

SUSQUEDA 1968-2018. 50 años de una gran obra de la ingeniería

Francisco Javier Martínez Monseco

La presa y la central hidroeléctrica de Susqueda cumplieron en 2018 el 50 aniversario de su existencia (1968-2018). Esta gran obra de la ingeniería se desarrolló teniendo muy bien definidos los objetivos que la sociedad de la época requería, de cara al futuro desarrollo demográfico, geográfico y de gestión de recursos primarios tanto de la provincia de Girona como de Cataluña.



Resumen

La vigencia de los objetivos de la infraestructura así como el incremento de muchas más funcionalidades hacen de esta obra una infraestructura en plena vigencia en cuanto a sus beneficios. La peculiaridad de los diferentes aspectos desarrollados por parte de su autor (Arturo Rebollo) y la actualidad de la instalación en cuanto a su estrategia de gestión también se repasan en el artículo.

Durante 2017 se constituyó una comisión (ayuntamientos, consejos comarcales, Diputación, Agencia Catalana del Agua, Consorci del Ter, Fundación Endesa, Endesa, Enel Green Power) para preparar una serie de actos multidisciplinarios durante todo el año 2018 con el principal objetivo de poner en valor lo que ha representado la construcción de esta infraestructura en el territorio:

- Actos lúdicos y deportivos.
- Difusión de visita virtual en 3D.
- Medioambiente y hábitat: fauna y piscícola.
- Actos culturales.



Figura 1. Construcción de las torres de toma de captación de agua y de los diferentes bloques de hormigón de la presa de Susqueda (Fundación Endesa).



Figura 2. Otra perspectiva de la construcción de las torres de toma de captación de agua y de los diferentes bloques de hormigón de la presa de Susqueda (Fundación Endesa).

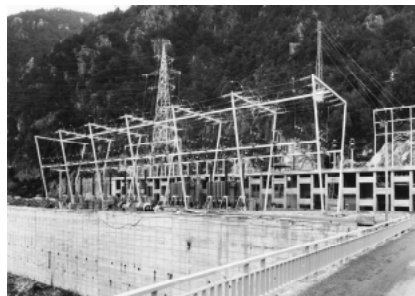


Figura 3. Construcción de la subestación eléctrica de la central hidroeléctrica de Susqueda (Fundación Endesa).

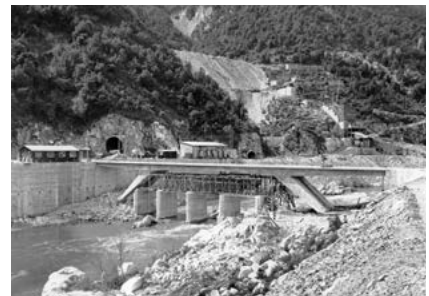
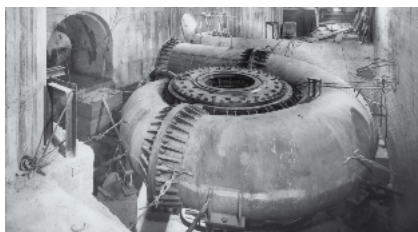
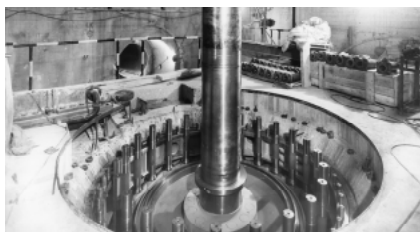
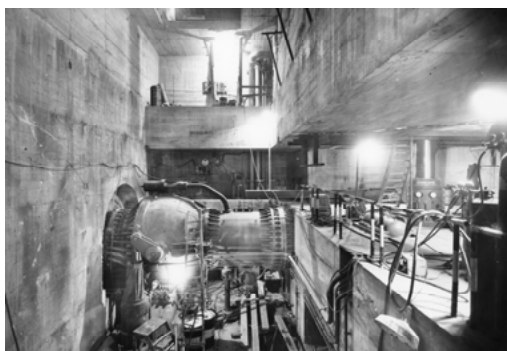


Figura 4. Construcción del puente de acceso y el túnel de la central hidroeléctrica de Susqueda (Fundación Endesa).



Figuras 5 y 6. Construcción del caracol del cono de aspiración y la obra civil del distribuidor de la turbina del grupo 1 de la central hidroeléctrica de Susqueda (Fundación Endesa).



Figuras 7-9. Construcción de la obra civil de la sala de la central, la válvula esférica del grupo 1 y el túnel de acceso a la central en caverna 1 de la central hidroeléctrica de Susqueda (Fundación Endesa).

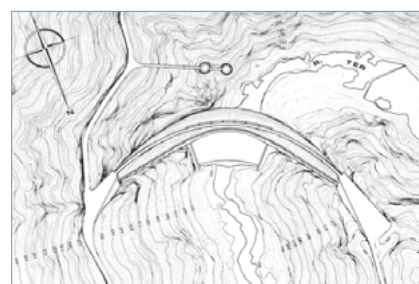
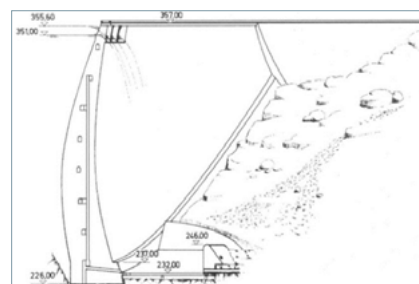
- Exposición de 50 años instalación en la sala hipóstila de la presa de Susqueda.
- Realización de documental sobre la construcción.
- Visitas de diferentes colectivos.
- Visitas con medios de comunicación (televisión, radio, prensa, etc.).

Palabras clave

Mantenimiento, fiabilidad, centrales eléctricas, procesos industriales.

La construcción de la infraestructura (1963-1968)

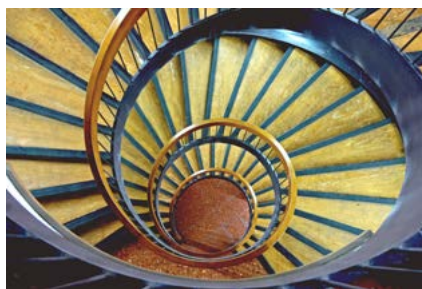
El ingeniero Arturo Rebollo recibe la orden del proyecto de la presa de Susqueda con solo 26 años. Implicado en el proyecto, viaja a Francia e Italia para conocer de primera mano los últimos tiros de doble curvatura, así como las causas de los accidentes que tuvieron lugar en Malpasset y Vajont. Como resultado de estas visitas, debe tomar conciencia de la importancia que se ha estudiado bien el terreno donde hay que colocar la decisión, algo que, aunque había considerado desde entonces, toma mucha más relevancia. Para el cálculo y diseño de la estructura se ayudan de la primera computadora de IBM de Cataluña y harán varios modelos a escala. La toma resultante es de doble curvatura, con una altura de 135 metros, una longitud de corona de 357 metros y un espesor de entre 21,5 y m. 5, este tipo de decisión



se caracteriza por un hogar más delgado que la presa de gravedad tradicional como el pantano de Sau, cuya forma lleva aguante (Figs. 1-5).

La instalación, que entró en funcionamiento el 5 de octubre de 1967, forma parte del complejo Sau-Susqueda-El Pastoral, y atiende el suministro de agua en Barcelona y en Girona, así como los regadíos de la demarcación. El pantano de Susqueda debe entenderse funcionalmente dentro del sistema Sau-Susqueda-El Pastoral, con el que se pretendía asegurar el suministro de agua potable a la creciente área metropolitana de Bar-

celona, fomentar el regadío en las planicies que se extienden de Girona hacia el mar y producir energía eléctrica de tipo renovable. El Salto de Susqueda es el intermedio y más importante de los tres que componen el complejo. Aparte de la función de generación de electricidad de origen hidráulico, el embalse de Susqueda cumple la función de regulación de los recursos hídricos del tramo inferior del río Ter antes de su desembocadura en el Mediterráneo y de satisfacer los planes de regadíos de las comarcas de Girona y como cabecera del abastecimiento de aguas en Barcelona y Girona. La gran



capacidad del embalse permite, además, laminar las avenidas de agua que se producen en el Ter, por lo que colabora de forma eficaz con la limitación de las inundaciones en la ciudad de Girona y municipios de alrededor.

Características técnicas de la central y la presa de Susqueda

Presa de Susqueda

Construcción: 1963-1967

Río: Ter

Tipo: Bóveda

Altura máxima sobre cimientos: 135 m

Cota de coronación: 357,00 m

Longitud de coronación: 357 m

Volumen de hormigón: 662.000 m³

Aliviaderos: Labio fijo de 120,7

Caudal máximo de desagüe: 2.800 m³/s

Características del embalse

Aportación media anual: 623 hm³

Sup. de la cuenca de aportación: 1.775 km²

Capacidad total: 233,44 hm³

Capacidad útil: 215,44 hm³

Cota máxima del embalse: 351,00

Cota mínima del embalse: 287,00

Superficie: 6,58 km²

Característica central de Susqueda

3 grupos Francis de eje vertical

Caudal máximo total: 59 m³/s

Salto bruto máximo: 162 m

Potencia máxima: 86,3 MW

Descripción de la presa

La presa, de tipo bóveda, está conformada por arcos de seis centros generados a partir de una ménsula central con desplazamiento hacia aguas arriba en su parte inferior, y hacia aguas abajo en la superior. El espesor mínimo en la zona central es de 5 metros y el máximo es de 24,8 metros en el zócalo. El ángulo máximo de abertura del arco es de 97° 24'. La coronación se dispone 6 metros por encima de la cota de máximo embalse normal, con una anchura variable. La estructura está



Detalles arquitectónicos de diferentes elementos de la presa y de la central de Susqueda (escalera de caracol, monolito de la presa, arquitectura de la sala central, y sala de las columnas).

conformada por 34 ménsulas verticales con juntas alabeadas, y queda monolitizada desde el momento de la inyección de estas juntas. Conectan la presa con ambas laderas estribos de gravedad de 33 m de altura. Una red de galerías a ocho niveles que atraviesan la presa, junto con una galería perimetral, tiene como misión fundamental el control de la estructura. La pantalla de impermeabilización y la red de drenaje se han efectuado desde esta red de galerías que se prolonga hacia el interior de la roca en ambos márgenes perpendicularmente a la dirección del río. El aliviadero, de labio fijo, se sitúa en la parte central de la presa, con una longitud total de 120,7 m, repartido en siete vanos, y el vertido libre hasta el cuenco amortiguador está dispuesto al pie de la presa. La capacidad máxima de desagüe es de 2.800 m³/s y su altura de lámina es de 4,60 m. Lateralmente, se sitúan cuatro desagües de fondo con válvulas de chorro hueco de 1,50 m de diámetro. Su desagüe máximo es de 200 m³/s. La construcción se efectuó entre los años 1963 y 1967, empleándose para el desvío del río un túnel por el margen izquierdo para una capacidad de 100 m³/s. La colocación de hormigón, con árido de pórfido granítico procedente de una cantera cercana, se realizó con dos blondinas. El volumen total de hormigón de presa es de 662.000 m³ con una excavación de 707.000 m³.

Descripción de la central

El esquema hidroeléctrico del salto se inicia con la toma en el embalse, formada por dos torres de más de 100 m de altura y 12 m de diámetro; en la primera,



con cuatro entradas a diversas cotas, se selecciona el agua que se ha de consumir en las poblaciones, y en la segunda se ubican la compuerta y ataguía de cierre. A continuación de la toma se encuentra la galería de presión, con 3.500 m de longitud y 4,60 m de diámetro y que finaliza con una chimenea de equilibrio de 100 m de altura y 8 m de diámetro y un depósito superior de expansión de 1.600 m³. La tubería forzada tiene una inclinación de 45° y una longitud de 140 m, continuando con un tramo horizontal de 60 m blindado, al final del cual se encuentra la bifurcación para las dos turbinas originales y la que se implantó en 1981. La central es subterránea con dimensiones de 50 m de longitud, 20 m de anchura y 30 m de altura. Una galería de 200 m desde el exterior permite su acceso.

Los equipos iniciales son dos grupos Francis de eje vertical acoplados a alternadores síncronos que giran a 375 r/min; con una potencia de 73 MW. Posteriormente, en 1981, se dispuso un grupo menor con mejor rendimiento para caudales pequeños, con una potencia de 13,3 MW que giraba a 600 r/min. Una galería de desagüe de 1.500 m de longitud y 5 m de diámetro restituye el agua al embalse de El Pastoral, situado aguas abajo.

Aspectos arquitectónicos de la central y la presa de Susqueda. Los espacios ocultos

Susqueda, una presa singular

Susqueda, más allá de cifras y datos, es un embalse singular. La construcción, dirigida por el ingeniero Arturo Rebollo, apos-

tó por una tipología de presa muy singular, redonda con una doble curvatura. Pero también por elementos que no son específicos de ingeniería hidráulica, como dos grandes salas en los extremos de la presa donde destacan diferentes elementos arquitectónicos únicos en una instalación de este tipo.

Sala de las columnas

En el interior de los estribos laterales de la presa, quedan configuradas dos salas triangulares de grandes dimensiones. La de la margen derecha, de menor tamaño, es completamente diáfana debido a la losa nervada de cubrición que posee. La sala situada en el estribo izquierdo tiene su acceso desde coronación a través de una escalera helicoidal de gran anchura. Su cubierta se sustenta mediante dos hileras de pilares de geometría hiperbólica de revolución truncada, e incorpora la iluminación. Estas salas constituyen, en sí mismas, una exposición didáctica en materia de estructura arquitectónica.

Escalera de caracol de acceso a la sala de columnas

El acceso a la sala de columnas se realiza por una escalera helicoidal de gran anchura de hormigón sin eje central, un elemento revolucionario para la época. También hay una segunda escalera de caracol muy fotogénica en el central que conecta todos los pisos de la instalación.

Una central excavada en la montaña

La central hidroeléctrica de Susqueda está excavada en la montaña (tipo caverna) y para su acceso se construyó una espectacular galería iluminada de 200 metros de colores verde y naranja, un elemento que Rebollo diseñó con tubos fluorescentes y ahora ha sido reemplazado por luces led. La sala de la central una vez finaliza el túnel tiene 50 metros de largo, 20 de ancho y 30 de altura y también está llena de sorprendentes detalles arquitectónicos como flores metálicas, iluminación de la sala central simulando una puesta de sol y un relieve de dibujos prehistóricos simulados que explican gráficamente los trabajos realizados para la construcción de este proyecto único.

Una gran infraestructura con plena vigencia de los objetivos y la funcionalidad de su construcción

Para poner en contexto los objetivos en que se basó la construcción de Susque-

da, hay que analizar la sociedad que existía en España en la década de 1960. La clara apuesta de desarrollo del país se basaba en fomentar las industrias en los núcleos urbanos principales, provocando un gran incremento de trabajo en el sector industrial. En el caso específico de Cataluña, se produjo un incremento demográfico en la zona metropolitana de Barcelona para dar mano de obra a las industrias que se estaban implantando. Estos dos factores (apuesta por el sector industrial e incremento demográfico de población) implicaban un incremento exponencial de las necesidades energéticas, así como el abastecimiento de agua a la población y a la industria.

Susqueda constituye en esa década una solución en la regulación y abastecimiento de agua para la provincia de Barcelona y Girona (desde la presa de El Pastoral sale la tubería subterránea que va a parar a Cardedeu, y de allí distribuye las necesidades hídricas a Barcelona, también desde el azud de El Pastoral 2 sale las tuberías de agua que abastecen a Girona). A la vez, constituye una fuente de generación de energía eléctrica en un territorio con pocos recursos energéticos, pero muy cerca de núcleos urbanos de gran desarrollo a partir de entonces.

Otro de los aspectos importantes dentro de los objetivos de la creación de Susqueda fue la regulación de las periódicas avenidas del río Ter, que provocaban catástrofes en las poblaciones situadas cerca del cauce del río. Mediante el sistema Sau-Susqueda-Pastoral, se podía amortiguar y regular estas aportaciones de caudal al cauce del medio y bajo Ter.

Y 50 años después, se constata que los objetivos que dieron origen a la infraestructura siguen estando con una vigencia totalmente justificada. En 50 años se han regulado un gran número de avenidas del río Ter, minimizando las posibles catástrofes que dichas avenidas podían haber provocado en las poblaciones del entorno del río. Desde hace unas décadas, los cauces de los ríos de las cuencas internas se encuentran monitorizados en línea en cuanto a caudales y aportaciones de las diferentes zonas del río. Este hecho permite que, conjuntamente con las capacidades de embalsado de cada presa, así como las capacidades de desembalsado de los órganos de maniobra de las presas, se pueda tener una gran información al ins-

tante sobre los gradientes de crecimiento y decrecimiento de dichas cuencas.

Como claro ejemplo de estas funcionalidades está el año 2018, cuando se celebró el 50 aniversario de la infraestructura. Durante ese año, se pasó de una estrategia de gestión del agua en estado de prealerta por las pocas aportaciones y reservas de los embalses (febrero 2018), a tener que gestionar en el mes de octubre 2018 la llamada “avenida de Santa Teresa”, donde se produjeron aportaciones de más de 1.600 m³/s en el embalse de Sau (record histórico de aportaciones) y estuvo semanas realizando desembalses controlados del sistema en el cauce del río Ter medio.

En el aspecto medioambiental, el sistema Sau-Susqueda-Pastoral ha contribuido durante estos años de vida a poder realizar movimientos de caudales de agua (avenidas programadas) debido a la proliferación de algunas especies acuíferas invasoras, que, por determinadas condiciones del hábitat (clima, temperaturas, etc.), han proliferado. Mediante estos movimientos de caudales se ha podido regular las condiciones del hábitat.

Por otro lado, si en la década de 1960 existía una clara necesidad para poder generar electricidad para el sector industrial, en el siglo XXI la prioridad en la generación eléctrica se ha incrementado, teniendo como objetivos estratégicos mundiales fomentar la generación de energía eléctrica de origen renovable. En este sentido, la central hidroeléctrica de Susqueda sigue constituyendo una fuente importante de generación en el perímetro próximo de los núcleos industriales de Cataluña. Incluso dentro de la generación renovable de energía eléctrica, Susqueda incrementa su importancia debido a la posibilidad de almacenamiento que el sistema Sau-Susqueda-Pastoral es capaz de realizar (Sau y Susqueda no son centrales fluyentes), ya que los embalses constituyen una “pila de energía” que utilizar en las condiciones más necesarias que solicita el mercado eléctrico.

Como se ha comentado, tener una central de energía renovable consolidada en el sistema eléctrico español, como es el caso de Susqueda, es muy importante. Si los objetivos energéticos mundiales se basan en priorizar las energías renovables, a día de hoy todavía estamos muy lejos de lo que seguramente sería recomendable. En España para el

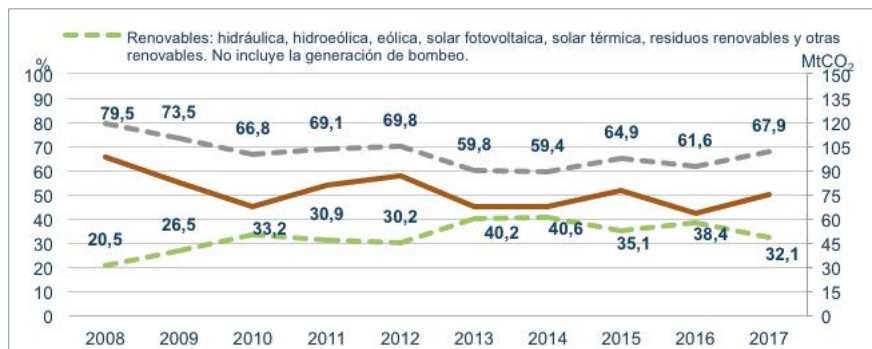
2017 los datos de la generación eléctrica son los siguientes (fuente informe anual REE 2017):

- La generación de energía renovable en el sistema eléctrico español es, aproximadamente, del 32% sobre todo el mix energético generado.
- En el caso de la energía hidroeléctrica, es el 7% del total de energía eléctrica generada.
- En el caso de Cataluña, la generación de energías renovables ha representado el 16% del total de energía generada (7.385 GWh).

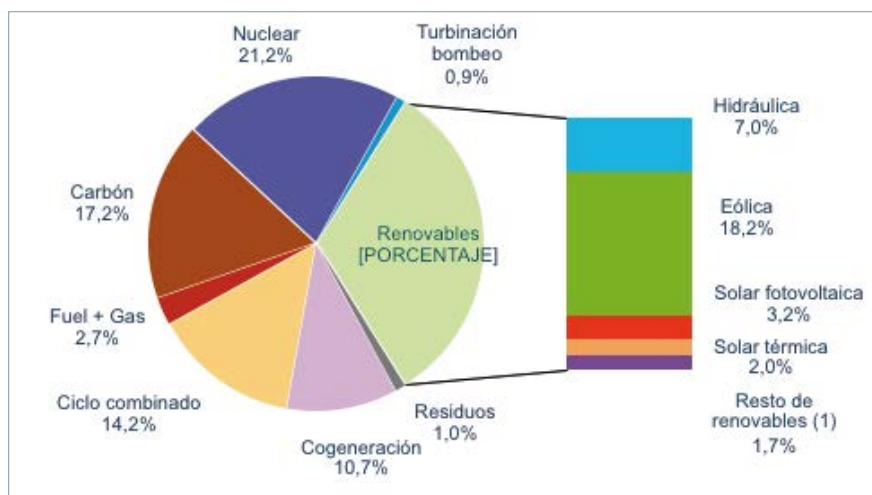
Desde el punto de vista del sistema eléctrico, Susqueda también tiene una gran importancia principalmente por 2 funcionalidades estratégicas:

- La relativa proximidad de los núcleos de consumo de energía eléctrica (Vallès, zona metropolitana de Barcelona, Osona, Girona) hace que el transporte de la energía generada esté asociada a pérdidas de transporte relativamente bajas. En la mayoría de países con generación hidroeléctrica, las centrales de generación suelen estar ubicadas muy alejadas geográficamente de los núcleos de consumo eléctrico, con lo que el transporte de dicha energía tiene unas pérdidas que hay que considerar.
- Otro aspecto importante del sistema eléctrico es que la central de Susqueda está preparada para funcionar mediante la tipología de explotación de “red isla”, lo que implica que ante un problema de caída del sistema eléctrico nacional, podría ser una central la que inicie la generación de energía eléctrica mediante acoplamiento de lastrado de cargas de consumo, y es la propia central la que realiza la regulación tanto de la tensión como de la frecuencia eléctrica del sistema. En el desarrollo de los 50 años de existencia de la central, se han producido varias situaciones en las que la central ha tenido que actuar dentro de esta tipología de explotación.

Desde el punto de vista del mercado eléctrico (necesidades de consumo-producción del sistema eléctrico nacional), la central de Susqueda tiene las ventajas



Evolución y generación renovable/no renovable y emisiones CO₂ asociadas a la generación eléctrica. Sistema eléctrico nacional (%)



Estructura de generación de energía eléctrica en 2017. Sistema eléctrico nacional (%)



Ratio generación renovable/generación (%) y generación renovable (GWh) en 2017

asociadas a la tecnología de energía renovable hidroeléctrica. Susqueda puede cubrir de manera casi instantánea los gradientes de incremento y decremento del consumo eléctrico intradiario. La mayoría de tecnologías de generación eléctrica tienen la “desventaja” de tener unos ciclos de acoplamiento a la red y

de parada bastante largos temporalmente (nucleares, centrales de carbón, centrales de ciclo combinado, etc.), por lo que en caso de necesitar “instantáneamente” poder consumir un incremento de energía eléctrica que no estaba dentro de la previsión del sistema, las centrales hidroeléctricas no fluyentes tienen

una secuencia de generación eléctrica muy rápida (en 3-4 minutos un grupo hidroeléctrico de Susqueda puede estar generando los gradientes que el sistema necesita). En el caso de otras fuentes de generación eléctrica renovable, la posibilidad de generación viene asociada a la posibilidad de la materia prima en cuestión (sol, viento, etc.), por lo que no pueden tener la funcionalidad indicada.

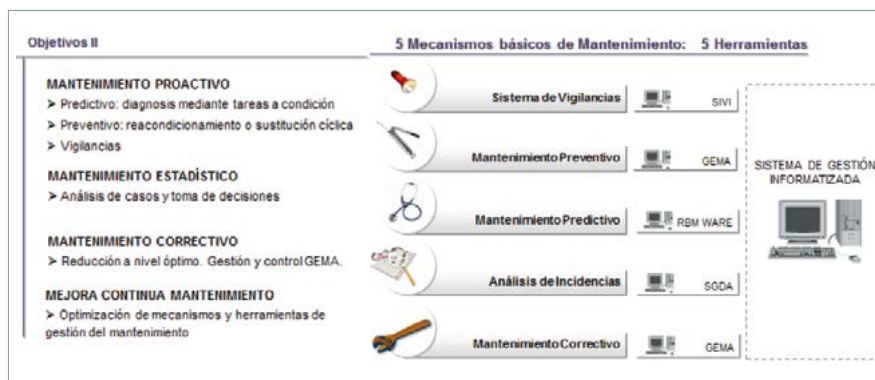
Todos estos objetivos, juntamente con la singularidad arquitectónica del diseño de esta infraestructura, hacen de Susqueda una instalación única en el mundo

Susqueda 2018. La evolución de la instalación en la actualidad

Explotación de la central

La central y la presa de Susqueda tuvieron turno de mantenimiento y explotación 24 horas hasta la década de 1980, cuando después de una automatización de la instalación, su funcionamiento se realizaba de manera telemática desde un centro de control que está pendiente de todos los parámetros de control del sistema:

- Niveles de presa.
- Caudales de consigna de funcionamiento.



- Restricciones de funcionamiento de cuencas.
- Restricciones de funcionamiento del sistema eléctrico.
- Alarmas.
- Monitorización *on-line* de parámetros.
- Gestión de los procedimientos de seguridad en los trabajos en la instalación (descargos eléctricos e hidráulicos).

Este centro de control está ubicado en Lleida y desde allí se gestionan todas las instalaciones hidroeléctricas de Cataluña.

En la central hay un sistema de monitorización y control (SCADA) tanto en cada grupo hidroeléctrico como en los sistemas comunes de la central que puede funcionar de diferentes maneras:

- Arranque paso a paso desde equipos.
- Arranque secuencial desde central.
- Arranque secuencial desde el centro de control y centro de control redundante.
- Arranque secuencial desde el centro de control local de centrales hidroeléctricas de la cuenca del Ter.

1ª generación	La más larga, desde la revolución industrial hasta después de la II Guerra Mundial, aunque todavía impera en muchas industrias	Reparar en caso de avería
2ª generación	Entre la II Guerra Mundial y finales de la década de 1970 se descubre la relación entre edad de los equipos y probabilidad de fallo. Se comienza a hacer sustituciones preventivas. Es el mantenimiento preventivo	Mayor disponibilidad de la plantilla Mayor vida útil de los equipos Costes más bajos
3ª generación	Surge a principios de la década de 1980. Se empieza a realizar estudios de causa-efecto para averiguar el origen de los problemas. Es el mantenimiento predictivo o detección precoz de síntomas incipientes para actuar antes de que las consecuencias sean inadmisibles. Se comienza a hacer partícipe a producción en las tareas de detección de fallos	Mayor disponibilidad, fiabilidad Mayor coste-efectividad Mayor seguridad No deterioran el medio ambiente Mejor calidad de los productos Mayor duración de los equipos
4ª generación	Aparece a principio de la década de 1990. El Mantenimiento se contempla como una parte del concepto de calidad total. Se concibe el mantenimiento como un proceso de la empresa al que contribuyen también otros departamentos. Se identifica el mantenimiento como fuente de beneficios, frente al antiguo concepto de mantenimiento como "mal necesario". La posibilidad de que una máquina falle y las consecuencias asociadas para la empresa es un riesgo que hay que gestionar, teniendo como objetivo la disponibilidad necesaria en cada caso al mínimo coste	Se requiere un cambio de mentalidad en las personas y se utilizan herramientas como: Ingeniería del riesgo (determinar consecuencias de fallos que son aceptables o no) Análisis de fiabilidad (identificar tareas preventivas factibles y rentables) - Mejora de la mantenibilidad (reducir tiempos y costes de mantenimiento). -> Monitores de condición -> Diseño direccionado a la fiabilidad -> Estudio de riesgos -> Computadoras pequeñas -> Análisis de modos de falla y efectos -> Sistemas expertos

Tabla 1. Características de las diferentes generaciones del mantenimiento.

Estrategia de mantenimiento de la central de Susqueda

Cualquier procedimiento de trabajo de la central se basa en los siguientes principios:

- Seguridad.
- Aspectos ambientales.
- Costes operativos.
- Costes de oportunidad en la realización de los trabajos.

Mediante un sistema informatizado de mantenimiento, se gestiona la información de la central en función de:

- Sistema de vigilancias.
- Planes de mantenimiento predictivo y preventivo.
- Análisis de incidencias.
- Averías.

Una vez que se tiene toda la información de análisis, se realiza una toma de decisiones del mantenimiento por desarrollar (estrategia de mantenimiento), según la combinación de:

- Mantenimiento proactivo:
Predictivo: (diagnosis mediante tareas a condición)
Preventivo (reacondicionamiento o sustitución cíclica)
Vigilancias (gamas de seguimiento de parámetros de maquina)
- Mantenimiento estadístico:
Análisis de incidencias y toma de decisiones.
- Mantenimiento correctivo.

Los objetivos que se persiguen son:

- Reducción a nivel óptimo en función del modo de fallo.
- Mejora continua del mantenimiento.
- Análisis de incidencias, implementación de mejoras de estrategias de mantenimiento y procedimientos.
- Optimización de la fiabilidad y mantenibilidad.

Evolución histórica del mantenimiento de la central de Susqueda

Principios básicos de la estrategia de mantenimiento de la central hidroeléctrica

Sistema de vigilancias

- Sistema de captación y seguimiento del estado de una instalación.
- Inspección visual de los elementos de la central.
- Asegurar la presencia y supervisión en la instalación de manera periódica.

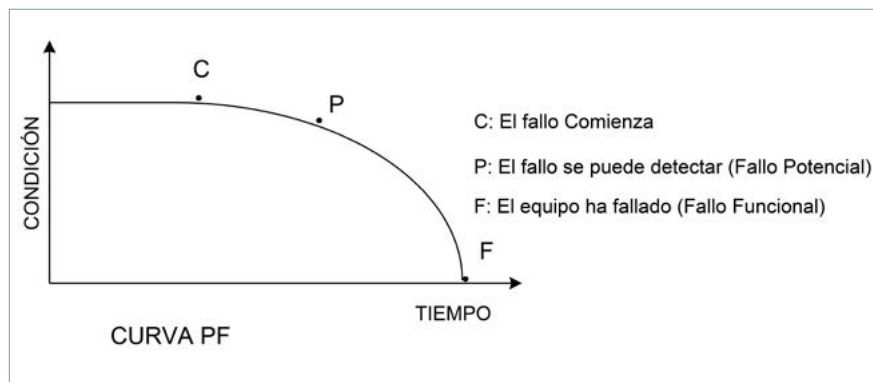


Figura 3. Curva P-F.

- Detección de anomalías y garantía de correcto estado de la instalación.
- Lectura de puntos de medida para analizar la evolución del funcionamiento dentro de parámetros correctos.
- Con los resultados obtenidos, evaluación a modo de oportunidad de los planes de mantenimiento y correctivo de equipos.

Terminal portátil, realiza la lectura de etiquetas (puntos de medida) y posterior volcado a programa de gestión de mantenimiento pasa su análisis y seguimiento.

Mantenimiento preventivo

- Basado en la experiencia acumulada (*know how*).
- Recomendación del fabricante.
- Normativa legal.
- Evaluación de la fiabilidad de cada sistema (punto óptimo de actuación).
- Planificación periódica y automatizada de las actuaciones de mantenimiento a realizar.
- Descripción de los equipos y tareas mediante hojas de ruta de mantenimiento.
- Actualización de las frecuencias de actuación en función de los equipos (sustitución de equipos, nuevas periodicidades).
- Coste real empleado (análisis).

Mantenimiento predictivo

Una falla potencial es un estado identificable que indica que una falla funcional está a punto de ocurrir en el proceso. Las tareas de chequeo consisten en revisar si hay fallas potenciales para que se pueda actuar previniendo la falla fun-

cional o evitar las consecuencias de la falla funcional.

El funcionamiento de las máquinas modifica su respuesta dinámica, bien por origen mecánico, eléctrico o mecánico. El mantenimiento predictivo intenta diagnosticar la avería cuando empieza a manifestarse y aún no es de gravedad para el sistema.

La figura 6 muestra éste proceso. Se le denomina curva P-F porque muestra cómo un fallo comienza y prosigue el deterioro hasta un punto en el que puede ser detectado (el punto P de fallo potencial). A partir de allí, si no se detecta y no se toman las medidas oportunas, el deterioro continúa hasta alcanzar el punto F de fallo funcional:

El seguimiento y control de los parámetros se puede hacer mediante vigilancia periódica, en cuyo caso es importante establecer una frecuencia tal que nos permita detectar el deterioro en un momento entre P y F, y que no sea demasiado tarde para reaccionar.

Asimismo, se puede hacer mediante monitorizado en continuo lo que evita el inconveniente anterior, pero no siempre es factible y, en cualquier caso, es más costoso. De esta manera, finalmente los parámetros por controlar y la forma dependen de factores económicos:

- Importancia de la máquina en el proceso productivo.
- Instrumentación necesaria para el control.

Los equipos a los que actualmente se les puede aplicar distintas técnicas de control de estado con probada eficacia son básicamente los siguientes:

- Máquinas rotativas.
- Motores eléctricos.
- Equipos estáticos.
- Aparatación eléctrica.
- Instrumentación.

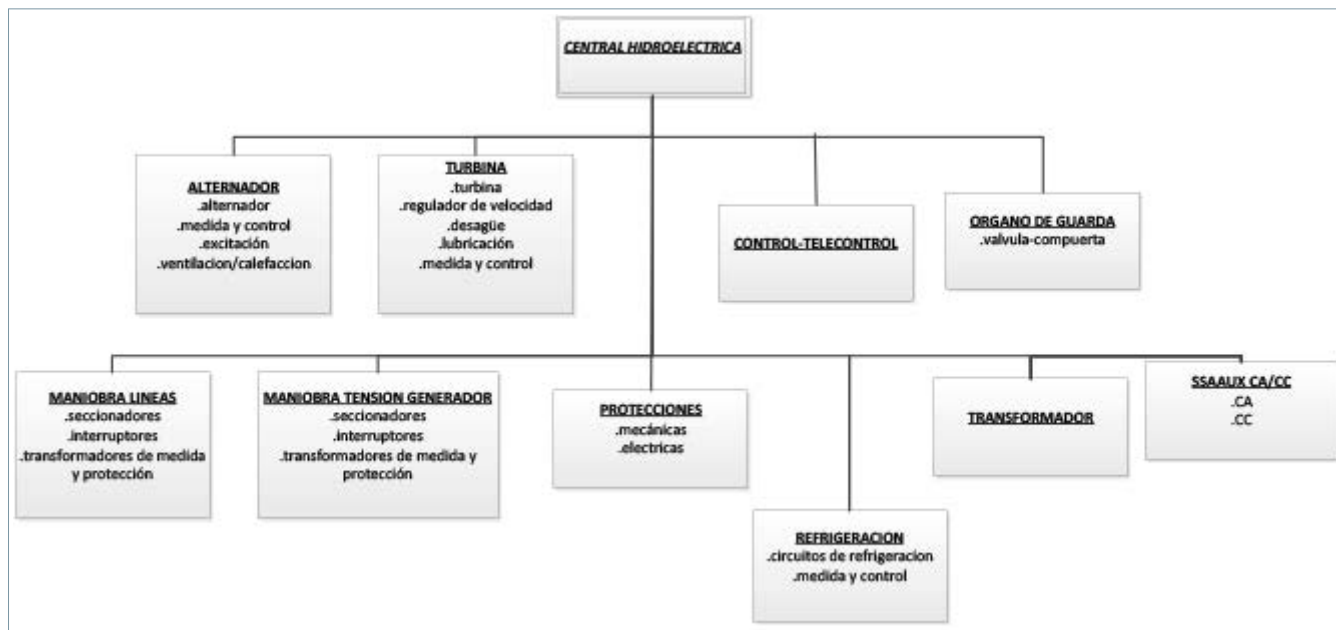


Figura 4. Sistemas y equipos que componen cada sistema de una central hidroeléctrica.

Técnicas de mantenimiento predictivo en una central hidroeléctrica

Seguimiento vibratorio

- Detección de daños.
- Evitar condiciones de operación perjudiciales.
- Identificación y solución de problemas vibratorios (inestabilidades, desgaste en cojinetes, daños en alternador, daños en rodets, cavitaciones, resonancia, etc.).

Análisis de aceites

Toma de muestras de aceites dieléctrico de transformador y aceites de lubricación y mando de grupos hidráulicos. Diagnóstico de posible degradación de los sistemas mecánicos y eléctricos.

EDAS. Diagnóstico de alternadores

- Pruebas de acuerdo con normativa IEEE.
- Análisis de problemas reversibles humedad superficial, etc.
- Análisis de problemas irreversibles (degradación eléctrica, envejecimiento, etc.).

Diagnóstico de transformadores ETP

Prueba que define el estado de los transformadores en términos de circuito eléctrico, magnético, dieléctrico o geométrico (normativa IEEE).

Termografías

Inspección por termovisión de elementos característicos de la instalación. El hecho

de que se detecte un punto caliente implica una degradación futura del equipo.

Análisis de incidencias

- Causa raíz de la incidencia
- Forma de solucionarla y evitar la repetición
- Acciones que emprender, plazos, y responsables.
- Descripción de la acción.
- Aplicación en otras instalaciones.

Definición de sistemas, equipos, grado de criticidad y modelo de mantenimiento de una central hidroeléctrica

Inicialmente, se define en la figura 4 los diferentes sistemas y equipos que componen cada sistema en una central hidroeléctrica.

droeléctrica.

Modos de falla y tipos de falla standard de una central hidroeléctrica.

Para definir los modos y tipos de falla asociados a una central hidroeléctrica se ha realizado un análisis en función de varias consideraciones:

- Datos históricos de incidencias del conjunto de centrales hidroeléctricas (universo de aproximadamente 100 centrales, en un periodo de 6 años de análisis).
- Experiencia aportada en el mantenimiento histórico de las centrales hidroeléctricas, así como de las incidencias acaecidas.
- Experiencia profesional de los

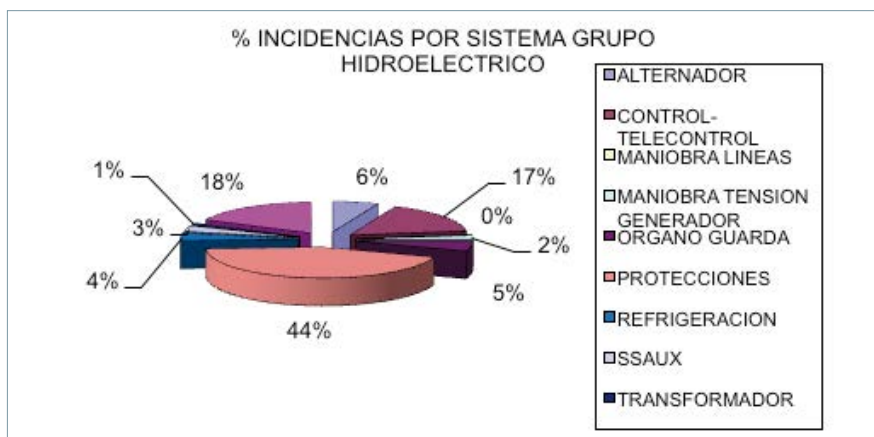


Figura 5. Diagrama de tanto por ciento de incidencias asociadas a cada uno de los sistemas de la central hidroeléctrica en relación con el histórico de incidencias analizado.

mantenedores de este tipo de sistemas.

- Análisis de las estrategias de mantenimiento y sus resultados en desarrollos quinquenales.

Por otro lado, y en función de los datos históricos de incidencias que poseamos, se confecciona la tabla de modos de falla y tipos de falla estándar a que está expuesto al grupo hidroeléctrico (tabla 3 y figura 5).

Análisis de criticidad de los equipos de la central hidroeléctrica

Siguiendo la guía de diseño del plan de mantenimiento, en la tabla 5 se indican las características consideradas en el

análisis de cada equipo de la central hidroeléctrica, para definir el grado de criticidad propio.

En función del grado de disponibilidad necesario del sistema que analizar, se pueden definir los modos de mantenimiento a realizar (tabla 6).

En función del grado de disponibilidad necesario del sistema por analizar, podemos definir los modos de mantenimiento a realizar (tabla 6).

Operaciones de mantenimiento según el tipo de los equipos de la central hidroeléctrica

Una vez definidos los sistemas, equipos, grados de criticidad de cada sistema así como objetivos de mantenimiento de la

central hidroeléctrica, el siguiente paso es definir las operaciones que realizar dentro de cada modo de mantenimiento a implementar en el desarrollo del plan de mantenimiento en cuestión (tabla 7). En los siguientes apartados se desarrollan las acciones que implementar en los modos de mantenimiento considerados.

Trabajos realizados en la central

Revisiones de grupo

Consecuencias de la gestión y de los resultados obtenidos con las herramientas básicas de la estrategia de mantenimiento, se acometen inversiones según coste oportunidad, recuperando las condiciones iniciales de funcionamiento del grupo y mediante automatización y modernización.

RCM mantenimiento centrado en fiabilidad

Método de análisis procedimentado para la implantación y optimización de sistemas de mantenimiento. Estudia los fallos funcionales y las actividades que realizar para diagnosticar el fallo con anterioridad, reparar cíclicamente, rediseñar o concluir que no es posible realizar ningún mantenimiento programado. Su objetivo es optimizar recursos asociados al mantenimiento.

1. Implementación SGMA:

- Control de productos primarios y residuos.
- Control de trabajos en función de parámetro de mejoras ambientales.
- Utilización de aceite biodegradable en sistemas de maniobra oleo-hidráulicos.
- Montaje de equipos de doble capa en sistemas de regulación oil.
- Control de presencia aceites en depósito de achique de centrales en cámara (primer nivel de control).
- Depósitos de confinamiento de centrales dentro del circuito de

Equipo alta fiabilidad (c)	– Seguridad y medioambiente • Accidente muy grave • Revisiones periódicas • Se han producido accidentes – Producción • Su parada afecta al plan de producción – Calidad • Es clave para la calidad del producto • Es el causante de un alto porcentaje de incidencias – Mantenimiento • Alto coste de reparación en caso de avería • averías muy frecuentes • Consume una parte importante de los recursos de mantenimiento
Equipo importante (i)	– Seguridad y medio ambiente • Necesita revisiones periódicas (anuales) • Puede ocasionar un accidente grave – Producción • Afecta a la producción pero es recuperable – Calidad • Afecta a la calidad pero no es problemático – Mantenimiento • Coste en mantenimiento
Prescindible (p)	– Seguridad y medio ambiente • Poca influencia en seguridad – Producción • Poca influencia en producción – Calidad • No afecta a la calidad – Mantenimiento • Bajo coste en mantenimiento

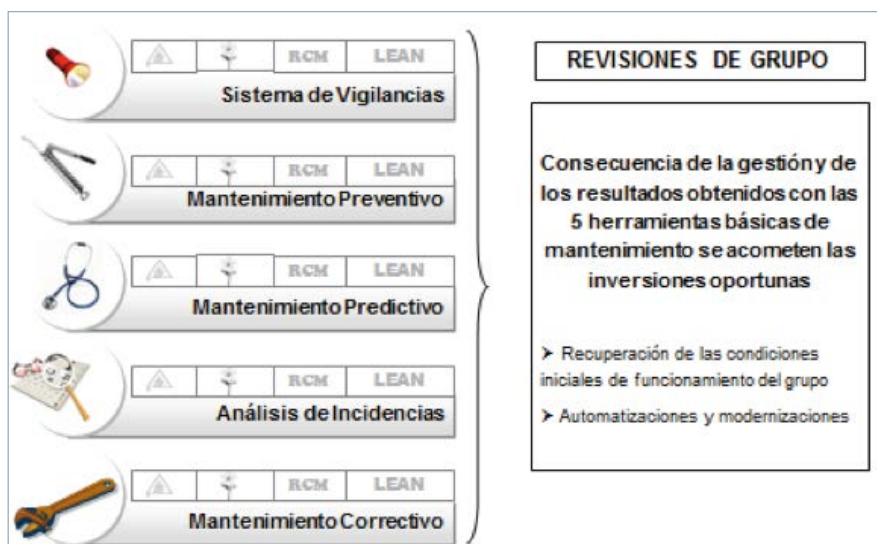
Tabla 5. Características de cada tipo de equipo en función de su criticidad en el funcionamiento.

DISPONIBILIDAD >90%	DISPONIBILIDAD ALTA	DISPONIBILIDAD BAJA
Modo mantenimiento alta fiabilidad	Modo mantenimiento sistemático	Modo mantenimiento condicional
Mantenimiento legal	mantenimiento subcontratado	
Normativa legal	Falta medios o conocimientos	
INDISPONIBILIDAD MUY BAJA		
Modo mantenimiento correctivo		

Tabla 6. Planificación del mantenimiento en función de la disponibilidad del sistema.

1. MODO DE MANTENIMIENTO CORRECTIVO – Reconocimientos de inspección
2. MODO DE MANTENIMIENTO CONDICIONAL – Recorridos de inspección – Operaciones de mantenimiento condicionales (a falta de)
3. MODO DE MANTENIMIENTO SISTEMÁTICO – Recorridos de inspección – Operaciones de mantenimiento condicionales – Operaciones mantenimiento reacondicionamiento cíclico – Operaciones de mantenimiento preventivos
4. MODO DE MANTENIMIENTO DE ALTA FIABILIDAD – Recorridos de inspección – Operaciones de mantenimiento condicionales – Operaciones de mantenimiento reacondicionamiento cíclico – Operaciones de mantenimiento preventivos – Operaciones de mantenimiento predictivos – Operaciones de rediseño

Tabla 7. Listado de operaciones de mantenimiento en cada modo de mantenimiento de equipo.



sistema de refrigeración de los grupos (decantación del agua de refrigeración para el control final del agua de retorno a cauce de río).

- Sustitución de transformadores e interruptores de aceite por otro equipamiento de tecnología “seca” reduciendo el volumen de aceites en el proceso productivo.
- Circuito de respaldo (grupos eléctricos doble capa, buferos con bandejas de recogida, etc.).
- Eliminación de uralitas y de PCB en las instalaciones industriales.
- Mejora del diseño de la iluminación externa (distribución de luminan-

cia hacia el suelo) y del alumbrado leds, alumbrado de seguridad. Auditorías anuales del sistema de gestión ambiental.

2. SGPR:

- Implementación de sistema de gestión de la prevención de riesgos laborales en la instalación.
- Mejora de los procedimientos de trabajo e instrucciones operativas (trabajos en altura, izado de cargas, permisos de trabajo, trabajos en alta tensión, BT, trabajos en descargo hidráulico, control de trabajos en espacios confinados y de difícil acceso).
- Modernización del equipamiento

eléctrico con la correspondiente actualización de enclavamiento de seguridad en su maniobra. Actualización del procedimiento de maniobra eléctrico de equipos.

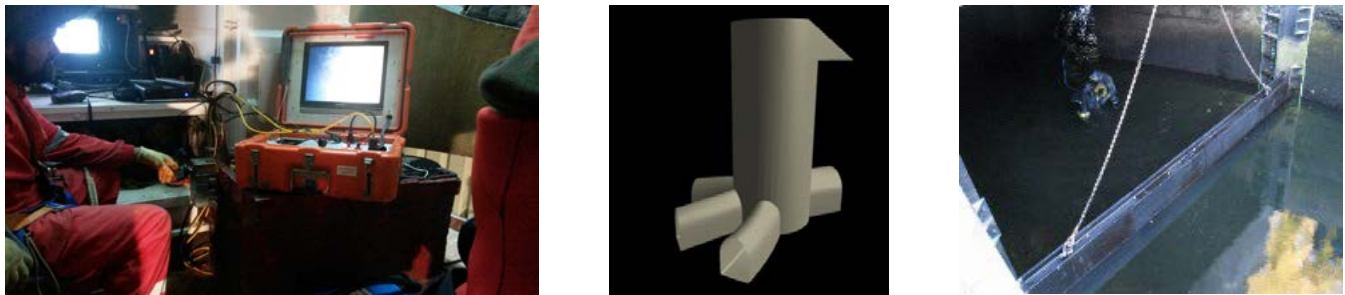
- Modernización de equipamiento mecánico con la correspondiente mejora de los sistemas de cierre y enclavamiento (cierres de revisión en descargo eléctrico, mejoras en enclavamientos).
 - Sistema de control y gestión OS-HAS 14000.
3. Mejoras, grandes actuaciones.
- Adecuación de las válvulas de medio funda de la presa de Susqueda.
 - Adecuación de la maniobra de compuerta y ataguía Torre de Toma.
 - Revisiones de tubería forzada en actuaciones periódicas de vaciado de tubería forzada de la central de Susqueda (4,5 km, diámetro 4,5 m, hormigonado excepto en el último tramo de caída 160 m, que es acorazado).
 - Inspecciones según programa de los procedimientos de control de la presa de Susqueda (auscultación).
 - Grandes revisiones de los grupos 1, 2, 3 con el correspondiente desmontaje total del grupo hidroeléctrico en la central - Alternador, Turbina, refrigeración.
 - Optimización del caudal de refrigeración de los grupos mediante individualización de cada circuito.
 - Adecuación del diseño de los rodets por grupos (eficiencia).
 - Sistemas de control de funcionamiento con 2 y 3 redundancias de control, para poder tener la información y seguimiento del funcionamiento de los grupos de manera *on-line* y con alta fiabilidad.
 - Montaje de arrancadores estáticos en fetos de sistemas con motores y bombas de los sistemas de grupos y los sistemas comunes de central.
 - Sistemas de control de niveles mediante ultrasonido, radar y sistemas de enclavamiento físico (boyas) para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y protección en función de dicho parámetro de funcionamiento -> Nivel.
 - Sistemas de actuación contraincendios de equipos CO₂.
 - Sistema de control de atmósfera central.



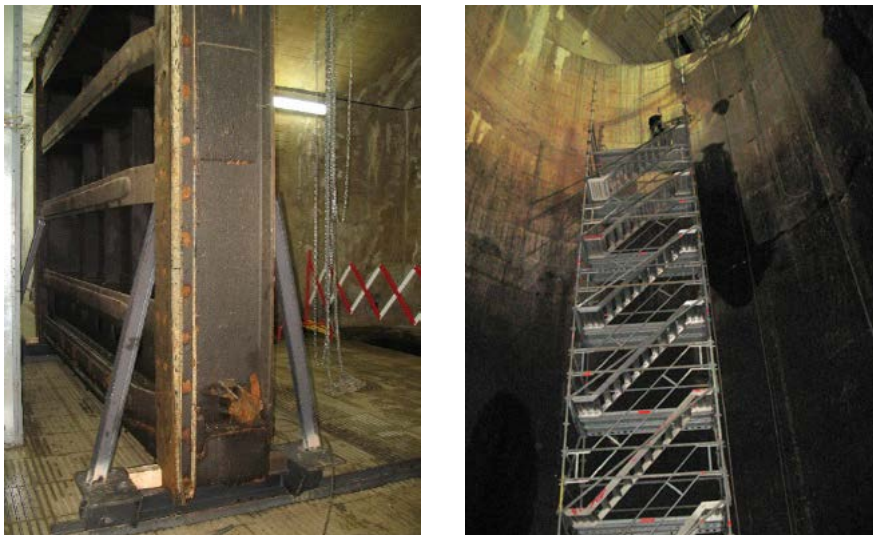
Trabajos de desmontaje grupos hidroeléctricos de Susqueda. Fuente: Base documental UPH Ebro Pirineos.



Trabajos de revisión mecánica en la zona de la turbina.



Trabajos de revisión y adecuación de las infraestructuras central y tuberías forzadas.



Revisiones y adecuaciones de elementos de maniobra hidráulica central.

Susqueda 1968-2018. Celebración del 50 aniversario

Durante 2017 se constituyó una comisión (ayuntamientos, consejos comarcales, Diputación, Agencia Catalana del Agua, Consorci del Ter, Fundación Endesa, Endesa, Enel Green Power) para preparar una serie de actos multidisciplinarios durante todo el año 2018, con el principal objetivo de poner en valor lo que ha representado la construcción de esta infraestructura en el territorio:

- Actos lúdicos y deportivos.
- Difusión de visita virtual en 3D.

Medioambiente y hábitat: fauna y piscícola.

- Actos culturales.
- Exposición de 50 años instalación



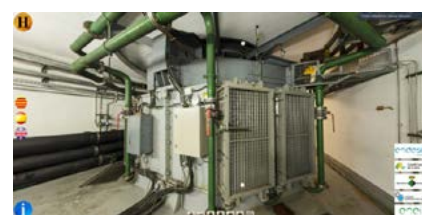
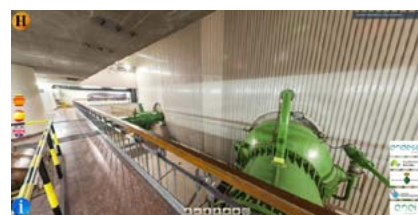
en la sala hipóstila de la presa de Susqueda.

- Realización de documental sobre la construcción.
- Visitas de diferentes colectivos.
- Visitas con medios de comunicación (televisión, radio, prensa, etc.).

Dentro de los actos de conmemoración de los 50 años de la presa y embalse de Susqueda, el viernes 16 de marzo se inauguró en la sala de columnas de la presa una exposición sobre la historia del complejo hidroeléctrico y su entorno. La muestra, albergada en la sala de columnas de la presa de Susqueda, ha tenido como objetivo compartir con el visitante las peculiaridades de esta singular infraestructura y su ubicación. La exposición estaba dividida en 5 ámbitos temáticos diferentes (el embalse de Susqueda, la construcción de la presa, los aprovechamientos hidroeléctricos, el río Ter y su patrimonio: fauna y flora) a través de paneles que aglutinan fotografías, ilustraciones, gráficos y textos y que invitan a hacer un recorrido visual, cómodo, intuitivo y agradable para los visitantes. Todo ello estaba enmarcado en un espacio con un atractivo arquitectónico único. La exposición se complementó con 23 piezas del Fondo Histórico de Endesa procedentes de varias centrales hidráulicas del territorio (algunas de las antiguas Hidro Empordà y HECSA) que representan la evolución y la trayectoria técnica de este tipo de infraestructuras y se convierten en un testimonio material de arqueología industrial.

Visita virtual 3D de la central hidroeléctrica y la presa de Susqueda. Difusión de un ejemplo de central de energía renovable

Uno de los actos más importantes de la celebración del 50 aniversario de Sus-



queda ha sido la realización de un visita virtual en 3 dimensiones tanto de la central hidroeléctrica como de la presa. En este recorrido, se pueden visitar ubicaciones de la instalación y en cada ubicación hay una explicación técnica sobre la funcionalidad y las especificidades. El hecho de que la central sea de tipo

caverna hace que no sea visitable cuando se desarrollan trabajos en su interior. Con esta actuación se intenta explicar la funcionalidad de la infraestructura de generación de energía renovable.

Francisco Javier Martínez Monseco es responsable de Enel Green Power Hydro. A. Ter.