dos pies y tres pulgadas. Pero después de alcanzada esta altura, si hacemos retroceder más el pistón, ya no atrae más hacia arriba el mercurio que, al seguir manteniéndose en esa altura de dos pies y tres pulgadas, se separa del pistón; de suerte que se origina un espacio vacío en apariencia que se hace tanto más grande cuanto más hacemos retroceder el pistón: es de suponer que la misma cosa suceda en una bomba aspirante; y que el agua sólo suba hasta la altura de treinta y un pies, que corresponde a la de dos pies y tres pulgadas de mercurio [...]”



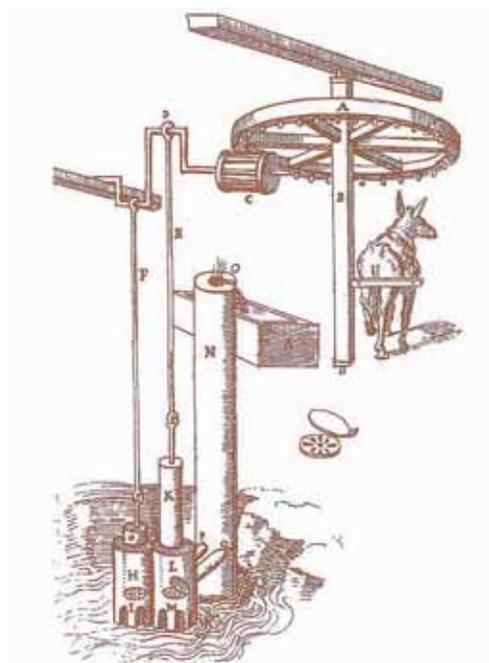
En una carta del 15 de noviembre de 1647 a su cuñado Perier decía: “después de este experimento había motivos para persuadirse de que no es el horror al vacío la causa de la suspensión del mercurio sino la pesantez y la presión del aire, que contrabalancea la pesantez del mercurio”. Para comprobarlo planteó repetir el experimento el mismo día, en un mismo tubo, a diferentes alturas del Puy-de-Dôme. El ensayo lo realizó Perier el 19 de de septiembre de 1648, resultando que en la parte baja la altura del mercurio era de veintiséis pulgadas y tres líneas y media y en la parte alta de la montaña, con una diferencia de alturas de quinientas toesas (974 metros), la altura se reducía a veintitrés pulgadas y dos líneas.

Este ensayo le confirmó: “que la naturaleza no siente ninguna repugnancia hacia el vacío y que no hace el menor esfuerzo para evitarlo y que todos los efectos que se han atribuido a ese horror proceden de la pesantez y de la presión del aire.”

Posteriormente escribió los “*Tratados del equilibrio de los líquidos y del peso del aire*” en el que desarrolla el concepto de presión y sus consecuencias. En él concreta los puntos siguientes:

LOS LÍQUIDOS PESAN SEGÚN SU ALTURA

Preparó varios tubos, de formas y secciones diferentes pero teniendo todos ellos la misma abertura en la parte inferior y comprobó que, teniendo la misma altura de agua en todos los tubos, se requería la misma fuerza para sujetar los tapones con independencia de la forma y dimensiones de los tubos.



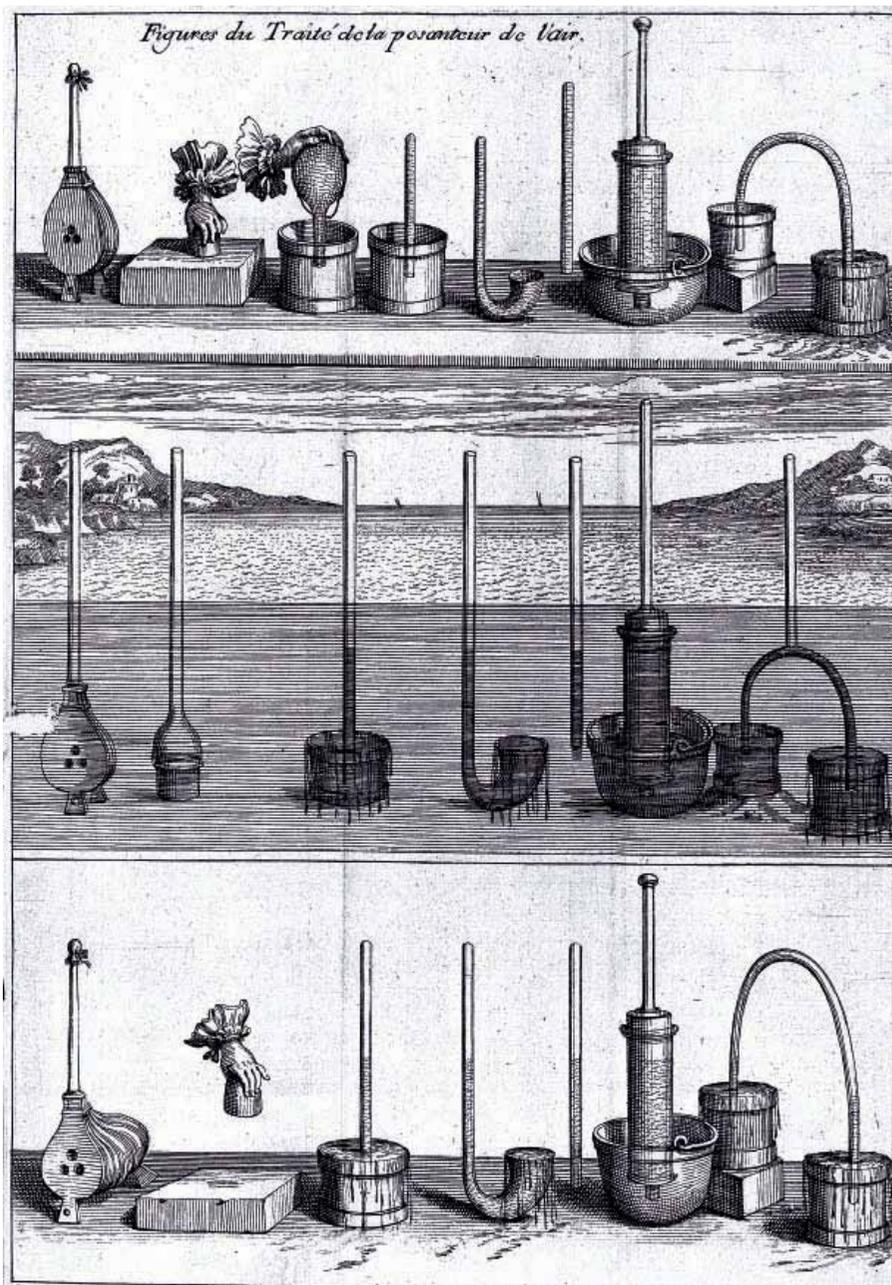
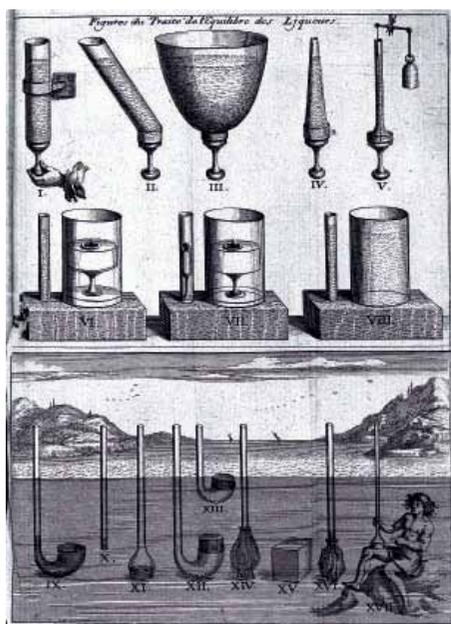
GATO HIDRÁULICO

En un recipiente cerrado colocó dos tubos de diferente diámetro, como se aprecia en el detalle VI de la figura de la página siguiente, y comprobó que si vertía agua por el tubo de menor diámetro debía colocar un peso grande sobre la tapa del tubo de mayor diámetro para evitar que el peso del agua del tubo pequeño no la levantara. Dedujo que se trataba de una nueva máquina que permitía multiplicar la fuerza, de modo que un hombre podría levantar la carga que desease. También comprobó que el desplazamiento de la tapa del tubo grande era muy reducida, porque dependía del volumen de agua que le llegaba del tubo pequeño. Dedujo que este efecto era debido a que los líquidos pesan únicamente según su altura.

EQUILIBRIO DE LÍQUIDOS DE DIFERENTE DENSIDAD

Colocando en dos tubos comunicados líquidos de diferente densidad, como agua y mercurio, comprobó que las alturas de cada uno eran inversamente proporcionales a la densidad, sin que tampoco influya el diámetro de los tubos.

Figures I-VIII du Traité de l'équilibre des Liqueurs.
Figures du traité de la pesanteur de l'air.



FUNCIONAMIENTO DE LOS SIFONES

El peso del aire es la causa de que el agua suba por un tubo de un sifón por encima del nivel de agua de la vasija y pueda circular continuamente.

EMPUJE EN SÓLIDOS SUMERGIDOS

Analizando la fuerza que hace el agua sobre las diferentes caras de un cuerpo sumergido dedujo el principio de Arquímedes que consiste en que el líquido ejerce una fuerza hacia arriba equivalente al volumen de agua desalojado, por lo que los cuerpos más ligeros que el agua flotan y los más pesados caen al fondo. Deduce también que los cuerpos pesan más en el aire que en el agua.

LÍMITES DE LOS EFECTOS DEL PESO DEL AIRE

Como el peso del aire no es infinito sus efectos son finitos por lo que la elevación del agua en los tubos está limitada en altura.

COMENTARIOS

Se llama principio de Pascal al hecho de que toda presión ejercida sobre la superficie libre de un líquido en reposo se transmite íntegramente y con la misma intensidad a todos los puntos de la masa líquida y de las paredes del recipiente.

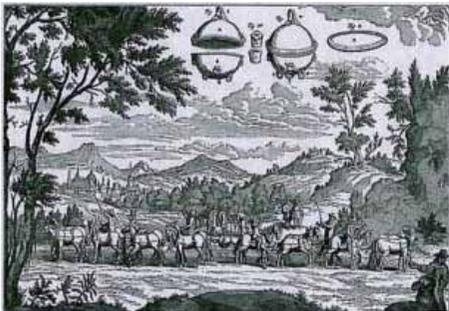
En homenaje al científico, se ha llamado Pascal a la unidad de presión en el Sistema Internacional, definida como el Newton por metro cuadrado (Pa).

El hecho de que el concepto de presión no se descubriese hasta el siglo XVII pone de manifiesto que se trata de algo muy sutil.

La presión atmosférica en el nivel del mar es de 760 milímetros de columna de mercurio o 10,13 metros de columna de agua, supone 101.325 Pa y se llama *atmósfera*. Normalmente la presión se mide como diferencia entre la del líquido de que se trate y la atmosférica.

Unos años después, el 8 de mayo de 1654, Otto Von Guericke, alcalde de Magdeburgo hizo una prueba para entonces sorprendente. Extrajo el aire del interior de dos hemisferios que estaban tangentes, pero sin sujetar entre ellos, y ató cada uno a 8 caballos, que solo después de muchos esfuerzos consiguieron separarlos.

Prueba de Magdeburgo.



CONCLUSIONES

La presión es la propiedad fundamental de los fluidos. Se puede definir como el peso de la altura del fluido entre el punto considerado y su superficie. Es un escalar con unidades de N/m^2 y puede dar lugar a una fuerza actuando sobre cualquier superficie perpendicular a ella. Se propaga a una velocidad del orden de 1.000 m/s en todas direcciones.

Los fluidos no tienen forma, adquieren la del recipiente que los contiene. Los líquidos, más densos que el aire llenan el recipiente hasta el nivel que corresponde a su volumen. Los líquidos prácticamente no se comprimen.

Esa propiedad de la presión hace que los fluidos sean especialmente adecuados para la generación de energía, ya que puede transformarse en velocidad con mucha facilidad.

La masa de aire, en la que estamos sumergidos es un fluido, cuya presión sobre los cuerpos que están dentro de ella es de 1 atm, aunque varía con la cota. Esa presión no la sentimos pero la usamos, al respirar hacemos un vacío que provoca la entrada del aire; cuando aspiramos una bebida con un paja creamos un vacío que hace que la presión del vaso empuje el líquido hacia arriba, ese sistema puede permitir cebar un sifón que puede llegar a vaciar un recipiente, pasando el agua por encima de la superficie del mismo, con presión menor de la atmosférica.

El movimiento de los fluidos, producido por la diferencia de presión da lugar a situaciones singulares, no intuitivas, como las siguientes:

En una tubería de gran longitud el movimiento del agua se produce por la diferencia de cotas entre la entrada y la salida, pero con la misma velocidad en los tramos de subida como en los de bajada.

Al cerrar la válvula del extremo final de una tubería con el agua en circulación se produce una sobrepresión, denominada golpe de ariete, que es función de la velocidad de circulación y de la longitud, lo que sí es intuitivo, pero también del diámetro de la válvula de cierre, que debe ser menor cuanto mayor sea la longitud de la tubería, lo que ya no es intuitivo y en muchas ocasiones ha sido la causa de muchos problemas.

Cuando se produce una rotura en una tubería de un abastecimiento los operarios deben ir corriendo a cerrar las válvulas de seccionamiento, pero una vez que empiezan deben hacerlo muy lentamente para evitar sobrepresiones que puedan producir nuevas roturas.

Los llenados de tuberías importantes son siempre delicados porque la sustitución del aire por el agua debe hacerse de modo que aquel salga con seguridad evitándose su acumulación en puntos altos, la velocidad de llenado se debe limitar para que al terminar de ocupar el espacio no de lugar a sobrepresiones peligrosas.

Todo ello es debido a la presión, que no es un concepto intuitivo, probablemente por ser un escalar y porque nosotros nos imaginamos los vectores, es decir las fuerzas. Pensamos que el agua avanza por un tubo como si fuese un chorro y en realidad lo hace empujando hacia los lados, de la misma manera que nosotros, los cuerpos sólidos, “pesamos” hacia el suelo. Los líquidos, y en general, los fluidos, “pesan”, por el efecto de la presión, hacia todos los lados.

Somos sólidos y pesamos como sólidos, pero vivimos en un mundo de fluidos, que tienen propiedades, para nosotros sorprendentes. Para utilizarlos adecuadamente es necesario conocerlas.

ECUACIÓN DE BERNOUILLI

El segundo hito teórico de la hidráulica se debe a Daniel Bernouilli, que en 1738, dedujo la ecuación que rige el movimiento de los fluidos, relacionando la presión, con la velocidad y la altura, en un fluido en movimiento. Bernouilli, perteneciente a una familia de grandes científicos suizos, empezó por estudiar el comportamiento de la presión y de la velocidad en el movimiento de líquidos en canalizaciones cerradas, para ello colocó tubos capilares conectados a la tubería principal, observando que el líquido subía por ellos hasta una determinada altura, que era la medida de la presión. Bernouilli comprobó que en los tramos de velocidad mayor la presión era menor, llegando a demostrar que la suma de la altura, más la presión y un término del cuadrado de la velocidad es constante. Bernouilli publicó sus trabajos en un libro titulado Hidrodinámica, que fue el inicio de la dinámica de los fluidos.

La formulación actual de la ecuación es:

$$\frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\gamma} = \text{constante}$$

Siendo

V velocidad en m/s

g aceleración de la gravedad en m/s²

z altura en m

P presión en Pa (N/m²)

γ peso específico en N/m³

Aplicando la ecuación a los puntos 1, 2, 3 y 4 se tiene:

En (1) Altura total = H

En (2) Altura total = $z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} =$

En (3) Altura total = $z_3 + \frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} =$

En (4) Altura total = $z_4 + \frac{v_4^2}{2g}$

Un caso particular es la aplicación de la ecuación a puntos por encima de la altura total, como es el caso de los sifones, situación muy usada en las centrales hidroeléctricas.

En (1) Altura total = H

En (2) Altura total = $z_2 - \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} =$

En (3) Altura total = $z_3 + \frac{v^2}{2g}$

En este caso la velocidad de salida es función de la diferencia de cotas entre el punto 3 y la lámina de agua del depósito [$v = \sqrt{2g(H - z_3)}$], con independencia de la altura del punto intermedio 2.

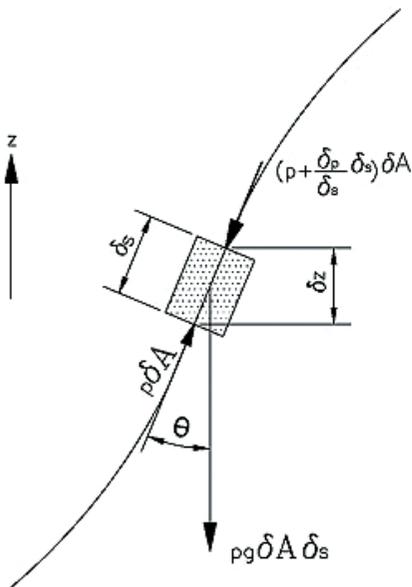
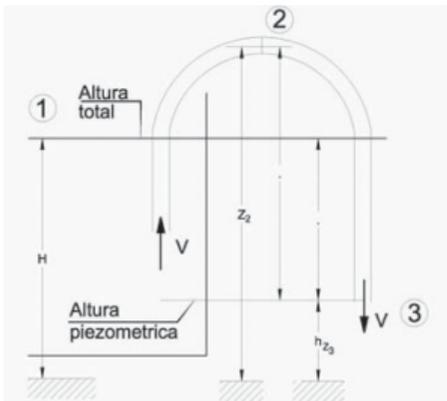
El agua sube por el tubo ascendente, en contra, aparentemente, de la gravedad, con un movimiento regido únicamente por la diferencia de cotas entre los dos puntos extremos.

Algo parecido ocurre en todas las tuberías de abastecimiento, en las que el movimiento del agua tiene el mismo comportamiento en las subidas que en las bajadas, con la misma velocidad (si el diámetro es constante), sin que la gravedad actúe más que en base a la diferencia de cotas entre el inicio y la salida.

La ecuación de Bernoulli complementada con las fórmulas de la pérdida de carga en tuberías, canales y puntos singulares es la base del desarrollo teórico de las canalizaciones y en general de las instalaciones hidráulicas.

Su demostración matemática puede hacerse del modo siguiente:

Ecuación de Bernouilli aplicada a un tubo en aspiración.
Elemento diferencial de una línea de corriente.



Supongamos un elemento de fluido de forma prismática que se mueve a lo largo de una línea de corriente en la dirección \$+s\$ y cuya masa es \$\rho \delta A \delta s\$. Se supone que el fluido es incompresible y que la viscosidad es cero, lo que elimina las fuerzas de corte quedando únicamente las debidas a la gravedad y la presión.

En el elemento considerado la fuerza aguas arriba vale \$p \delta A\$ en la dirección \$+s\$ y aguas abajo la fuerza es \$[p + (\frac{\partial p}{\partial s}) \delta s] \delta A\$ y actúa en la dirección \$-s\$. En las hipótesis consideradas cualquier otra fuerza sobre los lados del elemento es normal a \$s\$. La componente del peso en la dirección \$s\$ es \$-\rho g \delta A \delta s \cos \Phi\$. Aplicando la ecuación de fuerzas de Newton \$\sum f_s = \delta m a_s\$ tenemos

$$\rho \delta A - \left(p + \frac{\partial p}{\partial s} \delta s \right) \delta A - \rho g \delta A \delta s \cos \Phi = \rho \delta A \delta s a_s$$

Siendo \$a_s\$ la aceleración de la partícula del fluido a lo largo de la línea de corriente.

Dividiendo por la masa de la partícula \$\rho \delta A \delta s\$ y simplificando: $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \cos \Phi + a_s = 0$ (1)

\$\delta z\$ es el aumento de altura para un desplazamiento \$\delta s\$ y, por tanto, $\frac{\delta z}{\delta s} = \cos \Phi = \frac{\partial z}{\partial s}$. La aceleración \$a_s\$ es \$dv/dt\$. Como \$v\$ depende de \$s\$ y de \$t\$:

$$dv = \frac{\partial v}{\partial s} ds + \frac{\partial v}{\partial t} dt, \text{ dividiendo por } dt$$

$$a_s = \frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial s} \frac{ds}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t}$$

Sustituyendo en la ecuación (1) \$\cos \Phi\$ y \$a_s\$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

Para simplificar la ecuación se supone que el flujo es permanente, lo que implica que $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$,

con lo que $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial s} = 0$

y como, al ser el flujo permanente \$p\$, \$z\$ y \$v\$ son funciones únicamente de \$s\$, se pueden sustituir las derivadas parciales por totales:

$$\frac{dp}{\rho} + g dz + v dv = 0$$

Integrando:

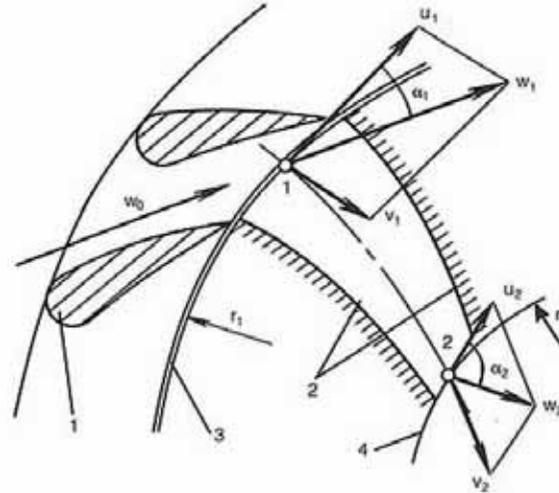
$$gz + \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

que se transforma en la ecuación usual, con las unidades en metros:

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} = \text{const}$$

Que es la ecuación de Bernouilli. Como hemos indicado implica que se aplique a una línea de corriente, en un fluido sin rozamiento y en régimen permanente.

ECUACIÓN DE EULER



Triángulo de velocidades de un rodete Francis.

El tercer hito es debido a Euler que, en 1754, expuso su teoría sobre las máquinas de reacción en la que demostró que el par que actúa sobre el rotor es igual a la variación del momento de la cantidad de movimiento del fluido en su paso por el rotor. Resulta sorprendente el adelanto en el tiempo de la ecuación de Euler sobre la aplicación real a la turbina, que se produjo unos cien años más tarde. Euler era contemporáneo y amigo de Daniel Bernouilli y sin duda uno de los matemáticos más importantes de la historia.

En el caso de una turbina Francis la ecuación de Euler es:

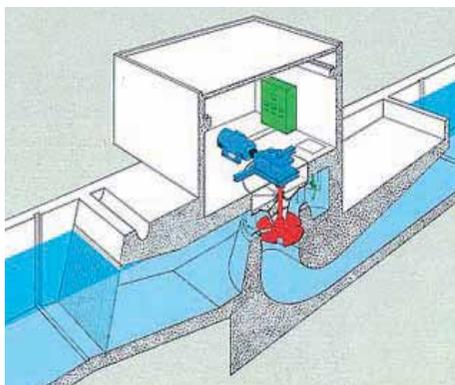
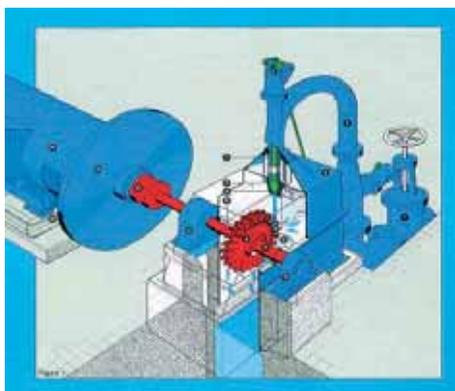
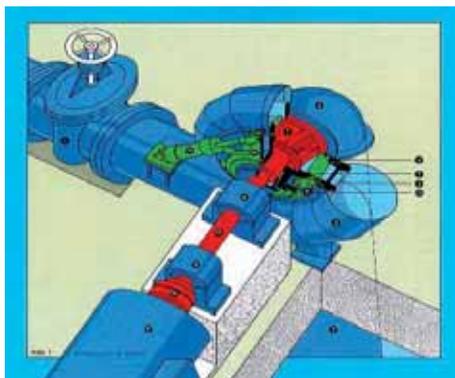
$$M = Q \rho (r_1 w_1 \cos \alpha_1 - r_2 w_2 \cos \alpha_2)$$

Siendo

- M momento transmitido al rotor
- Q caudal
- ρ Densidad del agua
- r_1 radio de entrada al rodete en la sección 1
- r_2 radio de salida del rodete en la sección 2
- w_1 velocidad absoluta del agua en la sección 1
- w_2 velocidad absoluta del agua en la sección 2
- α_1 ángulo de la velocidad w_1 con la dirección del movimiento del rodete en 1
- α_2 ángulo de la velocidad w_1 con la dirección del movimiento del rodete en 2

El mayor par se consigue cuando la velocidad a la salida del rotor es lo más radial posible. Por eso, en las turbinas de reacción se busca que el agua entre tangencial y salga, gracias a las formas de los álabes, sensiblemente radial, con lo que el momento a la entrada es máximo y mínimo a la salida, consiguiéndose el mayor efecto de giro sobre el rotor.

Turbina Francis espiral. Turbina Pelton.
Turbina Kaplan.



1.6 EL PASO A LA TURBINA

Durante los siglos XVI, XVII y XVIII se construyeron numerosas instalaciones, como las indicadas, que utilizaban la energía del agua y fueron, hasta la aparición de la máquina de vapor, las únicas industrias mecanizadas. Tenían que situarse a lo largo de los ríos y su funcionamiento estaba condicionado a la disponibilidad de caudales. La única mejora técnica fue el ya comentado molino de regolfo en el que, sobre la rueda horizontal, actuaba una masa de agua que producía un efecto de presión que aumentaba la energía transmitida.

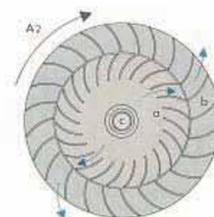
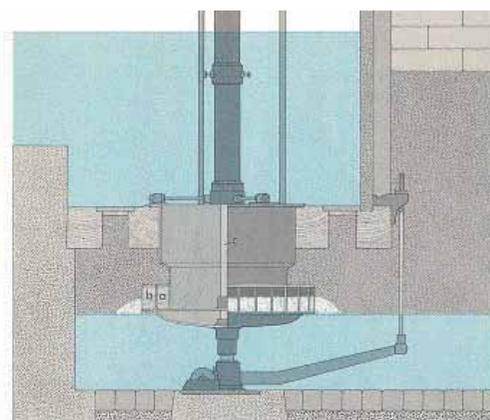
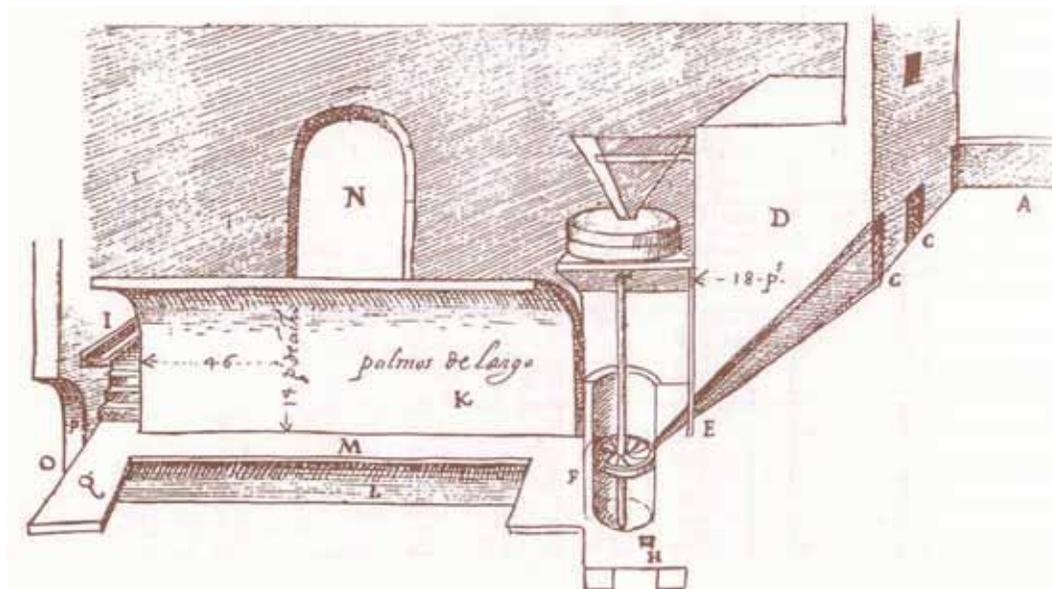
El paso siguiente fue la invención de la turbina. El primer diseño fue realizado por el francés Bénéoit Fourneyron en 1832. Constaba de dos ruedas concéntricas de eje vertical, una interior fija con alabes que dirigían el agua hacia las palas de otra exterior móvil. El agua entraba a presión en la rueda central y transformaba la presión en energía cinética en la rueda exterior, era lo que se llama una turbina centrífuga de reacción.

En 1840 James B. Francis construyó la primera turbina “Francis” en la que el rodete móvil está en el centro y el agua le llega, a presión, desde un anillo exterior, es pues una turbina centrípeta. Con este sistema se consigue un régimen más estable y con mayor facilidad para el giro del eje. El agua entra dirigida de modo radial y en el rodete cambia de dirección saliendo con una dirección próxima a la del eje. Este tipo de turbina, con las mejoras derivadas de su evolución, aún se sigue usando en la mayor parte de las centrales hidroeléctricas siendo indicada para caudales y altura de funcionamiento muy variables. Tiene un rendimiento del 90 %.

Las turbinas de acción, es decir, con el chorro de agua actuando directamente sobre los álabes, de modo similar a las norias o a los rodeznos fue mejorado en 1870 por Lester A. Pelton que descubrió que la fuerza del chorro se aprovechaba al máximo cuando el álabe invertía completamente la dirección del chorro. Diseñó unas palas que consiguiesen este efecto haciéndolas de dos partes simétricas que dividían el chorro y lo hacían salir en sentido contrario. Hoy día se siguen usando este tipo de turbinas Pelton para grandes alturas y con un rendimiento del 90 %.

El tercer tipo de turbina es debido al austriaco Víctor Kaplan que en 1912 diseñó una turbina de eje vertical y rotor en forma de hélice con palas de inclinación variable que resulta muy adecuada para saltos de baja altura y grandes caudales.

Con estos tres tipos de turbinas se han construido la mayor parte de las centrales del mundo. Hay turbinas Francis de hasta 700 MW con rodetes (como en la presa de las Tres Gargantas, ver fotos), muy similares a las de las pequeñas centrales de comienzos del siglo XX.



1.7 EL USO DEL AGUA PARA LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

La invención de la máquina de vapor supuso una modificación energética sustancial, ya que permitía disponer de mayor potencia y situar las industrias en el lugar más conveniente, sin tener que hacerlo en la proximidad de los ríos y además tener el condicionante de la variabilidad de los caudales. Ello motivó que, a lo largo del siglo XIX, se fuese sustituyendo el agua como fuente de energía por el vapor.

Sin embargo en el siglo XIX se produjo un descubrimiento energético excepcional. En 1831 Michael Faraday descubrió la inducción electromagnética, es decir que la variación del campo electromagnético que atraviesa un conductor le induce una corriente eléctrica.

Este invento, unido al descubrimiento de la corriente alterna, potenció extraordinariamente el uso de la energía del agua ya que la mejor forma de crear un campo magnético variable en un conductor es hacer girar, con una turbina, un rotor en el interior de los circuitos eléctricos del estator. Ello, unido a la facilidad de transporte de la energía eléctrica, permitía situar las centrales en los lugares en que los que podían construirse, incluso con embalses de almacenamiento de la energía potencial del agua.

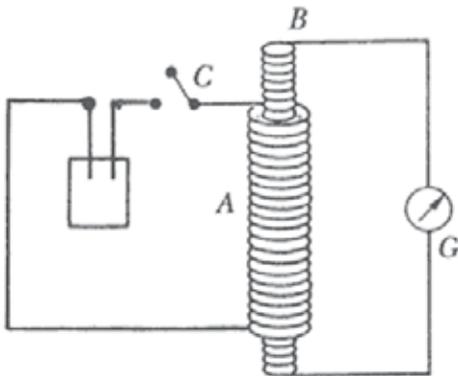
Este contexto propició que, desde finales del siglo XIX y durante todo el XX, se construyesen infinidad de centrales hidroeléctricas en todos los países. Unas utilizaban caudales fluyentes, otras contaban con embalses de acumulación. Unas se situaban a pie de presa, otras contaban con canales de derivación, y tuberías de carga hasta la central. El tipo de turbinas utilizadas depende de la altura del salto, del caudal, etc.

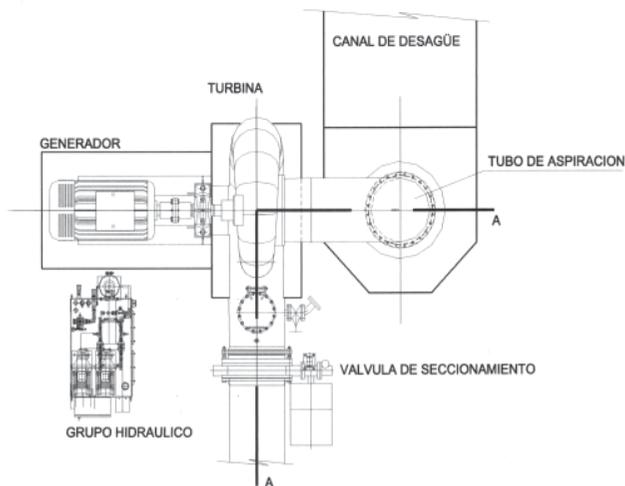
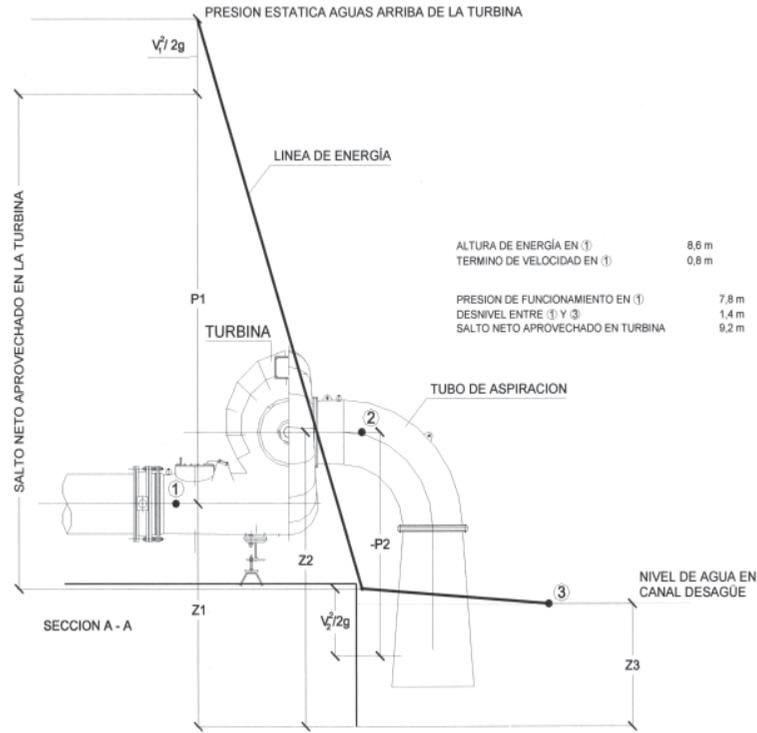
En las más antiguas la turbina, normalmente tipo Francis, se situaba debajo del nivel del agua y, mediante un eje vertical se conectaba con el generador situado por encima del nivel de las avenidas. Un ejemplo de una central de este tipo construida a principios del siglo XX puede verse en las fotos que corresponden a la antigua central de Miranda de Arga (Navarra), actualmente en ruinas. La turbina está situada en un recinto de piedra abovedado con una carga de agua de unos 2 metros. En este caso y como en la central del molino de Zubieta, antes comentado, el mecanismo de cambio de dirección del eje se hace con una rueda con dientes de madera.

Una mejora sustancial de las centrales hidroeléctricas fue situarlas en depresión. En el esquema de una central tipo, con turbina Francis puede verse que la turbina se encuentra por encima del nivel de aguas abajo y sin embargo se aprovecha el desnivel total entre las cotas de aguas arriba y de aguas abajo. De esta forma la turbina y el generador pueden estar por encima de la cota de avenidas. Aplicando la ecuación de Bernoulli a los puntos de aguas arriba (1), salida de la turbina (2) y desagüe en el canal (3) puede verse como la salida de la turbina está en depresión y de esa forma se aprovecha toda la altura del salto disponible. La salida del agua de la turbina al río se hace por el tubo con el codo. Este tubo se llama de aspiración porque “aspira” el agua que esta en depresión hasta la salida que se realiza a presión atmosférica.

(en la página anterior)
Molino de regolfo.
Turbina Francis sumergida de eje vertical.
y detalle de la turbina.
Turbina Fourneyron.

Esquema del experimento de Faraday con que descubrió la inducción electromagnética.
Turbina de eje vertical, rueda de la polea y regulador.

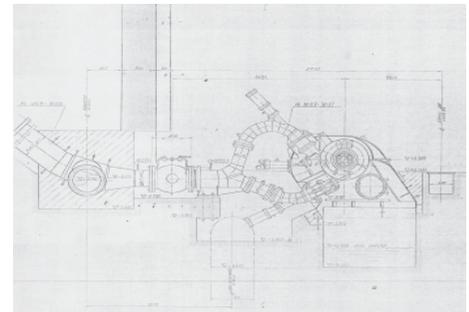




Croquis de central con turbina sobre la cota de salida.

Detalle de la rueda Pelton.

Turbina actual de la central de Almádoz y plano de detalle.



1.8 EVOLUCIÓN DE LAS CENTRALES HIDROLÉCTRICAS

Vamos a describir el desarrollo de las centrales hidroeléctricas, de sus diferentes tipos, a lo largo del tiempo.

CENTRALES DE LA PRIMERA MITAD DEL SIGLO XX

Utilizamos planos y fotografías de centrales construidas en los ríos navarros.

En aquella época no se disponía de maquinaria de obras públicas y las obras se tenían que hacer a mano, lo que motivaba que se precisase hacer centrales de poco caudal y gran desnivel, por lo que se situaban en las cabeceras de los ríos. Como Navarra en aquella época era una provincia rural, con muy poco consumo eléctrico, parte de la energía generada se llevaba a empresas guipuzcoanas.

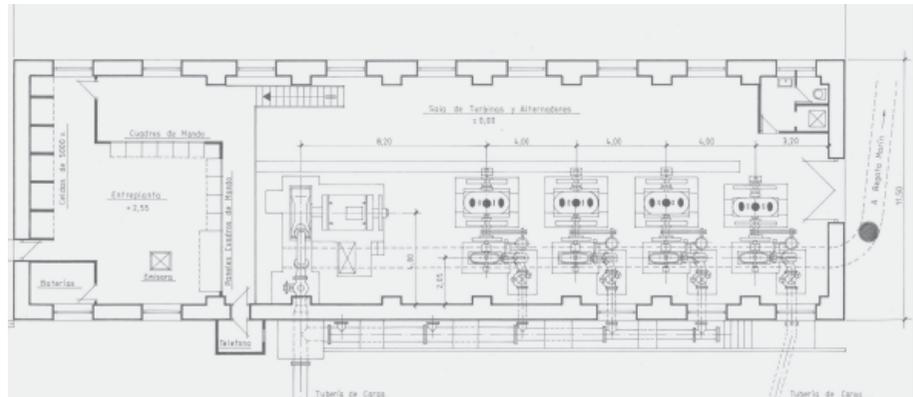
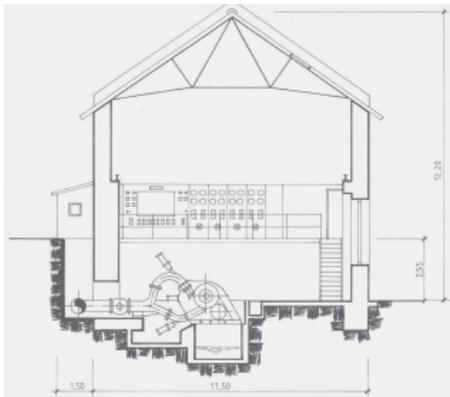
Las centrales constaban de azud de toma, canal de derivación, cámara de carga, tuberías de presión, central y desagüe al río.

CENTRALES CON TURBINAS PELTÓN

En los planos originales puede verse la planta y detalles de la central de Almándoiz, situada en un afluente del Bidasoa y que aprovecha el desnivel del paso de la cuenca mediterránea a la atlántica. Está equipada con turbinas Pelton. La turbina principal tiene 400 metros de salto con un caudal de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ y una potencia de 2.040 kW. Se construyó en 1911 y desde entonces sigue generando energía renovable, si bien en 1989 se renovó el grupo principal. En los planos y fotos se aprecia que la rueda móvil es atacada por dos chorros.

En la siguiente figura puede verse el detalle de una rueda Pelton, que como ya hemos indicado tiene los álabes divididos en dos mitades a fin de que consigan el cambio de sentido del chorro de agua, para dar el mejor rendimiento.

Sección transversal y planta de la central de Almándoiz.



Caracol de entrada del agua al rodete.
Mecanismo del distribuidor.
Tubo de aspiración de salida del agua del rodete.

Grupo hidroeléctrico completo con turbina, volante de inercia, generador y regulador.



CENTRALES CON TURBINAS FRANCIS

La mayor parte de las centrales de esta época tenían saltos menores de 50 metros, por lo que se proyectaron con turbinas Francis de eje horizontal, con los equipos funcionando en depresión.

Adjuntamos un plano de la central de Olaldea que corresponde a la renovación de la tubería original. Construida en el río Iratí, con un salto de 51 metros, un caudal total de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ y una potencia de 2.600 kW. En la foto actual de la central puede verse el conjunto del edificio, las tuberías de carga y el desagüe al río. Es un ejemplo típico de estas centrales, aún en funcionamiento.

Incluimos un plano de la central de Echalar. En él puede verse la planta y secciones de una típica central equipada con turbinas Francis. Como la de Olaldea consta de azud de toma, canal de derivación, tuberías de carga y central con desagüe al río.

Las turbinas Francis tienen un caracol para conseguir que el agua se distribuya en toda la circunferencia del rodete, su sección se va reduciendo a medida que va pasando el agua al rodete. El paso del agua se regula con el distribuidor que actúa de modo que las revoluciones del eje sean las debidas para que el generador consiga la frecuencia de la red. En las fotos de un antiguo grupo hidroeléctrico procedente de la central de Iñarbe, en funcionamiento de 1928 a 2004, puede verse:

- Caracol para la distribución del agua a lo largo de la circunferencia, con sección que se va reduciendo.
- Ejes del distribuidor que son accionados por el regulador, para conseguir las revoluciones debidas.
- Eje principal con el volante de inercia y el generador
- Dos tubos de aspiración para la salida del agua, una vez que el agua ha atravesado el rodete
- Regulador para controlar las revoluciones de la turbina.

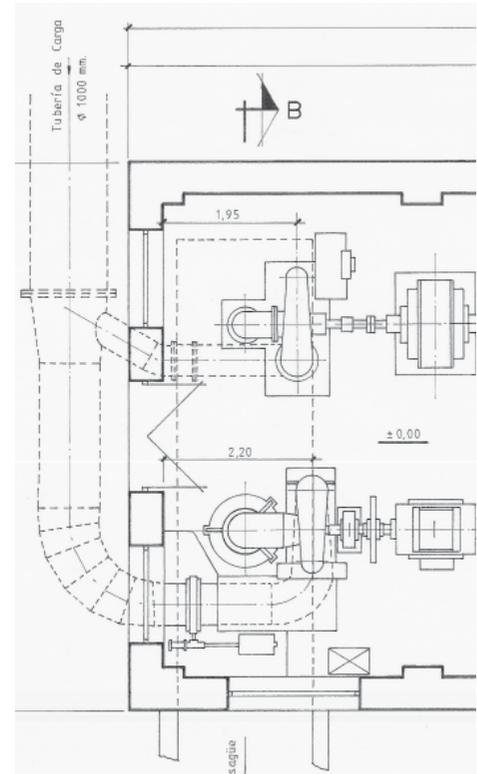
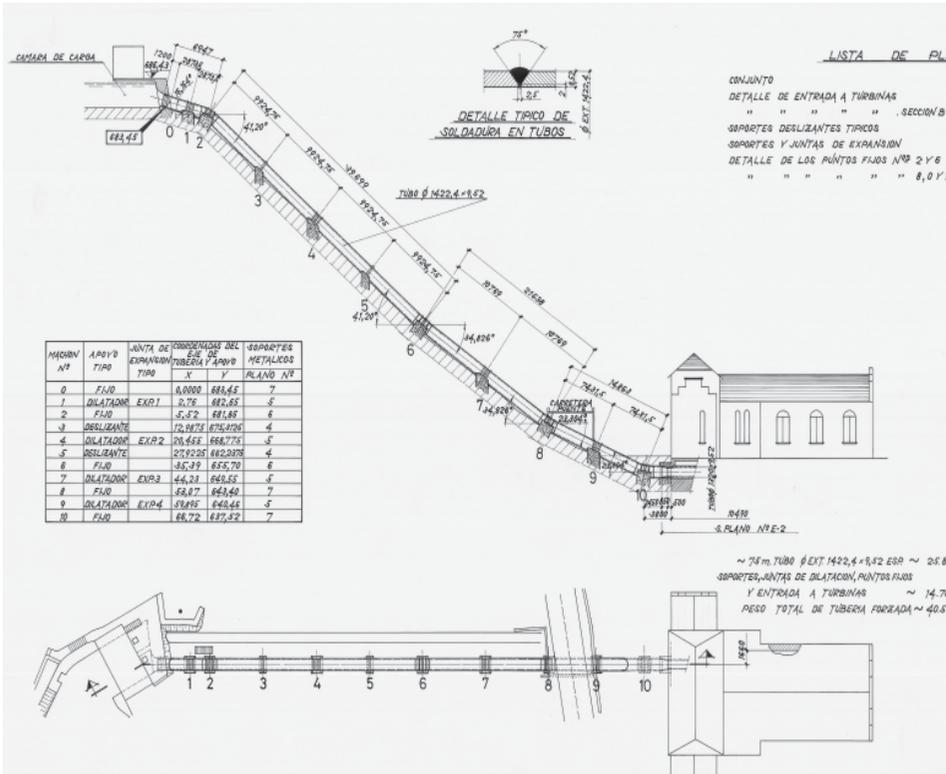
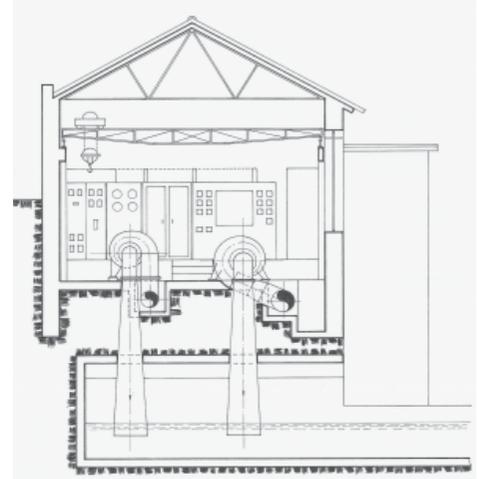


1. EL AGUA Y LA ENERGÍA



Foto de la Central de Olalde y plano de la sección de la Central de Echalar.

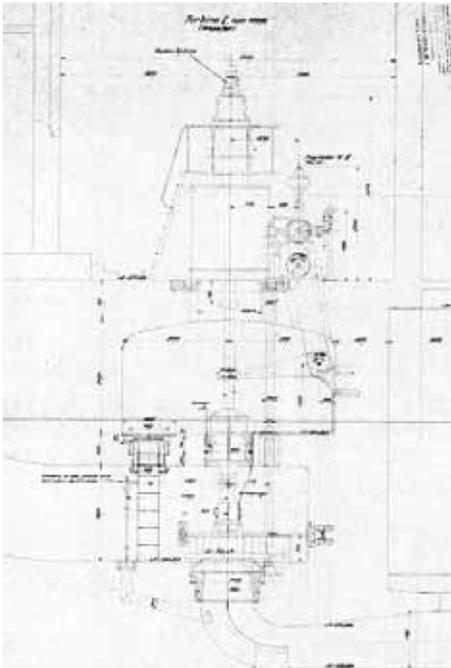
Tubería de presión de la central de Olalde y planta de la central de Echalar.



Fotografía de la presa y central de Usoz y detalle de la turbina.

Perfil de la Central de Lodosa con turbina Kaplan.

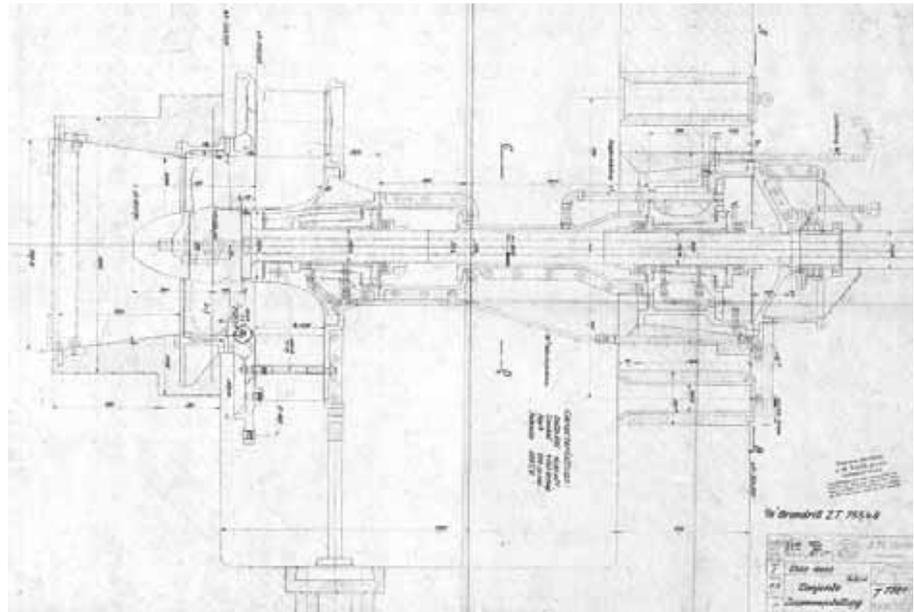
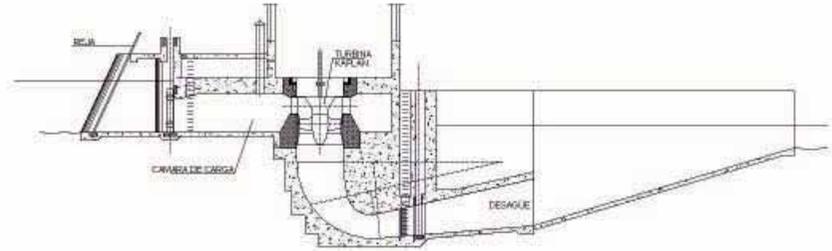
Plano original de la central de Usoz.



CENTRALES CON TURBINAS KAPLAN

En los casos de pequeño salto se proyectaban centrales con turbinas Kaplan, como es el caso de la central de Usoz, construida en 1933 en el río Iratí. Está situada a pie de presa, tiene un salto de 13,50 metros y un caudal por grupo de $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ con una potencia total de la central de 1.000 kW. Ha estado funcionando intermitentemente desde su construcción hasta el año 2004 en el que se desmanteló al ser afectada por el embalse de Itoiz (Navarra).

Recientemente se han construido en Navarra varias centrales de bajo salto y caudal importante equipadas con turbinas Kaplan. Su diseño corresponde a los planos adjuntos de la central de Lodosa, construida en el río Ebro en 1994 aprovechando el salto de una antigua presa. Consta de tres turbinas Kaplan, con un caudal total de $135 \text{ m}^3/\text{s}$ y una altura de salto de 3,09 m. La potencia total instalada es de 3.705 kW.



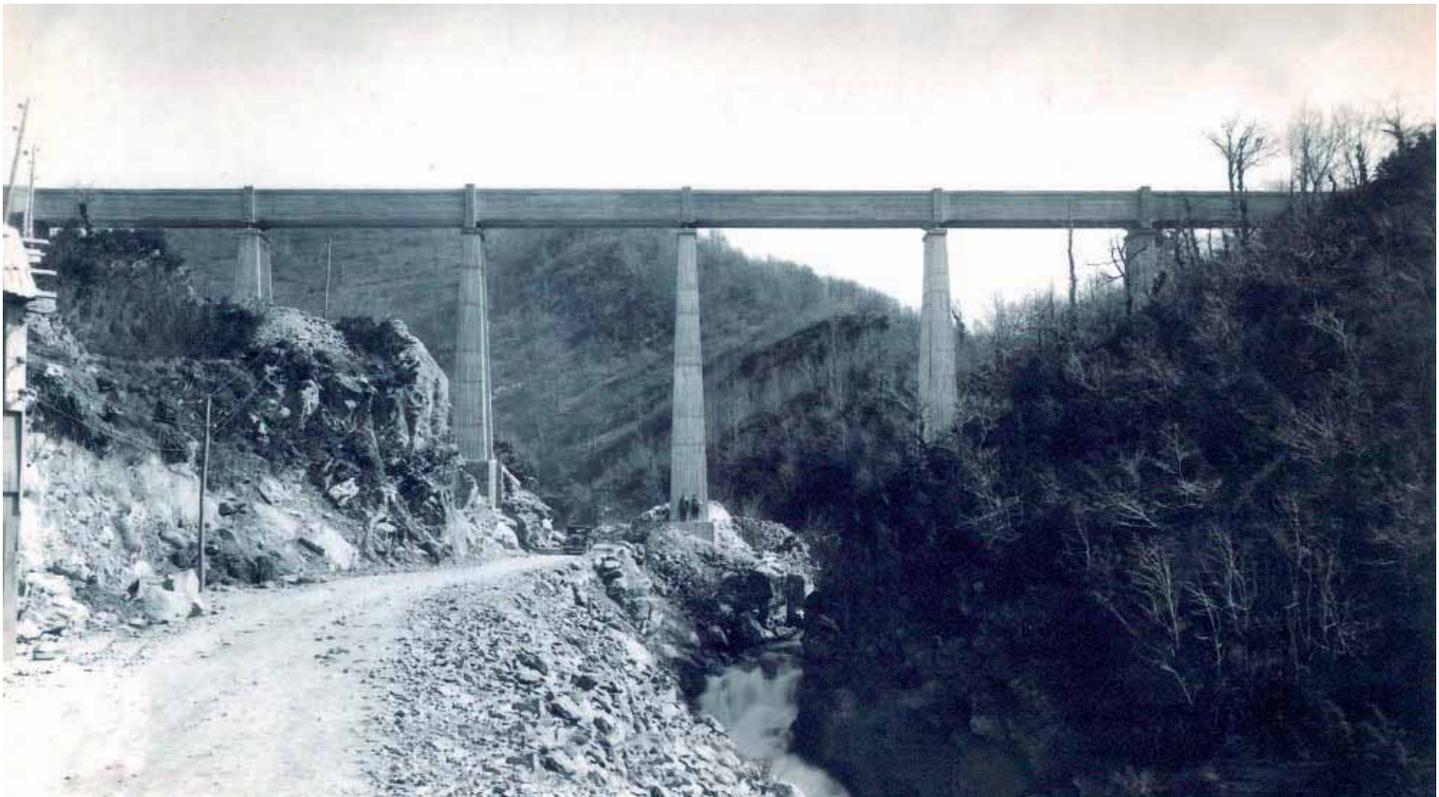
Acueducto de Alloz proyectado por E. Torroja y construido en 1939.

Fotografía antigua del acueducto de dos aguas construido en 1941.



ACUEDUCTOS EN CANALES

Los canales de derivación se construían a media ladera, pero, en ocasiones, precisaban construir acueductos como el de dos aguas en el río Iratí, construido en 1945 y todavía en perfectas condiciones de funcionamiento. Así como el excepcional de Alloz, proyectado por Torroja, que tiene un dimensionado estructural, combinando formas y pretensado, que consigue que toda la sección mojada esté en compresión longitudinal y transversal.



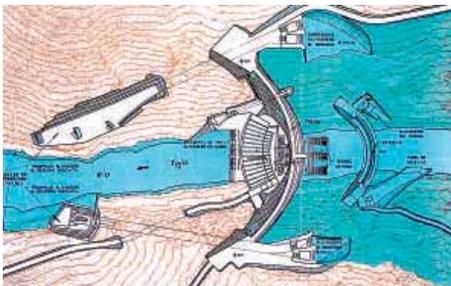
1.9 GRANDES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS ESPAÑOLAS

Durante el siglo XX se han construido las grandes centrales hidroeléctricas españolas, normalmente con embalses de acumulación de agua que permiten asegurar la producción para cuando es demandada.

En el siguiente cuadro se relacionan algunas centrales que, en el momento de su construcción, fueron singulares.

CENTRAL	RÍO	POTENCIA (MW)	PRODUCCIÓN (GWH/AÑO)	ALTURA SALTO (m)	VOLUMEN EMBALSE (Hm ³)	AÑO PUESTA EN SERVICIO
SALIME	Navia	156,0	272	134,0	266	1954
VALDECAÑAS	Tajo	225,0	375	75,0	1.446	1964
ALDEADAVILA I Y II	Duero	1.139,2	2.000	137,8	139	1963/83
ALCÁNTARA	Tajo	933,8	925	108,0	3.162	1969/70
VILLARINO	Duero	810,0	930	402,0	2.648	1970/77

Planta de la presa y central de Valdecañas.



Las centrales de Valdecañas, Villarino, y Aldeadavila II son reversibles pudiendo producir o bombear en función de las necesidades del sistema eléctrico

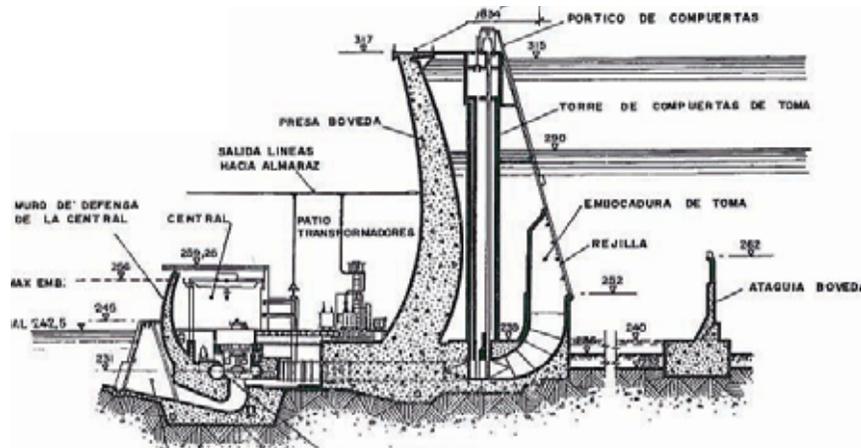
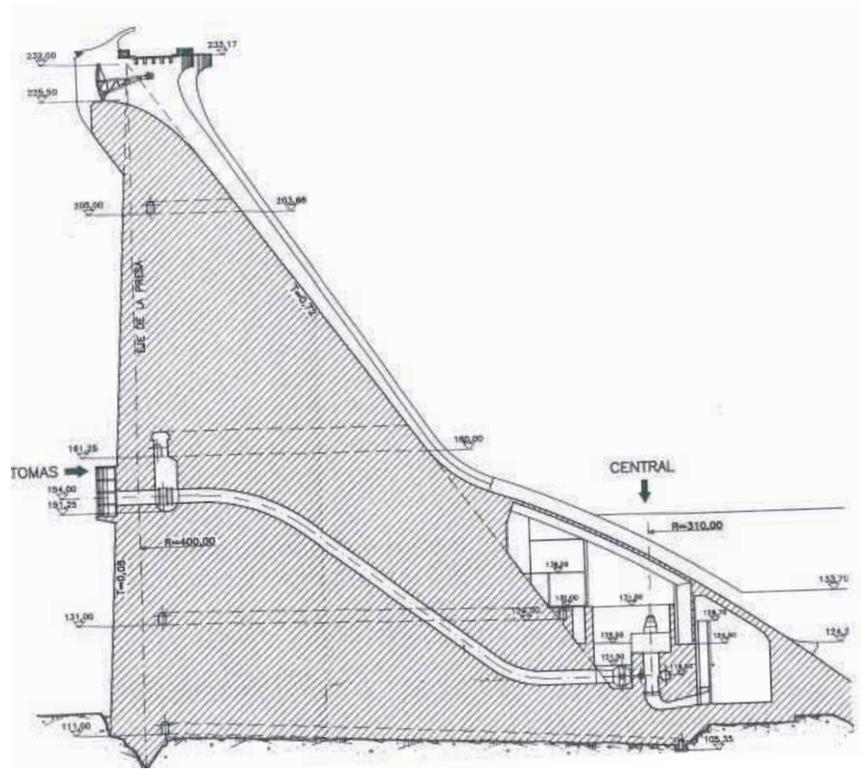
SALIME fue la presa más alta de España de su tiempo. Lo estrecho del valle motivó que la central se proyectase debajo del aliviadero de la presa de gravedad, por lo cual la parte baja del talud de aguas abajo tiene una forma singular, parece una presa embarazada por la central. Estando en la central en las grandes avenidas impresiona el ruido del agua vertiendo por encima de la cubierta.

VALDECAÑAS es una central reversible de un excepcional diseño hidráulico. La central está situada entre la gran bóveda y una contrabóveda, que limita el agua del pantano de Torrejón. La central funciona como reversible entre ambos embalses.

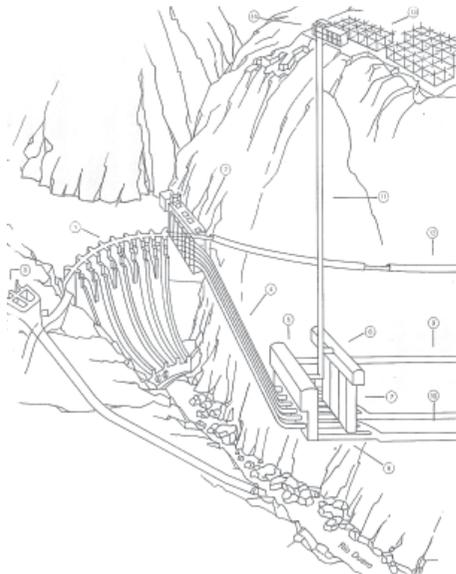
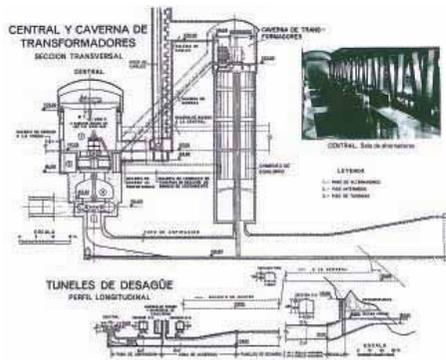
1. EL AGUA Y LA ENERGÍA

Presas de la Central de Salime y sección.

Central de Valdecañas con la presa vertiendo por el aliviadero y sección transversal del conjunto presa-central.



Sección de la central de Aldeávilla I.
Figura de la presa, la toma y la central de Aldeávilla
y foto aérea de la Presa.



ALDEADÁVILA es una presa de arco-gravedad extraordinariamente bien encajada en su emplazamiento. Es la presa de arco gravedad más alta de España y, sin duda, una de más bellas. Forma parte del conjunto de presas construidas para el aprovechamiento del Duero, que en su diseño, construcción y explotación fueron una epopeya.

ALCÁNTARA es la central hidroeléctrica española de mayor potencial. Su presa es la más alta de España de contrafuertes. Esta situada aguas arriba y muy cerca del puente romano, que casi se pone en carga en las grandes avenidas, poniéndose de manifiesto lo acertado de los estudios hidráulicos con los que, en aquel tiempo, se fijó su cota.

La central de VILLARINO toma el agua de la presa de Almendra, la más alta de España, con 202 metros. Es una central reversible de 810 MW entre el Tormes (aguas arriba) y el Duero (aguas abajo).

La construcción de estas grandes centrales ha sido un hito en la historia de la energía en España y gracias a ellas se pudo disponer de la electricidad necesaria para el desarrollo del país. Hoy día, siguen funcionando aportando energía sin contaminación, a un precio marginal muy reducido y permiten garantizar la regulación del sistema eléctrico.

Las centrales reversibles bombean en horas de poca demanda eléctrica, a precios baratos; y generan en horas punta a precios caros. Con este doble uso regulan el sistema eléctrico. Se inició su construcción con el programa nuclear para asegurar consumos nocturnos. Hoy día, permiten asegurar la potencia demandada y en los próximos años permitirán acumular la energía eventual del sector eólico.

Presas y puente de Alcántara.

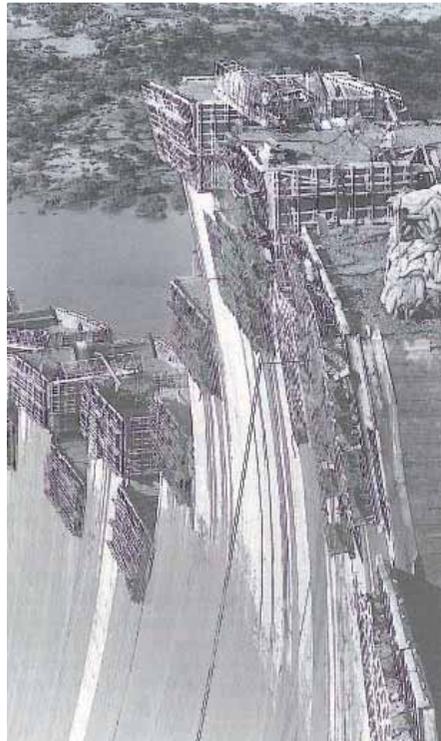
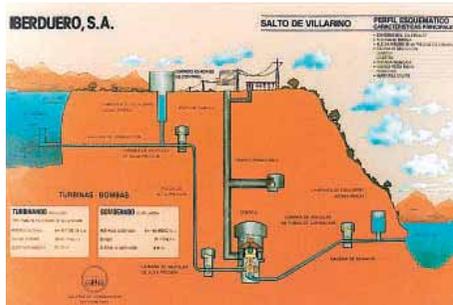
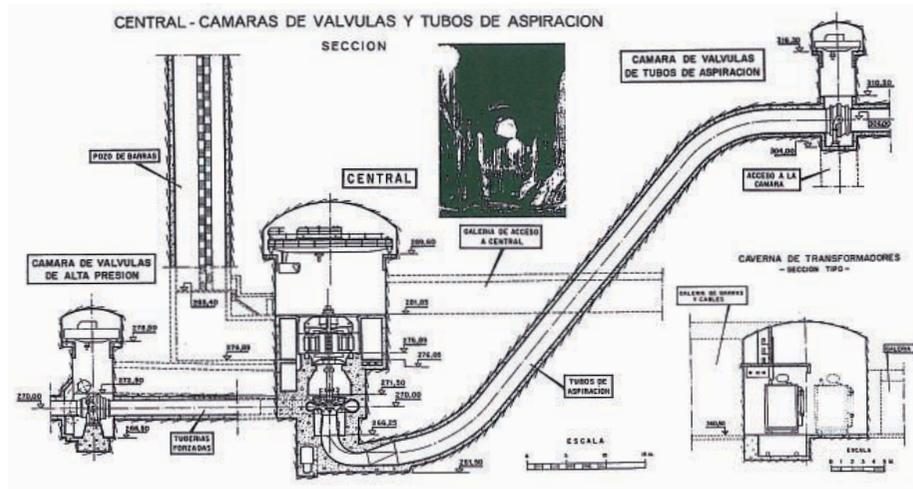


Esquema hidráulico y foto aérea del Embalse de Villarino.

Cámaras de válvulas y tubos de aspiración de la Central de Villarino.

Construcción de la bóveda de Almendra.

Caverna de la central.



La producción hidroeléctrica depende de la pluviometría, habiendo grandes variaciones de unos años a otros. A efectos informativos indicamos en el cuadro siguiente la producción del sistema eléctrico peninsular español del año 2006, según el Avance de Red Eléctrica Española.

TIPO DE ENERGÍA	POTENCIA (MW)	PRODUCCIÓN (GWh)	HORAS DE UTILIZACIÓN
HIDRÁULICA	16.657	24.761	1.487
CARBÓN	11.424	66.143	5.790
FUEL / GAS	6.647	5.841	878
NUCLEAR	7.716	60.184	7.800
CICLO COMBINADO	15.466	63.561	4.110
EÓLICA	11.100	23.063	2.078
RESTO RÉGIMEN ESPECIAL	9.280	26.840	2,892
TOTAL	78.290	261.675	3.342

En el cuadro se ha reflejado las horas de utilización de cada tipo de energía obtenidas dividiendo la producción anual por la potencia instalada. Puede verse la gran diferencia de unos tipos de energía a otros, destacando la gran utilización de las centrales nucleares.

El año 2006 fue un mal año hidráulico. En los años de fuerte pluviometría la producción puede llegar a 39.000 GWh, lo que supone 2.341 horas de utilización. Sin embargo la aportación de la energía hidroeléctrica es muy superior al porcentaje que supone sobre el total ya que su costo es más bajo que la media, y por tanto influye en el coste medio de la electricidad del país. Además, permite asegurar la potencia del sector gracias a su facilidad para adecuarse a las variaciones de la demanda eléctrica, muy superior a la de los restantes sistemas de generación, y con la enorme ventaja de que puede guardarse la energía en el agua embalsada.

1.10 GRANDES CENTRALES HIDROELÉCTRICAS MUNDIALES

A continuación vamos a relacionar algunas de las grandes centrales construidas en el mundo, cuyas dimensiones son de una escala muy superior a la mayor española.

CENTRAL	RÍO	POTENCIA (MW)	PRODUCCIÓN (GWH/AÑO)	ALTURA SALTO (m)	VOLUMEN EMBALSE (Hm ³)	AÑO PUESTA EN SERVICIO
HOOVER	Colorado	2.080		221	35.200	1936
ASUAN	Nilo	2.100	10.000	111	165.000	1970
ITAIPU	Parana	12.600	71.000	196	29.000	1991
TRES GARGANTAS	Yaangtze	18.200	84.680	185	39.300	2004

La presa de HOOVER, en el río Colorado, en Estados Unidos, fue un record para su época. Se construyó en los años de la depresión (1931/1936), superando infinidad de dificultades debidas al clima extremado, a lo aislado de su emplazamiento, a los volúmenes de obra, etc.

Ni la central ni la presa de ASUAN son especialmente grandes, sin embargo su embalse es más del triple que todos los embalses españoles juntos.

La central de ITAIPU, en el río Parana, entre Brasil y Paraguay tiene una potencia mayor del 75 % de todas las españolas y su producción es de casi tres veces el total hidroeléctrico generado en España.

La presa de las TRES GARGANTAS, recientemente inaugurada en China, es la central hidroeléctrica de mayor potencia del mundo. Su producción equivale a 33 % de todo el consumo eléctrico español

Las presas reseñadas en este apartado están en América, África y Asia. Sus dimensiones son de otra escala respecto a las españolas y ponen de manifiesto lo limitado, en este tema como en tantos otros, de nuestro país.

Embalse de Asuan.



A fin de dar una idea de lo que representa a nivel mundial la energía hidroeléctrica, en el siguiente cuadro indicamos los datos del World Energy Outlook de 2006 de la International Energy Agency. Todos los valores indicados corresponden al año 2004 y se refieren a los totales mundiales:

TIPO DE ENERGÍA	POTENCIA (MW)	PRODUCCIÓN (GWh)	HORAS DE UTILIZACIÓN
HIDRÁULICA	851.000	2.809.000	3.301
CARBÓN	1.235.000	6.917.000	5.601
GAS	1.055.000	3.412.000	3.234
FUEL	453.000	1.161.000	2.563
NUCLEAR	364.000	2.740.000	7.527
EÓLICA	48.000	82.000	1.708
BIOMASA Y RESIDUOS	36.000	227.000	6.306
SOLAR	4.000	4.000	1.000
GEOTÉRMICA	8.000	56.000	7.000
OTRAS RENOVABLES	96.000	369.000	3.843
TOTAL	4.054.000	17.408.000	4.294

Construcción del caracol de una turbina.

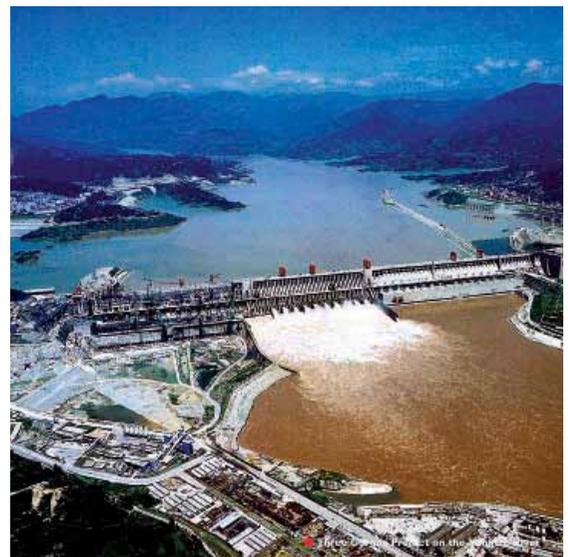
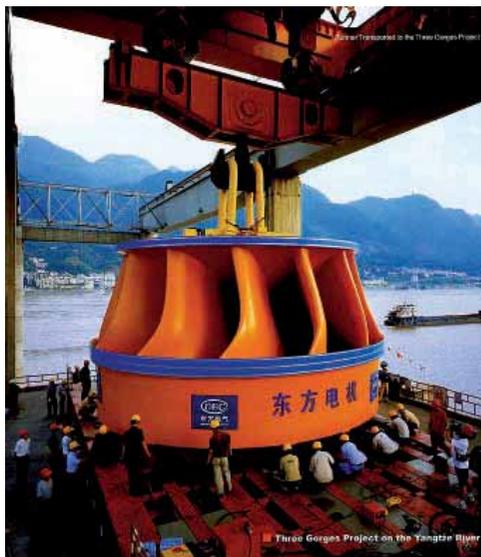
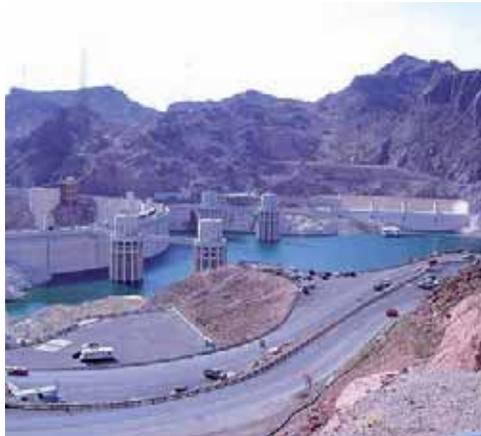
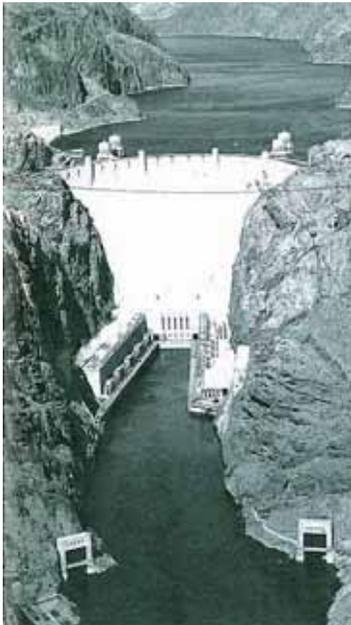


Hemos utilizado las mismas unidades que en el cuadro anterior para que sea fácil la comparación con los datos españoles. Casi todos son de otro orden de magnitud salvo la energía eólica en la que España tiene el 23 % del total mundial

Llama la atención el mayor número de horas de utilización del total de la potencia y sobre todo de la energía hidráulica y del las centrales de fuel. En las de carbón y nucleares la situación es muy similar y en la eólica se aprecia un mejor rendimiento de las centrales españolas, lo que justifica su gran desarrollo.

Presa Hoover, desde aguas abajo y desde aguas arriba. Presa de Itaipu.

Interior del caracol de una turbina. Caracol de una turbina terminado. Rodete Francis de una turbina. Presa de Tres Gargantas.



1.11 AFECCIONES AMBIENTALES

Como todas las obras humanas, la construcción de centrales hidroeléctricas supone una alteración del medio natural. Alteración que, normalmente, será tanto mayor cuanto más importante sea la central correspondiente. Puede haber molinos de poco salto e incluso sin canal en los que la afección es mínima y grandes centrales, como la Presa de las Tres Gargantas que han inundado extensísimas zonas habiendo obligado al desplazamiento de millones de personas. Como en todas las actividades hay ambientalmente aspectos positivos y aspectos negativos, que habrá que cuantificar en cada caso, a fin de adoptar la resolución que se considere.

En todo lo sucesivo nos vamos a referir a España, simplemente por ser el país del que tenemos más información y por lo que creemos que nuestras opiniones serán de mayor interés.

NECESIDAD DE REGULACIÓN DE LOS RÍOS

Durante muchos años, al menos en España, se han construido grandes presas, con embalses importantes, que hoy día serían muy difíciles de promover y que sin embargo son la base del desarrollo actual, tanto energético como agrícola e incluso imprescindibles para el abastecimiento urbano. En estas condiciones el tema de las afecciones es especialmente complejo, habiendo opiniones totalmente contradictorias entre los diferentes grupos que intervienen en estos temas.

A continuación vamos a detallar nuestro punto de vista, indudablemente subjetivo, y que, aunque hoy no esté de moda creemos que es importante resaltarlo en contra de lo que, en nuestra opinión, son mesianismos generalizados que están en contra de las actuaciones en los ríos.

Actualmente está de moda, incluso recogido en la Directiva Marco del Agua 2000/60 (por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas), el criterio que lo bueno es lo natural y que las alteraciones del régimen natural son malas y peligrosas, por lo que se debe retornar a un mundo ruossoniano en que los ríos circulen de modo natural como lo hacían antes de la aparición del hombre y sus actuaciones hidrológicas.

Resulta especialmente grave el carácter normativo de la citada Directiva que, como en muchos otros casos se ha redactado de modo genérico para todo el territorio comunitario, sin diferenciar adecuadamente las evidentes diferencias que, en temas hidrológicos, hay de unos países a otros y cuya aplicación literal, especialmente si se realiza por personas con ideas preconcebidas, puede ser, en nuestra opinión, extraordinariamente peligrosa.

En primer lugar es muy importante destacar el carácter torrencial de la casi totalidad de los ríos españoles, que tienen caudales de estiaje ínfimos e incluso nulos. Un ejemplo representativo puede ser la cuenca mediterránea de Navarra en la que, con aportaciones medias anuales muy importantes, de 3.524 Hm^3 (equivalentes a un caudal medio $112 \text{ m}^3/\text{s}$) el caudal de estiaje, en años medios es de sólo $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$, que incluso sería de menos de la mitad en años secos. Es decir totalmente insuficiente para incluso el suministro urbano e industrial y por supuesto sin regar ninguna hectárea. Pues bien frente a este dato objetivo hay muchas personas que, apoyándose en su interpretación de la citada Directiva, están en contra no ya de conseguir mediante nuevos embalses la regulación de la aportación, sino que incluso cuestionan los existentes, cuando en realidad se limitan a 720 Hm^3 , que suponen el 20,4 % de la aportación media anual, es decir mucho menos que la media nacional española del 50 %. El caso de Navarra es singular en el sentido de que si se toman medidas adecuadas se puede tener toda el agua que se pueda necesitar en la Comunidad Foral, sin embargo hay otras regiones de España en las que no se da esta circunstancia y que para tener un suministro adecuado precisan que se hagan trasvases desde zonas con excedentes.

En este régimen torrencial de los ríos resulta, en nuestra opinión, totalmente fuera de lugar el que se cuestione la regulación y que el indicador de muy buen estado hidrológico de los ríos, indicado en la Directiva, sea “el caudal y la hidrodinámica del río y la conexión resultante a aguas subterráneas reflejan total o casi totalmente las condiciones inalteradas.”

Si queremos vivir en España se precisa, por encima de casi todo, la regulación de los ríos. Este problema es tan antiguo que hay presas romanas que todavía están en funcionamiento (Proserpina y Cornalvo) en la cuenca del Guadiana y Almoracid de la Cuba en la del Ebro.

Casi todas las grandes ciudades se suministran de presas. Resulta especialmente llamativo el caso de Madrid, pero podríamos generalizar el tema a la totalidad de las grandes ciudades. Un caso singular es Bilbao, que bebe agua del Ebro, mediante un trasvase, tomándola de los embalses situados en el Zadorra, encima de Vitoria, en vez de regular las aportaciones de su cuenca hidrográfica, que tendría posibilidades de hacerlo, restándole agua regulada a la cabecera del Ebro y, sin embargo se cuestiona como un delito derivar excedentes del Ebro, desde cerca de la desembocadura a cuencas claramente deficitarias, sin que paradójicamente nunca salga a relucir el trasvase a Bilbao.

En este contexto en que vivimos resulta especialmente complejo exponer los problemas ambientales de las centrales hidroeléctricas. Previamente habría que aclarar algunos puntos:

1. ¿Es realmente razonable considerar como un objetivo la vuelta al estado natural de los ríos?

Llevar ese presunto objetivo a sus últimas consecuencias supone “cerrar” la mayor parte de las ciudades. En nuestra opinión es más razonable asegurar la vida de las personas garantizando el suministro para todos los usos (urbano, agrícola y energético) y ello diga lo que diga la Directiva.

2. Para asegurar la regulación de los ríos en el régimen hidrológico español, especialmente con garantía hiperanual, se precisa construir embalses de gran capacidad que, por razones, geológicas, topográficas y de afecciones, pueden emplazarse en muy pocos sitios.

En cada estudio de cada río se deben analizar esas posibilidades con independencia del destino que vaya a tener el caudal regulado. Destino que podrá ser en otra Comunidad política e incluso en otra cuenca hidrográfica. No puede admitirse que los estudios de la revisión del Plan Hidrológico, impuesta por la Directiva, ignoren este planteamiento.

3. La construcción de embalses siempre ha supuesto y seguirá suponiendo afectar a campos, edificios y, de una u otra forma, a personas.

Es evidente que se debe compensar adecuadamente a los afectados, pero no pueda admitirse que los afectados sean los que decidan si se hacen o no los grandes embalses, sería como que los alumnos fuesen los se pusiesen las notas en los exámenes.

4. Es indudable que las presas se deben construir con seguridad. No puede darse el caso de que se construyan o se mantengan presas que tengan riesgo de seguridad. Pero tampoco puede admitirse que profesionales del catastrofismo se dediquen a crear psicosis de riesgos inexistentes asustando a los vecinos de aguas debajo de las presas, y que ello se haga con absoluta impunidad y sin la menor responsabilidad.

En este sentido sería muy de desear que organismos independientes, como pudieran ser los colegios profesionales, interviniesen en el tema elaborando informes objetivos e incluso sancionando a los profesionales que hayan emitido informes que no se ajusten a la realidad.

En Navarra que, desgraciadamente, es un territorio gran abundancia de profetas que anuncian el fin del mundo cada vez que se plantea una nueva infraestructura (autopistas, embalses, vertederos, aparcamientos subterráneos, etc.) y que han conseguido demoras de las obras e importantísimos encarecimientos de las mismas, una vez terminadas y sin que nunca hayan ocurrido los riesgos anunciados su demagogia les sale gratis, sin la menor sanción. Se debiera establecer un sistema penal que castigue como delito ese tipo de actuaciones.

5. Otro tema que suele salir a relucir en los planteamientos de grandes presas es que implican la retención de arrastres con la consiguiente alteración del régimen de los ríos y, además, provocándose el aterramiento de los embalses.

Como tantos otros este un tema que hay que estudiar individualizadamente, pero baste

como ejemplo de que no es un tema general de todas las presas el que, como ya hemos indicado hay presas romanas en servicio desde hace más de 2.000 años. En Navarra, por ejemplo, el contenido de arrastres acumulados en todas las presas existentes (Irabia, Alloz, Eugui, Usoz y Yesa) es muy reducido.

AFECCIONES DE PEQUEÑAS CENTRALES

Se denomina minihidráulica a las centrales de menos de 10 MW. Dentro de esta delimitación se incluyen la casi totalidad de las centrales antiguas y bastante de las construidas en los últimos años en España.

Las centrales antiguas, como las correspondientes a las primeras fotos mostradas en el *apartado* 1.8 constaban, en general, de un pequeño azud de desviación, un canal construido a media ladera que terminaba en una cámara de carga en la que se iniciaban las tuberías que llevan el agua a presión hasta las turbinas, finalmente se conecta el desagüe de la central al río. El otro tipo, también recogido en el mismo apartado consistía en centrales situadas debajo de presas de poca altura y reducido volumen de agua. Todas ellas se situaban en las cabeceras de los ríos, en los que la pendiente es grande y pueden conseguirse desniveles importantes con longitudes pequeñas de canales. Las centrales suelen tener potencias variables entre 1.000 y 4.000 kW, con desniveles de unos 30/50 metros y caudales de 1/10 m³/s. estas centrales se hicieron hace unos 80/100 años y hoy día se encuentran totalmente integradas en el entorno, resultando difícil entender como pudieron hacerse con los medios de la época.

Hoy día, que se dispone de maquinaria de movimiento de tierras se construyen minicentrales en los tramos bajos de los ríos, con caudales muy superiores 50/200 m³/s y con saltos muy reducidos ente 2 y 10 m. Las potencias suelen ser similares, entre 1.000 y 6.000 kW.

Este tipo de centrales plantean las siguientes afecciones ambientales:

CENTRALES CON CANAL DE DERIVACIÓN

Suponen la derivación del río del caudal que se turбина, dejando un tramo con menor caudal. En estas centrales el tema ambiental más importante es definir el caudal a mantener prioritariamente en el río. Hasta ahora este caudal se llamaba caudal ecológico y se solía definir como el 10 % del caudal medio anual. Ello quiere decir que hasta que no se alcanzaba este caudal no se derivaba nada por la toma de la central. Dado que ésta tiene un caudal mínimo de arranque (que suele ser el 20 % del nominal de cada turbina) se mantenía todo el caudal por el río hasta alcanzar la suma de ambos caudales. En periodos de mayores caudales se canaliza a la central el exceso sobre esa suma hasta el nominal de la central, de modo que los caudales mayores circulan por el río.

Es indudable que esta forma de circulación es una alteración del régimen natural, pero

1. EL AGUA Y LA ENERGÍA

Escala de peces de la toma de Ecay y detalle.

Vista general de la toma para el Canal de refrigeración de la Planta de Sangüesa y detalle del canal.



lleva en funcionamiento unos 100 años, gracias a estas centrales se consiguió el desarrollo industrial de muchas regiones de España y su producción es importante (4.130 MWh en el año 2006).

Actualmente y, entre otras cosas en base a lo indicado en la Directiva Marco, se está planteado aumentar significativamente el caudal a mantener en el río dándole, además, un valor variable a lo largo del año, de modo que se reproduzca, en cierta forma, el régimen natural. El tema es difícil, hay muchos ríos con regulaciones de presas que alteran el caudal de estiaje, hay muchos derechos adquiridos por los propietarios de centrales que dificultarán la puesta en marcha de un tema, por otra parte nada fácil de cuantificar y discutible en un mundo tan diferente del natural como el hidrológico actual.

El mantenimiento del caudal ecológico en el río obliga a disponer de sistemas automáticos que aseguren la prioridad del mismo frente al derivado para las centrales. El sistema es fácil de automatizar, construyendo una escotadura en el azud que garantice el caudal mínimo establecido cuando el nivel de agua enrasa con la coronación del azud e instalando un autómatas que regula la posición de la compuerta de la toma para mantener, como mínimo el nivel de la coronación del azud, tal como se aprecia en la foto de la toma del Canal de Refrigeración de la Planta de Sangüesa, en el río Iratí (Navarra). Puede verse la toma del canal, el vertido sobre el azud, las compuertas para vaciado del azud y la sonda de control del nivel.

Agua debajo de la compuerta que regula la toma se dispone otra sonda de control para asegurar que el nivel no sobrepasa el máximo admisible en el canal. En la caseta de toma se sitúa un autómatas que, en base a la información de las dos sondas, posiciona la compuerta del canal dando prioridad a que se mantenga el caudal ecológico en el río.

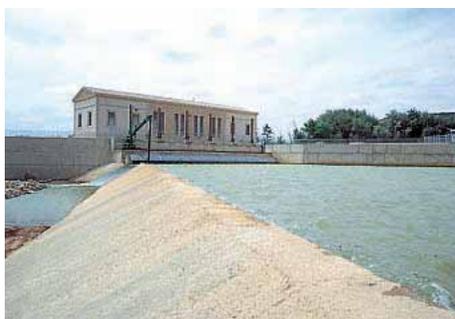
Los azudes de toma de las centrales constituyen discontinuidades en la circulación de los peces, que se suele solucionar instalando escalas de peces, que permitan que los peces migratorios puedan subirlas. Consisten en estanques con desniveles de unos 0,30 m, que salvan la altura total del azud. La pendiente media de estas escalas de peces es de un 10 %, por lo que su longitud es importante y limita la altura de azudes a los que es de aplicación. Se comprende que son inviables en presas de, por ejemplo 30 metros de altura. En las siguientes fotos puede verse la escala de peces del azud de toma de la central de Ecay en el río Iratí (Navarra), en la primera figura una vista general de la escala y en la segunda el detalle de la toma. Está construida en la margen derecha y su vertido al río se produce cerca del correspondiente a la escotadura.

Otro problema ambiental de estas centrales es evitar que animales, como gamos, ciervos, jabalíes, etc., caigan a los canales, lo que obligan a instalar cierres, pasos de animales, cubrir algunos tramos, colocar rampas de salida para animales en los canales, etc. También se deben poner dispositivos para evitar que los peces puedan llegar a las turbinas y resultar muertos.

Los temas ambientales de estas centrales se están agravando porque hay una sensación

Minicentral hidroeléctrica de Tudela.

Minicentral hidroeléctrica de Viana, vista general e interior.



generalizada de que se está reduciendo la pesca en todos los ríos. Este tema es complejo, ya que cada vez hay más pescadores, y hay muchas razones que pueden dar lugar a una reducción de las especies de pesca tradicionales, como la invasión de especies autóctonas, que acaben con las crías de truchas y madrillas, problemas de contaminación por vertidos no depurados, etc. La influencia de las centrales seguramente será reducida ya que el agravamiento de los problemas se ha producido en los últimos 30 años, es decir, mucho después de la construcción de las centrales, que, además, en aquella época, no tenían caudales ecológicos que respetar.

Se está produciendo una oposición social generalizada a este tipo de centrales, que está dando lugar a que apenas se construyan a pesar del potencial hidrológico disponible en muchos ríos ya que los Departamentos de Medio Ambiente de las Comunidades Autónomas deniegan sistemáticamente las aprobaciones, alegando razones, en muchos casos tan peregrinas, como que hay posibilidades eólicas importantes sin explotar, como si una cosa tuviese que ver con la otra. Y desde luego sin considerar el interés de generar energía renovable no contaminante y crear nuevas fuentes de riqueza.

Hoy día resultaría imposible conseguir la aprobación de centrales existentes y que están totalmente integradas en el entorno. Las únicas que suelen aprobarse se encuentran en tramos bajos de ríos, con grandes caudales y reducidos saltos, que son posibles de construir por la utilización de maquinaria.

Todas estas centrales tienen muy poca altura de salto, se equipan con turbinas Kaplan y tienen potencias reducidas, de 1.000 a 6.000 kW, con saltos entre 2 y 8 metros.

CENTRALES CON PIE DE PRESA

Algunas minicentrales se proyectan a pie de presa, sin canal de derivación. En ocasiones, se sitúan en azudes existentes para tomas de riego y en otras se construyen azudes específicos para este fin.

En el primer caso la afección ambiental de la central es nula, porque ya existía el azud y se mantiene el punto de vertido sin haber producido ninguna alteración en el cauce. En estos casos el caudal ecológico puede ser turbinado, así como el excedente sobre el de riego. Existen bastantes centrales de este tipo, en los azudes de tomas de riego de ríos como el Ebro, en algunos casos había centrales antiguas de caudales muy reducidos que se han modernizado ampliando el caudal turbinado.

En otros casos se construye el azud o la presa para este único fin. Tal es el caso de la central de Uzo comentada en el apartado 1.8.1 y construida en 1933. Recientemente se han construido algunas de este tipo, como la de Sarriá en el río Arga en Navarra, con un caudal de 70 m³/s, un salto de 6,00 m y una potencia de 3.700 kw. Estas centrales se sitúan en un lado del azud, que asegura la evacuación de las avenidas.

En las centrales situadas a pie de azud no hay tramos de río con menos caudal, pero sí

se altera el régimen de funcionamiento hidrológico del río sustituyendo un tramo en que el agua discurría con velocidad por otro en el que está remansada. Esta alteración da lugar a cambios en las condiciones de vida de los peces de la zona, que pueden modificar las especies del tramo de río afectado. Normalmente y porque los azudes son de poca altura se suelen construir escalas de peces que faciliten el paso de los peces a través del azud. Actualmente los Departamentos de Medio Ambiente también son contrarios a las centrales de este tipo y prácticamente tampoco se construyen.

La falta de aprobaciones ambientales se traduce en que no se cumplen las previsiones de los planes energéticos. Así para el periodo 1999/2004 se instalaron únicamente 239,2 MW muy por debajo de las proyecciones.

AFECCIONES DE GRANDES CENTRALES

Las grandes centrales requieren la construcción de grandes presas. Actualmente no se promueven para fines exclusivamente hidroeléctricos. Basta con ver que la potencia instalada en el sistema eléctrico peninsular apenas ha variada en los últimos años, como se aprecia en el siguiente cuadro:

AÑO	POTENCIA INSTALADA (MW)
2000	16.524
2001	16.586
2002	16.586
2003	16.657
2004	16.657
2005	16.657
2006	16.657

Los embalses que se promueven se hacen por necesidades de abastecimiento, riego, laminación de avenidas, etc. Una vez aprobados para estos fines se equipan con centrales condicionadas por los puntos de vertido de los caudales regulados, normalmente, la toma de los canales de derivación y los puntos de vertido de caudales ecológicos al río. Se comprende que, en todos estos casos, no existen afecciones debidas a las centrales que no condicionan ni la construcción de los embalses, ni el régimen de explotación de los mismos.

Hemos expuesto la necesidad de regulación de los ríos y la consiguiente construcción de embalses, indicando los puntos más señalados de los mismos. Únicamente queremos añadir la conveniencia de analizar la construcción de centrales reversibles, entre dos embalses, que permitan almacenar energía en forma de agua en el embalse superior para poder generar energía eléctrica eventual, por ejemplo eólica, y conseguir el aprovechamiento real de las energías renovables.

Debiera promoverse un estudio de soluciones de este tipo, sin el cual las fuentes renovables, normalmente sin garantía de potencia, no podrán ser una alternativa energética adecuada. Se debiera repetir el planteamiento, comentado en el *apartado* 1.9, de centrales reversibles impulsado en su día para conseguir la regulación del sector nuclear.

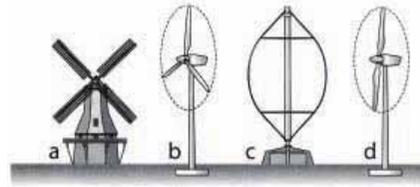
Estas soluciones requieren la utilización de dos embalses próximos, pero a diferente cota, de los que el inferior suele ser existente y se completa la instalación con otro situado cerca y lo más alto posible. Las obras consisten en el embalse superior, las tuberías de conexión, la central de generación/bombeo y la línea de evacuación. Se trata de grandes proyectos en lo que se deben analizar todos los aspectos, técnicos, ambientales, económicos, sociales y de garantía de suministro eléctrico.

Hasta el momento las energías renovables se incorporan al sistema eléctrico con prioridad de entrada en la red y con un precio primado, para que tengan viabilidad económica. Si se quiere realmente potenciar las energías renovables habrá que asegurar la potencia generada con soluciones como los embalses reversibles. Su rendimiento es del orden del 60 % y además se deben construir las obras complementarias. Es decir, para vender a la red el 60 % de la producción además se requieren nuevas e importantes inversiones. Ello pone de manifiesto el costo real de las energías renovables, que indudablemente se deben potenciar pero siendo conscientes de todos sus costos. Esa necesidad es una razón para potenciar estas soluciones que debe ser contemplada entre las afecciones ambientales positivas de estas obras.

LA ENERGÍA DE LOS FLUIDOS



2 . E L V I E N T O Y L A E N E R G Í A



- 2.1 LA NAVEGACIÓN A VELA
- 2.2 LOS MOLINOS DE VIENTO TRADICIONALES
- 2.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA ENERGÍA EÓLICA
- 2.4 DESARROLLO DE LOS AEROGENERADORES DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA
- 2.5 AEROGENERADORES ACTUALES
- 2.6 TORRES DE HORMIGÓN
- 2.7 IMPORTANCIA DEL SECTOR EÓLICO
- 2.8 FALTA DE GARANTÍA DE LA ENERGÍA EÓLICA
- 2.9 AFECCIONES AMBIENTALES
- 2.10 LA ENERGÍA EÓLICA “OFF-SHORE”

2. EL VIENTO Y LA ENERGÍA

Barco egipcio.

Reproducción de barco griego.

Galera la "Real" de don Juan de Austria.

Carraca.

Reproducción de barco romano. (derecha)



El viento ha sido, con el agua, una fuente de energía usada desde la antigüedad, y que actualmente, ha recobrado un protagonismo que había perdido. Su utilización es muy intuitiva, todos hemos sentido, en días de viento, su fuerza; sin embargo su aprovechamiento energético ha sido, y lo sigue siendo, complejo. En los apartados siguientes vamos a describir como ha sido su desarrollo.

2.1 LA NAVEGACIÓN A VELA

La navegación a vela es la forma más antigua del aprovechamiento del viento como fuente de energía. Existen grabados egipcios con embarcaciones con velas y en la tumba de Tutankhamon se encontró una reproducción de un velero real.

También hubo barcos con velas en la Grecia antigua y en el Imperio Romano. Sin embargo, hasta bien entrado el siglo XVI los barcos se movían combinando la fuerza del viento con la acción de los remeros. Así en la batalla de Lepanto (1571) las galeras de las dos armadas se enfrentaron movidas por el esfuerzo de los galeotes, tal como puede verse en la reproducción de la galera capitana de D. Juan de Austria existente en las Atarazanas de Barcelona.

Algo antes, a finales del siglo XV, ya había barcos estrictamente de vela, como las naves con las que Colón descubrió América. Ha habido barcos de vela de diferentes tipos y tamaños, con un mayor o menor número de palos (de aquí el refrán que cada palo aguante su vela), con diferentes tipos de velas, etc.



2. EL VIENTO Y LA ENERGÍA

Así surgieron la carraca (seguramente la Santa María de Colón era una carraca), la carabela (como la Pinta y la Niña), los galeones (famosos por las flotas que unían a España con los territorios de ultramar).

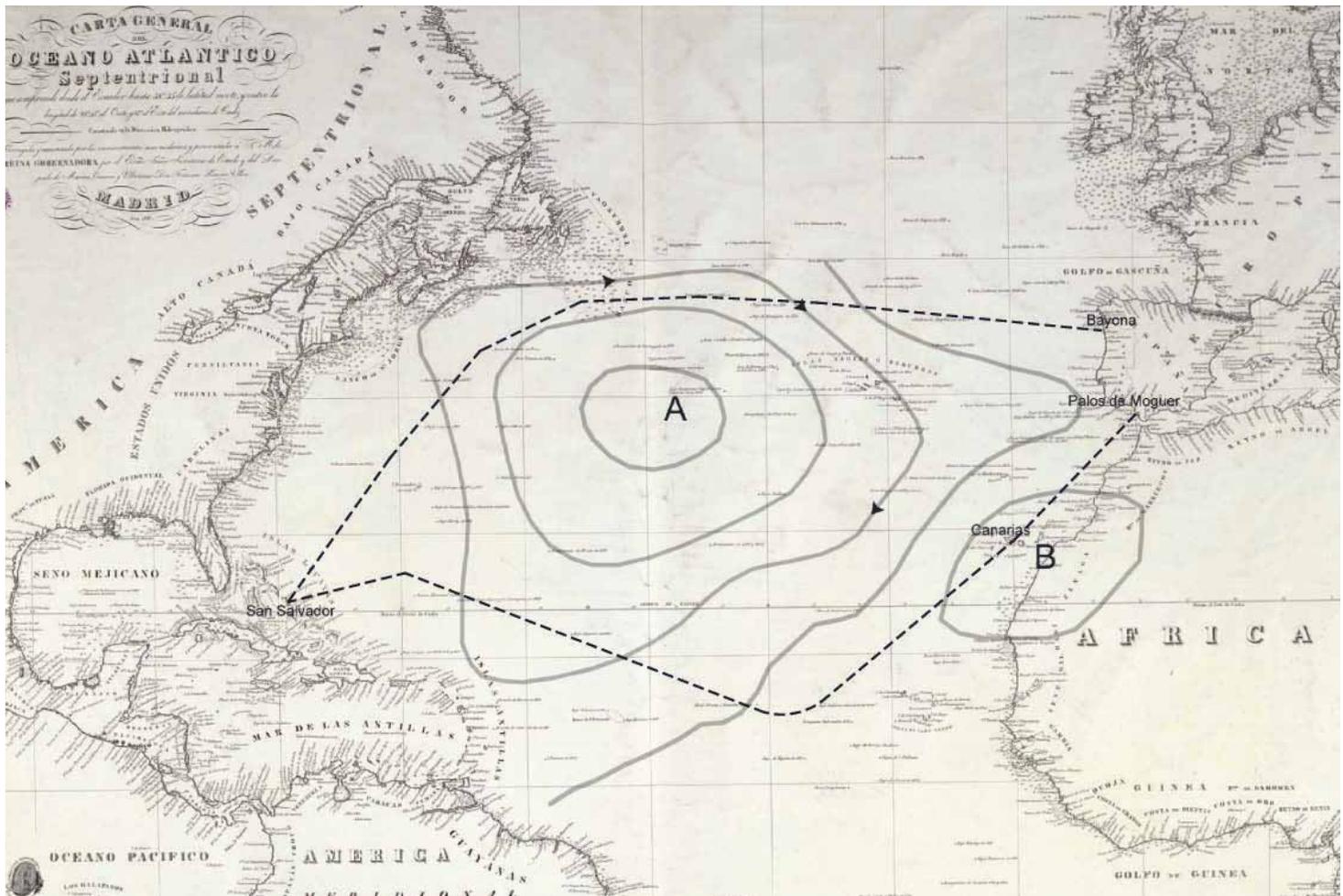
En esa época los veleros podían navegar exclusivamente cuando el viento incidía total o aproximadamente sobre la popa de la embarcación.

Los barcos de Cristóbal Colón tenían velas de estas características, llamadas cuadras, y pudieron hacer el viaje del Descubrimiento porque tuvieron, tanto a la ida como a la vuelta, el viento siempre de popa, gracias a que el anticiclón de las Azores produce circulaciones de aire que, como se ve en el esquema facilitan la navegación, siempre que se elija la trayectoria apropiada. La circulación del aire, producida por la fuerza de Coriolis, hace girar el viento en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte.

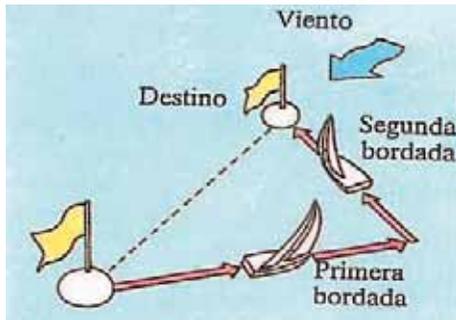
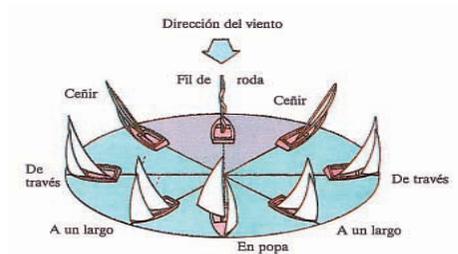
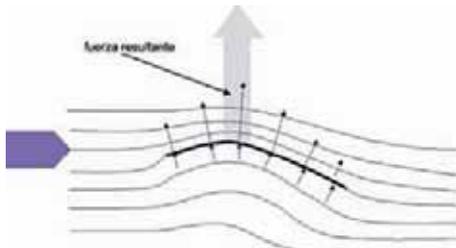
Navío Santísima Trinidad.
Galeón.



Carta General del Océano Atlántico Septentrional.



Fuerzas desarrolladas por la vela en el flujo laminar.
Viento.
Yate Alinghi, Copa América.



El viento que aprovechó Colón implicaba que la trayectoria de ida fuese muy diferente de la de vuelta. A la ida pasaron por Canarias y al volver una de las naves arribó a Bayona (Galicia) y la otra, con Colón, a Portugal. En Bayona hay una lápida, en recuerdo de la arribada, que dice:

A la noble villa de Bayona, la antigua Erizana
Le cupo la honra de ser la primera en anunciar
por asombro del mundo, el descubrimiento de América

Aquí arribó, al alborear Marzo, y en el año de Gracia de 1493
Martín Alonso Pinzón, al mando de la carabela La Pinta
Maltrecha la nao por los temporales, pero no los corazones

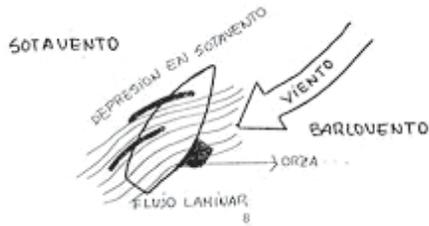
La siguiente evolución de los barcos de vela fueron los galeones, famosos por las flotas que unían a España con los territorios de ultramar, que también contaban con velas cuadradas.

En el siglo XVII se inició la construcción de los navíos de línea hasta con tres pisos de cañones.

Los barcos de vela fueron evolucionando, desarrollando técnicas de funcionamiento que aprovechaban como en la hidráulica, en la aviación y en los aerogeneradores, las propiedades de los fluidos y que comentaremos más adelante. Para ello fueron cambiando las formas de las velas consiguiendo poder avanzar en ángulos muy variables respecto a la dirección del viento y no solamente con el viento en popa. En la foto de los yates de la Copa América puede verse la forma que tienen las velas para poder avanzar en casi cualquier dirección.

La explicación aerodinámica del fenómeno puede verse en los dibujos. En el primero se ve la concentración de líneas de corriente que produce una vela expuesta al viento con un determinado ángulo. Se origina una fuerza, similar al empuje aerodinámico sobre las alas, que comentamos en el apartado 2.4.1, que se aprovechará para el movimiento del barco y que permite el avance con vientos que no son de popa. El barco no vuelca porque la parte sumergida ejerce una reacción contraria que consigue la estabilidad. Esta fuerza permite a los barcos navegar, con una gran variedad de ángulos con respecto al viento. Como puede verse en el dibujo, el único rumbo que no puede tomar la embarcación es aquel en que el viento incide por su proa con un ángulo, de aproximadamente 30 a 35 grados, variable según el tipo de embarcación. Para navegar en contra del viento la embarcación debe seguir un recorrido en zig-zag, cambiando el rumbo, a fin de dirigirse al punto buscado, tal como se indica en la figura.

Esquema viento
Clipper Cutty Sark.
Juan Sebastián Elcano.
Goleta América.



Para cambiar de rumbo se debe variar la posición de las velas, éstas se mantendrán muy tensas y planas en ángulos reducidos y se irán abriendo a medida que el ángulo, con respecto al viento, vaya siendo mayor, hasta llegar al viento de popa, en que las velas se abrirán completamente convirtiéndolas en lo más parecido posible a las velas fijas de los primeros navegantes. Como dice la Canción del Pirata “viento en popa, a toda vela, no corta el mar sino vuela un velero bergantín...” (Espronceda, 1840).

Con ángulos reducidos es posible remontar el viento. Si entendemos por barlovento el lugar del que viene el viento y por sotavento el lugar hacia el que va el viento, aplicaremos, en una embarcación el símil del avión, que comentamos en el apartado 2.4, de la siguiente manera: en las velas entra por la parte de barlovento un flujo laminar que producirá la fuerza equivalente a la de sustentación de la parte baja del ala del avión. El velero avanza, no obstante menos por ese motivo que por la depresión que se forma en la parte de sotavento de la vela y que succiona al barco lateralmente, o sea, hacia sotavento, esta fuerza equivale a la de sustentación que se produce sobre las alas de los aviones. La dirección a seguir por el barco éste es hacia delante, ya que toda embarcación a vela tiene una quilla, también llamada orza, que establece una fuerza antideriva. El conjunto de todas las fuerzas da lugar al avance del barco.



Además al tener el barco dos velas, el flujo laminar de barlovento de la vela situada más a proa favorece la depresión de sotavento de la vela situada más a popa, produciéndose un efecto de tubo Venturi. Con ángulos bajos respecto al viento el sistema indicado actúa como único impulsor, a medida que se va abriendo el ángulo con respecto al viento, cambiando de rumbo, este sistema va transformándose en empuje hasta la situación de viento de popa, donde navegaremos exclusivamente debido a esta última fuerza.

La embarcación hallará su máxima velocidad a un rumbo que se situará, según el tipo de barco, en un determinado ángulo, en el que se tiene el máximo de la suma de ambas fuerzas, la de empuje y la denominada como flujo laminar.

A lo largo del tiempo ha habido numeroso tipos de barcos de vela, bergantines, corbetas, fragatas, clíppers, etc., en lo que cada vez el velamen tiene más desarrollo vertical, con mas palos y de mayor altura, y con 4 ó más velas por palo, y que ha ido desarrollando la forma de optimizar el movimiento del barco en cualquier dirección respecto al viento.

En el siglo XIX empezaron los barcos a vapor, inicialmente combinando los motores con las velas, aunque todavía siguen en servicio auténticos barcos de vela, bien como buques escuela de las armadas, bien como buques de placer, de pequeño o gran tamaño.

La evolución de todos estos barcos ha sido fruto de la observación del efecto del viento sobre las velas, la forma mejor de aprovecharlo, avanzando incluso contra el viento, la resistencia de los palos y sus anclajes en el interior del casco, la forma de subir y bajar las velas, etc. Su desarrollo, ajeno a esta publicación, es indudablemente un tema apasionante y refleja la lucha de la humanidad a lo largo de la historia, por mejorar el aprovechamiento de los medios naturales.

Ese desarrollo de los veleros se ha ido traduciendo en mayores velocidades y, en consecuencia, menores tiempos en las travesías oceánicas. Colón tardó 36 días en su primer viaje (del 6 de septiembre, en que salió de Canarias, al 12 de octubre de 1492, en que llegó a la primera isla americana) mientras que los grandes clippers tardaban unos 15 días en el trayecto de Londres a Nueva York, alcanzando velocidades de hasta 18 nudos.

En el desarrollo de los veleros son muy importantes las competiciones, porque suponen desafíos que fomentan el desarrollo tecnológico de nuevos diseños, nuevas velas, nuevos materiales. Entre todas destaca la Copa América, llamada así porque la goleta América ganó en 1851, en la costa de Cowes, isla de Wight, a todos los veleros del equipo inglés. En el año 2003 el yate suizo Alinghi ganó la carrera de Auckland, Nueva Zelanda. En las fotos puede verse la evolución de los veleros entre ambas regatas. Tradicionalmente la regata se celebra en la costa del país ganador de la competición anterior. Ante la falta de mares en Suiza en 2007 se ha celebrado la regata en Valencia, también ganada por el Alinghi y en la que ha podido verse el continuo cambio de la posición de las velas para conseguir el mejor avance de los barcos.

Star Clipper.



2.2 LOS MOLINOS DE VIENTO TRADICIONALES

El aprovechamiento del viento como fuente de energía requiere una tecnología más compleja que la necesaria para la utilización del agua, ya que se precisa desarrollar mecanismos que permitan la regulación y la orientación de las palas al viento. Por otra parte, la fuerza que el viento produce sobre las palas se debe al efecto de unas fuerzas de presión, nada intuitivas, que no se han conocido hasta el inicio de los estudios aerodinámicos ligados a la aviación. Todo ello unido a la irregularidad de los vientos y normalmente, a la dificultad de acceder a los lugares en que existe con potencial apropiado para su utilización, ha motivado que tanto en la antigüedad, como en los tiempos actuales, los molinos de agua y la energía hidroeléctrica se hayan anticipado al uso de los molinos de viento y a la energía eléctrica eólica.

Los primeros molinos de los que se tiene referencia concreta eran de eje vertical y se utilizaban para elevar agua o moler. Un inconveniente importante de los molinos de eje vertical es que las velas son arrastradas por el aire en media vuelta y se mueven en contra de él en la otra, con lo que, para que el momento resultante sea positivo se precisa reducir, de una u otra forma, la presión negativa del aire, usando soluciones como la de la figura de la página siguiente en la que se protege con una pared la parte del sistema que daría momento negativo.

Sin embargo, los molinos de eje horizontal presentan indudables ventajas técnicas que han motivado su generalización, tanto en otras épocas como en la actualidad, por lo que nos vamos a referir en lo sucesivo a ellos. En primer lugar hay que considerar que, en ellos, el viento actúa con momento positivo en toda la superficie de las palas enfrentada al viento.

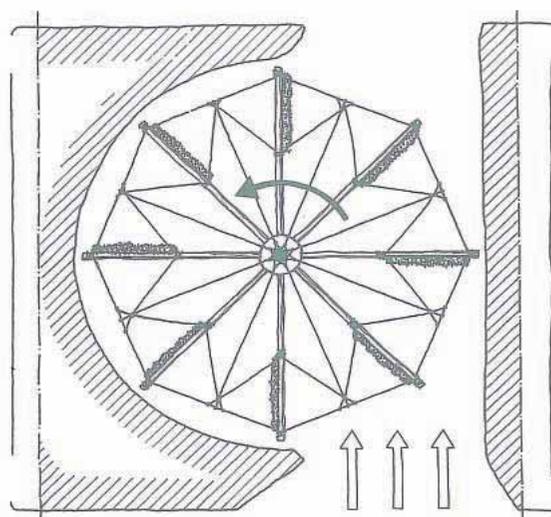
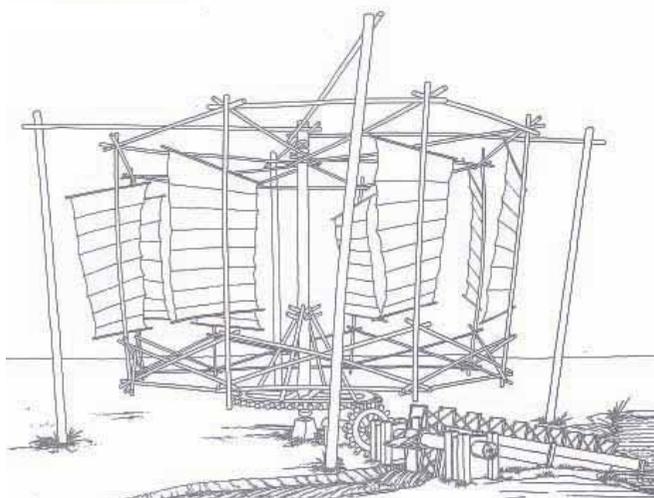
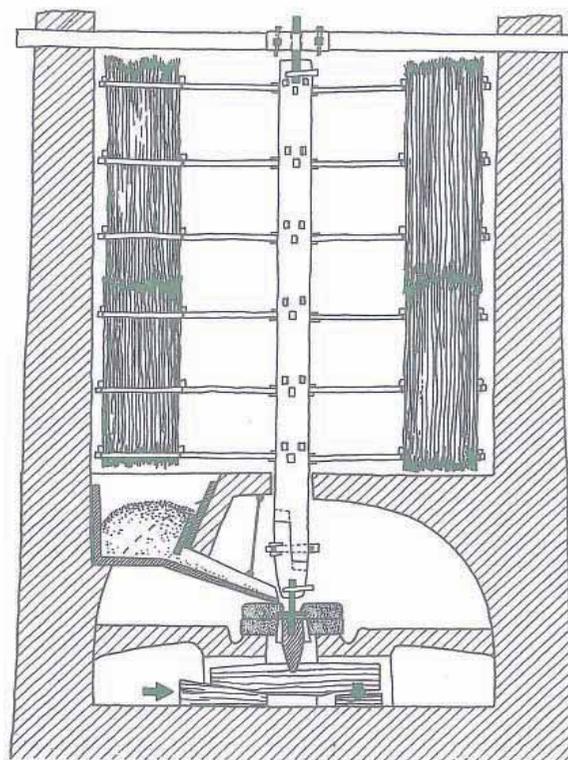
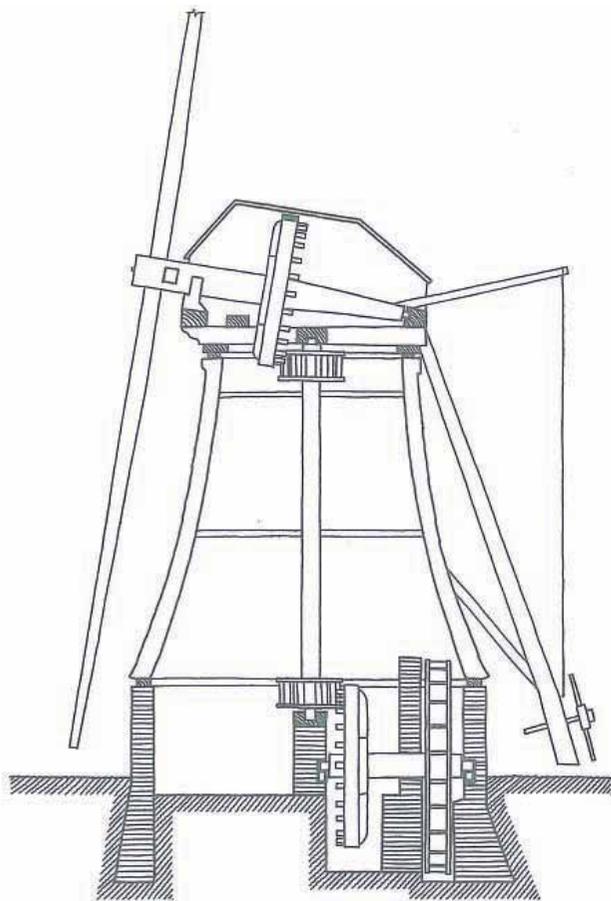
Inicialmente las aspas de los molinos se construían atando telas a los palos de las aspas, y la velocidad de giro se regulaba soltando o recogiendo velas o variando la orientación general de la parte móvil al viento.

Ha habido multitud de molinos con diferentes tipos de velas y con distintos sistemas de orientación. El mejor diseño corresponde al típico molino de moler manchego, que forma parte del paisaje de la Mancha, y que se ha hecho popular por el famoso incidente de la lucha de don Quijote con lo que él creía un gigante.

Como iremos viendo es extraordinaria la similitud de los conceptos básicos de diseño de estos molinos de los siglos XVI y XVII con los actuales aerogeneradores de producción eléctrica. Parece que los molinos de viento fueron introducidos en Europa como consecuencia del conocimiento de los mismos que tuvieron los cruzados en países del actual Oriente Medio. En Holanda se usaron desde mediados del siglo XV para bombear agua mediante el giro de un eje vertical que movía, con otros engranajes una noria, tal como se aprecia en la figura.

(en la página derecha)
 Esquema de molino holandés para bombeo.
 Alzado de molino de eje vertical.
 Perspectiva de molino de eje vertical.
 Planta de molino de eje vertical.

2. EL VIENTO Y LA ENERGÍA



Los molinos de moler se construían sobre terrenos elevados, para aprovechar el mayor viento de esos lugares. En ocasiones, como en Consuegra, se sitúan a lo largo de una cresta y en otros casos, como en Campo de Criptana se construyen en una meseta elevada sobre el territorio. En el plano de la página siguiente puede verse la sección del típico molino manchego del siglo XVI:

El funcionamiento de los molinos es el siguiente:

Consta de un edificio de piedra, de planta circular, de unos seis metros de diámetro y nueve de altura, muy resistente, con tres pisos en su interior y sobre el cual se coloca la parte móvil, que puede girar para orientarse al viento.

La parte móvil tiene un eje ligeramente inclinado en cuyo extremo se sujetan las cuatro palas sobre las que actúa el viento. La inclinación del eje hace que el plano de las palas también esté inclinado y éstas, al girar deformadas por la fuerza del viento, no peguen con la pared.

Este eje se apoya en dos piedras, una llamada boyega, situada sobre la pared más próxima a las palas y otra, llamada rebote en el extremo del eje que se sitúa sobre la otra pared. Las piedras están talladas para recibir el eje de roble y se engrasa la superficie de apoyo.

En el eje está colocada una rueda, llamada catalina, de gran diámetro, cuyos dientes, de madera de encina, engranan con los de otra rueda vertical, llamada linterna. La inclinación del eje principal hace que, al girar sobre el eje vertical la parte móvil, los dientes de la rueda catalina engranen, en todas las posiciones, con los de la rueda linterna.

En el extremo posterior de la parte móvil hay un palo, llamado de gobierno, que sirve para hacer girar la parte móvil del molino a fin de que las palas se enfrenten al viento.

Las palas constan de una estructura de madera sobre las que se atan unas velas para conseguir que actúe sobre ellas la fuerza del viento. Para atarlas el molinero se debía subir por los travesaños de las palas, por eso, los extremos de las palas quedaban a un metro de suelo.

El eje vertical, arrastrado por la rueda linterna tenía acoplada una piedra de moler, llamada volandera, que giraba sobre otra fija, llamada solera y ese movimiento provocaba la trituración del grano, que era introducido entre las dos piedras.

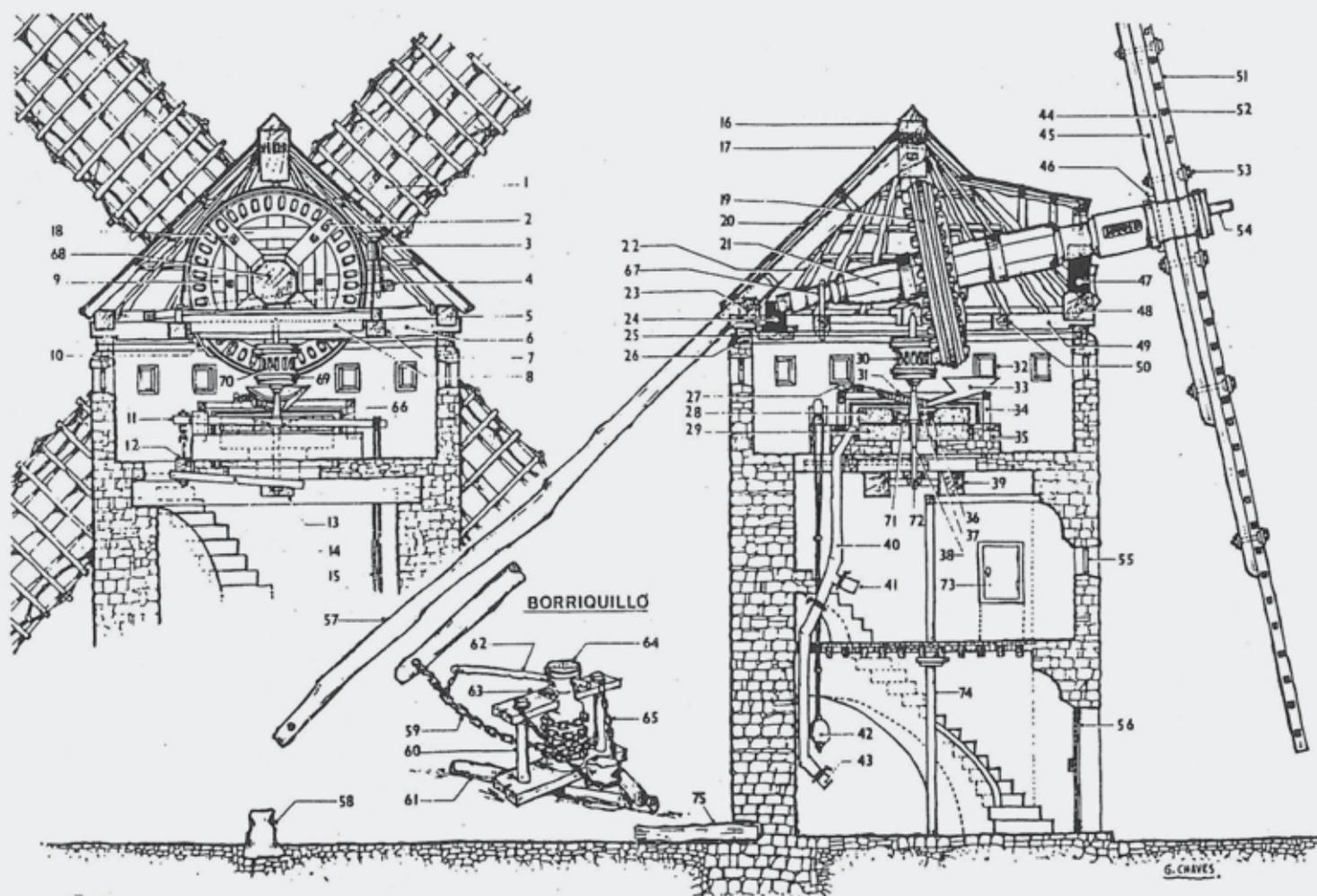
Con una palanca se graduaba la posición del eje vertical y por tanto el espacio entre las dos piedras y, en consecuencia, la finura del molido.

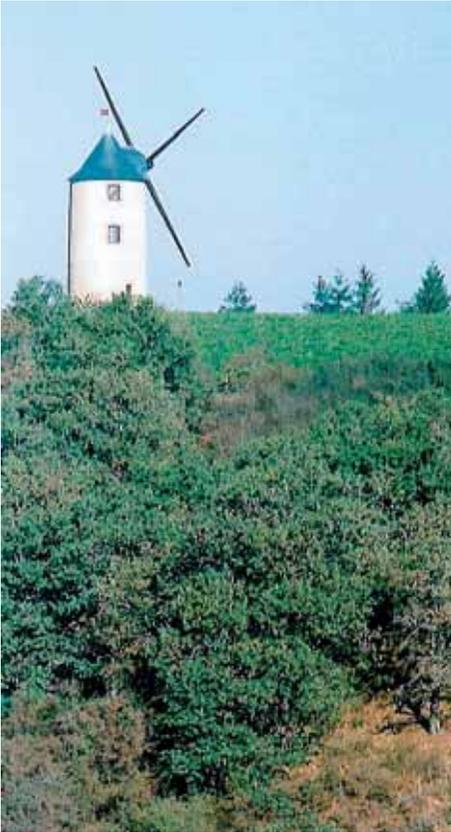
El producto ya molido caía por un tubo hasta la parte baja en la que era ensacado.

Molinos de Campo de Criptana.



Sección de un molino antiguo.





Molino Francés.

Molino Holandés.



Este esquema de molino ha estado en vigor, con pequeñas mejoras desde el siglo XVI hasta la actualidad. Los molinos de moler se han abandonado por sus dificultades operativas y el alto costo de su mantenimiento, en comparación con otras soluciones energéticas. Sin embargo, algunos de los molinos de bombeo, aún siguen funcionando en determinados emplazamientos.

En Francia, especialmente en la zona de Anjou, hay muchos molinos, y como el terreno es llano son de mayor altura que los manchegos, ya que con esa mayor elevación consiguen aprovechar la energía del viento que sería demasiado baja en cotas más reducidas. También son de gran altura los molinos holandeses construidos para bombear agua.

Era frecuente la instalación de molinos de viento sobre torres de castillos, y por eso, en la reconstrucción del Château du Haut-Koenigsbourg, a principios del siglo XX, se instaló un molino sobre una de las torres del primer recinto fortificado.

PROBLEMAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOLINOS

Los molinos de viento son estructuras complejas y sometidas a unas condiciones de trabajo muy duras que hacen que su funcionamiento presente muchas dificultades. Entre ellas podemos indicar:

El giro de la parte móvil sobre la fija se hace deslizando la estructura de madera de la móvil sobre los muros de piedra de la fija, teniendo que vencer el rozamiento mediante grasa y con muchas posibilidades de que produzcan acodamientos.

Las palas para girar se deben enfrentar al viento, para ello el molinero se asomaba por las ventanas situadas en el piso superior y observaba la dirección del viento.

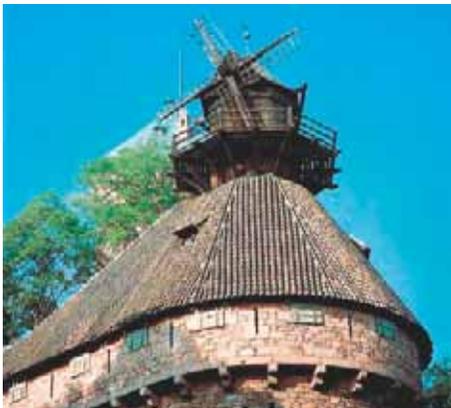
Para hacer el giro la parte móvil a la dirección elegida el molinero tiraba del palo de gobierno con un cabrestante que anclaba en alguna de las piedras colocadas al efecto en un círculo exterior. Era un trabajo muy duro.

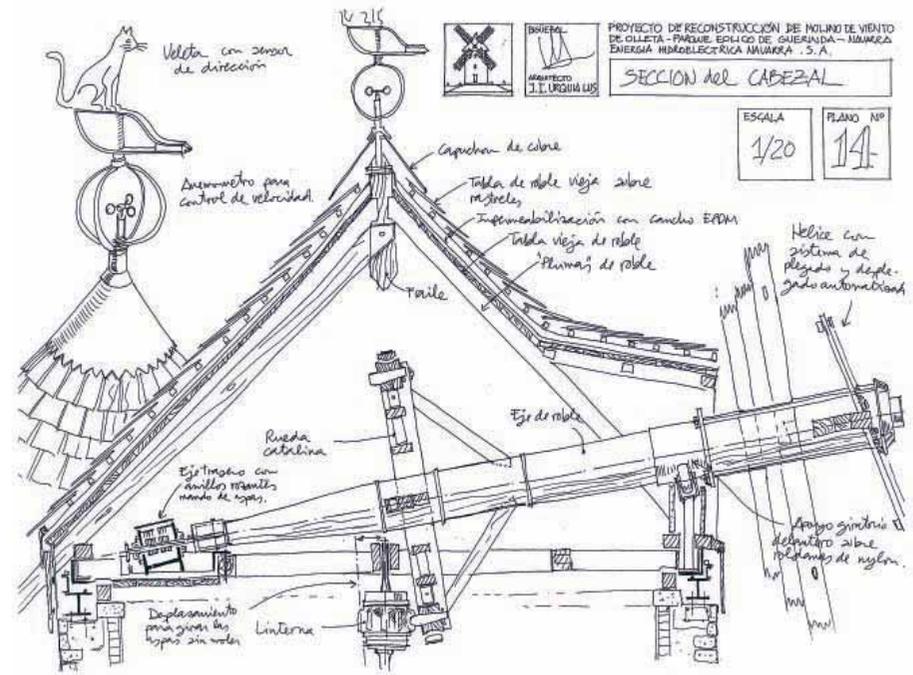
El molinero tenía que subirse por las palas para atar la velas a los travesaños y, si aumentaba la velocidad del viento debía cortar las cuerdas, estando las palas girando, para evitar que un exceso de fuerza arrastrase toda la parte móvil. Se comprende lo peligroso de esta situación y la cantidad de accidentes que se producirían.

Todo ello ha motivado que, salvo algunos casos muy concretos, estos molinos se hayan ido abandonando y actualmente sólo funcionan, con muchas limitaciones, como atractivo turístico.

Desde el punto de vista de aprovechamiento de la fuerza del viento únicamente se consideraba su acción sobre las velas, con una cierta inclinación que facilitase el efecto dinámico, pero sin contar con el menor estudio de esfuerzos aerodinámicos, que se empezaron a desarrollar con los primeros años de la aviación a finales del siglo XIX.

Castillo de Koenigsbourg.





EL MOLINO DE GUERINDA

Durante la construcción de los parques eólicos de la Sierra de Guerinda, en Navarra en 1998, se encontraron los restos de un antiguo molino, que se ha reconstruido manteniendo los esquemas básicos de su funcionamiento, pero con algunas modificaciones para hacerlo más operativo.

En los planos procedentes del proyecto de reconstrucción del molino, redactado por el arquitecto Iñaki Urquía, puede verse que se mantiene lo esencial aunque:

El eje principal se apoya en cojinetes de bolas situados entre chapeados de piedra.

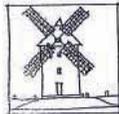
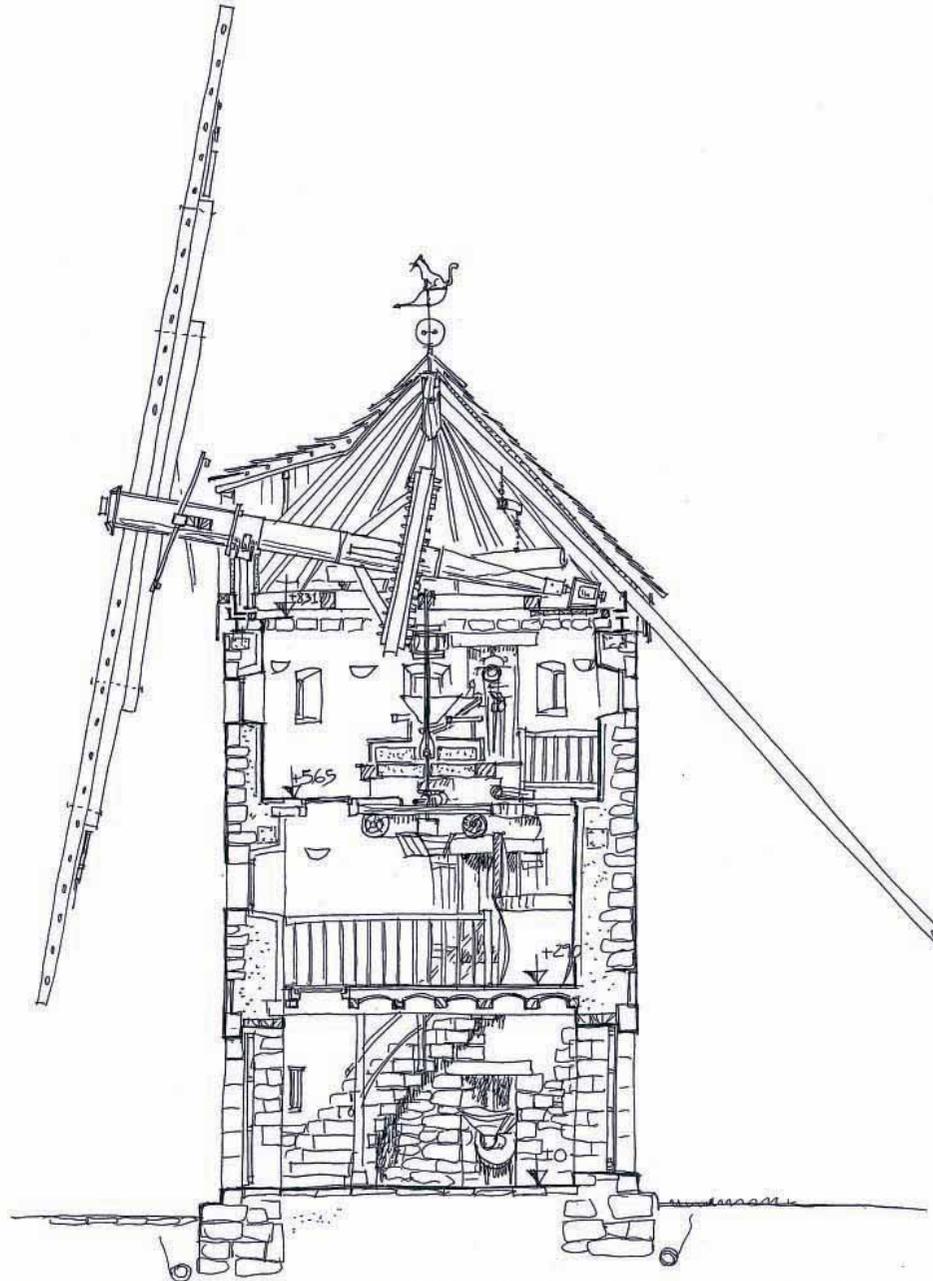
La parte móvil gira con la ayuda de unos motores que actúan sobre un camino de rodadura.

Con dos sistemas de anillos rozantes se hace pasar corriente eléctrica de la parte fija a la móvil y de esta al eje para poder plegar y desplegar las velas con motores eléctricos que eviten al molinero tener que subirse a las palas.

Con estas modificaciones se ha conseguido que el molino sea operativo y que funcione cuando se desee, aunque siempre condicionado a que la velocidad del viento sea la adecuada. Cuando gira y muele el trigo se siente la historia de la energía, impresiona vivir una situación energética que tiene 500 años.

Sección del cabezal.
Sección por las puertas (en la página siguiente).

2. EL VIENTO Y LA ENERGÍA



BIGUERAN 12-II-78
ARQUITECTO
J.I. URQUIA LUS

PROYECTO DE RECONSTRUCCIÓN DE MOLINO DE VIENTO
DE OLLETA - PARQUE EOLICO DE GUERINDA - NAVARRA
ENERGÍA HIDROELECTRICA NAVARRA . S. A. FINAL DE OBRA

SECCIÓN POR PUERTAS

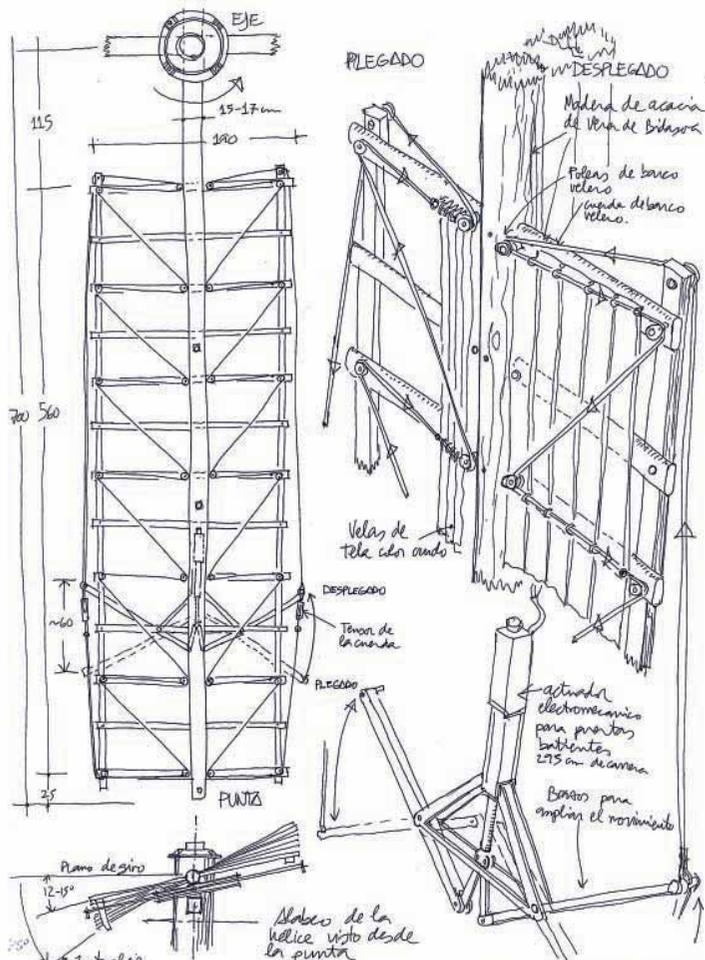
ESCALA

1/50

PLANO Nº

10

Hélice, armazón y velas.
Detalles de molino de piedra.

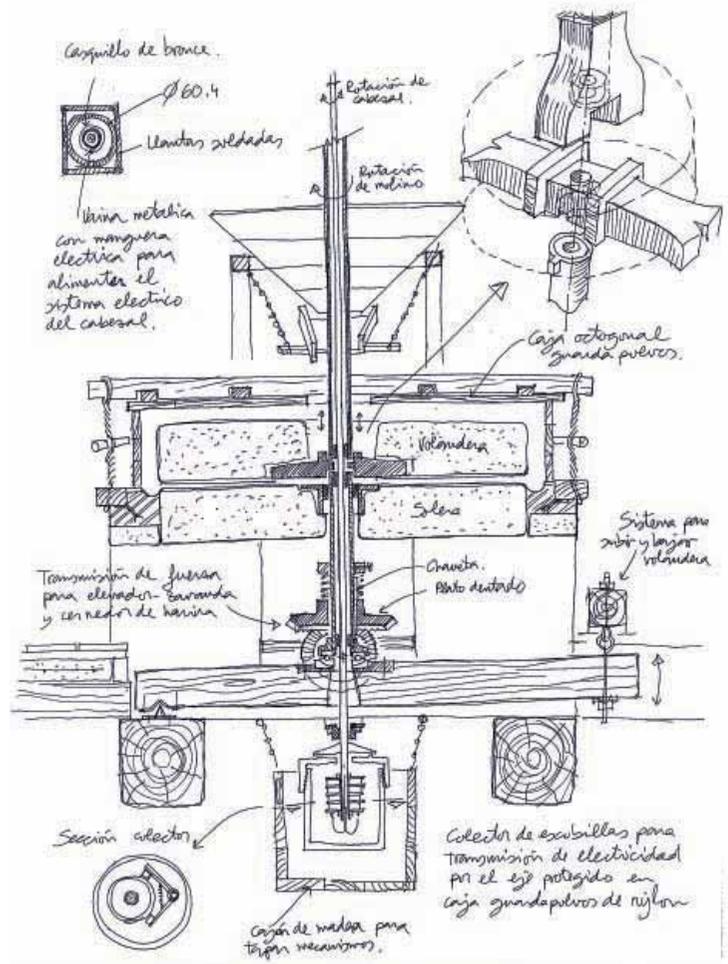


PROYECTO DE RECONSTRUCCIÓN DE MOLINO DE VIENTO DE OLLETA - PARQUE ESCOLICO DE GUERINDA - NAVARRA. EMPRESA HIDROELECTRICA NAVARRA . S. A. TITUL. DE OBRAS

HELICE - ARMAZON Y VELAS

ESCALA
1/25

PLANO Nº
15



PROYECTO DE RECONSTRUCCIÓN DE MOLINO DE VIENTO DE OLLETA - PARQUE ESCOLICO DE GUERINDA - NAVARRA. EMPRESA HIDROELECTRICA NAVARRA . S. A. TITUL. DE OBRAS

DETALLES MOLINO DE PIEDRA

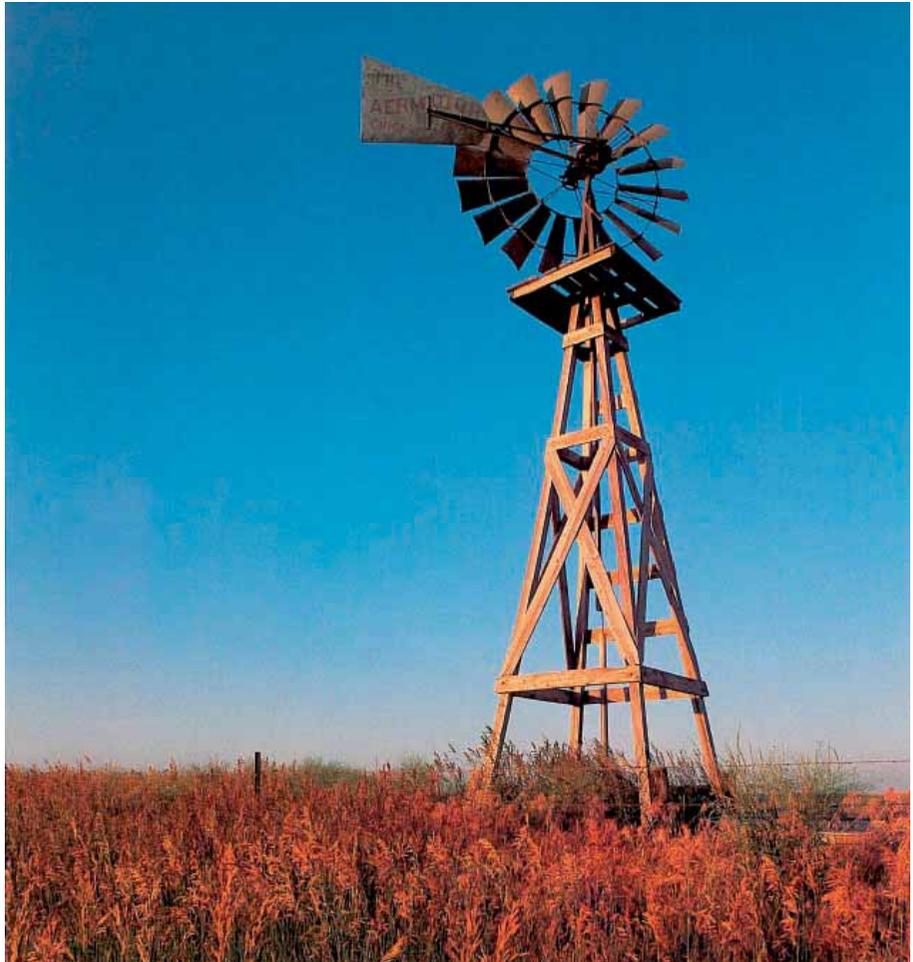
ESCALA
1/10

PLANO Nº
17

MOLINOS MULTIPALAS

Un caso singular de los molinos de viento son los multipalas, que aparecen en todas las películas del oeste americano. Son de eje horizontal con un rotor, de unos 3 metros de diámetro compuesto por muchas palas que gira a bajas velocidades de viento. Se orientan con una veleta, situada en el otro extremo que las palas, y el giro se acopla a una bomba aspirante para la elevación del agua. Empezaron a usarse en la mitad del siglo XIX, con un sistema de giro del eje vertical que acciona una bomba de pistón. Todavía se siguen usando habiéndose fabricado millones de unidades. En España hay empresas especializadas en su fabricación y comercialización.

Molinos multipalas



2.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA ENERGÍA EÓLICA

EMPUJE AERODINÁMICO SOBRE LAS PALAS

El empuje aerodinámico sobre las palas es similar al efecto que permite volar a los pájaros y a los aviones y avanzar a los barcos de velas con viento de lado.

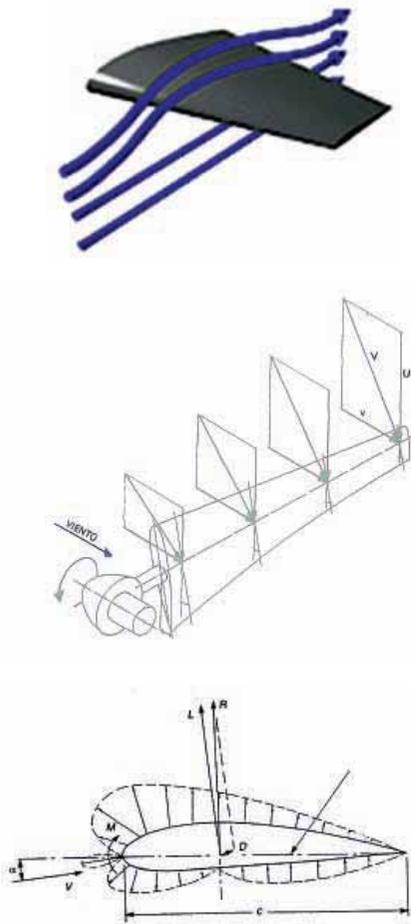
La curvatura de la parte superior del ala hace que se concentren sobre ellas las líneas de corriente del aire, que pasa por el ala, y esa mayor velocidad, respecto a la inferior, implica una menor presión resultando, en consecuencia, una fuerza ascendente que produce la sustentación. Para que exista esa fuerza hace falta que el ala se mueva con velocidad. Volar con máquinas más pesadas que el aire requirió, además de saber aprovechar el efecto aerodinámico que produce la sustentación, disponer de motores que permitiesen conseguir la velocidad. Todo ello se consiguió a principios del siglo XX y el 17 de diciembre de 1903 los hermanos Wright lograron el primer vuelo a motor de la historia.

En el caso de las palas de los aerogeneradores tenemos perfiles aerodinámicos, similares a las alas de los aviones, enfrentados al viento que crea las diferencias de presión, a ambos lados del perfil generando la fuerza que produce el giro de la pala. El comportamiento de las palas difiere de las alas de los aviones porque en aquellas a la velocidad del viento hay que sumar, vectorialmente, la velocidad de giro, que varía a lo largo de la pala y la resultante de ambas será la que se debe considerar para calcular los esfuerzos. Hay que tener en cuenta que la velocidad de viento puede variar entre 5 y 20 m/s y que la de giro puede llegar, en la punta de la pala a 70 m/s, con lo que comprende la importancia de la variación de la suma vectorial de ambos términos a lo largo de la pala, que condiciona la forma y esfuerzos producidos.

El desarrollo de la aviación ha motivado que se hayan estudiado los comportamientos aerodinámicos de los diferentes perfiles definiéndose por la NASA una colección de perfiles, llamados NACA, de los que se conocen los esfuerzos que el viento genera en ellos, en diferentes condiciones de enfrentamiento y velocidad.

En los aerogeneradores modernos, el conjunto de las palas se enfrenta al viento, y cada pala gira sobre su eje, lo que se llama pitch, que más adelante comentaremos. En la siguiente figura pueden verse las fuerzas que se ejercen en una sección de una pala; α es el ángulo de ataque de la velocidad suma del viento y la debida al giro. La concentración de líneas de corriente da lugar a la fuerza L , que producirá el giro de la pala.

Ala con líneas de corriente.
Figura de suma de velocidades.
Presiones y fuerzas sobre una sección de una pala.



LÍMITE DE BETZ

La teoría de la energía que podría ser captada por el rotor de un aerogenerador fue desarrollada por el alemán A. Betz en 1927.

El límite de Betz establece que la máxima potencia que puede obtener un aerogenerador ideal es 0,59 de la potencia del viento incidente. El cálculo se desarrolla del modo siguiente:

La potencia de una masa de aire que pasa a través de una sección S con velocidad V_1 es:

$$W = \frac{E}{T} = \frac{\frac{1}{2}MV_1^2}{T} = \frac{\frac{1}{2}\rho SV_1TV_1^2}{T} = \frac{1}{2}\rho SV_1^3$$

Siendo W Potencia; M Masa de aire; E Energía; T Tiempo; ρ Densidad del aire; V_1 Velocidad del aire

Como puede verse la masa de aire M que pasa en un tiempo T, es el producto del área (S) por el volumen que pasa (V_1T) y por la densidad (ρ).

Vamos a considerar un tubo de corriente, en el que hay una sección S_1 aguas arriba de la del rotor R y otra aguas abajo S_2 . El aire que se desplaza por el interior del tubo atraviesa el rotor y le cede parte de su energía. La sección aumenta de S_1 a R y de R a S_2 . Suponemos un movimiento estacionario, con densidad constante, con lo que la velocidad debe ir disminuyendo a medida que aumenta la sección.

Las ecuaciones que regulan el movimiento son:

Ecuación de continuidad $S_1V_1 = SV = S_2V_2$

Ecuación de la cantidad de movimiento $F = M\Delta V = \rho SV(V_1 - V_2)$

Aplicando la ecuación de Bernouilli a la sección S_1 y a la cara anterior del disco $P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P^* + \frac{1}{2}\rho V^2$

Operando entre la cara posterior del disco y la sección S_2 $P^* + \frac{1}{2}\rho V^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2$

Restando ambas ecuaciones y considerando que la presión se iguala en las secciones S_1 y S_2 resulta que la diferencia de presión a ambas caras del disco vale

$$P^* - P^* = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2)$$

La fuerza que se ejerce sobre el rotor es el producto de la diferencia de presiones a ambos lados por el área: $F = (P^* - P^*)S = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2)S$

igualando este valor a la fuerza de antes definida se obtiene que $V = \frac{V_1 + V_2}{2}$

Es decir que la velocidad del viento en el plano del rotor es la semisuma de la velocidad incidente con la de aguas abajo, ambas suficientemente alejadas.

La potencia absorbida por el rotor W es el producto de la fuerza F ejercida por la velocidad del viento V. Operando con los valores obtenidos tenemos.

$$W = FV = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2)S \frac{V_1 + V_2}{2} = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right)$$

Si llamamos $k = V_2/V_1$ la expresión queda de la forma $W = \frac{1}{4}\rho SV_1^3(1+k)(1-k^2)$

El máximo de la potencia se obtiene igualando a cero la derivada dW/dk .

Operando se obtiene que $k = 1/3$ y sustituyendo este valor en la ecuación de la potencia se obtiene el valor máximo que puede obtenerse:

$$W_{\max} = \frac{8}{27}\rho SV_1^3$$

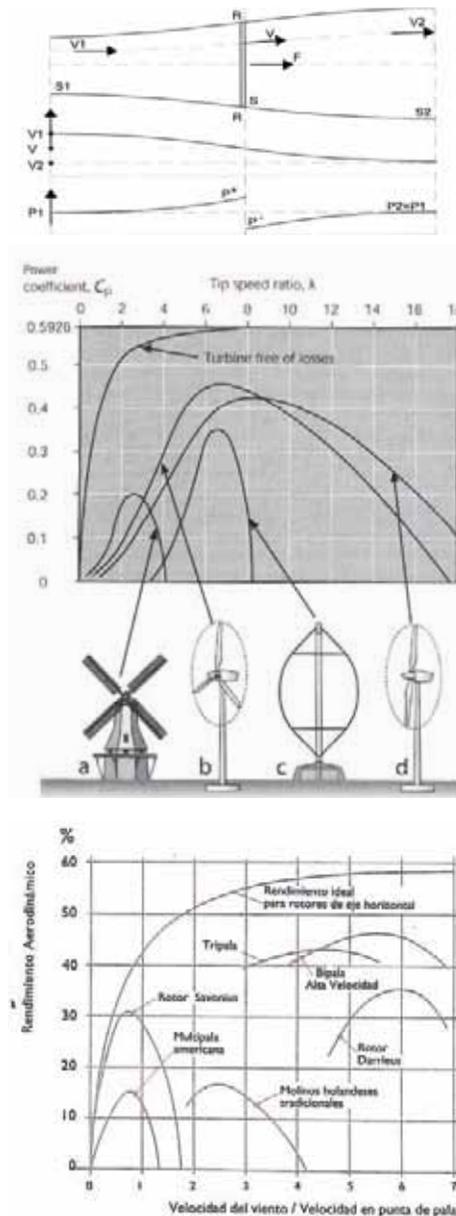
Definimos el coeficiente de potencia C_p como la relación entre la potencia máxima que puede obtenerse y la potencia total del viento incidente antes definida.

Su valor máximo es:

$$C_{p\max} = \frac{W_{\max}}{W} = \frac{\frac{8}{27}\rho SV_1^3}{\frac{1}{2}\rho SV_1^3} = \frac{16}{27} = 0,5925$$

Vemos que la máxima potencia que se puede obtener, en teoría, de una corriente de aire, con un aerogenerador ideal, nunca puede superar al 59,25 % de la potencia del viento incidente. Ese coeficiente es el llamado límite de Betz.

Gráfico de C_p en función de λ



ENERGÍA APROVECHABLE

Resulta sorprendente lo tardío de este descubrimiento teórico frente al desarrollo, tanto teórico como práctico, de las turbinas hidráulicas, lo que pone de manifiesto el retraso de este sector frente al hidroeléctrico.

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

Con lo que la energía máxima aprovechable es:

$$P_a = 0,3 \rho S v^3$$

- Siendo P Potencia máxima del viento
- P_a Potencia máxima aprovechable
- S Sección del área del rotor
- v Velocidad del viento
- ρ Densidad del aire

En la práctica la energía aprovechada es:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho S v^3$$

Siendo C_p un coeficiente cuyo valor se indica en la figura adjunta.

La ecuación pone de manifiesto:

La importancia de tener altas velocidades de viento, al ser la potencia función del cubo de la velocidad (pasar de 5 m/s a 8 m/s de velocidad supone multiplicar por 4,1 la potencia generada).

La influencia de la densidad del aire, ya que la energía se obtiene de la masa de aire en movimiento. Se genera más energía en el nivel del mar, que en cotas altas en que la densidad es menor. Como dato informativo podemos señalar que la densidad del aire en el nivel del mar a 15 ° y 1013 milibares es de 1,228 kg/m³ y que la equivalente a 1.000 metros es de 1,112 kg/m³, etc.

La ecuación también pone de manifiesto que para potencias mayores, con el mismo viento, se deben hacer máquinas que tengan mayor sección, es decir con mayor longitud de pala.

El coeficiente λ es la relación entre la velocidad en la punta de la pala y la del viento. Puede verse la importante variación de C_p para diferentes valores de λ .

La importancia de operar con un buen valor de C_p , que es la parte del viento que se aprovecha y que, como puede verse en la figura, tiene valores muy variables, en función de λ con una zona de máximos muy limitada. Como hemos indicado el máximo teórico de C_p es 0,59 (límite de Betz).

En la figura se ha dibujado únicamente la curva de C_p correspondiente a una máquina de 3 palas, que son las normalmente utilizadas, porque, a las velocidades de funcionamiento de los aerogeneradores actuales, el aumento de producción que supondría un número mayor de palas no justifica el aumento del costo y las mayores complejidades correspondientes. En cambio con velocidades bajas en la punta de las palas y con vientos reducidos, el número de palas es muy importante, por eso los molinos multipalas de bombear agua tienen un gran número de ellas.

En al siguiente figura se aprecian los diferentes valores de C_p , en función de λ , para diferentes tipos de aerogeneradores

2.4 DESARROLLO DE LOS AEROGENERADORES DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA

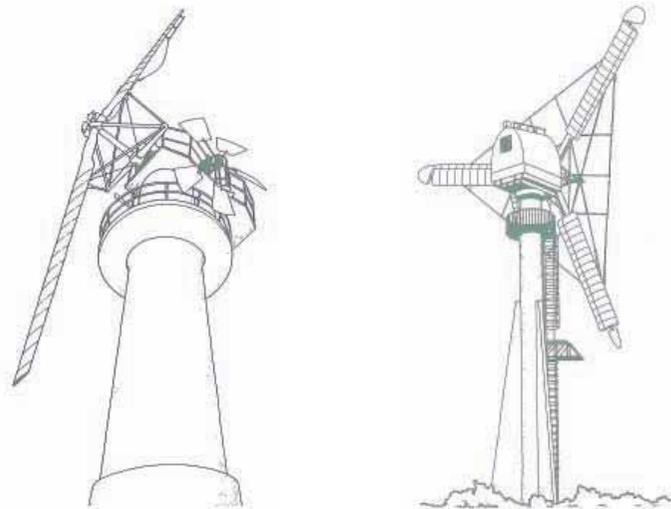
En 1890 el gobierno danés inició un programa de desarrollo eléctrico con energía eólica y encargó a Poul La Cour la dirección de los trabajos. La Cour acabó diseñando el primer prototipo de aerogenerador eléctrico. Tenía un rotor de 4 palas de 25 metros de diámetro y era capaz de desarrollar una potencia entre 5 y 25 kW. El modelo se empezó a fabricar en los primeros años del siglo XX. En los años veinte se fabricaban en Dinamarca aerogeneradores de 20 kW llegando, en los años 30, a potencias de 30 kW.

El desarrollo de las teorías aerodinámicas en las primeras décadas del siglo XX permitió aplicar, a partir de los años veinte, perfiles aerodinámicos diseñados para alas y hélices de aviones. Con ello, se consiguió velocidades en punta de pala cuatro o cinco veces superiores a la velocidad del viento incidente, mientras que en los molinos multipala la relación era de sólo dos.

El primer aerogenerador con diseño aerodinámico de Dinamarca se fabricó en los años treinta, por la compañía FL-Smidth con potencia entre 30 y 70 kW.

Más tarde, el gobierno danés puso en marcha un plan de desarrollo eólico que permitió instalar en 1957 un aerogenerador de 200 kW con hélice tripala de 24 m de diámetro.

Los bajos precios del petróleo que duraron desde la segunda guerra mundial hasta 1973 retrasaron el desarrollo eléctrico eólico que, en esa fecha tuvo un nuevo impulso, instalándose, especialmente en Estados Unidos gran número de equipos de potencias importantes, con una potencia instalada de 1.600 MW en 1991. Este desarrollo, realizado básicamente con marcas europeas, ha propiciado la situación actual del sector.



Aerogenerador con diseño aerodinámico.
Aerogenerador Gedser.

2.5 AEROGENERADORES ACTUALES

Los aerogeneradores más usados actualmente son de 1,5 a 2,0 MW instalados en torres de 80 metros de altura, con palas de 37 a 40 metros de longitud y con curvas de potencia/velocidad de viento como la indicada.

Hemos dibujado la curva de potencia de un aerogenerador tipo de 1.500 kW, en función de la velocidad de viento y hemos superpuesto la frecuencia de cada velocidad de viento de un emplazamiento. Para calcular la producción total se debe integrar la de cada velocidad, calculada en base al coeficiente C_p correspondiente. A la vista de las dos curvas se comprende la importancia de acertar en la elección de un coeficiente adecuado para la franja de vientos más frecuentes. Puede verse que, en el caso indicado en la figura, la producción con velocidades de viento reducidas es muy importante.

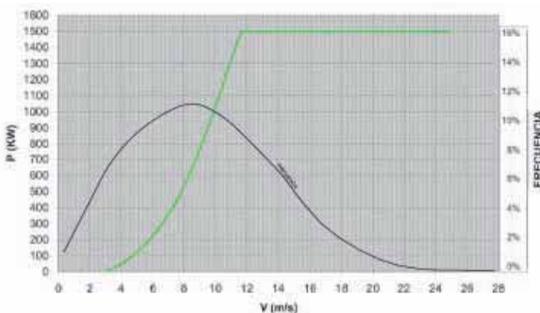
Por razones de ruido y de cargas mecánicas la velocidad de la punta de las palas se suele limitar a 200 km/h, lo que implica que en máquinas mayores la velocidad de giro sea más reducida y por tanto, mayor la relación del multiplicador (para tener 1.500 vueltas en el generador) o mayor número de polos en caso de ser de acoplamiento directo.

El aumento de la potencia supone mayores tamaños y, por tanto, mayores esfuerzos con lo que las máquinas deban ser más robustas.

También las palas deben serlo, ya que han de ser mayores, por lo que ya se ha empezado su construcción con fibras de carbono, en vez de vidrio, que, aunque de mayor costo, tienen mejores condiciones estructurales. Hay que tener en cuenta que las palas de un aerogenerador son las estructuras con más duras condiciones de trabajo, son ménsulas de gran longitud sometidas a las fuerzas aerodinámicas, que producen su giro, al peso que les afecta de forma variable según su posición, al efecto de sombra de la torre cuando pasan delante de ella y todo ello 30 ciclos por minuto. Como hemos indicado anteriormente las palas utilizadas en España hasta el momento eran palas diseñadas según perfiles NACA de aviación, sin embargo en la actualidad las principales empresas del sector están diseñando sus propias palas buscando la mayor eficiencia ante la variación de velocidad que la suma del viento y el giro producen en cada punto, para lo que se cuenta con la ayuda del laboratorio de pruebas que el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) ha construido en Sangüesa (Navarra).

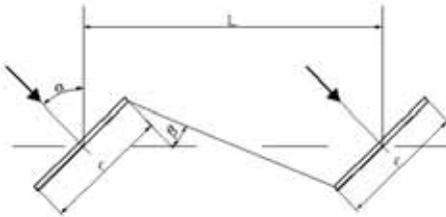
Un tema muy importante en los aerogeneradores es el posicionamiento de las palas al viento. Inicialmente, con máquinas de hasta 500 kW, los generadores eran síncronos y por tanto giraban a la frecuencia de la red (50 ciclos), lo que implicaba que sólo podían tener la máxima eficiencia (mayor valor de C_p) en un punto, es decir para una determinada velocidad de viento. Normalmente eran de cuatro polos y giraban a 1.500 r.p.m.; con un multiplicador 1/50 las palas giraban a 30 r.p.m.

Curva de potencia.



Actualmente los aerogeneradores tienen velocidad de giro variable, gracias a un sistema de control rotórico que permite una cierta variación de giro respecto al nominal. Con ello se consigue alcanzar el mayor valor de C_p en un intervalo, es decir en una gama de velocidades de viento. La velocidad variable del generador daría lugar a frecuencias variables en la corriente, por lo que se instalan sistemas electrónicos que introducen frecuencias adicionales en el generador que dan como resultado los 50 hercios en la corriente entregada a la red. Con vientos bajos la pala está enfrentada al viento hasta que se alcanza la potencia máxima. Cuando se llega a esta posición, se debe reducir la fuerza del viento sobre la pala, lo que se consigue haciéndola girar sobre su eje, lo que se llama pitch. Se pierde C_p pero ya no es importante estar en el máximo, porque con valores inferiores estamos en la potencia máxima del sistema. En cada generador hay un ordenador que regula este tema dando órdenes a un equipo hidráulico que produce el giro de las palas a la posición precisa. Esta regulación del pitch debe hacerse de modo igual en las tres palas, ya que un desequilibrio de una respecto a las otras da lugar a esfuerzos anormales, muy superiores a los extremos considerados en el cálculo, que pueden ocasionar incluso la caída completa del aerogenerador y todo ello con el agravante de que el viento es muy superior a 100 metros de altura que a 50 y que unas palas están arriba y otras abajo. Este sistema de pitch variable es una de las razones técnicas del desarrollo eólico.

Croquis de la distancia entre molinos.
Parque del Perdón (Navarra).



Otro tema importante del desarrollo eólico es diseñar adecuadamente la implantación de los aerogeneradores en los parques. Si el viento fuese de dirección constante a lo largo del año los aerogeneradores se pondrían perpendiculares a dicha dirección y con los círculos casi tangentes entre ellos. En la práctica no se da esta situación y los aerogeneradores deben situarse a una distancia L tal que el cono de sombra de uno no afecte al círculo del siguiente, tal como se aprecia en el croquis. Lógicamente la distancia L es tanto mayor cuanto más elevado sea el ángulo α máximo que quiera aprovecharse sin que unos aerogeneradores “hagan sombra a otros”.

Este criterio de proyecto obliga a estudiar, en cada emplazamiento, no solo la velocidad del viento a lo largo del año, sino su dirección. Con programas informáticos se estudia la producción con los aerogeneradores a unas y otras distancias considerando las incidencias que, en cada caso, se producen y las pérdidas de producción consiguientes, adoptándose la solución que se considere óptima. Lo ideal es disponer de crestas perpendiculares a la dirección de viento predominante y colocar los aerogeneradores próximos. Este fue el caso del parque de *El Perdón* en Navarra, en el que además de tener una excelente velocidad de viento, se da la circunstancia de que la alineación de la cresta es este/oeste cuando los vientos dominante son del noroeste.

Deben desarrollarse sistemas eléctricos y electrónicos para adecuarse a los problemas de seguridad y estabilidad de la red de modo que, en casos de huecos de tensión, se evite la desconexión de grandes potencias para las que el sistema eléctrico tendría dificultades de disponer de alternativas que garantizaran el suministro y pudieran producirse apagones generalizados.

2.6 TORRES DE HORMIGÓN

Torre de hormigón de Aibar.
Parque de Cerro Blanco (Castilla la Mancha).



Cada vez las torres son más altas para captar mayores velocidades de viento, y los aerogeneradores de mayor potencia, para aprovechar mejor los emplazamientos. Como consecuencia de ambos factores aumentan los esfuerzos en las torres y por tanto éstas deben ser más resistentes. Actualmente, con máquinas de 1,5 MW y torres de 80 m de altura se ha llegado a diámetros en la base de las torres de 4,50 metros, que no puede aumentarse porque es el galibo de los puentes de carreteras. Ello obliga a que, para mayores esfuerzos, el aumento de la resistencia se consiga únicamente a base de mayores espesores de chapa, lo que crea problemas de costo, de curvado de chapas, de soldaduras, etc. Como solución alternativa se plantean torres de hormigón prefabricadas en piezas de dimensiones que las hagan transportables y que se monten en obra.

En la foto puede verse una torre de hormigón de 80 metros de altura para un generador de 1500 kW instalada en el año 2006, en el parque de Aibar (Navarra), y que es el primer ejemplo de solución prefabricada de España. Ha habido algunos prototipos de torres de hormigón *in situ*, tanto en España como en Alemania, para aerogeneradores de gran potencia (hasta 5 MW), pero no parece que vayan a ser soluciones en serie para parques de gran número de equipos. Las torres de hormigón construidas con elementos prefabricados se pueden proyectar del diámetro que los esfuerzos requieran y resultan mucho más proporcionadas que las de acero. Por otra parte los fallos de las torres de acero, en condiciones de esfuerzos excepcionales, se producen por abolladura de la zona comprimida, lo que pone de manifiesto que las torres de hormigón son estructuralmente más adecuadas. El desarrollo de torres de hormigón es uno de los retos actuales del sector.

En 2007 se han puesto en servicio siete aerogeneradores del Parque de Cerro Blanco (Albacete) equipados con torres de hormigón similares a la de Aibar y se ha iniciado la construcción de tres torres de 100 m de altura en el parque de Alaiz en Navarra, también de 1,5 MW, estando en desarrollo un proyecto de 33 torres en la Comunidad de Valencia, que va a suponer la puesta en marcha definitiva de estas soluciones.

Se está proyectando aerogeneradores de 3 MW, también con torres de hormigón de 100 y 120 m de altura. Se espera iniciar su construcción en 2008.

2.7 IMPORTANCIA DEL SECTOR EÓLICO

En el siguiente cuadro, figuran las potencias y producciones de energía eléctrica de origen eólico en España, señalándose también los valores totales del sistema eléctrico peninsular.

AÑO	GENERACIÓN ELÉCTRICA TOTAL		GENERACIÓN DE ORIGEN EÓLICO			
	POTENCIA (MW)	ENERGÍA (GWh/año)	POTENCIA (MW)	%	ENERGÍA (GWh/año)	%
1991	41.784	140.116	3	0,01	3	0,00
1992	41.864	141.475	33	0,08	17	0,01
1993	41.890	141.425	34	0,08	85	0,06
1994	42.099	146.276	39	0,09	74	0,05
1995	42.414	151.764	89	0,21	160	0,11
1996	46.671	156.244	163	0,35	304	0,19
1997	48.149	162.383	405	0,84	620	0,38
1998	49.231	173.058	759	1,54	1.237	0,71
1999	50.858	184.373	1.493	2,94	2.507	1,36
2000	52.397	194.904	2.079	3,97	4.256	2,18
2001	55.152	205.643	3.442	6,24	6.600	3,21
2002	59.820	211.516	4.950	8,27	9.257	4,38
2003	62.233	225.850	6.220	9,99	11.720	5,19
2004	68.719	235.999	8.442	12,3	15.753	6,68
2005	73.970	246.187	9.798	13,2	20.377	8,28
2006	78.290	252.878	11.100	14,2	23.063	9,12

Fuentes:

Datos 2006: "Avance del informe del Sistema eléctrico español del año 2006" (Publicado por Red eléctrica de España en el año 2007).

Datos del 2005 al 2001: "Informe del sistema eléctrico español. Año 2005" (Publicado por Red eléctrica de España en el año 2006).

Datos del 2000 a 1996: "Informe del sistema eléctrico español. Año 2000" (Publicado por Red eléctrica de España en el año 2001).

Datos de 1995 a 1991: "El marco legal estable. Economía del sector eléctrico español 1988-1997" (Publicado por Red eléctrica de España en el año 2006).

Puede verse como han ido aumentando, año a año, la potencia y la producción de origen eólico.

El Plan de Energías Renovables en España 2005-2010 prevé, para el año 2010, una potencia eólica instalada en el sistema eléctrico peninsular de 19.475 MW que posiblemente podrá superarse.

A fin de situar el sector eólico español en el contexto mundial, en el siguiente cuadro se resumen los datos de los países con mayor potencia instalada a fines de 2005.

PAÍS	POTENCIA (MW)	PRODUCCIÓN (GWh)	HORAS EQUIVALENTES
ALEMANIA	18.445	33.090	1.794
ESPAÑA	10.027	21.060	2.100
ESTADOS UNIDOS	9.181	21.120	2.300
INDIA	4.253	7.660	1.801
DINAMARCA	3.087	6.950	2.251
RESTO DEL MUNDO	14.271	30.590	2.144
TOTAL	59.264	120.470	2.033

Fuente: International Wind Energy Development.

Los datos de España difieren algo de los antes citados por estar incluidos los sistemas eléctricos insulares.

Los datos de este cuadro ponen de manifiesto que entre sólo tres países se concentra el 63,5 % del total. Destaca la importancia de España en este campo, -segundo país del mundo por potencia instalada, por delante de los EEUU, con mucho menor territorio- así como la relativa alta rentabilidad de sus instalaciones, sobre todo frente a las de Alemania.

Es indudable que la potencia eólica instalada en cada país es función de la política energética adoptada. En Alemania, por ejemplo, se ha optado por propiciar que los parques eólicos estén distribuidos por todo el país, con precios de la energía generada más altos en las áreas de menos viento, lo que ha motivado su gran desarrollo, aunque las horas equivalentes, y por tanto la rentabilidad energética, sea baja.

Los datos expuestos ponen de manifiesto que el futuro de la energía eólica depende de las políticas energéticas que se adopten en los diferentes países. Parece claro que se debe estimular el desarrollo de energías renovables como solución segura y estable a largo plazo y hay que tener en cuenta que, al menos de momento, la eólica es la única realidad cuantitativamente importante de este sector. En este sentido parece más adecuado, en nuestra opinión, situar los parques en lugares de vientos que los hagan rentables que mantener políticas permanentes de precios primados.

Parque eólico de Guerinda (Navarra).



2.8 FALTA DE GARANTÍA DE LA ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica es una energía eventual que carece de garantía, lo que es compatible con el hecho de que, del mismo modo que se sabe si en los próximos días va a llover, también se sepa, más o menos, qué viento va a haber en cada sitio y por tanto, la energía de origen eólico que se va a generar. Es decir, que la eventualidad es compatible con la programación, lo que facilita el trabajo del operador del sistema eléctrico.

Sin embargo, está claro que hay días sin viento, y en algunos casos no se produce en casi ningún lugar de la península. Por ejemplo, el 17 de julio de 2006 se alcanzó la mayor punta de demanda eléctrica histórica de verano (40.730 MW). Climatológicamente fue debida a un anticiclón situado sobre la península, sin apenas viento, y con muy altas temperaturas, en la que la energía eólica sólo aportó 611 MW (el 1,5 % del total). Ese día el sistema tuvo que utilizar exclusivamente otras fuentes para garantizar el suministro.

Es decir, la energía eólica puede ser muy importante en la cuenta anual de kWh generados, pero tenemos que disponer casi de la misma potencia instalada para los días en que no hay viento, en tanto no se disponga de sistemas que den garantía de suministro a la energía eólica. Para esto hay, en este momento, dos posibles soluciones, al margen de recurrir a otras fuentes renovables no intermitentes, como la biomasa:

- Centrales hidráulicas reversibles que bombeen en horas de viento y generen cuando no lo haya.
- Fabricar hidrógeno para producir electricidad u otros usos energéticos.

La primera solución fue implantada en España cuando se puso en marcha un programa de centrales nucleares a fin de buscar consumos a la gran potencia nocturna sin demanda. De noche se bombeaba y de día se generaba, ajustándose de este modo la curva de producción neta a la demanda real. Ello supuso la gran inversión de las centrales reversibles, algunas de ellas magníficas, que actualmente sirven para asegurar la potencia del sistema eléctrico.

Algo así cabe plantearse con la energía eólica: habrá que construir nuevas centrales reversibles, pagar su coste, y asumir la pérdida de rendimiento que el bombeo y la generación suponen, y que reducen la energía neta del conjunto al 60%. Es decir, que se precisa hacer nuevas inversiones y considerar reducida la energía generada al menos al 60%. La realidad de esta solución estará condicionada a la forma en que se distribuyan los vientos, se comprende que en caso de que sean muy estacionales, con épocas sin viento, se podrá corregir la variación diaria pero no se podrá asegurar la potencia en todo momento.

Otra alternativa es fabricar hidrógeno cuando haya viento y acumularlo para su uso cuando se precise. Esta solución ofrece la ventaja de no tener problemas de estacionalidad de vientos; además el hidrógeno se puede producir en parques situados en lugares de mucho viento, aunque no haya red eléctrica, y transportarlo a los lugares de consumo. Tiene el inconveniente de que las pilas de combustible para vehículos, no están todavía muy desarrolladas, son caras, de bajo rendimiento, etc. El rendimiento de fabricar hidrógeno y producir electricidad es, actualmente, del orden de 0,35, inferior por tanto al de las centrales reversibles, aunque al tratarse de un sistema en desarrollo se prevé que pueda llegar a 0,55. La solución del hidrógeno irá seguramente ligada al desarrollo de vehículos que usen esa fuente de energía. Su generalización mejoraría el medio ambiente urbano, ya que el tráfico no haría ruido ni produciría humos.

La garantía de suministro supone un encarecimiento de la energía eólica, pero para valorarla adecuadamente habría que considerar todos los costos de las soluciones alternativas, como las emisiones de CO₂, la moratoria nuclear, el desmantelamiento de las centrales nucleares (no incluido en los precios del pool), las subvenciones estatales al carbón nacional (en 2005 fueron de 481,3 millones de euros), la contaminación por lluvias ácidas del carbón, etc.

Caben otras soluciones para casos concretos, como bombeos de acuíferos profundos a balsas de regulación de riego, pero, aunque en ciertos supuestos puedan ser muy interesantes, nunca serán la solución al problema de fondo del sistema eléctrico peninsular.

Un caso de especial utilización de la energía eólica puede ser Canarias. Esta Comunidad tiene una casi total dependencia energética del petróleo que, además de para la generación eléctrica, se usa para la desalación del agua del mar. Sin embargo, los fuertes vientos de la isla, unidos a los grandes desniveles existentes pueden propiciar la construcción de aprovechamientos eólicos unidos a centrales reversibles y a plantas desaladoras que constituyan una alternativa parcial al uso del petróleo.

2.9 AFECCIONES AMBIENTALES

Las energías renovables tienen impactos ambientales significativamente menores que el resto de las demás fuentes de generación. Sin embargo, presentan aspectos negativos que vamos a describir:

Afección visual.

Afecciones por generación de ruido.

Riesgo de mortandad de aves y murciélagos por colisión con las palas en movimiento.

Afecciones sobre el medio natural donde se sitúan.

Afecciones por las infraestructuras asociadas: caminos de acceso, líneas eléctricas de evacuación, subestaciones, etc.

Afecciones por interferencias radioeléctricas.

Afecciones al patrimonio cultural.

A todo ello hay que añadir las afecciones que se producen durante la fase de obras.

Frente a estos aspectos negativos hay que considerar los positivos:

Generación de energía renovable no contaminante, contribuyendo a la reducción de producción de CO₂.

Generación distribuida y, en muchos casos, relativamente próxima a los puntos de consumo.

Creación de riqueza compatible con otros usos del suelo.

Creación de riqueza en lugares en que, muchas veces, presentan escasos recursos económicos.

Contribuye a la generación de empleo local.

Creación de un nuevo sector industrial con grandes perspectivas de desarrollo en todo el mundo.

Posibilidad de un desarrollo gradual, con inversiones ajustadas a las demandas de energía.

En cuanto a las afecciones negativas podemos detallar:

AFECCIÓN VISUAL

Los parques eólicos, en nuestras latitudes, suelen presentar un alto grado de visibilidad, debido al tamaño de los aerogeneradores, a su localización en crestas y zonas elevadas, y sobre fondo de cielo. El propio movimiento de las palas incrementa la atención visual. Todo ello supone una alteración del paisaje por la presencia de elementos artificiales de gran dimensión, aunque con carácter reversible.

Además, se añade que la imposibilidad de enmascaramiento de estas altas estructuras en movimiento impide minimizar visualmente su presencia.

La valoración del paisaje presenta una componente de carácter subjetivo que condiciona la aceptación de una alteración determinada. Aunque hay personas que rechazan los parques

eólicos, sin embargo, estos son mayoritariamente aceptados debido a que representan generación de energía renovable y no contaminante, y con ello, se favorece considerar asumible el impacto visual. La proximidad espacial al consumidor puede contribuir a incrementar el interés en la producción de energía y a la concienciación de su impacto y la corresponsabilidad de cada uno con ella. Además, la actual situación sobre el cambio climático favorece la aceptación de estas instalaciones en la opinión pública como una respuesta importante ante este grave problema ambiental de escala planetaria.

No obstante, la presencia de infraestructuras en el medio natural contribuye a la humanización y alteración de los medios naturales o seminaturales.

AFECCIONES POR RUIDOS

Los aerogeneradores producen ruido debido a los propios equipos mecánicos que los componen, al efecto aerodinámico del giro de las palas y a la alteración del viento al paso por la torre.

El impacto del ruido es un aspecto que se debe considerar muy detallada en el diseño de los parques eólicos, a fin de prevenir incidencias de difícil corrección en fase de funcionamiento, o que pudieran suponer una limitación en la producción de algunas máquinas durante la fase de funcionamiento. La medida cautelar más importante, basada en estudios de prevención de ruidos de inmisión, suele ser la recomendación de mantener unas distancias mínimas a los núcleos habitados de unos 800 a 1.000 metros.

MORTANDAD DE AVES Y MURCIÉLAGOS

Los parques eólicos suelen compartir espacios habituales por la fauna voladora de un determinado espacio debido a que ambos utilizan el mismo recurso eólico para sus actividades habituales. Por esta razón, pueden producirse colisiones de aves con las palas de los aerogeneradores. La estadística de aves muertas es muy variable de unos parques a otros, dependiendo de la población y tipo de especies de fauna voladora en el entorno, así como, del uso de ese espacio tanto en actividades habituales como en periodos de migración.

Los accidentes se producen especialmente con aves cuyo vuelo es de planeo, como los buitres, a los que les resulta difícil modificar su trayectoria ante las palas, y los cernícalos por su vuelo cernido.

Los resultados de estudios de seguimiento en parques eólicos, y la importante promoción de este tipo de instalaciones que puede generar efectos sinérgicos relevantes para aves y murciélagos, han conducido a que se empiece a exigir, previo a la tramitación de un parque, un estudio de ciclo anual de las aves y sus desplazamientos, al objeto de poder determinar el estado inicial del emplazamiento y poder detectar y evitar problemas posteriores.

Palas pintadas parcialmente para incrementar la visibilidad por las aves. PPEE Vedadillo (Navarra).



A parte de ello, tras la instalación de un parque eólico se desarrollan estudios de seguimiento o monitoreo sobre fauna voladora para comprobar la existencia de incidencia o no, y analizar la implementación de medidas correctoras.

Dentro de las medidas correctoras a poder aplicar en parques en funcionamiento se han ensayado actuaciones para comprobar un incremento de la visualización de las palas, como pintarlas con franjas alternas que las hagan más visibles.

AFECCIONES AL MEDIO NATURAL

La construcción de parques supone crear una actividad que modifica el estado inicial de un medio natural, muchas veces de carácter natural o seminatural, forestal y agrícola. Este planteamiento motiva que muchos Departamentos de Medio Ambiente los denieguen por coincidir con zonas poco alteradas por otra actividad, buscando preservar su naturalidad. Este planteamiento, a veces, choca con el interés de desarrollo de los vecinos de la zona que ven en los parques la posibilidad de creación de riqueza que mejore su situación, muchas veces muy deprimida.

La situación de parques en áreas humanizadas resulta de mayor aceptación y desarrollo.

AFECCIONES DE LOS CAMINOS DE ACCESO Y DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS DE EVACUACIÓN

Para acceder a los parques se requiere construir caminos que permitan el paso de las torres y las palas, que cada vez son de mayor tamaño. Estos nuevos accesos o la mejora de los existentes presentan aspectos negativos como un incremento del grado de permeabilidad a zonas de anterior uso más restringido, generalmente por actividades agroganaderas y/o forestales. Por el contrario, mejora la accesibilidad para labores locales y para prevención o extinción de incendios.

La evacuación eléctrica requiere construir líneas de gran potencia en zonas donde no suele haberlas, y que también favorece la humanización del medio. Todo ello supone afecciones a veces de mayor importancia que los propios parques por lo que deben incluirse en los proyectos a fin de que la aprobación contemple el conjunto de afecciones.

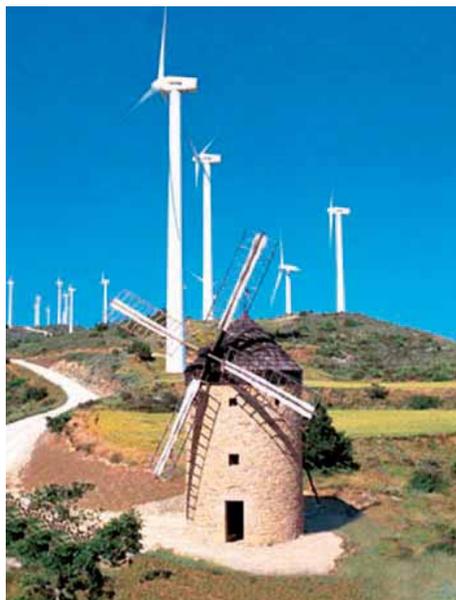
AFECCIONES POR LA CONSTRUCCIÓN DE SUBESTACIONES

Cada parque requiere la construcción de una subestación para el paso de la tensión de las redes internas, que suele ser 20 kV, a la de evacuación, que suele ser 66 ó 132 kV. Son instalaciones industriales en un medio rural. Algunas empresas cuidan especialmente estas obras dándoles un carácter propio de los edificios de la zona, por la incorporación de elementos arquitectónicos locales, tal como puede verse en las fotos de subestaciones proyectadas por Acciona Energía en Navarra.

2. EL VIENTO Y LA ENERGÍA



Molino de Olleta (Navarra).
Subestación de Vedadillo (Navarra).
Subestación de Codés (Navarra).
Subestación de Ibargoiti (Navarra).
Parque de Leitza.



AFECCIONES POR INTERFERENCIAS RADIOELÉCTRICAS

La presencia de parques eólicos puede ocasionar problemas en las radiocomunicaciones de la zona por lo que debe estudiarse en el diseño de implantación la presencia de torres de telecomunicación, radioenlaces, la radiodifusión de televisión, así como instalaciones militares y radioayudas de navegación aérea.

AFECCIONES AL PATRIMONIO CULTURAL

Otro aspecto a contemplar es el interés arqueológico, etnográfico y cultural del emplazamiento propuesto para albergar un parque eólico, a fin de detectar áreas a proteger para que no se vean afectadas por las obras o por las ubicaciones de las máquinas.

A veces, durante los seguimientos en la fase de construcción se pueden producir hallazgos no previstos, que requieren de actuaciones especiales de protección desde entidades responsables de la administración local.

Sin embargo, la aparición de restos arqueológicos puede dar lugar a su recuperación, como es el caso del Molino de Olleta, del siglo XVII, cuyos restos fueron localizados con motivo de la construcción de los parques de la Sierra de Guerinda, en Navarra, y que ha sido reconstruido tal como puede verse en la fotografía de la página anterior.

Las AFECCIONES POSITIVAS suponen:

GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONTAMINANTE

La aportación de los parques eólicos al sistema eléctrico peninsular fue, en el año 2006, de 23.063 GWh, el 9,12 % del consumo anual. Se trata evidentemente de cantidades muy importantes de energía, necesarias para reducir la quema incesante de combustibles fósiles y de reducir las emisiones de CO₂. No hay en este momento ninguna otra fuente de energía renovable capaz de conseguir una producción semejante.

GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Los parques eólicos pueden situarse, al menos en España, en numerosos emplazamientos, lo que supone una distribución de la generación que puede estar mucho más próxima al consumo que las fuentes tradicionales de generación, reduciéndose las pérdidas energéticas por transporte.

CREACIÓN DE RIQUEZA

La ocupación de suelo de los parques suele ser reducida, limitándose a los pies de torre, los caminos de acceso, subestación y línea de evacuación. Por ello, pueden mantenerse los usos tradicionales del entorno, actividades agropecuarias, etc. Puede verse en el parque de Leitza (Navarra) cómo se compatibiliza con el uso ganadero de la zona, con presencia de vacas, caballos y ovejas junto a las torres.

Los lugares que normalmente se eligen para situar los parques son zonas alejadas, deprimidas, con muy pocas posibilidades de creación de riqueza. Es habitual que a los propietarios de los terrenos, muchas veces los propios ayuntamientos, se les ofrezca una parte de los beneficios. Ello unido a los impuestos pagados por la empresa que se crea, suponen ingresos muy importantes para zonas. Esta situación suele mover a los ayuntamientos de la zona para apoyar fuertemente este tipo de proyectos ante los Departamentos de Medio Ambiente al objeto de conseguir las aprobaciones que les permitan mejorar su situación económica.

CREACIÓN DE UN NUEVO SECTOR INDUSTRIAL

El proyecto, la fabricación y la instalación de los aerogeneradores, así como el mantenimiento de los parques instalados ha supuesto la creación de un nuevo sector industrial con enormes posibilidades de desarrollo en todo el mundo. En el cuadro de referencia mundial puede verse que España es el segundo país en desarrollo eólico. Hay empresas españolas proyectando y construyendo parques eólicos en Estados Unidos, Canadá, México, Inglaterra, Alemania, Francia, China, India, Corea, Australia, etc. Seguramente nunca se habrá dado una situación similar.

DESARROLLO GRADUAL

Una ventaja de los parques eólicos es que se construyen por unidades independientes, pudiendo adecuarse a la potencia que se desee.

CONCLUSIONES AMBIENTALES

Los efectos ambientales de los parques son condicionantes a tener en cuenta, aunque algunos presenten un componente subjetivo difícil de valorar. Sin embargo aspectos como espacios protegidos, espacios de Red Natura (LICs ZEPAs), zonas naturales sin alterar, pasos de aves importantes, lugares emblemáticos, etc., deben ser contemplados, al mismo tiempo que se consideran otros aspectos económico-sociales como la creación de riqueza en zonas deprimidas y la generación de cantidades muy importantes de energía no contaminante.

APLICACIÓN EN NAVARRA

El desarrollo eólico en Navarra se ha hecho de un modo muy singular que parece indicado exponer, porque el impacto ambiental se consideró de modo muy especial.

La empresa Energía Hidroeléctrica de Navarra (EHN) instaló en 1992 anemómetros en repetidores de teléfonos y de TV por todo el territorio de la Comunidad. Al cabo de un año, en 1993, se tuvo conocimiento de que había en Navarra un potencial eólico extraordinario, totalmente desconocido. En los mapas eólicos generales Navarra era una zona sin viento, porque esos mapas se elaboran en base a datos de anemómetros situados en aeropuertos y en ciudades, donde normalmente no hay viento.

En EHN (actualmente Acciona Energía) se estudió con detalle el potencial eólico de Navarra comprobando que la producción eléctrica de origen eólico podía incluso cuadruplicar el consumo total anual de la Comunidad. Ante esta situación Esteban Morrás, Director de EHN planteó tres objetivos:

Construir el número de parques necesarios para conseguir que, en el año 2010, la producción eólica y de otras fuentes renovables fuese equivalente al consumo eléctrico total anual de Navarra.

Elegir los emplazamientos valorando la potencia, la producción y las afecciones ambientales.

Crear en Navarra un nuevo sector industrial para la fabricación de aerogeneradores.

Todo ello se hizo con rapidez, pero sin agobios porque, al no tener nadie información del tema, se podía tomar una iniciativa sin presiones de competidores. El resultado ha sido un enorme éxito que ha dado lugar a que Navarra sea una referencia mundial en el campo de las energías renovables.

El tema ambiental se estudió del modo siguiente:

En primer lugar se eliminaron todos los emplazamientos situados en zonas protegidas, ZEPAS, masas arbóreas autóctonas, lugares emblemáticos, etc., así como los que requerían la instalación de líneas eléctricas de evacuación que produjesen afecciones importantes.

En el resto de los emplazamientos se analizaron las afecciones a aves de la zona y migratorias, a la vegetación, al paisaje, a zonas arqueológicas, el ruido, etc. y ello tanto de los parques como de los accesos y de las líneas de evacuación. Se asignaron, para cada parámetro ambiental valores de afección relativos, otorgándose el valor 1 al emplazamiento con mayor afección y valorando los demás por su afección relativa respecto al máximo, hasta un máximo de 10 en el caso de la menor afección.

Se valoraron los conceptos de potencia y de producción puntuándose también con valores relativos de modo que el valor máximo de 10 correspondía al máximo de cada uno de esos dos conceptos.

Se analizaron 72 emplazamientos y se efectuó, en cada uno, la suma de puntos ponderando al 50 % los aspectos energéticos y las ambientales. En base a la puntuación correspondiente se seleccionaron los que se necesitaba para tener una potencia de 577 MW, calculada para cumplir el objetivo energético establecido. Resultaron 29 seleccionados. Es de destacar que este sistema implicó rechazar, por afecciones ambientales (traducidas en pocos puntos), lugares de altísima rentabilidad energética.

Se redactaron los anteproyectos de los 29 emplazamientos seleccionados y con todos ellos se preparó un Proyecto Sectorial de Incidencia Supramunicipal (PSIS), que es la figura urbanística vigente en Navarra para tramitar actividades de este tipo, ya que permite calificar suelo para infraestructuras, así como obtener la declaración de utilidad pública.

El PSIS fue aprobado por el Gobierno de Navarra y se ha completado con las modificaciones y complementos derivados de su desarrollo.

Se consideró muy importante contar con el apoyo ciudadano a la iniciativa, por lo que se le dio la mayor divulgación mediante la celebración de jornadas expositivas, para las que se contó con la participación de representantes de las grandes organizaciones ecologistas españolas (Greenpeace, Ecologistas en Acción, etc.). Hubo alguna oposición de grupos ecologistas locales, basada en la defensa de algún punto concreto, pero fue irrelevante.

También se contó con la colaboración de los Ayuntamientos en cuyos términos se proyectaban los parques, porque se les ofreció un canon anual por el alquiler de los terrenos comunales en los que se situaban los parques.

Con todo ello se consiguió que el objetivo, de que toda la energía consumida en Navarra se pudiese producir con fuentes renovables en La Comunidad, ilusionase a la población y ello supuso un apoyo decisivo, para la aprobación y el desarrollo de la propuesta.

Se eligió como primera actuación la parte alta del parque del Perdón, que además de ser el de mejor rentabilidad es visible desde Pamplona, lo que motivó que más del 50 % de la población de Navarra pudiese ver físicamente lo que suponía la energía eólica. El parque fue visitado por un elevadísimo número de personas, que en su mayor parte aprobaban la iniciativa. Se organizaron cursillos de divulgación de lo que la energía renovable podía suponer en Navarra, acudiendo a colegios y organizando visitas de los escolares al Perdón.

Entendemos que el criterio ambiental seguido ha sido básico para el éxito de la promoción, que ha llegado al extremo de que actualmente en los folletos divulgativos de Navarra se incluyen fotos de parques eólicos, de la planta de biomasa, etc.

2.10 LA ENERGÍA EÓLICA “OFF-SHORE”

Construcción del parque “off-shore” de Arklow.

Ensamblaje del parque “off-shore” de Horns Rev (Dinamarca).

Parque “off-shore” de Horns Rev (Dinamarca).



La generación eólica con aerogeneradores situados en el mar, parques “off-shore”, constituye un tipo singular, de incipiente desarrollo y enorme proyección de futuro. En 2005 la potencia total instalada en el mundo fue de 679 MW, con unas previsiones de 8.338 MW para 2010.

Los parques eólicos “off-shore” tienen varias ventajas:

- El viento en el mar suele ser de mayor intensidad, más uniforme y sin turbulencias
- Se pueden colocar máquinas de gran tamaño (en este momento son de 3,6 MW)
- Se pueden instalar potencias muy importantes (hay proyectos de parques de 1.000 MW)
- Su afección es más reducida que la de los parques de tierra.

Frente a estas ventajas, cuentan con los inconvenientes de los mayores costos de las cimentaciones, del montaje y de las conexiones eléctricas, la agresividad del mar a las instalaciones, las dificultades de acceso, etc.

Existen algunos programas comunitarios para el desarrollo técnico de esta parcela del sector que pueden dar lugar a importantes actuaciones en toda la costa europea.



EN ESPAÑA

En España todavía no se ha ejecutado ninguna instalación de este tipo, pero se ha aprobado el Real Decreto 1028/2007 de 20 de julio por el que se establece el procedimiento administrativo para la tramitación de las solicitudes de autorización de instalaciones de generación eléctrica en el mar territorial, que regula su desarrollo.

En el Real Decreto se regula el procedimiento para su desarrollo, mediante un sistema similar al establecido para la investigación de hidrocarburos. Se reserva un territorio con un permiso para la investigación que posteriormente da lugar a un concurso para la explotación. Los parques marinos deben tener una potencia superior a 50 MW.

La empresa interesada en una concesión debe presentar una solicitud de reserva de zona para la realización de estudios previos. A la solicitud se acompaña acreditación de la capacidad del solicitante, superficie afectada, detalle de los estudios previos que van a realizarse, plan de inversiones y un anteproyecto de las obras a realizar, incluidas las líneas eléctricas de evacuación.

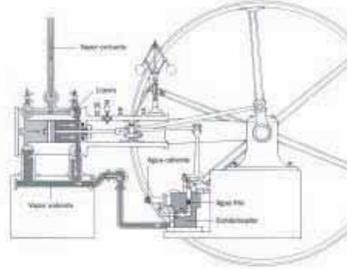
A la vista de la solicitud, la Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio procede a iniciar el procedimiento de caracterización del área eólica marina analizando los efectos ambientales de todo tipo que pueden producirse, así como los efectos sobre la navegación y la incidencia en materias de defensa y seguridad. Previos los informes de todos los Ministerios afectados se aprueba y se abre el procedimiento de concurrencia, en el que cualquier empresa interesada, incluida la que provocó el inicio del expediente, puede presentar oferta. Entre otras cosas se debe presentar una solicitud de prima que no podrá ser mayor que los 8,43 c€/kWh establecidos en el Real Decreto 661/2007 por el que se regula la producción de energía eléctrica en régimen especial. Este importe es bastante superior a los 2,929 c€/kWh de la prima de la energía eólica terrestre, lo que pone de manifiesto el interés de la Administración en el desarrollo de la energía “off-shore”.

Una vez resuelto el concurso la empresa adjudicataria puede realizar los trabajos de investigación, y una vez terminados puede presentar la solicitud de la instalación definitiva.

LA ENERGÍA DE LOS FLUIDOS



3 . E L V A P O R Y L A E N E R G Í A



- 3.1 PRIMERA REFERENCIA DEL VAPOR
- 3.2 DESARROLLO INDUSTRIAL
- 3.3 JAMES WATT
- 3.4 MEJORAS POSTERIORES A WATT
- 3.5 BARCOS DE VAPOR
- 3.6 MÁQUINAS DE VAPOR AUTOMOTRICES
- 3.7 FUNDAMENTOS TEÓRICOS
- 3.8 TURBINAS DE VAPOR
- 3.9 ESTADO ACTUAL DE LAS CENTRALES TÉRMICAS
LA PLANTA DE BIOMASA DE SANGÜESA

3. EL VAPOR Y LA ENERGÍA

Figura de la Aeolipia.
Máquina de Papin.



Después del agua y del viento el vapor ha sido el tercer fluido que se usó como fuente energética. Su utilización ha sido posterior a las otras dos porque no existe de forma natural y hay que generarlo. Además su manejo es difícil y ha requerido un desarrollo de la técnica que no se produjo hasta el siglo XIX. Sin embargo, su utilización presenta indudables ventajas que hacen que haya sido, y en parte lo siga siendo, una de las fuentes principales de generación de energía, sobre todo eléctrica.

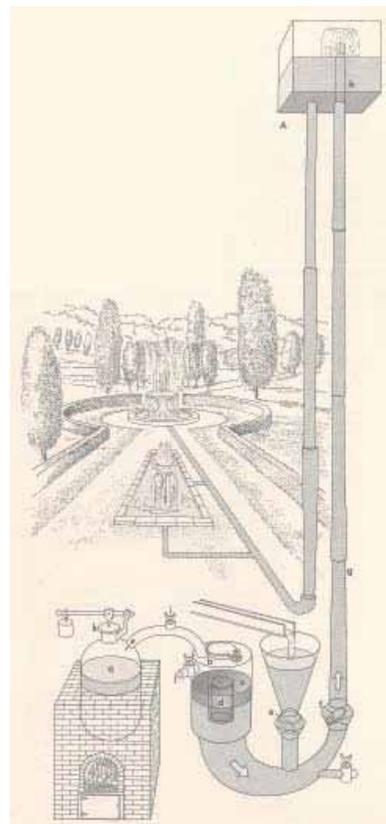
3.1 PRIMERA REFERENCIA DEL VAPOR

La primera referencia sobre el uso del vapor es del siglo II a. de C. Herón, de la escuela de Alejandría, construyó la Aeolipia, que era una turbina de reacción accionada por el vapor de una combustión. Consiste en un globo hueco sostenido por dos pivotes por los que le llega vapor que sale por dos tubos doblados en sentido contrario de manera que puede girar. No pasó de ser un instrumento curioso, porque para poder aprovecharlo industrialmente se precisa gran presión de vapor, giro a muchas revoluciones, gran precisión en todos los conductos y cierres, etc. Todo ello no fue posible hasta muchos siglos después, por lo que, aunque ha habido varios intentos a lo largo de la historia no llegaron a traducirse en realidades.

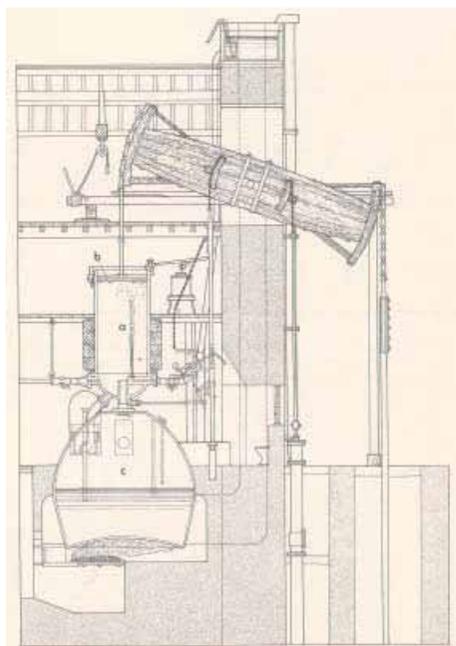
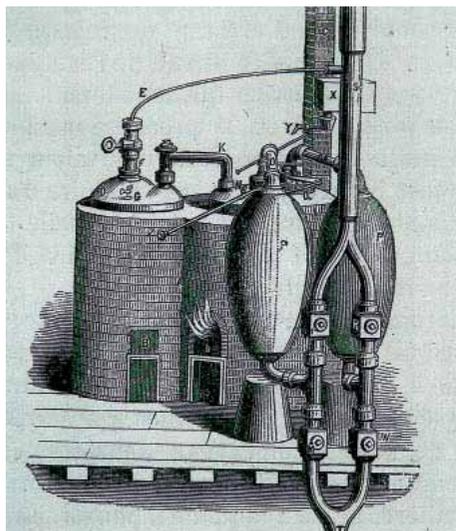
3.2 DESARROLLO INDUSTRIAL

A continuación vamos a comentar la evolución de las máquinas que han permitido la utilización del vapor como fuente de energía. Como siempre ocurre ha sido un proceso gradual, con grandes personajes que han cambiado la sociedad. Resulta llamativa la referencia a patentes que, en ocasiones, han bloqueado el desarrollo y que ha motivado que nuevos inventores tuviesen, por no poder utilizarlas, que desarrollaran sus propias soluciones.

El primer uso industrial del vapor fue realizado por Denis Papin (1647-1714) que descubrió la forma de aprovechar la energía del vapor enfriándolo, construyendo la primera máquina de vapor. El vapor procedente de una combustión movía un pistón, en el interior de un cilindro, que impulsaba el agua hacia un depósito elevado, desde el que se hacían funcionar las fuentes de los jardines del Duque de Hesse. Una vez llegado el pistón al final del cilindro se condensaba el vapor, con la entrada de agua, y el cilindro subía por la fuerza del agua de un depósito de agua intermedio y por el vacío que había provocado la condensación del vapor al otro lado del pistón, repitiéndose el ciclo. El descubrimiento de Papin fue que el vacío que provocaba la condensación del vapor permitía hacer repetitivo el funcionamiento. Pero las tuberías de elevación reventaban y el sistema se abandonó, poniéndose de manifiesto las limitaciones de la técnica para la utilización del vapor.



Máquina de vapor de Savery.
Máquina de Smeaton.



Tomás Savery patentó en 1698 su máquina de vapor pensada para extraer aguas de las minas. El vapor de la caldera pasaba a un recipiente y hacía subir el agua contenida en él. Al vaciarse el recipiente se interrumpía el flujo de vapor y se enfriaba el recipiente con agua fría, con lo que se condensaba el vapor produciéndose un vacío que hacía entrar de nuevo el agua, que se aspiraba del lugar que se quería achicar. La presión de vapor llegaba hasta 10 atm y también se producían numerosos reventones de tuberías, pero muchas de estas bombas se usaron en los primeros años del siglo XVIII.

A pesar del resultado satisfactorio de estas máquinas no tuvieron éxito ya que eran costosas, su manejo peligroso y tenían muchas averías por lo inadecuado de los materiales utilizados para las duras condiciones en que debían trabajar.

En 1712 Thomas Newcomen construyó la primera máquina de vapor atmosférica en Dudley Castle. Funcionaba del modo siguiente. El vapor entraba en un cilindro y la presión empujaba el pistón hacia arriba. El pistón estaba conectado a una barra que provocaba la subida de un balancín. Cuando se llenaba el cilindro de vapor, con el pistón en la parte superior, se rociaba el cilindro con agua condensando el vapor, entonces la presión exterior hacía bajar el pistón que bajaba el extremo del balancín. De esta forma se conseguía la subida y bajada de un balancín que accionaba una bomba aspirante impelente de agua. Como en la máquina de Savery el movimiento se producía por el vacío creado por la condensación del vapor. Newcomen tuvo problemas legales porque la patente de Savary era muy amplia y su vigencia duró hasta 1733. Además tuvo los mismos problemas de Papin de falta de resistencia de las varillas y cojinete, así como falta de estanqueidad entre el pistón y el cilindro.

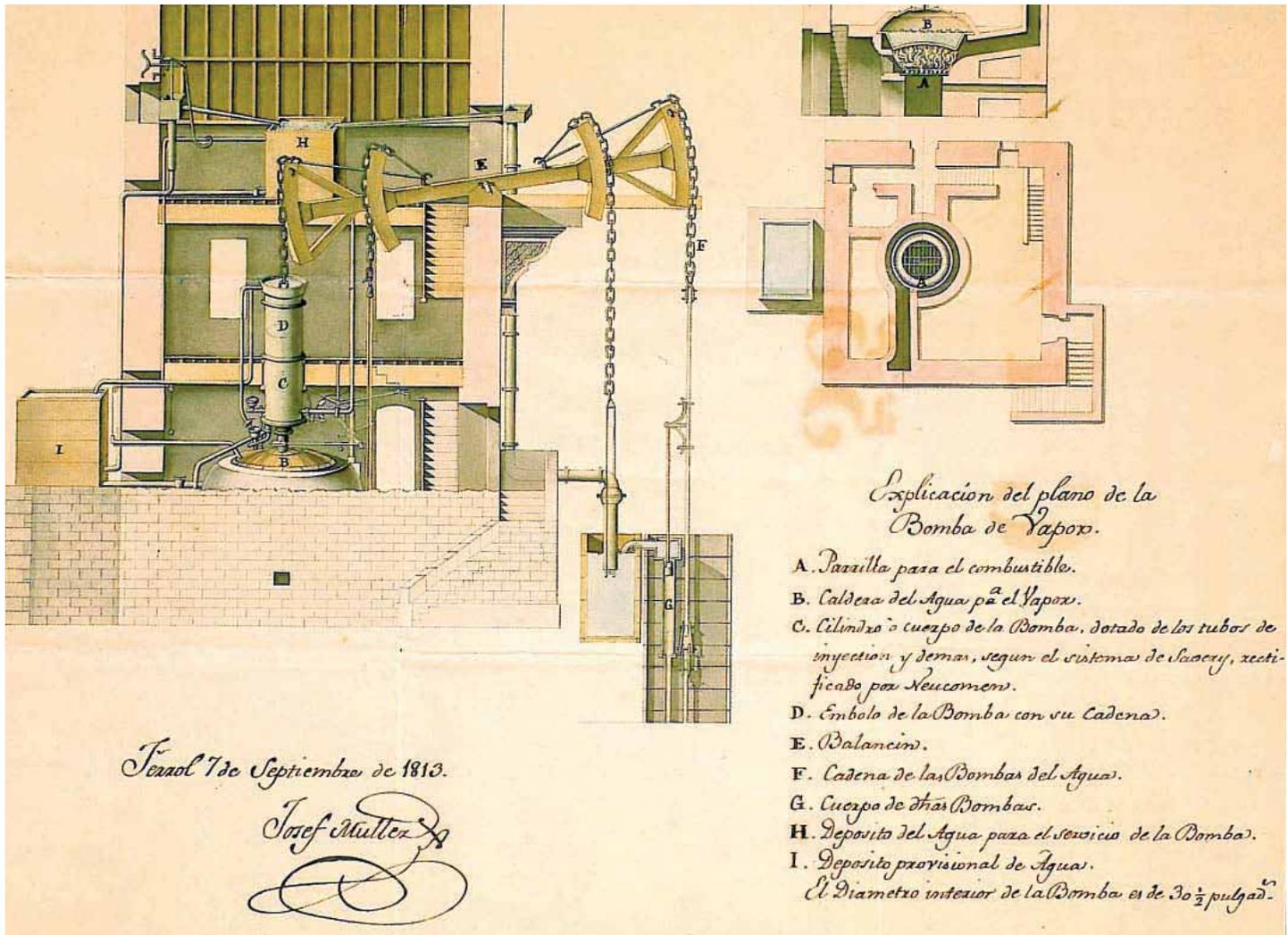
Las máquinas se fueron perfeccionando, se automatizaba la apertura y cierre de válvulas y se mejoraban los materiales. En 1760 había más de 100 máquinas en funcionamiento en Inglaterra, la mayoría para sacar el agua de las minas de carbón. Tenían un gran consumo de combustible, sufrían grandes desgastes y tenían muchas averías. Se decía que hacía falta una mina de hierro para construirla y para las piezas que había que reponer, y otra de carbón para mantenerla en funcionamiento.

Entre las mejoras de la máquina destacan las de John Smeaton que, en 1772, construyó una máquina que era tres veces más eficaz que la de Newcomen, gracias al ajuste conseguido entre el cilindro y el pistón.

El uso de las máquinas de vapor cambió el mundo ya que se podía producir energía en cualquier lugar, a cualquier hora y, relativamente, de cualquier potencia, sin tener que estar condicionado a los emplazamientos en que había saltos de agua o viento adecuado. Ello supuso la concentración del trabajo y el desarrollo de la sociedad industrial, desarrollo que tuvo lugar principalmente en Inglaterra.

El desarrollo de las máquinas de vapor ha ido ligado, necesariamente, a la calidad y precisión de los elementos que las constituyen, así fue decisivo el mecanizado con tornos de piezas que debían acoplarse con precisión.

Máquina de vapor de Newcomen utilizada para achicar el agua en los diques de carena del Arsenal del Ferrol.



3.3 JAMES WATT

Analizando el funcionamiento de máquinas de Newcomen, Watt descubrió que al introducir agua fría en el cilindro, para condensar el vapor, se desaprovechaba parte de la energía y que ésta era la principal razón del exagerado consumo de combustible.

Watt ideó la solución de condensar el vapor en otro recipiente, el condensador, manteniendo además caliente el cilindro principal. En 1769 patentó un “Nuevo método para disminuir el consumo de vapor y combustible en las máquinas térmicas”, que es una de las patentes más importantes de la historia de la tecnología. De esta forma el vapor se convertía en agua en el radiador frío y se enviaba nuevamente a la caldera para volver a convertirse en vapor.

Watt se asoció con Matthew Boulton y crearon la sociedad Boulton & Watt que fabricó los primeros motores a escala industrial, especialmente para achicar aguas de minas. Además de las mejoras técnicas introducidas habían pasado más de 80 años desde la primera máquina de Papin y había mejorado apreciablemente la tecnología para conseguir materiales resistentes a tracción, mejorar el ajuste entre el pistón y el cilindro, adecuar la automatización de apertura y cierre de válvulas, etc.

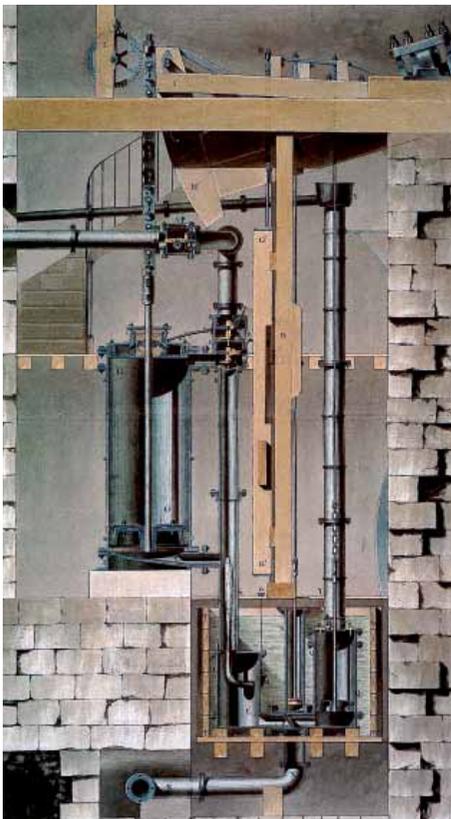
Boulton y Watt idearon un sistema comercial consistente en alquilar sus máquinas cobrando el ahorro de combustibles respecto a una máquina de Newcomen del mismo tamaño.

El siguiente problema a resolver era transformar el movimiento oscilante del balancín en giro. Watt se encontró con la dificultad de que existía una patente de solución con biela y manivela que no podía utilizar, por lo que inventó el sistema de transmisión planetaria consistente en dos ruedas dentadas, que girando una sobre la otra consiguen el mismo resultado que la solución ya patentada.

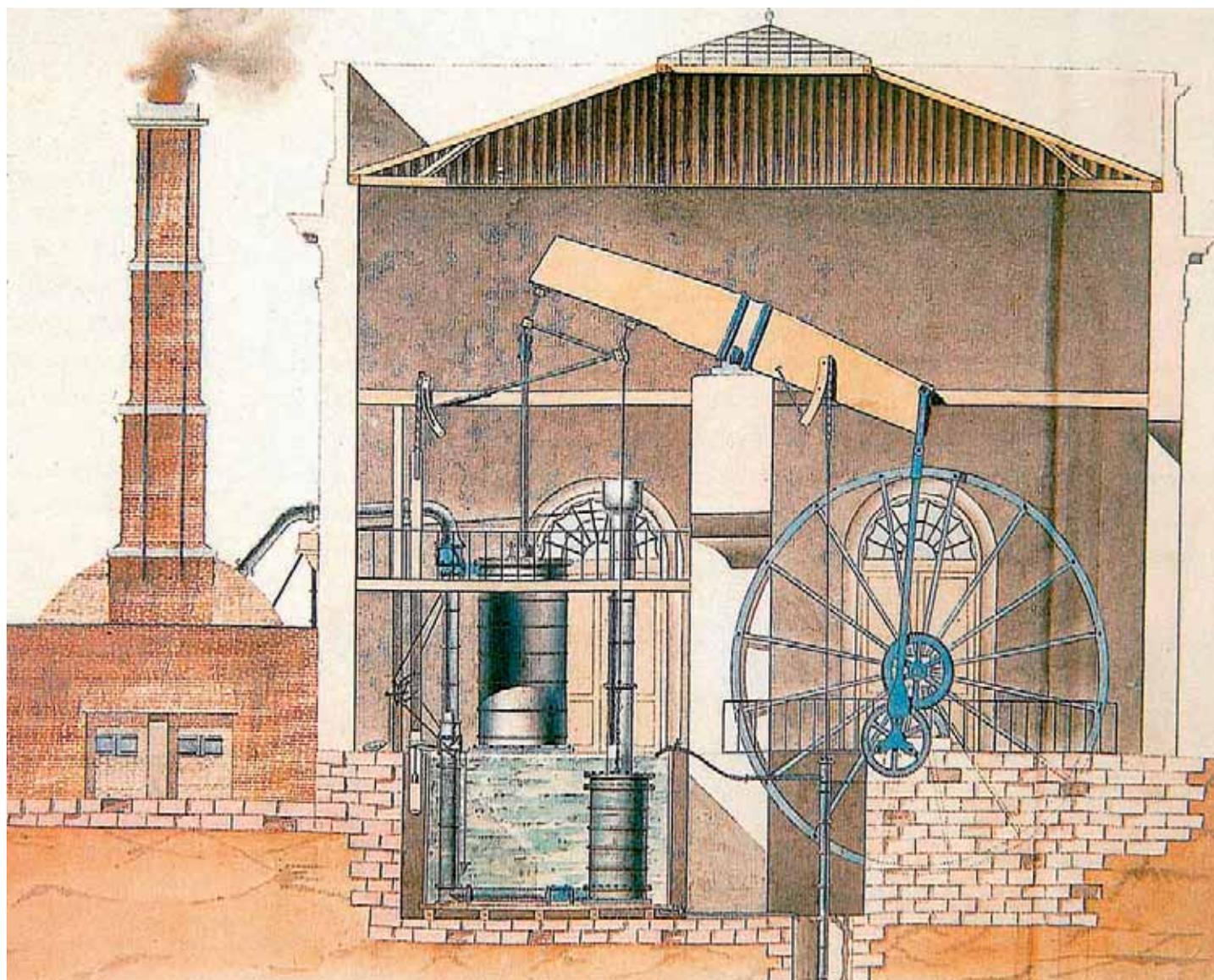
Otra gran mejora conseguida por Watt fue el cilindro de doble acción. El vapor entraba en el cilindro por los dos extremos y se duplicaba el rendimiento de la máquina. Ello obligó a cambiar las cadenas que conectaban la varilla del émbolo con la viga principal del balancín por barras, para que funcionasen en los dos sentidos. Para solucionar los problemas que ello ocasionaba inventó el varillaje de dirección en paralelogramo, que Watt siempre consideró como su obra maestra, y que permitía que el movimiento ascendente en una misma vertical se pudiese conectar a un punto que giraba y que, por tanto no estaba en la misma vertical. Este paralelogramo articulado es la solución que se usa en los automóviles para conseguir que cada rueda delantera gire lo que debe para que las perpendiculares a ambas se encuentren en la prolongación del eje trasero y haya un único punto de giro.

El gran éxito de Watt fue, con todas sus mejoras, conseguir cuadruplicar el rendimiento de la máquina de Newcomen.

Máquina de vapor.



Diseño de la máquina de vapor de Watt de doble efecto, con planetarios y con paralelogramo articulado, según dibujo de Agustín de Betancourt. París, 1788.



3.4 MEJORAS POSTERIORES A WATT

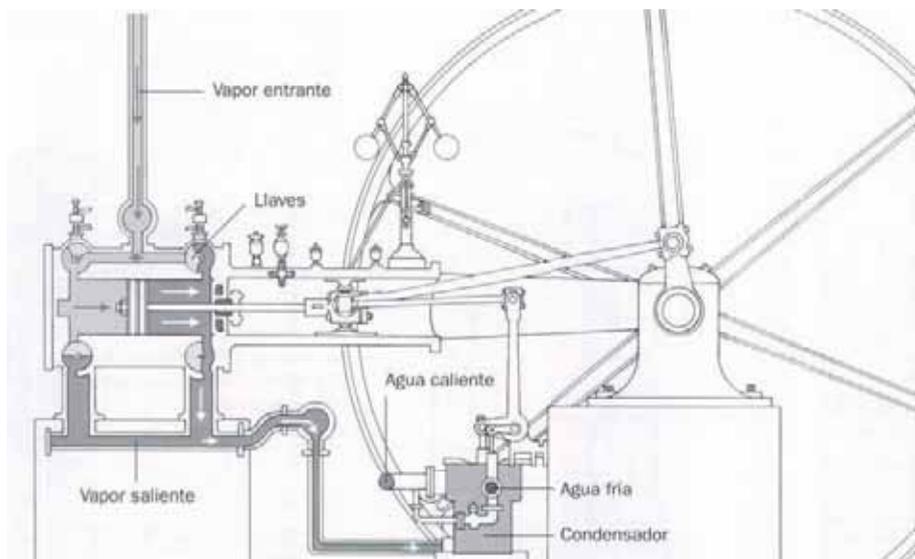
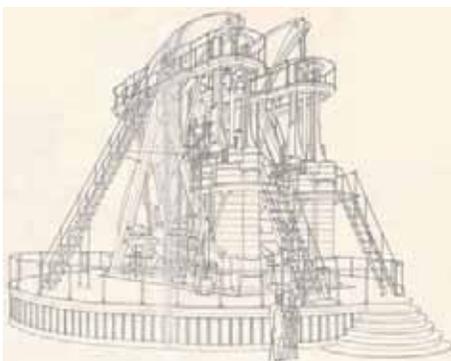
En 1802 el escocés Matthew Murray inventó la válvula corredera que, con ligeras modificaciones se usó durante toda la era del vapor. Por otra parte iban mejorando las calderas y se podían conseguir presiones cada vez más altas.

Mucho más tarde, en 1849 el americano George Henry Corliss patentó el cursor Corliss cuya válvula corredera, que regula la entrada del vapor al cilindro, estaba controlada por un regulador centrífugo, de manera que la cantidad de vapor que admitía dependía del trabajo a realizar por la máquina, con lo que se ahorra vapor, economizando combustible. Llegó a ser el ingeniero más popular de Estados Unidos construyendo la gran máquina de 2.500 caballos de potencia de la Exposición del Centenario en Filadelfia en 1876.

En 1866 Charles Brown construyó la primera máquina de vapor sobrecalentado, que permitía reducir considerablemente las pérdidas de calor debidas al intercambio de calor entre el vapor y las paredes del cilindro. La máquina, equipada con un cursor de Corliss, funcionaba a 5 atmósferas de presión y tenía 56 caballos de potencia.

El aumento de la presión del vapor llevó a que se expandiera sucesivamente en una serie de dos o más cilindros. Hacia 1870, aplicando ya los conocidos fundamentos teóricos de la termodinámica, las máquinas de vapor habían llegado a su límite. Entonces apareció la energía eléctrica y hacia 1880 se inventó el primer motor de gasolina, con lo que la máquina de vapor dejó de tener la primacía que había adquirido.

Cilindro de una máquina de Corliss.
Esquema de funcionamiento.



3.5 BARCOS DE VAPOR

Las máquinas de vapor eran inicialmente grandes, de muy bajo rendimiento, con riesgos de explosiones e incendios y se destinaron a los bombeos de agua de las minas. Se comprende que, en cuanto fue posible, se intentase instalarlas para el movimiento de barcos, cuyo desplazamiento estaba condicionado a los vientos y requería muchos esfuerzos para el accionamiento de las velas, con un trabajo de mucho riesgo, etc.

Ese intento supone un cambio cualitativo, de enorme importancia, ya que se pasó, de mover un balancín que accionaba una bomba, a que se moviese la propia máquina que producía la fuerza. Por otra parte los barcos eran, relativamente grandes y podían instalarse en ellos las máquinas de vapor de finales del siglo XIX.

Después de varios intentos en 1783 el marqués Claude de Jouffroy d'Abans consiguió que el vapor de ruedas de paletas Pyroscaphe navegase quince minutos en contra de la corriente en el río Saône, cerca de Lyon. El barco tenía ruedas horizontales a los dos lados, accionadas con máquinas de doble acción horizontales. La Revolución impidió la continuación de estos ensayos.

En Norteamérica, en 1785, John Fitch ideó un sistema de 6 remos verticales, a cada lado del barco que eran accionados, con una máquina de vapor. Hizo algunas pruebas en el río Delaware, pero la velocidad era muy baja y el sistema no tuvo éxito.

En 1801 el escocés William Symington construyó el Charlotte Dundas de 18,6 metros equipado con una máquina de doble efecto, tipo Watt, que accionaba una rueda de paletas en la popa. Las pruebas fueron un éxito arrastrando dos barcazas de 70 toneladas a los largo de 20 millas en 6 horas, pero los propietarios del Canal Forth & Clyde pensaron que las olas que provocaba erosionarían las orillas del canal y prohibieron su uso.

El americano Robert Fulton, después de haber hecho algunos intentos en Francia, logró, en 1807, que su barco de vapor Clermont de 40,5 metros de eslora, equipado con un motor de Boulton & Watt que accionaba las ruedas laterales, navegase por el río Hudson cubriendo en 32 horas las 150 millas de distancia entre Albany y Nueva York. El Clermont ha sido el primer barco de vapor de servicio regular, podía transportar 90 pasajeros y funcionó hasta 1814.

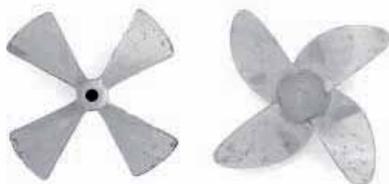
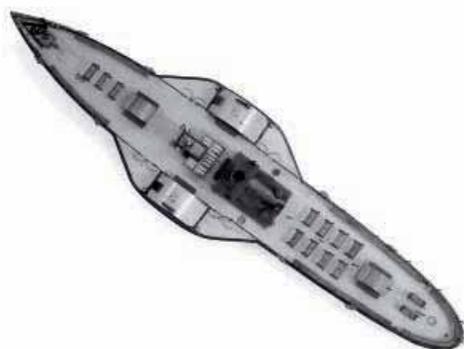
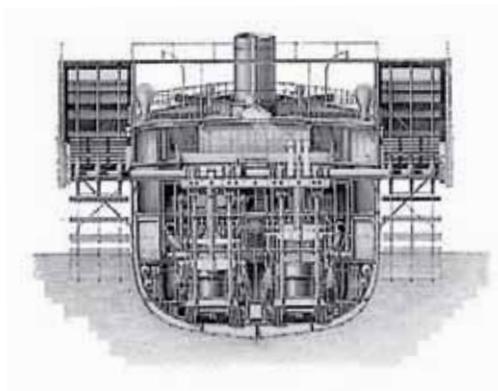
El Savannah, en 1819 cruzó el Atlántico a vapor y a vela, entre Savannah y Liverpool. Cuando llegaba a Irlanda la salida del humo de la chimenea hizo pensar a los vecinos de la costa que el barco estaba ardiendo y enviaron un guardacostas en su ayuda.

En 1821, el James Watt inició el transporte a vapor y vela de pasajeros y cargamentos entre Londres y Leith (Edimburgo), siendo, hasta que se inició el ferrocarril, la forma más rápida de comunicación entre las dos ciudades.

Ilustraciones del King Alfred.

Fotografías de hélices.

Ilustración del Natchez (derecha).



Los barcos de vapor iniciales eran muy parecidos a los de vela, incluso disponían de los dos sistemas de propulsión. Las máquinas de vapor movían ruedas, normalmente laterales, lo que era intuitivo y fácil de inventar.

Tenían dos ruedas laterales como el *King Alfred* usado para navegar por el Tamesis. También hubo otros barcos con una sola rueda en la parte de popa, como el *Natchez* del río Misisipi.

Pero las ruedas tenían muchos inconvenientes, eran grandes y pesadas, impulsaban la nave con movimiento discontinuo, como los remos. El balanceo de la nave afectaba a la parte sumergida y por tanto al movimiento.

Por eso fueron sustituidas por la hélice, que fue patentada por el sueco John Ericson en 1836. Las palas de las hélices giran alrededor de un eje sensiblemente horizontal que es accionado por el motor. Pueden ser de 2, 3 ó 4 palas. Los barcos grandes tienen 2 o incluso 4 hélices. Las hélices están sumergidas permanentemente por lo que proporcionan un empuje regular sin que le afecten ni las olas ni el movimiento del barco. Impulsan la nave hacia delante con un movimiento semejante al de un tornillo. Es llamativa la fuerza de avance que pueden generar las hélices y que se traduce en su, relativamente, pequeño tamaño respecto al de los barcos en que están instaladas.



Barcos Great Britain, Alecto, Rattler, Turbinia, City of Rome y Victoria.



En 1845 el Great Britain, de 98 metros de eslora hizo la primera travesía con hélice del Atlántico, de Liverpool a Nueva York, tardando 14 días y 21 horas. Fue un logro para su época, era el barco de hierro más grande construido hasta entonces. Seguía manteniendo velas.

En 1845, el Almirantazgo Británico hizo una prueba con dos naves: el *Rattler* con hélice y el *Alecto* de ruedas de paletas. El barco de hélice pudo con el *Alecto* remolcándolo a la velocidad de 2,5 nudos y, aunque siguieron construyéndose barcos de ruedas, el camino del futuro quedó fijado.

Posteriormente los barcos de vapor se fueron beneficiando de las mejoras técnicas del vapor, como máquinas de doble, triple o cuadruple expansión, etc.

En 1884 Sir Charles Parsons inventó la turbina de vapor y en 1894 instaló una en un pequeño barco, el Turbinia, que debutó en el Diamond Jubilee Naval Review, sorprendiendo a todos los asistentes al alcanzar la velocidad de 34 nudos dejando a su estela a los guardacostas que le perseguían.

Durante muchos años los barcos compaginaban las hélices con las velas, tanto para barcos mercantes como de guerra.

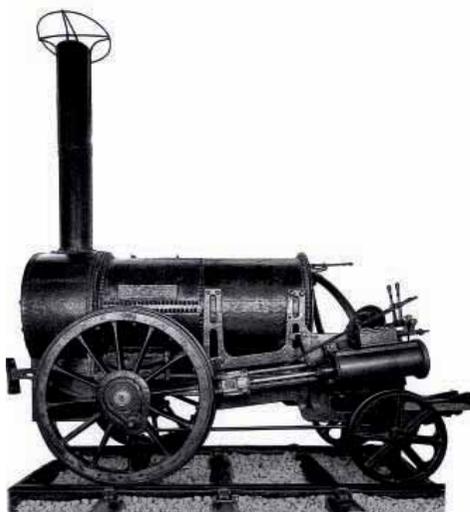
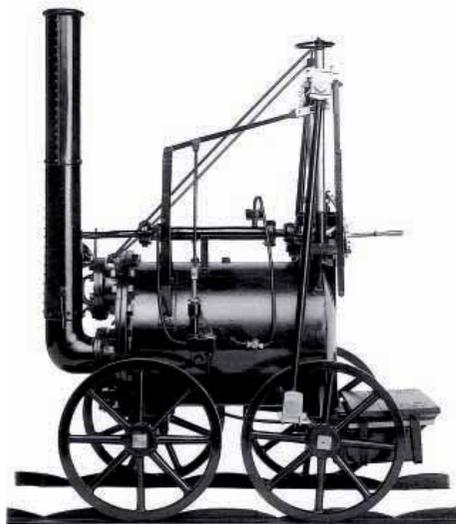
En 1904 se inició la instalación de motores de explosión en los barcos, con lo que poco a poco fueron desapareciendo los barcos equipados con máquinas y turbinas de vapor.



3.6 MAQUINAS DE VAPOR AUTOMOTRICES

Máquina de Trevithinck.

Locomotora Rocket.



Algo después de la instalación de máquinas de vapor en barcos empezaron las pruebas de vehículos a motor de vapor terrestres. En 1801 Richard Trevithinck (1771-1833) consiguió que un vehículo equipado con su máquina de vapor de alta presión subiese una cuesta en Beacon Hill, en Inglaterra. Al año siguiente la patentó así como su utilización como motor para vehículos. Casi simultáneamente el americano Oliver Evans construyó una máquina de vapor portátil.

Aunque ha habido autobuses, camiones y maquinaria de vapor, el desarrollo de vehículos automotrices se realizó en los ferrocarriles. Ya existían primitivos ferrocarriles tirados por caballerías con vehículos que se movían sobre rieles de hierro. En uno de ellos, en 1804 Trevithinck hizo una prueba satisfactoria con una máquina de vapor.

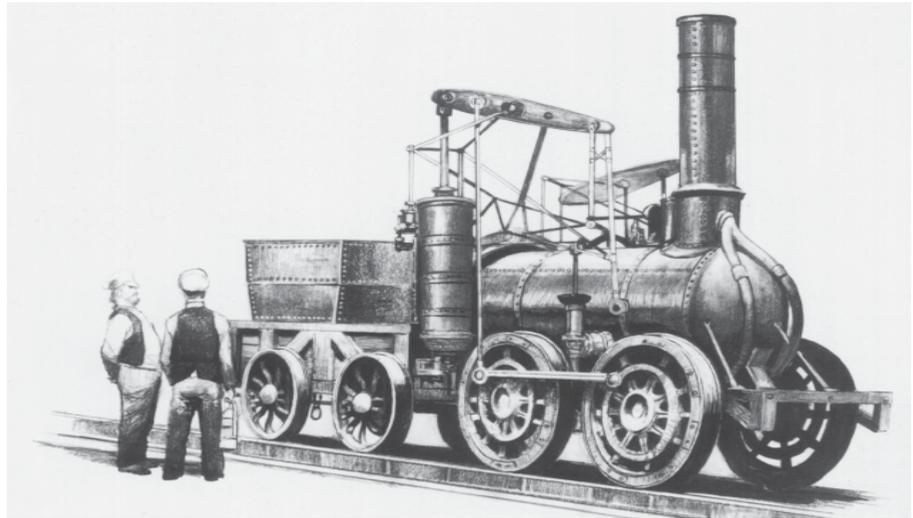
En 1829, el inglés George Stephenson presentó su máquina en un concurso convocado por la Compañía del ferrocarril de Liverpool y Manchester para decidir que método de tracción sería el más indicado y ofreciendo un premio para la mejor propuesta. Stephenson logró un rotundo triunfo con su locomotora *Rocket* que alcanzó la velocidad de 40 kilómetros por hora. La caldera estaba construida por tubos, muy similar al sistema de calderas tubulares modernas. Los émbolos de los cilindros, puestos en posición inclinada, accionaban directamente a las ruedas motoras, con un sistema de biela y manivela. Una vez efectuado el trabajo, el vapor se incorporaba a la chimenea por la que salía, además, el humo de la combustión. Como puede verse la *Rocket* reunía todos los elementos esenciales de las máquinas de vapor de ferrocarriles y por ello se impuso de manera fulminante, constituyendo una revolución en el transporte.

Como siempre que hay cambios sustanciales en el desarrollo se produjeron fuertes oposiciones a los vehículos de vapor. Mucha gente pensaba que serían causa de desempleo. En Inglaterra llegó a promulgarse la Ley de la bandera roja que imponía a los vehículos automotrices la necesidad de ir precedidos por una bandera o una linterna para advertir a los peatones del peligro que se acercaba.

Su desarrollo cambió el mundo, acortó las distancias, permitió la unión de territorios muy lejanos. Será uno de los inventos que más han repercutido en la historia del desarrollo. Por otra parte supuso acabar con las diligencias, redujo sensiblemente el transporte por canales, haciendo que algunos que se estaban construyendo, como el Canal de Castilla, no llegasen a terminarse.

El desarrollo de las locomotoras de vapor tuvo lugar principalmente en Inglaterra y en Estados Unidos. En 1829 la locomotora *Stourbridge Lion* fue la primera que operó a nivel comercial. En la figura puede verse que para el accionamiento de las ruedas mantenía el sistema de balancín de las máquinas de vapor fijas.

Las locomotoras fueron perfeccionándose, aumentando el tamaño y la potencia, mejorando el sistema de producción del vapor, colocando sistemas de accionamiento a varias ruedas, de modo que todas fuesen tractoras, pero sin cambios sustanciales. En la figuras pueden verse diversas locomotoras, sensiblemente iguales que la “Rocket”, aunque de mucho mayor tamaño, con los cilindros horizontales, con las ruedas acopladas, etc.

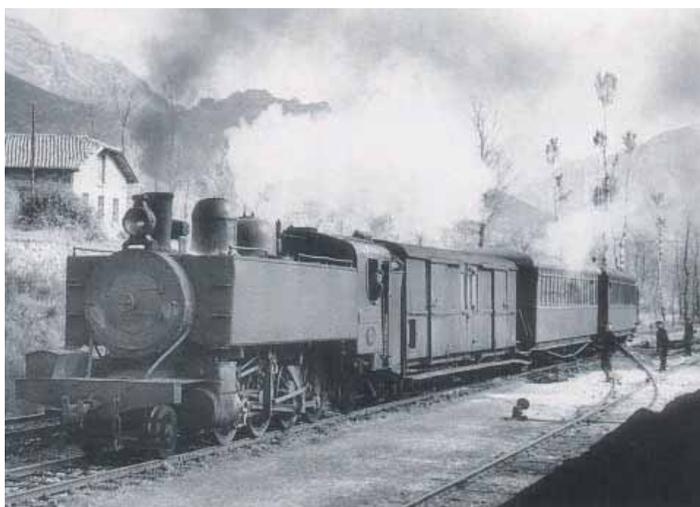
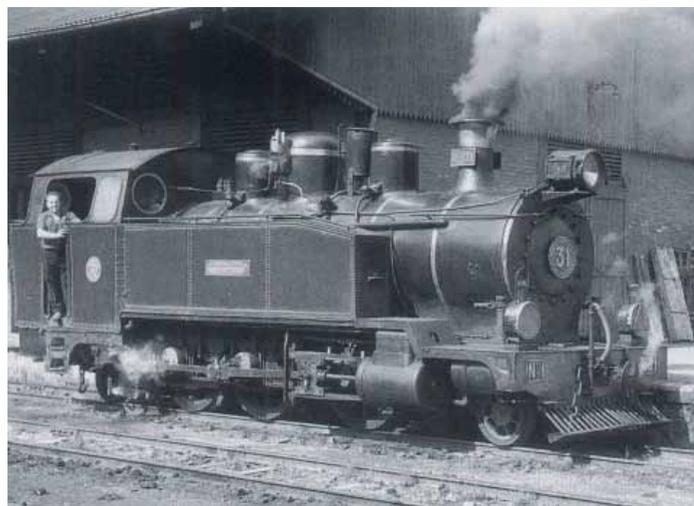
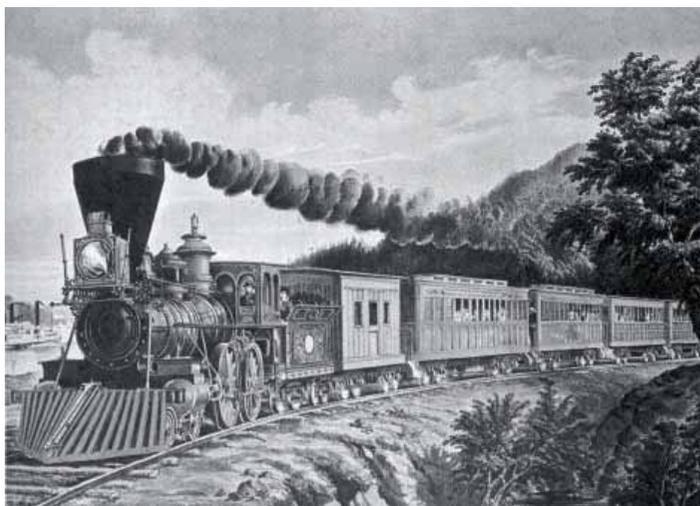


Stourbridge Lion.
Sección de un ferrocarril.



3. EL VAPOR Y LA ENERGÍA

En las imágenes siguientes puede verse el sistema de producción de vapor, el paso a los cilindros, las bielas y manivelas, la conexión entre las ruedas, etc. Típica locomotora americana de la época de la conquista del Oeste americano. Locomotora de los ferrocarriles de Asturias, en servicio en 1960. Locomotora del ferrocarril de La Robla en 1962. Locomotora 240-2074, una de las últimas de RENFE



La locomotora *Evening Star* fue la última construida para los ferrocarriles británicos en 1960, como puede verse es muy similar a las anteriores.

Las locomotoras de vapor han funcionado hasta la segunda mitad del siglo XX, en que fueron progresivamente sustituidas por las diesel o eléctricas. La máquina de vapor se ha usado para maquinaria de obras públicas, autobuses, etc., pero en estos sectores la introducción del motor de explosión fue mucho más rápida y los vehículos de vapor tuvieron un desarrollo muy limitado en el tiempo.

Autobuses de vapor.

Locomotora Evening Star.



3.7 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Vamos a describir el desarrollo de los conocimientos teóricos de las máquinas de vapor, y por tanto de la termodinámica, en base a las aportaciones de sus principales descubridores.

SADI CARNOT

Todo el desarrollo que hemos comentado se produjo sin el menor conocimiento teórico del proceso térmico. Se creía en la existencia del calórico y no se conocían los calores específicos ni los de cambio de estado. En ese contexto, en 1824, el ingeniero y físico francés Sadi Carnot escribió un libro titulado “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia”, que constituye la primera teoría básica de la máquina de vapor. El libro era casi incomprensible para los técnicos de la época y pasó desapercibido.

El que se escribiese en Francia, cuando casi todo el desarrollo industrial, como hemos comentado, se había producido en Inglaterra, pone de manifiesto que las grandes aportaciones de la ciencia se deben a personajes singulares que aparecen en cualquier lugar.

Hasta entonces la preocupación de los constructores de máquinas era mejorar el rendimiento con mejores ajustes entre las partes móviles, mayor presión de vapor, mejores transmisiones, etc. Pero sin que se analizase lo que ocurre después de la apertura de las válvulas de la salida del vapor.

Se inicia el libro con una exposición sobre la importancia de las máquinas de vapor, indica que “Parecen destinadas a producir una gran revolución del mundo civilizado.” Alude al efecto que han tenido para la extracción del agua de las minas de hulla y de hierro, que ha permitido asegurar su funcionamiento, así como para “la navegación segura y rápida de los buques de vapor que puede contemplarse con un arte totalmente nuevo y que ha permitido el establecimiento de comunicaciones rápidas y regulares”.

Lo interesante de su trabajo es que planteó, no un análisis concreto de las máquinas de vapor que se estaban construyendo en aquel momento, sino un planteamiento científico para analizar, de modo general, los problemas de transformación calor/energía en su mayor amplitud. El libro no aludía a experimentos concretos, ni tenía un desarrollo matemático importante sino que teorizaba, teniendo como objetivo buscar las leyes que regulan el funcionamiento de una máquina térmica ideal.

Su gran aportación fue plantear que la potencia motriz del calor depende del salto térmico entre los estados caliente y frío del proceso, cuando los ingenieros de su época consideraban que la presión era la variable relevante del proceso. Este concepto es lo que se denomina Principio de Carnot.

Figura de Carnot.

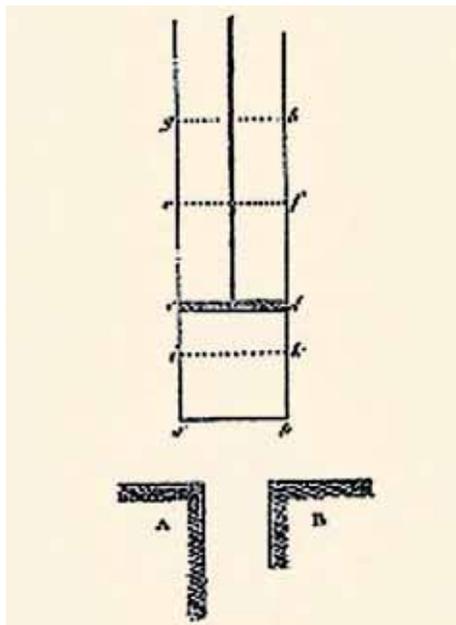


Figura textualmente en su libro:

“Para producir potencia motriz no basta con producir calor, además hay que procurarse frío; el calor sin el frío sería inútil”.

“Allí donde existe una diferencia de temperatura puede haber producción de energía motriz”.

“La potencia motriz del calor es independiente de los agentes que intervienen para realizarla; su cantidad se fija únicamente por la temperatura de los cuerpos entre las que se hace, en definitiva, el transporte del calórico”.

Este planteamiento es el que se hace hoy día para expresar el rendimiento de las máquinas reversibles:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Siendo T_2 la temperatura absoluta del foco caliente y la T_1 la del frío

Como servidumbre de la época, Carnot asumía la teoría del calórico, considerando que el vapor es un medio para transportar el calórico desde el foco caliente al frío.

Planteaba los siguientes principios para desarrollar la potencia motriz del calor:

“1° En primer lugar se debe llevar la temperatura del fluido al grado más elevado posible, con el fin de obtener una gran caída del calórico, y, por consiguiente, una gran producción de potencia motriz.

2° Por la misma razón debe llevarse el enfriamiento también lo más lejos posible.

3° Es necesario actuar de modo que el paso del fluido elástico de la temperatura más elevada a la más baja se deba a la extensión de volumen, es decir, es necesario actuar de modo que el enfriamiento del gas tenga lugar espontáneamente por medio de la rarefacción.

Los límites de la temperatura donde es posible hacer llegar primeramente el fluido no son más que los límites de la temperatura producida por la combustión.

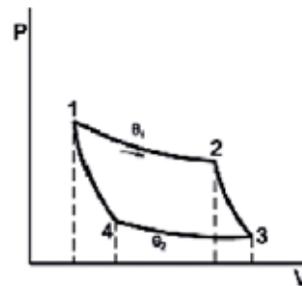
Los límites del enfriamiento se encuentran en la temperatura de los cuerpos más fríos de los que se pueda disponer fácilmente y en gran abundancia: estos cuerpos son habitualmente las aguas del lugar donde uno se encuentra.”

Analiza el funcionamiento teórico de una máquina que hiciese el ciclo completo de modo reversible: Estudiaba el funcionamiento de un cilindro provisto de un émbolo que puede estar en contacto con dos cuerpos A y B que se mantienen a temperatura constante, siendo la de A más elevada que la de B. El cilindro, en contacto con A se calienta y el émbolo se eleva, desde la posición *cd*, hasta la posición *ef*, manteniendo la temperatura de A. El cilindro se aleja de A, se pone en contacto con B y “se comprime el aire por el retroceso del émbolo hasta la posición *cd* a la temperatura constante de B, al que cede su calórico”.

Continuaba con la descripción del ensayo volviendo a la situación inicial “separado el cilindro de B se continua la compresión del aire que va elevando su temperatura hasta alcanzar la de A. En contacto con A el émbolo hasta a la posición *cd*”.

Como puede verse planteaba un ciclo cerrado, es decir propio de máquinas reversibles. En una primera parte "había producción de una cierta potencia motriz y el transporte del calórico del cuerpo A al B" y en la segunda la "consumición de potencia motriz y la vuelta del calórico del cuerpo B al A."

Este funcionamiento ideal se conoce como CICLO DE CARNOT y queda reflejado en el diagrama presión/volumen, con dos curvas isotermas y dos adiabáticas, ideado por Clapeyron en 1834, que se aprecia en la figura.



El tramo 1-2 corresponde a la expansión isotérmica en la que el vapor aumenta de volumen a la temperatura t_1 . La expansión adiabática 2-3 se produce cuando el cilindro está sobre el cuerpo frío B y corresponde a la obtención del trabajo hasta que alcanza la temperatura t_2 de B. El tramo 3-4 es la compresión, aportando trabajo a la temperatura t_2 y el 4-1 es la compresión adiabática hasta alcanzar el estado inicial. En un proceso reversible el trabajo exterior realizado es el área del ciclo.

Analiza también la diferencia entre los planteamientos teóricos y los reales. En las máquinas de vapor de entonces se conseguía un salto de temperatura de 120° , entre los 160° del vapor y los 40° del condensador, cuando en una caldera se podía llegar a unos 1.000° y el agua de refrigeración podía estar a 10° . Para conseguir aprovechar ese salto de casi 1.000° plantea hacerlo "a presiones sucesivas muy variables, muy diferentes unas de otras y progresivamente decrecientes." Planea que se aproveche el salto con dos cilindros de modo que "en el segundo se aproveche el vapor que ya ha actuado en el primero". Incluso ese reducido salto de 120° tenía un rendimiento de tan solo un veinteavo de la energía del carbón utilizado.

Como puede verse, además de los fundamentos teóricos de la termodinámica, muchos de los planteamientos prácticos de Carnot se aplican en las centrales térmicas de hoy día.

RUDOLF CLAUSIUS

En 1848 James Joule hizo el importante descubrimiento de que la corriente eléctrica calentaba el alambre por el que fluía y, que, en ese proceso, perdía parte de su fuerza. En base a ello Rudolf Clausius planteó, en 1850, que el calor y el trabajo no eran sino dos variantes de un mismo fenómeno al que luego se llamó energía. Calor y trabajo eran fundamentalmente lo mismo, pudiendo medirse con las mismas unidades, estableciéndose la relación entre las calorías y los julios. En el experimento de Joule la energía eléctrica se transformaba en energía térmica.

Cualquier tipo de energía podía transformarse en otro tipo de energía, sin afectar a la energía total del universo. Este concepto llegó a denominarse Ley de Conservación de la Energía y supuso el fin de la teoría del calórico, porque asumía que era la energía y no el calor la base de los fenómenos térmicos.

Clausius adecuó las teorías de Carnot, que como hemos comentado, creía en el calórico, a este nuevo planteamiento. Decía que “en todos los casos en los que se produce trabajo por medio del calor, se consume una cantidad de calor proporcional al trabajo realizado”, es decir el sistema toma de la caldera una cantidad de calor Q_1 mayor que la cedida al refrigerante Q_2 y el trabajo realizado T es igual a $Q_1 - Q_2$. Aparte del calor malgastado en pérdidas y que eran la causa del bajo rendimiento de las máquinas térmicas.

Analizó el comportamiento irreversible del calor:

El calor fluye naturalmente de lo caliente a lo frío y nunca de lo frío a lo caliente. Este planteamiento conduce al Segundo Principio de la Termodinámica que puede plantearse como que “No es posible un proceso cuyo único resultado sea la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura” y que se conoce como Enunciado de Clausius.

El rendimiento de una máquina térmica es la relación ente el trabajo realizado T y el calor tomado de la caldera.

$$\eta = \frac{T}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Que pone de manifiesto que todos los ciclos reversibles entre dos temperaturas dadas tienen igual rendimiento y que equivale a la ecuación de rendimiento antes expuesta para un ciclo reversible.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Cuando se opera con temperaturas absolutas de los dos focos de calor.

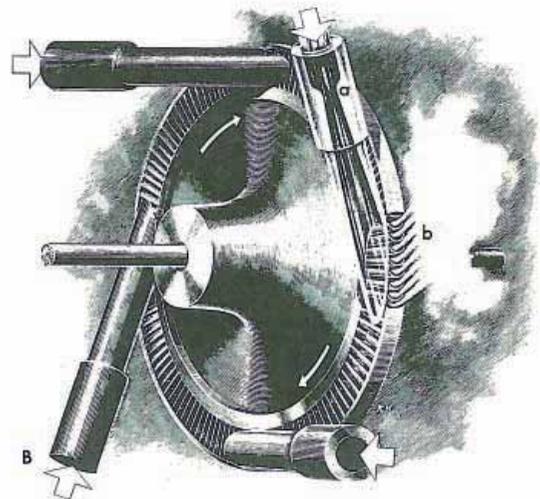
Definió el concepto de entropía como relación entre el calor y la temperatura, estableciendo que en todos los cambios naturales se producían aumentos de entropía, mientras que en todos los antinaturales (conseguidos mediante máquinas) se producían reducciones de entropía. Pero en todas las máquinas reales, a causa de las pérdidas, rozamientos, etc. el saldo era positivo, lo que supone que la entropía global del Universo esté siempre aumentando.

3.8 TURBINAS DE VAPOR

En 1883 el sueco Carl Patrick de Laval patentó la boquilla de una turbina de acción, en la que el vapor de alta presión pasaba por unas toberas en las que se conseguía la energía cinética justo antes de incidir en las paletas de la rueda de una turbina. De esta manera se producía directamente el movimiento de giro que supone una gran ventaja sobre el movimiento oscilante de las máquinas de vapor anteriores. La velocidad de giro se podía controlar con la presión de la tobera.

El principal problema consistía en las altas velocidades que se alcanzaban al expansionarse completamente el vapor en una sola etapa, más de 30.000 r.p.m., lo que requería ejes perfectamente equilibrados. También se precisaba aumentar la presión del vapor, que en 1897 llegó a 220 atmósferas.

Casi simultáneamente, en 1884, el inglés Sir Charles Parsons, construyó una turbina de reacción, basada en las turbinas hidráulicas de Fourneyron. El vapor entraba por el eje, fluía entre guías fijas actuando sobre palas de la rueda móviles. La turbina conseguía un gran aprovechamiento de la energía porque tenía un escalonamiento del salto energético mediante 14 ruedas fijas, que hacían de toberas sobre otras 14 ruedas móviles unidas en un eje común. El escalonamiento hacía que, en cada paso, se convertía en energía cinética una parte de la presión, hasta llegar a la presión de escape, lo que permitía reducir la velocidad de giro, que era 18.000 r.p.m. La turbina movía un generador eléctrico de 75 A. Esta turbina de flujo axial ha sido un paso muy importante en la historia de la tecnología e inició el espectacular desarrollo de las turbinas de vapor.



Máquina de Laval.

Estas turbinas, las primeras de reacción, se usaron para grandes barcos. El Turbinia, botado en 1895, fue el primer barco equipado con turbina.

Algo más tarde, en 1891, Parsons construyó la primera turbina radial en la que el vapor trabajaba radialmente desde el centro hacia fuera. Esta turbina giraba a 4.800 r.p.m. accionando un generador de 100 kW. En 1898 se llegó a potencias de 1.000 kW.

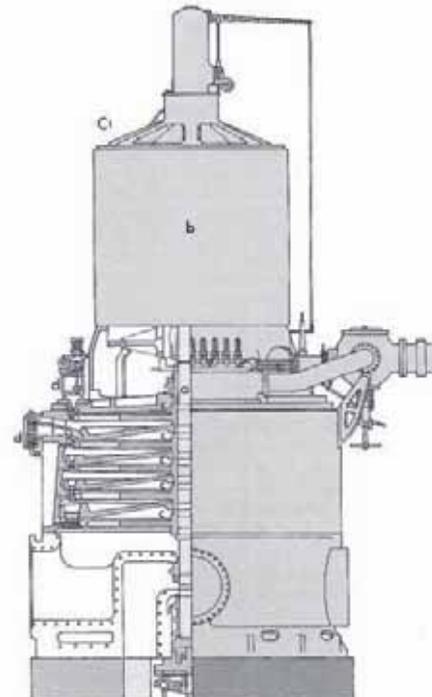
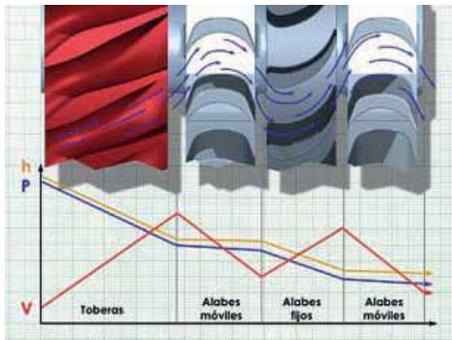
En 1895 el americano Charles Gordon Curtis patentó una combinación de turbina de acción y reacción. El vapor incidía sobre un rotor con paletas de guía fijas, como en la turbina de reacción de Parsons y al mismo tiempo se expandía, como en las boquillas de Laval. En 1903 se terminó una máquina de este tipo de 5.000 kW.

En Francia, en 1896 Auguste Rateau patentó una turbina de etapas múltiples dividiendo la expansión el vapor en varias etapas sucesivas. Ello permitía que la turbina girase a menos revoluciones sin que disminuyera el rendimiento, pudiendo conectarse directamente al generador sin necesidad de multiplicador.

En 1912 los suecos Birger y Erik Ljungström construyeron una turbina con flujo axial del vapor que además se expandía. La turbina, de 1.000 kW, tenía unas palas-guía que giraban en sentido contrario a la rueda motriz

Turbina con múltiples etapas.

Máquina de Parsons.



3.9 ESTADO ACTUAL DE LAS CENTRALES TÉRMICAS

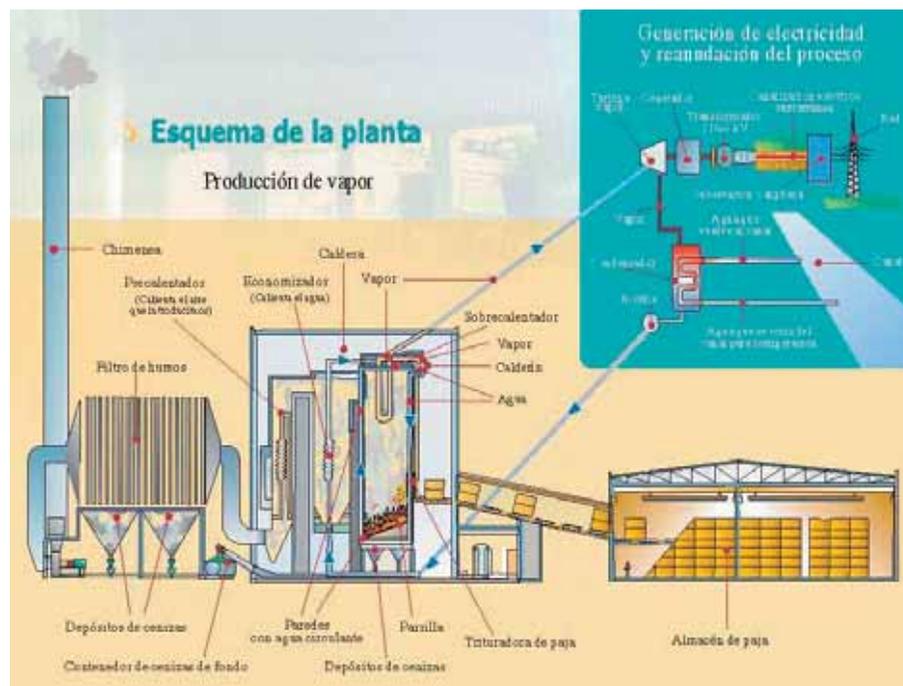
LA PLANTA DE BIOMASA DE SANGÜESA

En los apartados anteriores hemos expuesto el desarrollo de la técnica y de los conocimientos teóricos de la utilización del vapor para generación de energía. En éste vamos a describir la Planta de Biomasa de Sangüesa. Es una central térmica de 25 Mw, de potencia neta, construida en 2002, que utiliza como combustible paja de cereal y de maíz. La descripción de esta planta nos a permitir exponer, de modo detallado, el estado actual de todos los procesos de generación de vapor, funcionamiento de la turbina, condensación, recuperación de calor, precalentamientos etc.

La planta consta principalmente de tres edificios principales: almacén de paja, caldera y turbina. Este último engloba también las oficinas y salas eléctricas. Además hay edificios auxiliares para tratamiento de agua, bombeo etc. Se ha construido con un diseño arquitectónico cuidado con una galería para que las visitas de grupos puedan ver todas las instalaciones, pero sin entrar en su interior.

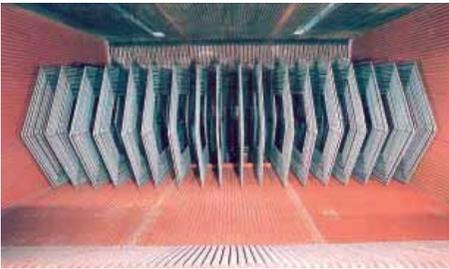
Planta de biomasa de Sangüesa. Conjunto con edificios auxiliares y chimenea. Vista nocturna.

A la derecha, esquema de la planta.



Caldera. Sobrecalentadores en el interior, vistos desde abajo. Calderín superior.

Foto del conjunto de caldera.



CALDERA

En la caldera se produce la combustión de la paja. Se ha proyectado ajustada a las características del combustible a utilizar. Está formada por paredes construidas con tubos verticales soldados a tope por los que circula el agua líquida, de abajo hacia arriba y en los que, por efecto del calor, se evapora. Están revestidos de aislante en el exterior. El combustible, la paja, entra por cuatro puntos y cae sobre unas parrillas vibratorias móviles que son accionadas por un motor que provocan la el avance de la paja en la caldera. La caldera está diseñada de modo que los gases de combustión en su recorrido atraviesan los sobrecalentadores, con lo que se consigue elevar la temperatura del vapor. Las dimensiones de la caldera están establecidas para conseguir, mediante la combustión de paja de cereal, el caudal y características del vapor adecuadas a la potencia de la instalación. La caldera quema 20 ton/hora de paja con un calor específico de 3.400 kcal/kg, produciendo 108 m³/h de vapor a 540° C y 90 bar de presión. Esta transformación implica un rendimiento de la caldera del 92 %. En el resultado final de la instalación cada kilogramo de paja produce 1,375 kwh eléctricos.

La caldera mide 24 metros de altura. Está apoyada en una estructura metálica proyectada para permitir las dilataciones, de hasta 0,30 metros, debidas a las variaciones de temperatura. Tiene una sección transversal de 65 metros cuadrados. Cuenta con equipos de control, limpieza, etc. para asegurar el funcionamiento.

La evolución de las características del agua y del vapor es:

El agua entra en la caldera precalentada a 230°, el caudal es de 107m³/h. Circula por las paredes verticales de la caldera y llega al calderín como vapor a 317°C y 97 bar.

Al pasar a través de los sobrecalentadores, se consigue aumentar la temperatura y la presión sucesivamente a 400° C-97 bar, a 450° C-95 bar, a 510° C-93 bar y finalmente sale de la caldera a 540° C-90 bar.



Residuos de cenizas e inquemados.

Equipos de toma y precalentamiento de aire.

Primeros precalentadores de agua.

Segundo calentador.



INQUEMADOS

La combustión de la paja deja un residuo de cenizas e inquemados que se recoge en un espacio denominado cenicero situado bajo la parrilla vibratoria y que debe ser retirado de forma continua. Por razones de seguridad y de estanqueidad frente a los gases el cenicero está lleno de agua, por lo que el material extraído tiene una humedad del 50 %. A través de una cadena arrastradora se llevan a unos contenedores desde donde se transportan a un gestor autorizado de residuos para su utilización como ingredientes de compost. Esta utilización está justificada por la estructura así como por su contenido en potasio. Las cenizas de fondo de parrilla secas suponen el 4,5 % en peso de la paja quemada seca, lo que representa 19 ton/día.

AIRE PARA LA COMBUSTIÓN

El aire para la combustión de la paja entra por cuatro puntos situados en la parte baja de la caldera. Se toma de la parte alta del interior de edificio de caldera y después de pasar por un precalentador de aire rotativo se lleva hasta la caldera. En este equipo se aprovecha el calor de los gases de combustión hasta conseguir elevar la temperatura del aire hasta 220° C. El caudal total de aire es de 118 m³/h.

CIRCUITO DE AGUA

El agua, procedente del condensador, antes de volverla a introducir en los tubos de la caldera, es precalentada en dos etapas: primero, en el precalentador de baja y luego, en un segundo calentador. Debe estar desmineralizada para evitar que al calentar/evaporar se produzcan precipitaciones que den lugar a incrustaciones en las paredes de la caldera que dificultarían la transmisión del calor y la circulación del agua. El caudal de agua es de 95m³/h y se producen unas pérdidas de aproximadamente un 12% en purgas, drenajes, etc. que deben ser repuestas con agua desmineralizada. Desde el condensador el agua es bombeada al precalentador, consistente en un intercambiador tubular, y desde el cual se inyecta en la parte inferior de los tubos que constituyen las paredes de la caldera.



SALIDA DE GASES DE COMBUSTIÓN

Los gases de combustión, después de atravesar todas las partes de la caldera son enviados a la atmósfera por una chimenea de 50 metros de altura que consigue la difusión en la atmósfera. Salen de la caldera a 470° C, después de atravesar el economizador, donde se calienta el agua, salen a 310° C, después pasan por el precalentador de aire rotativo, de donde salen a 130° C aprovechando parte de su energía para calentar el aire de entrada para la combustión. Antes de ser enviados a la atmósfera los gases de combustión se depuran con un sistema de filtros de mangas, que retiene las partículas sólidas de hasta 1 micra. A estos residuos sólidos se les llama cenizas volantes.

La emisión se ajusta a la normativa de centrales térmicas que establece los siguientes valores límite de contaminantes expresando las concentraciones en mg/m³ normal y al 6% de O₂).

SO ₂	1.000
NO _x	600
Partículas	100

CENIZAS VOLANTES PROCEDENTES DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES

Las cenizas volantes son ricas en potasio. Se recogen en contenedores que son transportados a un gestor autorizado de residuos para su utilización como ingrediente del compost. Se genera un 1 % en peso de la paja quemada, lo que supone 4 ton/día.

Contenedores de recogida de cenizas de limpieza de gases.



CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

SISTEMA DE CONTROL DE EMISIONES Y TORRE METEOROLÓGICA

Tal y como obliga la Normativa, en la chimenea de la caldera se instaló un sistema de registro y control de emisiones. Por otra parte, también se instaló, en un extremo de la parcela, una estación meteorológica a 60 metros de altura para poder registrar los vientos dominantes y condiciones climáticas.

Esto permite correlacionar las emisiones con las inmisiones según los vientos dominantes.

La información del sistema de emisiones así como las meteorológicas se ofrece a la autoridad ambiental en tiempo real. Además diariamente se envía un archivo de forma automática conteniendo los valores medios horarios de los niveles de emisión, las condiciones meteorológicas así como las condiciones de operación de la planta.

SISTEMA DE CONTROL DE INMISIONES

Al redactar el proyecto de la Planta se realizó un estudio que simulaba los niveles de inmisión de contaminantes debidos a la operación de la planta. Para ello se creó un modelo de simulación en el que con las características de la instalación de combustión, la orografía del terreno próximo y las condiciones climáticas se obtenían resultados sobre la dispersión de los contaminantes. En este estudio se comprobó que no había afecciones significativas y para verificarlo se instaló una estación de control de calidad de aire en el casco urbano más próximo: Sangüesa.

Estación de control.

Turbina rotor con todos los álabes móviles.



TURBINA

La turbina de vapor de Sangüesa refleja la evolución de estas máquinas desde las primeras hasta el momento. La turbina instalada en Sangüesa es una turbina denominada “de reacción”. El vapor llega de la caldera a 90 Bar y 540°C y a medida que va atravesando la turbina, durante su expansión va produciendo el giro del rotor. La turbina consta de 20 filas de álabes en el rotor y sus correspondientes en las etapas fijas de la turbina. Son de diferente tamaño y se distribuyen intercalando etapas de álabes fijos con etapas de álabes móviles en el rotor. De esta forma se consigue la reducción progresiva de la potencia, pasando el vapor de unos a otros como se aprecia en las fotos, de modo que el salto térmico en cada paso sea reducido, consiguiendo una producción de potencia en cada paso que permite un giro del conjunto a 6.000 r.p.m.

La evolución decreciente de las condiciones de presión y temperatura, según el sentido del flujo de vapor a lo largo de la turbina son:

Etapla 4	P=30 bar,	T ^a =423°C
Etapla 3	P=12 bar,	T ^a =300°C
Etapla 2	P=5 bar,	T ^a =250°C
Etapla 1	P=0.45 bar,	T ^a = 78°C

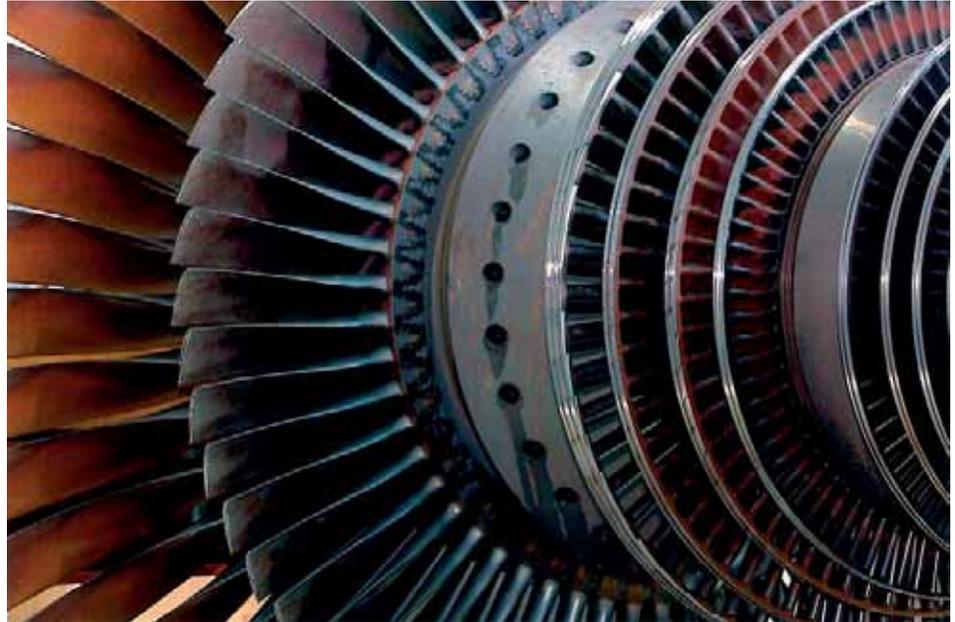


A la salida de al turbina las condiciones del vapor son 0.040 bar y 29°C.

La potencia de la turbina es de 30,2 MW. Se trata de una turbina pequeña, habiendo grandes centrales con turbinas de más de 500 MW.

Las turbinas al girar a un elevado régimen de revoluciones y estar a temperatura y presión muy altas, son equipos especialmente sensibles que deben estar perfectamente equilibrados y con una cimentación adecuada a los esfuerzos que se producen. Corresponden al estado actual del aprovechamiento de la energía del vapor y son iguales tenga el vapor la procedencia que tenga; es decir tanto si se trata de centrales nucleares como si son de carbón, de paja etc.

Turbina. Álabes fijos intermedios entre los móviles.
Conjunto de turbina y condensador.
A la derecha, detalles de turbina: varias filas de
álabes móviles y última fila de alabes móviles.



CONDENSADOR

Una vez que el vapor ha perdido presión y temperatura es condensado para pasarlo al estado líquido y mediante bombas incorporar esta agua nuevamente al circuito. La condensación se consigue haciendo circular por el interior de unos tubos de 19 milímetros de diámetro el agua de refrigeración tomada en el río Iratí. Alrededor de este haz tubular y en sentido contrario circula el vapor a condensar. La superficie total de este intercambiador es de 1.900 m². El caudal de agua de refrigeración es de 1,1 m³/s, entra a temperatura variable según la época del año, entre 10° y 23°; es sobrecalentada 12°C y es devuelta al canal del que se hace la toma. Se trata de un circuito abierto en el que no hay reducciones de caudal. La alternativa es tomar un caudal mucho más reducido, del orden de 35 l/s, y evaporarlo para producir la condensación con el calor de evaporación. En Sangüesa se optó por el circuito abierto, porque había disponibilidades de caudal, sin dificultades para verter el agua 12° sobrecalentada y porque este sistema tiene mejor rendimiento energético.

El rendimiento energético bruto de la planta es el 34,6% y se define como la relación entre la energía que se aporta a la caldera y la que se obtiene en bornes del generador. Este rendimiento viene fijado por las condiciones de operación de la turbina, que en nuestro caso corresponde al salto de temperaturas entre el vapor y el líquido condensado, esto es, el foco caliente está a 540°C y el foco frío a 15°C. El rendimiento neto de la planta es la relación entre la energía que se aporta a la caldera y la que se exporta a la red eléctrica. Este rendimiento en el caso de la planta de biomasa de Sangüesa es del 31,5%.

Condensador.

Tubería de entrada de agua de refrigeración al condensador.

Tubos interiores del condensador.



REDUCTOR

La turbina gira a 6.000 r.p.m. y el generador lo hace a 1.500 r.p.m., precisándose un reductor para el ajuste de revoluciones. Consiste en un sistema de engranajes que consigue el cambio de revoluciones en base a la diferencia de diámetros entre la corona y el piñón. Se trata de un equipo muy robusto, dimensionado para la potencia a transmitir, que trabaja en condiciones duras y continuas. Resulta llamativo su tamaño en relación con el de la turbina.

GENERADOR Y CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

El giro de la turbina llega, a través del reductor al generador en el que el movimiento del rotor induce la corriente en los bobinados del estator. En Sangüesa el estator tiene 4 pares de polos que a 1.500 r.p.m. genera la corriente a 50 ciclos. La potencia nominal es de 30,2 MW aunque en las condiciones nominales de operación opera a 27,5 MW, de los que 2,5 MW se necesitan para el autoconsumo de la planta (consumos auxiliares internos) y los 25 MW restantes son enviados a la red, previa una transformación 11.000/66.000 V saliendo de la planta a esta tensión hasta la subestación general en que se incorporan al sistema eléctrico. Esta línea de evacuación es subterránea y tiene una longitud de 750 metros.



Central de Sangüesa. Azud de toma de agua en el río Iratí.

INSTALACIONES COMPLEMENTARIAS

La central requiere un conjunto de instalaciones complementarias:

TOMA DE AGUA PARA LA REFRIGERACIÓN

Como se ha indicado, la refrigeración del condensador se consigue con un caudal continuo de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ que es tomado del río Irati en un azud existente y bombeado al circuito de refrigeración, con una presión de $2,1 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Una vez calentado es devuelto al canal y como el condensador precisa una contrapresión de 10 metros hay un pequeño salto energético que es aprovechado con una turbina de 85 kW.

ALMACÉN Y MANEJO DE LA PAJA

La central de Sangüesa usa paja como combustible. La paja llega en pacas normalizadas que se guardan en “pajeras” desde la recolección hasta el momento de su utilización. En la planta hay un almacén para el consumo de los fines de semana. Todo el proceso está normalizado para permitir el mejor aprovechamiento de los camiones así como la automatización de la descarga y traslado a la caldera. Llegan cada día 50 camiones con remolque, con unas 15 toneladas de paja cada camión.

SISTEMA DE CONTROL

Toda la planta funciona con un sistema automatizado, en base a programas de explotación, que permiten que en los días festivos haya únicamente dos personas en la planta trabajando de forma continua en la sala de control.

EQUIPOS ELÉCTRICOS

El funcionamiento de la planta precisa cuadros eléctricos y equipos electrónicos que se sitúan en parte en una instalación centralizada y en parte distribuidos en los diferentes recintos.

Camiones. Descarga. Cuarto de control.

A la derecha, cinta de conducción de la paja a la caldera.



AFECCIONES AMBIENTALES

El vapor es un medio, en cierto modo indirecto, para utilizar la energía de los combustibles. Por esta causa las afecciones ambientales de las centrales que usan el vapor dependen de la materia prima que se utilice.

Se pueden agrupar las afecciones en dos capítulos. Un primer capítulo incluye las afecciones propias del vapor y en el segundo se agruparían las propias del combustible utilizado.

AFECCIONES PROPIAS DEL VAPOR

En el primer capítulo incluimos las afecciones que se producen una vez que se ha generado el vapor y son:

- Afección al agua de refrigeración para la condensación del vapor
- Ruido de funcionamiento de la turbina, reductor y generador

AFECCIONES PROPIAS DEL COMBUSTIBLE

Cada tipo de combustible que se utilice para la generación de vapor supone una planta diferente en cuanto a afecciones ambientales.

Se puede producir vapor quemando:

- Carbón, de muchas clases y con diferentes sistemas de extracción
- Gas natural
- Fuel o hidrocarburos
- Residuos urbanos o industriales
- Biomasa, de diferentes tipos

Además, y dentro de este tipo de centrales, hay que incluir las plantas nucleares en las que la generación del vapor se hace mediante los procesos de desintegración radiactiva.

Cada uno de estos tipos de centrales tiene sus propias afecciones ambientales, cuyo análisis está lejos del objetivo de este artículo. Únicamente podemos señalar que se refieren tanto a las emisiones de la combustión, como a las producidas por la extracción y transporte de la materia prima.

Las centrales que queman carbón, gas o hidrocarburos producen emisiones de CO_2 que colaboran de modo apreciable al efecto invernadero.

AFECCIONES DE LA PLANTA DE SANGÜESA

Vamos a describir las afecciones ambientales de la Planta de Sangüesa. Cuando se redactó el proyecto se visitaron varias plantas similares del norte de Europa (Dinamarca y Finlandia) y comprobamos, sobre el terreno, que las afecciones por las emisiones de la combustión eran reducidas y que había plantas situadas junto a ciudades, a fin de poder destinar parte de la energía a sistemas centralizados de calefacción.

En base a esta idea se consideró la posibilidad de situar la planta en Pamplona y suministrar calefacción a varios barrios de la ciudad en los que había sistemas centralizados de calefacción. Se trataba de llevar el agua caliente a la salida de las actuales calderas instalando intercambiadores, pero el estudio económico que se realizó puso de manifiesto que la pérdida de producción eléctrica que ello suponía era mayor que el importe de la venta de energía térmica, valorando está a precios del combustible sustituido. Llegamos a la conclusión de que en Pamplona no hace suficiente frío como para que estas instalaciones centralizadas sean rentables.

Desde un principio se proyectó la planta con paja como combustible principal, aunque se diseñó la caldera de modo que pueda quemar madera en un 50%. Se aprovechó la situación de excedente de paja que se iba a producir en la zona porque una importante papelera de Zaragoza iba a dejar de fabricar papel con paja como materia prima. Además se tenía conocimiento que en Dinamarca había varias centrales que quemaban paja.

La paja tiene la ventaja de que su poder calorífico es alto, especialmente por su baja humedad. Además la recogida, transporte y manipulación es fácil de mecanizar. Y, por supuesto se trata de un combustible renovable que, en el balance anual, no genera emisiones de CO₂.

Una vez eliminado el emplazamiento de Pamplona se decidió situar la planta junto a un río a fin de que el circuito de refrigeración funcionase de modo abierto, es decir tomando agua y devolviéndola calentada. Se analizaron cinco emplazamientos. En cada uno se estudiaba la toma de agua, la evacuación eléctrica, los accesos y la superficie disponible. Se eligió Sangüesa por ser el más próximo al centro de gravedad de la paja producida en Navarra y la zona lindante de Aragón, ya que el transporte de la materia prima era el término que más influía en el costo total de operación.

Se diseñó la planta para una producción neta de 25 MW, que supone una producción anual de 200 GWh, con un consumo de 160.000 toneladas de paja anuales, equivalentes a un transporte de 50 camiones diarios. Se adoptó este dimensionado por ser la paja generada en un radio de unos 50 km, que se consideró como distancia adecuada para el transporte.

El emplazamiento elegido, en un extremo de un polígono industrial, supone disponer de acceso en condiciones de seguridad. El agua para usos sanitarios se toma de la red del polígono, y las aguas residuales se vierten a la red de colectores de la zona sin necesidad de tratamiento previo. La evacuación eléctrica se resuelve en la subestación del polígono mediante una conexión enterrada.

La toma de agua, de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$, se hizo del río Iratí, cuyo caudal de estiaje iba a quedar asegurado por el embalse de Itoiz. Se aprovechó una antigua toma de una papelera que se había abandonado. Se reparó el azud de toma, se hormigonó el canal hasta la planta y se automatizó la entrada de agua, de modo que se mantenga el caudal ambiental en el río y se limite el que entre en el canal en las avenidas. El agua, calentada unos 12° , se vierte al canal, y es utilizada por una comunidad de regantes. Se realizaron estudios de la repercusión. Wefecto era irrelevante, salvo la mayor generación de algas en el tramo entre el vertido de la planta y la zona de riegos. El vertido del canal, cuando no se riega, se produce en el río Aragón, cuyo caudal regulado por Itoiz y por Yesa permite la dilución en condiciones en que el aumento de la temperatura es de $0,51^\circ$, por lo que no se produce afección ambiental al río. La alternativa era evaporar unos 35 l/s , aprovechando para la refrigeración el calor de evaporación, pero esta solución supone una pérdida de caudal en el río y, además implica un menor rendimiento en la planta.

La turbina, con el reductor, generador y condensador y sus equipos auxiliares se instalaron en un edificio cuyas paredes se proyectaron con aislamiento acústico.

Al redactar el proyecto se estudiaron especialmente las emisiones a la atmósfera, para lo que se realizó un modelo de simulación de la zona analizando la dispersión que los gases emitidos iban a tener en la atmósfera, en las diferentes condiciones de viento de la zona, y el cumplimiento de los niveles de contaminación en los núcleos de población próximos. Se estudió la contaminación de SO_2 , NO_x y partículas, estando todos ellos muy por debajo de los valores exigidos en la normativa. Para comprobar el funcionamiento se instaló una central automática en la entrada de Sangüesa, habiéndose comprobado, una vez en marcha la planta, lo correcto de las previsiones.

El ruido de la turbina, del multiplicador y del generador es reducido, gracias al revestimiento interior del recinto en que van alojados. Ello permite que en las oficinas, puestos de control, etc. situados en el mismo edificio no haya ningún problema de ruido para trabajar de modo permanente.

Las afecciones ambientales propias del combustible son las derivadas de la recogida, almacenamiento y transporte de la paja. La recogida se condiciona a que pase la época de cría del aguilucho cenizo, que anida en los campos. Una vez recogida la paja se almacena en los campos, en montones, llamados pajeras, situados en extremos de campos y en condiciones para que puedan tener acceso para la carga de camiones. Se suelen cubrir con lonas para evitar la entrada de agua.

El transporte a la planta no crea ningún problema ambiental. Se precisa una logística muy estudiada para minimizar los desplazamientos, asegurar que se pueda acceder a las pajeras en invierno, etc. Los camiones se cubren con redes para evitar que la paja se desprenda.

FRANCISCO GALÁN SORALUCE



La redacción de este libro ha sido posible gracias a la colaboración de varios compañeros de Acciona. Concretamente Luis Ruiz de Galarreta, que ha redactado los temas marinos, Migueltxo Núñez que ha escrito lo relativo al funcionamiento eléctrico de los aerogeneradores, Alicia Lizarraga que ha preparado los temas ambientales de los parques eólicos, Pedro Lerga que describe la planta de biomasa y muy especialmente María Ezcurdia que ha buscado y preparado todo tipo de documentación y se ha ocupado además y muy eficazmente de todo lo relativo a la preparación del texto definitivo. Con un equipo de ese nivel se puede hacer cualquier cosa, incluso las que hacemos en Acciona Energía.

EL ÚLTIMO SUSPIRO

Luis Buñuel contó de sí mismo en las páginas finales de *Mon dernier soupir*, memorias autoconfesadas a Jean-Claude Carrière, que a pesar de haberse jactado toda la vida de ser un ateo convencido resulta que en sus últimos años había intimado con un cura, un dominico mejicano a quien –para matizar lo extravagante de esa amistad en relación con su trabajada imagen pública de quemasotanas– tildaba de «moderno». Se trataba del padre Julián que visitaba a Buñuel en su casa a diario y a quien el cineasta dijo entre broma y serio, que llegado el momento de su último suspiro le confesaría todos sus pecados, pediría la absolución y desearía recibir los Santos Óleos para irse en paz de este mundo de su presbiterial mano. En realidad no sabemos si finalmente lo hizo o no, porque él mismo reconocía no encontrarse de viejo con el aplomo suficiente como para reírse del tema de la muerte, es decir de su propia muerte, la puñetera que ya venía venir y sobrecogía al artista llenándole de ansiedad y desasosiego.

El final de un libro como el que el lector tiene entre sus manos no evocará seguramente sentimientos tan dramáticos y contradictorios como los que expresaba el genio de Calanda en su narrada autobiografía, y desde luego esperemos que mucho menos lúgubres. Pero es posible que las cuitas que en él se relatan sobre la energía le lleven a plantearse algunas preguntas que, de modo parecido a lo que sucede con la trascendencia en el dogma religioso, tampoco tienen una respuesta sencilla desde el conocimiento común de una persona de la calle, en buena medida ajena a ese mundo específico y en ciertos aspectos tan provechoso como poco transparente de los negocios energéticos.

Empezaremos declarando que quien escribe estas líneas siempre ha sentido el fenómeno físico de la energía más próximo a lo humano que por ejemplo el de la materia. En primer lugar por la sinonimia que se le reconoce al término con la idea de trabajo, familiar a quienes gracias a Dios o a Darwin viven de su propio esfuerzo y no de herencias o parentescos, y además especialmente por otra circunstancia más profunda que es la de la irreversibilidad de los procesos energéticos reales. Cuestiones ambas nada triviales pero que forman parte de nuestro ser consciente, inconsciente y si se quiere también paraconsciente. La energía, que ya se encuentra en las primeras mitologías de la cultura occidental desde la violenta Titanomaquia hasta el significado simbólico que posee en ese contexto la égida de Zeus, es además un lugar común en el acervo de los ingenieros pues bien claro se tiene que su disponibilidad constituye nada menos que un prerrequisito para la acción, lo que en teoría debería ser una de nuestras principales motivaciones para vivir profesionalmente.

Sobre el significado de los conceptos de trabajo e irreversibilidad hay suficientes evidencias empíricas como para no hacer aquí innecesarios añadidos filosóficos, aunque no está de más señalar que hay quienes piensan que la irreversibilidad asociada a la

energía es una ruptura dolorosa de simetría dentro de la física, por más que resulte tan real como la vida misma. En ello se presiente la existencia de un fenómeno no conservativo cuyo significado preciso se le escapa al público en general, la creación de entropía, una función de estado del sistema que expresa la degradación termodinámica que acompaña a los flujos de energía. De la ciencia de la termodinámica se sabe que es una disciplina nada fácil por lo que en ella tienen de enrevesadas las relaciones causales que desearíamos ver siempre claras y bien arregladitas para poder estar a gusto con nuestras explicaciones.

La irreversibilidad termodinámica, ¿es o no lo mismo que la flecha del tiempo? A esta pregunta se podría responder tanto afirmativa como negativamente y sin saber con seguridad hasta qué punto se está del lado de lo cierto. El tiempo es, además de una duración, una magnitud orientada y la irreversibilidad se apoya precisamente en esta circunstancia, que es una especie de barrera erigida por la naturaleza e inasequible a la voluntad humana. No se trata de una abstracción axiomática como los postulados euclidianos que pueden variarse con cierto margen de discrecionalidad dando lugar a geometrías diferentes, contraintuitivas pero irreprochables en su consistencia lógico-matemática. La segunda ley de la termodinámica que ya enunció Carnot aunque sin llegar a completar una formalización estrictamente rigurosa de la misma, establece la imposibilidad de un movimiento perpetuo de segunda especie y explica la diferencia sutil pero sustante que hay entre la conversión de la energía mecánica en calor y viceversa. En el fondo el problema de la irreversibilidad de los procesos energéticos reales no sólo constituye uno de los interrogantes fundamentales que se sitúan a caballo entre ciencia y filosofía, sino que incluso a través del lenguaje se pueden llegar a cuestionar de su mano algunas bases del positivismo tomadas por inamovibles.

Al margen de sesudas cavilaciones que derivarían hacia el plano metafísico aunque parezcan a priori sencillas –quién no distingue el presente del pasado– el mundo de la energía llama la atención al hombre de hoy en muchos otros aspectos, quizá menos fundamentales pero más prácticos. Uno de ellos es sin duda la cuestión de las externalidades ambientales que se derivan de la generación industrial y el uso humano de la energía, y en particular la espinosa relación que puede haber entre ésta y el cambio climático. Se trata de un fenómeno complejo que no sólo causa preocupación a personas bienintencionadas, tanto enterados como legos, sino que atrae sospechosamente a un buen número de logreros y agoreros –no se emplean estos términos aquí en referencia a los A. Gore de turno, aunque cualquiera lo podría pensar– cuya principal preocupación sobre el fenómeno parecer ser fundamentalmente la de hacer caja.

En España una de las voces más autorizadas sobre tan intrigante asunto, que unos pintan en tonos apocalípticos mientras otros desdeñan con una arrogancia que también

espanta un poco, es la del académico Francisco García Olmedo, catedrático de Biotecnología de la universidad Politécnica de Madrid. Olmedo regala periódicamente nuestro interés en el tema con unos magníficos artículos que se publican curiosamente en revistas culturales y no técnicas –La Revista de Occidente, Revista de Libros– y que contienen una buena dosis de opiniones ponderadas al tiempo que desprovistas de los típicos tópicos del sesgo y del prejuicio. Destaca en ellos generalmente la dificultad que el autor reconoce a la hora de valorar desde una perspectiva puramente científica si el calentamiento global obedece a un proceso de naturaleza coyuntural y es por tanto un transitorio, o si refleja por contra un peligroso patrón tendencial a más largo plazo y en tal caso si en ello hay o no una base antropogénica contrastable.

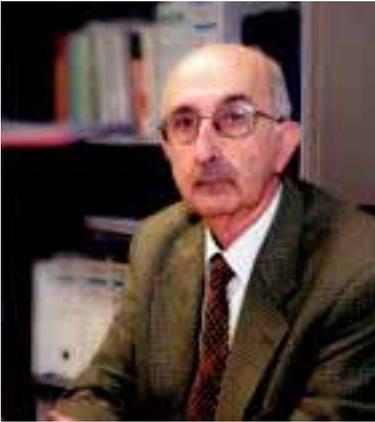
Partiendo de la consideración de que la duda es un arma bastante razonable del pensamiento racional, aún parece que le queda mucho por dar de sí a esta hipotética asociación entre energía, acción antrópica y cambios ambientales en la macroescala planetaria que serían insoportables homeostásicamente para el ser humano y la biodiversidad que hoy conocemos. En el espectro de teorías, conjeturas variopintas y reflexiones referidas a tan enjundiosa cuestión cabe casi todo, desde las afirmaciones semiproféticas del Dr. James Lovelock, el científico activista autor de la «hipótesis Gaia» en la cual se trata a nuestro entero planeta como una especie de ser vivo gigantesco cuya necesaria capacidad de autorregulación podría verse alterada fatalmente por la acción de fenómenos como el calentamiento global, hasta opiniones manifiestamente frías al respecto como las también muy conocidas –y dignas de tener en cuenta– del profesor danés Bjørn Lomborg que en su libro *The Skeptical Environmentalist* argumenta de una manera que parece convincente sobre la carencia de datos de peso para poder juzgar la situación con propiedad y aún menos hacer proyecciones de futuro. Por cierto, conviene mencionar que Lovelock, una figura hasta ahora muy reverenciada por el ecologismo militante, empieza a hacer manifestaciones curiosas sobre el problema del calentamiento global. Una de ellas al constatar que aproximadamente la cuarta parte de las emisiones de CO₂ a la atmósfera provienen de la respiración de los seres vivos (humanos y animales) y por tanto que cabría pensar –entre otras opciones, claro– si biológicamente se podría respirar menos, y la segunda, algo chocante para una personalidad tan reputada de «verde» pero una propuesta seguramente más realista que la anterior, es la opinión de que las energías renovables no solucionan el problema por más que se diga desde el pensamiento políticamente correcto y su manipulación interesada por los *lobbies* de turno, y que hoy por hoy es necesario considerar de nuevo la opción nuclear para garantizar el desarrollo sostenible. Difícil será que le den el «príncipe de Asturias» al venerable ambientalista inglés, en este último caso por decir las verdades del barquero.

Finalmente no querríamos exhalar el último suspiro de este libro –con la venia del editor, naturalmente– sin antes haber expresado un sentimiento de admiración y sana envidia hacia la energía como negocio magnífico que es, siempre jugoso en España sean cuales sean las circunstancias. El aprovechamiento económico del agua, el viento, los combustibles fósiles y demás recursos que ahí estaban antes de que apareciesen la especie humana y los derechos de propiedad, debe ser fruto de la inteligencia y del buen hacer de quienes desde el control del comercio de productos y servicios energéticos han sabido crear y manejar una industria que en cierta medida recuerda el milagro de los panes y los peces, dicho sea en plan metafórico y sin atisbo alguno de irreverencia hacia las Sagradas Escrituras ni por supuesto falta de estima a los capitostes del ramo y sus felices financieros. Una de las bases más fructíferas del modelo de negocio proviene de la propia regulación que ejercen los gobiernos sobre unos mercados acusadamente imperfectos en términos de estructura y competencia –según en qué casos se trata de oligopolios con un *numerus clausus* muy bien guardado o incluso monopolios de los llamados «naturales» si es que tal naturalidad existe– y que tradicionalmente ha recompensado en nuestro país a las grandes empresas de la energía con la bendición del *pass through*, es decir la posibilidad de usar los instrumentos regulatorios para endosar el coste de las contingencias de la política energética –y por qué no decirlo, también de algunas de sus veleidades que haberlas hailas– al consumidor final en su factura. Subvenciones al carbón nacional, moratoria nuclear, garantía de potencia, costes de transición a la competencia, primas a las renovables, déficit tarifario y un largo menú de extras obligados, son minucias que permiten ir tirando a un sector empresarial que a pesar de esos sacrificios regala los ojos del inversor capitalista con noticias deslumbrantes sobre creación de valor y beneficios sistemáticos por encima de la media, según se lee en la prensa económica. Riesgo y ventura entendidos tal vez al hispánico modo.

Y llegados a este punto de entusiasmo sincero, permítase al epiloguista rendir sin más el postrer aliento de su encomienda. Cruz y raya por esta vez, amigo lector; que la Fundación Esteyco siga proveyendo.

CÉSAR LANZA

FRANCISCO GALÁN SORALUCE



Nació en Pamplona en 1942. Estudió Ingeniería de Caminos en la Escuela de Madrid, perteneciendo a la promoción de 1966. En el año 1965, trabajó de alumno en el Laboratorio de Hidráulica del Ministerio de Obras Públicas, en ensayos de modelos reducidos de aliviaderos de presas. De 1966 a 1968 trabajó en la empresa constructora Agromán en temas de obras hidráulicas. De 1968 a 1991 trabajó en el abastecimiento de agua de Pamplona, actualmente Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, participando en la elaboración de diversa normativa de proyectos de abastecimiento y saneamiento, redactando proyectos y dirigiendo obras de tuberías, colectores, depósitos así como las plantas de tratamiento de agua potable y depuración de residuales y el Centro de Residuos Urbanos de la Comarca de Pamplona. Compaginando con el trabajo en la Mancomunidad, en el periodo 1975 a 1980, fue Jefe de los Servicios Técnicos del Ayuntamiento de Pamplona, participando en los planes y actuaciones urbanísticas de la ciudad y de la Comarca. De 1990 a 1992 trabajó en la dirección de obra de diversos polígonos industriales y residenciales. A partir de 1992 trabaja en temas energéticos en la empresa Acciona Energía proyectando las obras civiles y participando en la construcción de centrales hidroeléctricas, parques eólicos, plantas solares, de biomasa, de biocombustibles etc. llevando también la explotación de la presa de Irabia. Ha recibido, en 2007, la Medalla al mérito profesional del Colegio de Ingenieros de Caminos.

MARIO ONZAIN GUTIERREZ



Nacido en Lalín (Pontevedra), el 14 de noviembre de 1939, estudia bachillerato en el colegio de los Jesuitas de Gijón, enganchándose a la literatura gracias al estupendo profesor de la asignatura. En el acueducto de Segovia descubre una épica diferente a la de la Odisea, y, sintiéndose un poco Ulises, se traslada a Madrid para recorrer caminos y estudiar Caminos, constatando que la Escuela no es, como él creía, la isla de los Cíclopes. En 1966 debuta profesionalmente en el “Abastecimiento de Aguas al Gran Bilbao” y posteriormente, durante muchísimos años, profesa en la contrata (Ferrovial, A.C.S., empresas menores...), también en la promoción inmobiliaria, viviendo intensamente la mística de la cuenta de resultados. Para huir de la barbarie escribe desde siempre, pero hasta 1996 no publica su primera novela “El paso alegre de la paz”; después vienen “La Ría de Bilbao” y algunas intromisiones más en los libros de la Fundación Esteyco. Sus otras dos novelas, de gran valía a juicio del autor, llevan por título “Un ángel más” y “La estirpe de Lilith”. Actualmente impulsa, a la orilla del Nervión y en complicidad con Javier Rui-Wamba, Esteyco Gernika.

CÉSAR LANZA SUÁREZ



Nació en León –capital- en agosto de 1955, pero tal como van las cosas casi preferiría haber nacido en Zürich. Es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (1978) y *Computer Science MSc* (1988). Hasta el año 1982 trabajó en las empresas AYESA, Estudio L-I y Gibbs&Hill, en proyectos relacionados con puentes, hidráulica, urbanismo y energía. Ingresó ese año por oposición libre en el cuerpo de Administradores Civiles del Estado (especialidad técnica), dentro del cual desempeñó el puesto de Subdirector General del Ministerio de Industria y Energía, siendo consejero de las empresas ENCE e INISEL. Cesó en el Estado a petición propia en el año 1986 para completar su formación universitaria como becario *Fulbright* realizando estudios universitarios de postgrado (*Master of Science*) en ingeniería eléctrica y ciencias de la computación en Los Ángeles –California– donde pasó tres semestres inolvidables. A su vuelta a España fundó Tecnova I.C. firma independiente de ingeniería de sistemas con especialización en proyectos de nuevas tecnologías en los campos del transporte y de la energía. Al frente de Tecnova sigue ejerciendo lo mejor que puede las funciones de ideador, organizador y animador del trabajo de sus muy competentes colaboradores, intentando no caerse con tanto trajín y tener una aceptable cuenta de resultados. Es miembro del IEEE y de ASCE, así como de la *American Mathematical Society*, amigo del IVAM y socio del Círculo de Bellas Artes de Madrid. Últimamente promueve la red informal denominada “nice” sobre innovación en la ingeniería civil, y al igual que Boris Vian piensa que lo mejor que hay en el mundo, aparte de la propia ingeniería naturalmente, es la música de Duke Ellington y el amor en todas sus manifestaciones.

PORTADA

Almadía en el río Esca en 1930. Fondo del Marqués de Santa María del Villar. Archivo de la Institución Príncipe de Viana del Gobierno de Navarra.

EL AGUA Y LA ENERGÍA

- p. 32. Iberdrola.
- p. 34. (1) Anselmo Guinea. *La Sirga*. Óleo sobre lienzo. Bilbao, 1892. Colección de don Fulgencio Urbano Alonso. (2) Plano y perfiles de almenara y puente de Formigales. Signatura OH-29. Archivo del Ministerio de Fomento. Archivo Gráfico CEHOPU, CEDEX.
- p. 35. (1) Perfiles del Canal Imperial. Lámina 37 y (2) Planta y perfil de una alcantarilla construida en el Canal Imperial. Lámina 38. Conde Sástago. Descripción de los Canales Imperial de Aragón y Real de Tauste. Archivo Gráfico CEHOPU, CEDEX.
- p. 36. Planta y perfil de cuatro inclusas construidas en el Canal Imperial. Lámina 35. Conde Sástago. Descripción de los Canales Imperial de Aragón y Real de Tauste. Archivo Gráfico CEHOPU, CEDEX.
- p. 37. Fondo del Marqués de Santa María del Villar. Archivo de la Institución Príncipe de Viana del Gobierno de Navarra.
- p. 38. Fondo del Marqués de Santa María del Villar. Archivo de la Institución Príncipe de Viana del Gobierno de Navarra.
- p. 40. (1 y 2) *Los veintitún libros de los ingenios y máquinas de Juanelo Turriano*. Fundación Juanelo Turriano. (3) *Los molinos: patrimonio industrial y cultural*.
- p. 41. (1) *Los veintitún libros...* Fundación Juanelo Turriano. (3) Colección Acciona Energía.
- p. 42. *Técnica e Ingeniería en España*.
- p. 43. (1) Diputación Provincial de Toledo. (2) Fotografía de Clifford de 1859. (3) Fotografía de Clifford de 1858. Archivo de la Biblioteca Nacional de Madrid.
- p. 45. Pierre Denis Martín "El Joven". El bombeo de Marly. Óleo sobre lienzo, Château de Versailles et Trianon, París. MV 778.
- p. 46. *Los veintitún libros...* Fundación Juanelo Turriano.
- p. 47. *Los veintitún libros...* Fundación Juanelo Turriano.
- p. 48. Colección Acciona Energía.
- p. 49. Colección Acciona Energía.
- p. 50. *Los veintitún libros...* Fundación Juanelo Turriano.
- p. 51. (1 y 2) *Turbomáquinas hidráulicas*. (3 a 6) Colección Acciona Energía.
- p. 52. (1) *Tecnología popular española*. (2 a 4) *Los veintitún libros...* Fundación Juanelo Turriano.
- p. 53. Colección Acciona Energía.
- p. 55. *Los veintitún libros...* Fundación Juanelo Turriano.
- p. 56. Pascal, B. *Traitez de l'Equilibre des Liqueurs et de la Pesanteur de la Masse de l'Air*. París, 1663: (1) Figuras I a VIII y (2) Figuras de los experimentos.
- p. 62. *Aprovechamientos hidroeléctricos*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- p. 63. Catálogo de Voith.
- p. 64. (1) *Los veintitún libros...* Fundación Juanelo Turriano. (2 y 3) Colección Acciona Energía. (4) *Máquinas, una historia ilustrada*.
- p. 65. (2) Colección Acciona Energía.
- p. 66. (1, 3 y 4) Colección Acciona Energía. (2) Catálogo *Mimihidráulica*.
- p. 67. Colección Acciona Energía.
- p. 68. Colección Acciona Energía.
- p. 69. Colección Acciona Energía.
- p. 70. Colección Acciona Energía.
- p. 71. (1) Archivo Gráfico Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. (2) Colección Acciona Energía.

- p. 72. *Ingeniería de presas, presas de fábrica*. Universidad de Cantabria.
- p. 73. (1) *Dams in Spain*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (2) *Aprovechamientos hidroeléctricos*. CICCP. (3) *Tajo, Tejo, Río Ibérico*. (4) *Ingeniería de presas, presas de fábrica*.
- p. 74. (1 y 2) *Aprovechamientos hidroeléctricos*. CICCP. (3) *Dams in Spain*. CICCP.
- p. 75. *Tajo, Tejo, Río Ibérico*.
- p. 76. (1 y 5) Iberdrola. (2) *Aprovechamientos hidroeléctricos*. CICCP. (3 y 4). Iberduero.
- p. 78. Asuan.
- p. 79. *Three Gorges Project in China*.
- p. 80. (1) Hoover Dam, Departamento del Interior de EEUU. (2) Colección Acciona Energía. (3) Itaipu Internacional. (4 a 7) *Three Gorges Project in China*.
- p. 85. Colección Acciona Energía.
- p. 87. Colección Acciona Energía.

EL VIENTO Y LA ENERGÍA

- p. 90. Colección Acciona Energía.
- p. 92. (1) Archivo White Star. (2). Erich Lessing/Contrasto. (3) *La mar, los buques y el arte*. (4) John Batchelor Illustration. (5) Alfio Garozzo/ Archivo White Star.
- p. 93. *La mar, los buques y el arte*.
- p. 94. Dirección Hidrográfica. Biblioteca Nacional de Madrid.
- p. 95. (2 y 3) *Eyewitness Encyclopedia*. Vol 36. Boat. (4) *La copa América 1851-2003*.
- p. 96. (1) Brown, Son & Ferguson Ltd. (2) Beken of Cowes. (3) *La copa América 1851-2003*.
- p. 97. Harvey Lloyd/Helios Production.
- p. 99. Endesa.
- p. 100. Colección Acciona Energía.
- p. 101. Proyecto de Reconstrucción de Molino harinero de Olleta-EHN. Iñiqui Urkía.
- p. 102. (1) Moulins d'Anjou. *Inventaire general des monuments et des richesses artistiques de la France*. (2) *Windmills*.
- p. 103. *Le Château du Aut.-Koenigsbourg*.
- p. 104 a 107. Proyecto de Reconstrucción de Molino harinero de Olleta-EHN. Iñiqui Urkía.
- p. 108. (1) Catálogo de Molins de vent Tarragó. (2) *Windmills*.
- p. 112. Endesa.
- p. 114. Colección Acciona Energía.
- p. 115. (1) Archivo Revista Obras Públicas. Dic. 2006. N° 3.472. CICCP. (2) Colección Acciona Energía.
- p. 117. Archivo Revista Obras Públicas. Dic. 2006. N° 3.472. CICCP.
- p. 122. Colección Acciona Energía.
- p. 123. Colección Acciona Energía.
- p. 128. Colección Acciona Energía.

EL VAPOR Y LA ENERGÍA

- p. 130. Colección Acciona Energía.
- p. 131. Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya.
- p. 132. *Máquinas, una historia ilustrada*.
- p. 133. (1) Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, BETSICCP, Madrid. (2) *Máquinas, una historia ilustrada*.
- p. 134. Museo Naval, PB-155.
- p. 135. Corte vertical de la máquina de vapor. “*Descripción del establecimiento de Yndrid...*”. Agustín de Betancourt, 1791. Lám. XI (Biblioteca del Palacio Real, Madrid, IX-Mesa 97).
- p. 136. Biblioteca de la École National des Ponts et Chaussées, BENPC, París.
- p. 137. (2) *El vapor Aymerich, Amat i el Jover de Terrassa*. Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya.
- p. 139. *Eyewitness Encyclopedia*. Vol 36: Boat.
- p.140. (1, 3 a 5) De Agostini. (2 y 6) TRH Pictures.
- p. 141. (1) Charmet. (2) National Railway Museum, York (England).
- p. 142. (1) *Trenes de vapor*. Joaquín Chacopino Fabre y Armando Muntés March. (2) *Eyewitness Encyclopedia*. Vol 39: Train.
- p. 143. (1 y 4) *Trenes de vapor*. (2 y 3) *Recuerdo del vapor en la vía estrecha española*.
- p. 144. (1 a 3) Colección Acciona Energía. (4). National Railway Museum, York (England).
- p. 149. *Máquinas, una historia ilustrada*.
- p. 150. (1) www.uamerica.edu.co. (2) *Máquinas, una historia ilustrada*.
- p. 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158 y 159. Colección Acciona Energía.

LA PRESENTE PUBLICACIÓN HA SIDO REALIZADA POR
LA FUNDACIÓN ESTEYCO
BAJO LA COORDINACIÓN EDITORIAL Y
EL DISEÑO GRÁFICO
DE PILAR CARRIZOSA.

LA FUNDACIÓN ESTEYCO QUIERE AGRADECER SU PARTICIPACIÓN
A TODOS LOS MIEMBROS QUE ESTE AÑO HAN FORMADO PARTE DEL
COMITÉ EDITORIAL Y ESPECIALMENTE A JESÚS IRIBARREN.

LA FOTOCOMPOSICIÓN, EDICIÓN Y ARTEFINALIZACIÓN
HA SIDO REALIZADA POR ASOCIADOS&CIA.

LA FOTOMECÁNICA E IMPRESIÓN GRÁFICA
HA SIDO REALIZADA EN ARTES GRÁFICAS PALERMO, MADRID.