



Presas y energía hidroeléctrica

Dams and hydropower

Revista de Obras Públicas
nº 3.509. Año 157
Abril 2010
ISSN: 0034-8619

Daniel García-Lorenzana Acasuso. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Jefe de Área de gestión de Infraestructuras. División de Obras Hidráulicas. Técnica y Proyectos S.A. (TYPESA)
dgarcial@typsa.es

Resumen: Se resume y comenta en este artículo, el informe del ponente general de la cuestión Q.88 "Presas y energía hidroeléctrica", así como las contribuciones orales y escritas presentadas en el XXIII Congreso de Grandes Presas celebrado en Brasilia.

Palabras Clave: Presas; Energía hidroeléctrica; Energía renovable; Esquemas reversibles; Desarrollo sostenible; Objetivos del Milenio; Mecanismos de desarrollo limpio; Mercado de derechos de emisión de CO₂

Abstract: The article summarizes and comments on the report by the General Reporter on question Q.88 "Dams and hydropower", and the oral and written contributions presented in the XXIII Congress on Large Dams held in Brasilia.

Keywords: Dams; Hydropower; Renewable energy; Pumped storage schemes; Sustainable development; Millennium Development Goals; Clean Development Mechanisms; Carbon Credits Market

1. Introducción

La cuestión nº 88 tratada en este congreso corresponde a los aspectos hidroeléctricos de las presas, entre ellos:

- El papel de las presas en el ámbito de las energías renovables. Potencial hidroeléctrico y proyectos actuales.
- La energía hidroeléctrica y el desarrollo sostenible. Contribución a los objetivos del milenio⁽¹⁾ en relación a la reducción de los gases de efecto invernadero; mecanismos de desarrollo limpio (CDM) y accesibilidad al mercado internacional de derechos de emisión de CO₂.
- Planificación, diseño y construcción de presas hidroeléctricas. Aspectos técnicos, financieros, sociales y ambientales; buenas prácticas ambientales y sociales.
- Objetivos hidroeléctricos en embalses de usos múltiples. Reglas de operación e interacción con otros usos.

(1) Millennium Development Goals (MDGs).

- Esquemas reversibles: requerimientos específicos y de diseño de la presa.

Los aspectos hidroeléctricos de las presas y los embalses no habían sido tratados de forma específica en ninguna cuestión en congresos anteriores del ICOLD.

Esta cuestión responde a la preocupación de la opinión pública por el calentamiento global y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como medida para tratar de frenarlo. En este escenario de desarrollo sostenible, toma importancia la energía hidroeléctrica como fuente renovable de energía y con una nula emisión de gases de efecto invernadero.

Dentro del desarrollo sostenible, hay que prestar atención a diferentes aspectos de los proyectos: técnicos, financieros, sociales y ambientales; y toman importancia los esquemas de usos múltiples y los reversibles, que optimizan el recurso y potencian el crecimiento de los países en vías de desarrollo.

A esta cuestión se ha dado respuesta a través de 40 comunicaciones, cuyos países de origen son los que se reflejan en la tabla 1.

Tabla 1. País de origen de las comunicaciones en relación a la cuestión Q.88.

País	Nº de comunicaciones	Referencias
Austria	2	R.31, R.39
Brasil	4	R.06, R.30, R.37, R.38
Canadá	2	R.13, R.16
China	8	R.17, R.18, R.20, R.21, R.22, R.23, R.26, R.35
Costa Rica	1	R.14
Eslovaquia	1	R.02
Eslovenia	1	R.05
Francia	2	R.32, R.33
Islandia	1	R.34
Irán	1	R.28
Italia	1	R.25
Japón	1	R.01
Noruega	1	R.07
Pakistán	2	R.08, R.09
Reino Unido	2	R.03, R.04
Republica Checa	1	R.24
Rumania	1	R.10
Rusia	2	R.11, R.27
Suecia	1	R.36
Suiza	1	R.29
USA	3	R.12, R.15, R.19
Venezuela	1	R.40

Agrupadas por continentes corresponden: once a América, catorce a Asia, quince a Europa y ninguna tiene su origen en África. Tampoco hay representación española, quizá por la limitación del recurso hídrico y el reducido número de proyectos nuevos, a pesar de que la potencia instalada es significativa en relación a países con mayores recursos hidráulicos, tal como muestra la tabla 2.

En esta cuestión han participado 22 de los 32 países intervinientes en las cuatro cuestiones planteadas para este congreso, y ha sido la tercera cuestión con más participación, con el 21% de las comunicaciones, después de la gestión de seguridad de presas (Q.91) y la adecuación de presas existentes (Q.90), únicamente por delante de la cuestión sobre la gestión de la sedimentación en embalses existentes (Q.89).

Cabe destacar que los temas más tratados son los problemas técnicos específicos en los proyectos de las presas (16 comunicaciones), los aspectos ambientales y sociales de los proyectos (10 comunicaciones), los proyectos reversibles (6), proyectos actuales en desarrollo (4) y el resto (4) sobre políticas, programas o iniciativas relacionadas con el desarrollo de la energía hidroeléctrica.

2. Ponencia general

El ponente general de esta cuestión fue el Sr. Giovanni RUGGERI (Italia), de la Unidad de Ingeniería Civil de ENEL, que trató los siguientes temas:

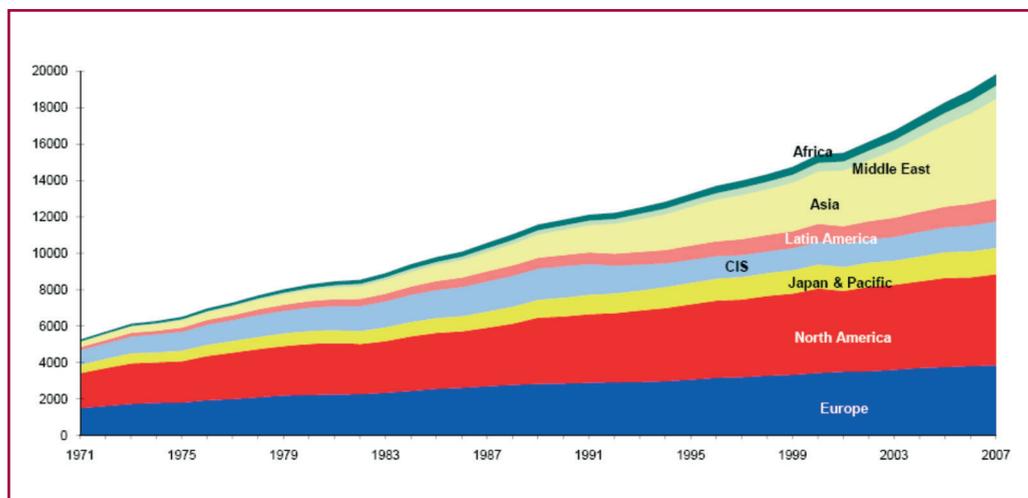


Fig. 1. Producción de energía desde 1970.

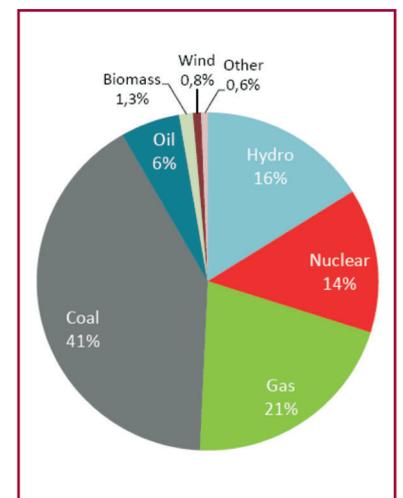


Fig. 2. Mix energético actual.

Tabla 2. Producción hidroeléctrica por países.

Productor	Producción TWh	% del total mundial	País	Potencia instalada GW	País (sólo 10 primeros productores)	% hidro de la generación Para consumo interno
China	436	14,0	China	118	Noruega	98,5
Canadá	356	11,3	USA	99	Brasil	83,2
Brasil	349	11,2	Brasil	71	Venezuela	72,0
USA	318	10,2	Canadá	72	Canadá	58,0
Rusia	175	5,6	Japón	47	Suecia	43,1
Noruega	120	3,8	Rusia	46	Rusia	17,6
India	114	3,6	India	32	India	15,3
Japón	96	3,1	Noruega	28	China	15,2
Venezuela	79	2,5	Francia	25	Japón	8,7
Suecia	62	2,0	Italia	21	USA	7,4
Resto	1.016	32,7	Resto	308	Resto	14,3
Total	3.121	100,0	Total	867	Total⁽³⁾	16,4
España	29	0,9	España	19	España	9,6

Fuente: IEA-Naciones Unidas y UNESA. (2).

2.1. Introducción a la situación energética mundial

Se analiza el crecimiento continuo de la producción de electricidad en el mundo desde hace más de 30 años, que sigue creciendo a una tasa superior al 2%, así como el papel de Asia y en concreto China, que actualmente produce el 16% del total de la energía mundial.

La evolución de la producción mundial de energía y el mix de generación a nivel mundial se representan en las figuras 1 y 2.

Algunas predicciones a las que hace referencia la ponencia general, indican que en el periodo 2005-2020:

- el consumo mundial crecerá un 30%, liderado por China e India.
- el sector hidroeléctrico será el principal en la satisfacción del aumento de demanda con un crecimiento del 40% en este periodo.

(2) Los datos de la EIA corresponden a los años 2005-2006 y los de UNESA para España a 2006.

(3) Se han excluido los países que no tienen producción hidroeléctrica.

- las emisiones mundiales de CO₂ crecerán un 30%, correspondiendo a Asia el 70%.

También se hace referencia a los Objetivos del Milenio, y a la importancia del acceso a la energía para su cumplimiento. Como conclusión adelantada de las comunicaciones remarca que de todas ellas se deduce que *el mundo necesita energía, energía limpia, energía barata*.

2.2. La energía hidroeléctrica

La importancia de la energía hidroeléctrica queda patente en que, en unos 60 países la energía hidroeléctrica contribuye en más del 50% al total de la generación, y que, de acuerdo al Registro Mundial de Presas, el primer propósito de las presas es el regadío (38%), seguido del hidroeléctrico (18%). Esta importancia se concreta en que en el mundo más de 8.200 presas en operación tienen como única finalidad la producción de energía.

En la tabla 2 se muestran los datos más significativos a nivel mundial, extraídos de la ponencia general,



Tabla 3. Mayores proyectos del mundo en Operación.

Presa	País	Año de finalización	Potencia instalada (MW)	Max producción anual (TWh)
Three Gorges ⁽⁴⁾	China	2009	17.600	>100
Itaipu	Brasil/Paraguay	1984/2003	14.000	90.0
Guri (Simón Bolívar)	Venezuela	1986	10.200	46.0
Tucuruí	Brasil	1984	8.370	21.0
Grand Coulee	USA	1942/1980	6.809	22.6
Sayano Shushenskaya	Rusia	1985/1989	6.400	26.8
Krasnoyarskaya	Rusia	1972	6.000	20.4
Robert-Bourassa	Canadá	1981	5.616	
Churchill Falls	Canadá	1971	5.429	35.0
Bratskaya	Rusia	1967	4.500	22.6
Ust Ilimskaya	Rusia	1980	4.320	21.7
Yaciretá	Argentina/Paraguay	1998	4.050	19.2
Longtan ⁽⁵⁾	China	2009	3.500	18.7
Tarbela	Pakistán	1976	3.478	13.0
Ertan	China	1999	3.300	17.0
Ilha Solteira	Brasil	1974	3.200	
Xingó	Brasil	1994/1997	3.162	
Gezhouba	China	1988	3.115	17.0
Nurek	Tajikistan	1979/1988	3.000	11.2

Tabla 4. Mayores proyectos del mundo en Construcción.

Presa	País	Potencia instalada (MW)	Inicio de la construcción	Finalización prevista
Xiluodu	China	12.600	2005	2015
Xiangjiaba	China	6.400	2006	2015
Longtan	China	6.300	2001	2009
Nuozhadu	China	5.850	2006	2017
Jinping 2 Hydropower Station	China	4.800	2007	2014
Laxiwa	China	4.200	2006	2010
Xiaowan	China	4.200	2002	2012
Jinping 1 Hydropower Station	China	3.600	2005	2014
Pubugou	China	3.300	2004	2010
Goupitan	China	3.000	2003	2011
Boguchan	Rusia	3.000	1980	2012

(4) La potencia final instalada será de 22.500 MW. (5) La potencia final instalada será de 6.300 MW.



Tabla 5. Proyectos actualmente desarrollados.

Comunicación	País	Resumen	Nombre del proyecto	Datos principales
R.05	Eslovenia	Proyecto de usos múltiples. Aspectos ambientales y participación pública	Río Sava	6 centrales en cascada entre 25 y 40 MW de pequeño salto (7,6-10,95 m).
R.11	Rusia	Plantas mareomotrices. Nuevas tecnología de construcción y en tipos de turbinas. Turbinas ortogonales	Kislogubs-kaya TPP	Detalles del diseño y la construcción de otras cinco centrales existentes o en proyecto.
R.15	USA	Nuevo embalse superior realizado con HCR de bajo contenido en pasta. Sustituye a la presa anterior que colapsó.	Taum Sauk	450 MW en dos unidades reversibles. Datos del incidente de 2005 y su análisis.
R.16	Canadá	Descripción del proyecto y discusión sobre la elección del tipo de presa entre pantalla de hormigón y núcleo asfáltico.	P. H. La Romaine	4 centrales con una capacidad total de 1550 MW. La presa Romaine-2 tiene 121 m de altura y 505 m de longitud de coronación.

a los que se ha añadido los datos correspondientes a España en la última línea.

El ponente general repasa también los mayores proyectos hidroeléctricos del mundo, tanto en operación como en construcción, destacando el papel actual y futuro de China, como se puede ver en las tablas 3 y 4.

Las comunicaciones que tratan sobre proyectos actuales se resumen en la tabla 5 y en la tabla 6 se incluyen aquellas que tratan sobre problemas técnicos específicos de las presas.

2.3. Aspectos clave de la energía hidroeléctrica

En este epígrafe se trata los aspectos generales de la energía y su particularización en el caso de la hidro-

eléctrica, como son: el coste, los beneficios adicionales de la hidroelectricidad, la emisión de gases de efecto invernadero, y los aspectos ambientales y sociales.

Se da información sobre los costes de las diferentes tecnologías de generación, ya sea renovable o no, se desarrollan los beneficios adicionales de los aprovechamientos hidroeléctricos y las ventajas de los proyectos reversibles, y se dan datos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero de las diferentes tecnologías.

Las comunicaciones que tratan sobre los aspectos ambientales y sociales se resumen en la tabla 7, el resto de aspectos son tratados, conjuntamente con otros temas, en comunicaciones como la R.05 de Eslovenia y R.09 de Pakistán.



Fig. 3. El embalse superior de Taum Sauk (Missouri, USA), antes y después de su rotura en diciembre de 2005.

Tabla 6. Problemas técnicos específicos en los proyectos de presas para fines hidroeléctricos.

Comunicación	País	Resumen	Nombre de los proyectos referenciados	Datos principales
R.01	Japón	Utilización de prefabricados en galerías, voladizos, cámaras y pozos, etc. para reducción costes.	Otaki dam Fuefuki dam	Presas de 1.000.000 y 228.000 m ³ de volumen de hormigón, respectivamente.
R.03	UK	Estudio de las interrupciones en el proceso de puesta en obra del HCR.	Yeywa H. P. (Myanmar)	790 MW. Presa de 2,8 M de m ³ y 134 m de altura. Puesta en obra de 74.000 m ³ /mes de HCR.
R.04	UK	Estudio del hormigón a emplear y el proceso constructivo.	Ghatghar (India)	3 presa de HCR de 14.850, 36.750 y 643.050 m ³ .
R.06	Brasil	Evaluación práctica de filtraciones a través de presas de hormigón.	3 presas de HCR y 7 de hormigón convencional	Aplicación de los criterios de Lugeon y Pautre.
R.07	Noruega	Núcleos asfálticos en presas de materiales sueltos.	-	Historia, ventajas, criterios de diseño y ejecución, y control de calidad.
R.19	USA	Problemas en el diseño de la mezcla y parámetros resistentes en presas de hormigón compactado.	Taum Sauk	Estudio de las mezclas, los áridos, la reactividad álcali-árido de las cenizas y las losas de ensayo.
R.20	China	Análisis de respuesta sísmico y registros de terremotos. Modelización del comportamiento por elementos finitos.	Yele Dam	Presa de escollera con núcleo asfáltico de 125,5 m de altura.
R.21	China	Efecto de la variación de áridos en la deformabilidad.	-	Se analiza el comportamiento de áridos graníticos, areniscas, cuarcitas y calizas.
R.26	China	Criterios de diseño y comportamiento de presas de escollera con pantalla de hormigón.	Mohale Dam (Lesoto) Barra Grande y Campos Novos (Brasil) Tianshengqiao-1 (China)	Nuestra los casos de rotura correspondientes a las presas indicadas, entre 145 y 202 m de altura, y analiza el mecanismo de rotura y los factores que afectan.
R.28	Irán	Análisis de daños en presas arco debido a planos de micro-fractura.	-	Describe un modelo matemático por elementos finitos para analizar el comportamiento del hormigón.
R.29	Suiza	Decisiones sobre el diseño y construcción de una presa de HCR	-	Análisis de las mezclas de alto contenido en cemento, el proceso constructivo, instalaciones y control de calidad.
R.30	Brasil	Gestión de grandes avenidas durante la construcción. Esquema del desvío del río.	P.H. Xingo	3000 MW. CFRD de 120 m de altura. Desvío del río para 10.500 m ³ /s mediante 4 túneles de 16 m de diámetro.
R.34	Islandia	Descripción del proyecto y su comportamiento	Kárahnjúkar dam	CFRD de casi 200 m de altura con una geometría de la pantalla innovadora.
R.35	China	Modelo dinámico simplificado del terreno (SZJ) basado en el modelo no lineal de Hardin.	-	Análisis de las diferencias en los resultados, y consideraciones sobre su irrelevancia para el cálculo a sísmo en presas de materiales sueltos.
R.37	Brasil	Parámetros resistentes de hormigones compactados con alto contenido de finos	Dona Francisca HPP	Simulación del proceso de puesta en obra en laboratorio, validación y análisis de la resistencia al corte
R.38	Brasil	Problemas y remedios para cimentaciones en rocas con alto contenido en azufre.	Irapé HPP	360 MW. Presa de 208 m de altura de escollera con núcleo de arcilla. Aliviadero en túnel para 6000 m ³ /s.

Tabla 7. Aspectos ambientales y sociales de la energía hidroeléctrica

Comunicación	País	Resumen	Nombre de los proyectos referenciados	Datos principales
R.08	Pakistán	Estudio de alternativas. Influencia de los aspectos sociales y medioambientales en el diseño en una zona arqueológica	Dasu HPP (río Indo)	4.320 MW
R.10	Rumania	Situación actual de la energía hidroeléctrica en Rumania y papel de la regulación en los embalses. Comparación con la hipotética situación sin regulación	Río Lotru	5 presas y embalse, 3 centrales de 510, 18 y 115 MW y 3 estaciones de bombeo.
R.12	USA	Historia del proyecto. Compatibilización de usos: paisajístico, navegación, suministro de agua y generación. Uso compartido con Canadá.	Niágara	La primera planta de generación a gran escala data de 1895 con una potencia instalada de 80 MW
R.13	Canadá	Monitorización automática y análisis espacio-temporal de emisiones de gases de efecto invernadero en grandes proyectos hidroeléctricos.	Robert-Bourassa Eastmain-1 Rivière-des-Prairies	Instrumentos NDIR y FTIR para la medida de los gases
R.14	Costa Rica	Estudio de alternativas en base a la viabilidad ambiental y social.	P. H. Diquis	608 MW. Evolución del proyecto Boruca que satisface los condicionantes sociales y ambientales
R.17	China	Beneficios del proyecto y gestión de la adecuación ecológica. Monitorización.	The Three Gorges	Capacidad de 22.500 MW. Embalse de más de 600 km de largo y un vaso de 1.000 km ²
R.18	China	Medidas tomadas para proteger los recursos acuáticos en el río Yangtze y bajo Jinsha.	The Three Gorges	Construcción de reservas naturales, reproducción artificial, investigación, monitoreo, etc.
R.22	China	Estudios realizados sobre los efectos ambientales de la operación del embalse.	-	Índice de evaluación de la salud en ríos con presas para su operación ecológica.
R.23	China	Análisis numérico del transporte de la contaminación en la segunda etapa de construcción.	The Three Gorges	Comparación entre el modelo numérico y los valores registrados.
R.40	Venezuela	Medidas tomadas en plantas en operación para beneficiar a las comunidades afectadas y minimizar los impactos al ecosistema.	Río Caroní	Gurí (8850 MW), Macagua (2930 MW), Caruachi (2196 MW) y Tocoma (2160 MW)

2.4. Desarrollo de la energía hidroeléctrica

El ponente general analiza el desarrollo de esta energía en el mundo, diferenciando entre las regiones en las que el recurso ha sido explotado y aquellas en las que aun esta por explotar. En este último caso se trata sobre la gestión integrada de los recursos hídricos, la cooperación internacional y las directrices de Naciones Unidas.

La comunicación R.24 de la Republica Checa contribuye al conocimiento de los modelos de desarrollo actual, en países con el recurso desarrollado y con un potencial hidroeléctrico muy limitado, mediante el impulso al desarrollo de pequeñas centrales en

presas existentes. La comunicación R.36 de Suecia trata sobre el Centro de Energía Hidroeléctrica de Suecia cuya finalidad es transmitir el conocimiento tecnológico para su desarrollo.

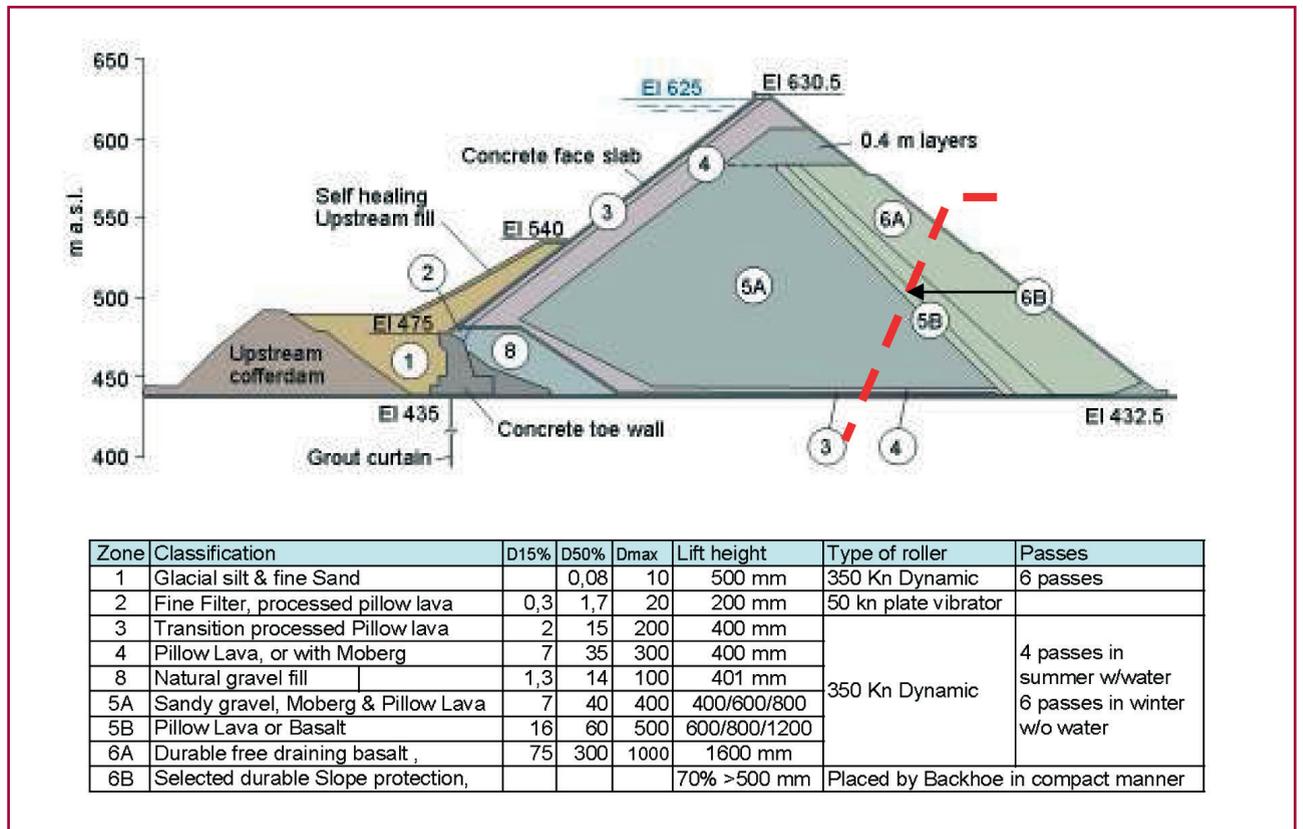
2.5. Políticas y programas

Se resumen la situación actual en el mundo respecto al cumplimiento del Protocolo de Kioto y la promoción de las energías renovables, así como la influencia de los modelos de financiación.

A la discusión de estas políticas y programas, contribuyen las comunicaciones R.09 de Pakistán, sobre los aspectos que deben promover el desarrollo de la ener-



Fig. 4. Sección tipo de la presa de Kárahnjúkar (Islandia).



gía hidroeléctrica como fuente más eficiente desde el punto de vista de la sostenibilidad, y R.27 (Rusia), sobre aspectos de financiación, analizando el potencial hidroeléctrico de Rusia y describiendo un nuevo programa de 4900 MW en regiones poco desarrolladas.

3. Comunicaciones

El ponente general clasifica las comunicaciones presentadas, agrupándolas según los aspectos tratados y los temas planteados en la cuestión. Esta agrupación ha sido el punto de partida de la clasificación

Fig. 5. La presa de Susa (Italia).
1-Nivel máximo, 2-Nivel normal, 3-Desagüe de fondo, 4-Cortina de inyecciones, 5-Consolidación, 6- Pantalla de drenaje y 7- Mezcla de rocas y hormigón.

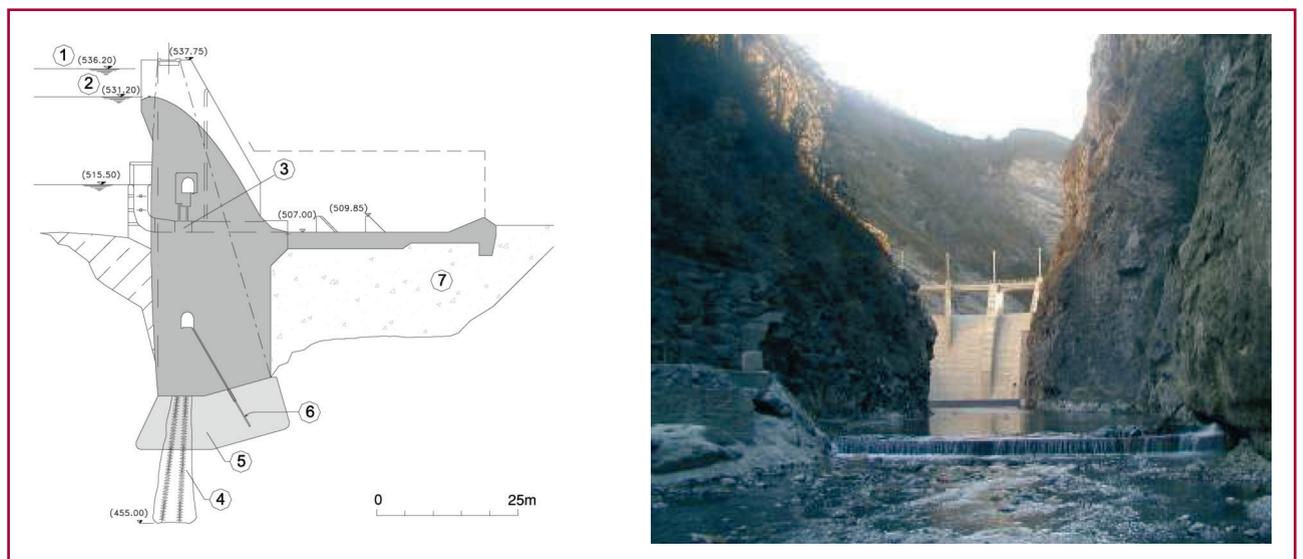


Tabla 8. Proyectos reversibles.

Comunicación	País	Resumen	Nombre de los proyectos referenciados	Datos principales
R.02	Eslovaquia	Diseño de una presa de escollera para una central reversible. Estudio de alternativas y cálculo de la presa.	Ipel PHP	4 x 150 MW. Presa de 75 m de altura.
R.25	Italia	Sustitución de dos plantas muy antiguas por una central reversible, dotándolo de un nuevo embalse regulador.	Pont Ventoux HPP y Susa Gorge Dam	150 MW con una producción anual de 400 GWh.
R.31	Austria	Modelización en laboratorio y diseño de la cámara de carga	Limberg II	Incremento de la turbinación de 353 a 833 MW y del bombeo de 130 a 610 MW. Salto de 380 m.
R.32	Francia	Plantas mareomotrices reversibles como sistema de almacenamiento de energía, como la solar o la eólica.	-	Análisis de costes y sistemas con uno o dos vasos.
R.33	Francia	Origen y características del proyecto. Operación con grandes variaciones de salto.	Tehri PSP (India)	4 x 250 MW. Salto variable de 130 a 230 m.
R.39	Austria	Estudios de optimización y soluciones obtenidas sobre diferentes problemas o aspectos	Kops II HPP	450 MW. Salto de 804 metros. Presa bóveda de 122 m de altura y 400 m de longitud de coronación.

de las comunicaciones que se realiza en los apartados siguientes. En ellos, se muestra en forma de tabla, para que sean más fáciles de identificar los proyectos, aspectos o características de interés para el lector, el cual podrá obtener más información en la publicación de comunicaciones del congreso.

3.1. Proyectos hidroeléctricos actuales

Respecto a este aspecto de la cuestión Q.88 se han recibido 30 comunicaciones, de las cuales 4 corresponden a desarrollos de proyectos en diferentes países, 16 tratan de diferentes aspectos técnicos relacionados con el desarrollo de esos u otros proyectos y 10 corresponden a aspectos sociales y ambientales de la energía hidroeléctrica. El contenido de estas comunicaciones se resume en las tablas 5, 6 y 7.

Uno de las realizaciones más impresionantes es la presa de Kárahnjúkar en Islandia en la que se ha dispuesto de un muro para salvar los más de 40 metros de profundidad del cañón, mejorando la geometría de la pantalla de hormigón, como si se tratase de un plinto al-

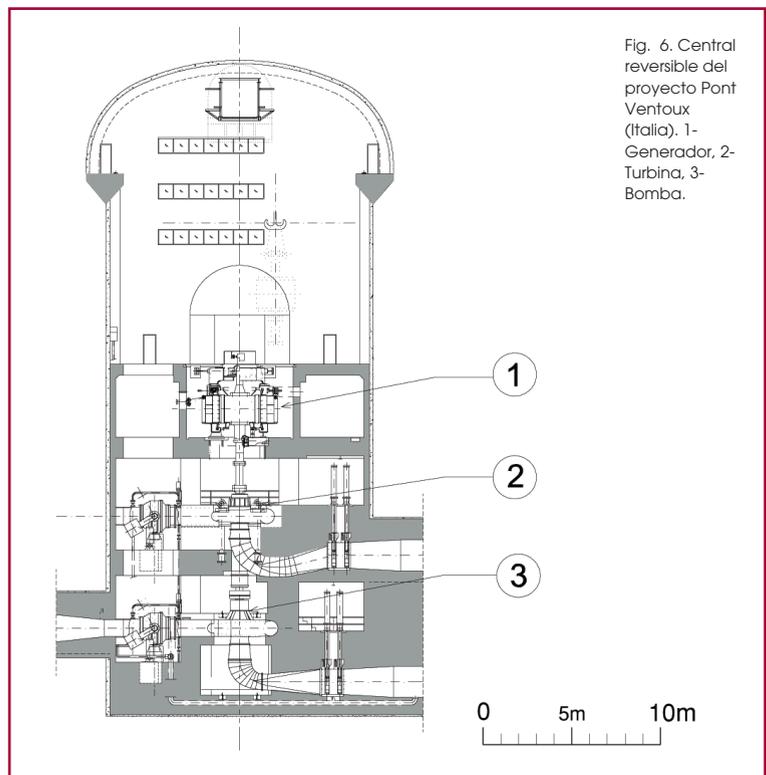


Fig. 6. Central reversible del proyecto Pont Ventoux (Italia). 1- Generador, 2- Turbina, 3- Bomba.



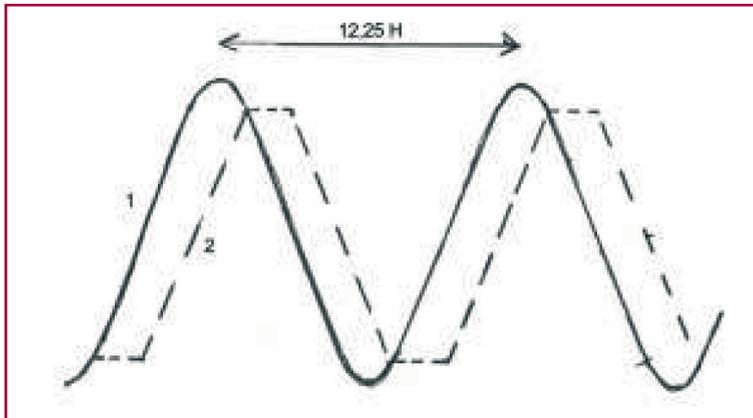


Fig. 7. Planta mareomotriz reversible. Esquema de funcionamiento. 1-Nivel del mar, 2-Nivel interior y 3-Periodos de generación.

to. En la figura 4 se muestra la sección tipo de la presa y las características de los materiales constituyentes.

3.2. Proyectos reversibles

En cuanto a los requerimientos específicos y de diseño de los esquemas reversibles, se han recibido 6 comunicaciones, las cuales se resumen en la tabla 8.

Es de destacar la cimentación de la presa de Susa (R.25), que para realizarla en roca ha necesitado de una profundidad de cimentación de más de 30 metros tal como puede verse en la figura 5.

También se muestra por su interés, en la figura 6, la disposición de la bomba y turbina de uno de los dos grupos dispuestos de 75 MW, en el interior de la caverna de la central reversible de Pont Ventoux (Italia).

Se destaca también la propuesta de almacenamiento de energía mediante plantas mareomotrices reversibles (ver R.32). Estas plantas, en su esquema simple, es decir, con un solo vaso, pueden operar 4 horas en cada dirección, siendo la carrera de marea interior similar a la marea natural o exterior, como se muestra en la figura 7. La marea interior, se desplaza tres horas en el tiempo y se reduce ligeramente al eliminarse los niveles extremos. La carga media en la turbinas es aproximadamente la mitad de la carrera de marea, siendo adecuadas para este uso las turbinas tipo ortogonal (ver R.11). ♦