

ESTUDIO SOBRE TURBINA TUBULAR DE PEQUEÑA POTENCIA

Saralegui G.D.¹, Lopardo C.E.¹, Sanmarco E.D.¹, Liscia S.², Suarez V.²

¹UID DISIM, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina,
disim@ing.unlp.edu.ar

²Laboratorio de Hidromecánica, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata, Argentina,
Lab.hidromecanica@ing.unlp.edu.ar

Resumen

La energía eléctrica es una necesidad social básica, muchas veces ausente en comunidades relativamente alejadas de los principales centros urbanos. Es por ello que estudiar la posibilidad de dotar de energía a centros de escaso consumo mediante la construcción de pequeñas o medianas centrales hidroeléctricas resulta de gran interés, sobre todo donde se dispone de un recurso hídrico cercano, pasible de ser aprovechado.

La necesidad de este estudio surgió en el marco de una coyuntura nacional, donde creció fuertemente la demanda energética y por otra parte los altos costos que implica llevar líneas de abastecimiento a puntos alejados de la red interconectada, fortalecieron la posibilidad de avanzar con este proyecto.

La Facultad de Ingeniería ha priorizado y profundizado una política de investigación y desarrollo sobre los recursos renovables, enmarcando en este sentido los miniaprovechamientos hidroeléctricos.

En este campo se concentra este proyecto, que se presenta a continuación, donde la Facultad de Ingeniería a través del Área Departamental Hidráulica, y su Laboratorio de Hidromecánica, en conjunto con el Área Departamental Mecánica, y su unidad de I+D, DISIM, ha decidido en el marco de las tareas de extensión que la misma realiza, desarrollar un proyecto hidroeléctrico ubicado sobre el río Luján de la provincia de Buenos Aires.

Este proyecto se desarrolla a partir de la disponibilidad de una turbina tubular (de característica de una turbina bulbo con transmisión a 90°), que sería la primera instalada en la Provincia de Buenos Aires. La misma llegó a la Facultad, sin uso, pero en estado de deterioro por el tiempo transcurrido en que estuvo almacenada en lugares no adecuados, por lo que se requirió su reparación para dejarla en óptimas condiciones de funcionalidad.

Palabras clave: Turbina tubular, Miniaprovechamientos hidroeléctricos.

INTRODUCCIÓN

Alrededor del año 1980 un organismo estatal de la provincia de Buenos Aires resolvió la compra de una turbina tipo tubular con intenciones de instalarla en un río de la Provincia. Por diferentes motivos, entre ellos que surgió la posibilidad de invertir en un aprovechamiento de mayor potencia, el proyecto no se ejecutó. El equipo se guardó en diferentes almacenes de la Provincia, hasta ser rescatado por la Facultad de Ingeniería, 20 años después y a punto de ser desguazado.

Posteriormente, desde la Facultad, se promovió el estudio del equipo, y a efectos de cumplimentar la etapa de mantenimiento y reparación de la turbomáquina, se procedió a firmar un convenio con el Astillero Río Santiago a través del cual, este último, se comprometió a realizar los trabajos necesarios para lograr el fin deseado, los cuales se encuentran muy avanzados.

Por los años transcurridos y el deambular del equipo por diferentes depósitos, no se pudo hallar ningún tipo de información técnica del mismo. No se obtuvieron estudios técnicos, planos, ni ninguna información del montaje ni de la puesta en marcha. Estas circunstancias hicieron necesario una evaluación del equipo.

En el marco de este desarrollo también se analizaron los ríos de la Pcia. de Buenos Aires, donde los desniveles se caracterizan por pequeños saltos, concentrados en determinadas zonas donde las

características geológicas ha permitido el emplazamiento de pequeñas presas, que han cumplido, en otros tiempos, funciones hidroeléctricas y también han complementado con emprendimientos turísticos, generando pequeños espejos de agua que permiten la recreación. Estas presas se encuentran en condiciones de ser reestructuradas para poder adaptarse a la generación con este tipo de turbinas axiales y en particular en este caso se trata de una readequación de las instalaciones existentes para poder llevar a cabo un emprendimiento de estas características. Los estudios hidráulicos que inicialmente se enfocaron en el lugar de instalación pensado originalmente (sobre el río Quequén), pronto presentaron una serie de inconvenientes prácticos que obligaron a reubicar el equipo, aprovechando la ventaja de tener otro emplazamiento de mejores características sobre el río Luján.

ANÁLISIS DE LA TURBINA TUBULAR.

La turbina que es la base para el desarrollo de este estudio, tiene las características de ser de flujo axial y del tipo tubular, fue fabricada en Grenoble, Francia, es marca Neyrpic, de 225 Kva. y 380V, se ubica dentro del rango de Mini-turbinas, o Generación en pequeña escala, y pertenece a las del tipo hélice. Posee un generador Marca Jeumont Schneider, con un sistema de freno de Foucault, refrigerado por agua. Las mediciones realizadas por el Área de Hidráulica de la Facultad, indican que su punto óptimo de funcionamiento esta dado para un caudal de 6 m³/s, y un salto útil de 5,5 m. Con estas características, la turbina esta pensada para el aprovechamiento energético en ríos de llanura, funcionando con un salto bajo.

La turbomáquina, que puede observarse en la figura 1, presenta un diámetro de rodete de 988 mm, con distribuidor y hélices fijas. Aguas arriba, la aducción de la turbina tiene un diámetro exterior 1000 mm, albergando en el centro un bulbo, en el cual se realiza la transmisión de la potencia a 90°, para su utilización con un generador sincrónico, de 1000 rpm. Este número de vuelta obliga a la transmisión de 90° a multiplicar el número de vueltas en 250 rpm.



Fig. 1. Vistas parciales del cuerpo principal de la turbomáquina.

Como primera medida se procedió a realizar un relevamiento de partes. Luego de los registros fotográficos y la generación de planillas, se pudo avanzar en el desarme del cuerpo principal, que resultó ser el más dañado por el tiempo, ya que tuvo una filtración de agua por el eje conducido, que provocó corrosión sobre el mayor de los rodamientos, hecho que lleva al reemplazo definitivo del elemento, porque se rompe la película superficial y las discontinuidades de ella no hacen más que multiplicar los esfuerzos sobre el punto de apoyo, generando así un acelerado deterioro del mismo. Otra daño ocasionado es la oxidación sobre los dientes de los engranajes, pero de acuerdo con las evaluaciones realizadas no representa mayores complicaciones.

La mayor consecuencia, en realidad, se produjo sobre el eje vertical, con un avanzado estado de corrosión, tal como puede observarse en la figura 2, que no solo afectó al eje, sino que el agarre producido hizo muy difícil su desarme, demorando las tareas más de lo previsto.

Luego de varios intentos, se logró extraer el bulbo completo, las columnas superior e inferior, no sin aplicar grandes cargas, mediante un dispositivo hidráulico. En este paso las tareas se demoran porque se van probando posibilidades cautelosamente para no producir daños.

Es interesante destacar que los accesorios y partes complementarias se encontraron en muy buen estado de conservación, en especial los componentes eléctricos, bien embalado, protegido contra la corrosión, y con hoja indicativa de nombre y cantidad de piezas.



Las primeras evaluaciones del despiece apuntaron a verificar los materiales de las piezas integrantes del conjunto, en especial aquellos que por su función están más expuestas a mayores solicitaciones mecánicas, como es el caso de los ejes de transmisión de potencia, tanto el principal como el conducido.

Los resultados del análisis químico practicado sobre los mismos son los siguientes:

-Eje motor: con un contenido de Mn de 0,68% y de C de 0,39%, sin Ni y sin Cr, corresponde a un Acero SAE 1040.

-Eje conducido: con un contenido de Mn de 0,84%, de Cr de 0,91%, de C de 0,4% y Mb de 0,22%, sin Ni, corresponde a un Acero SAE 4140.

Fig. 2. Corrosión en el par de transmisión.

El siguiente paso fue un trabajo conjunto entre becarios de la Facultad, que tenían la tarea de realizar los croquis de cada pieza, y el personal de Metrología del Astillero, que era el encargado de las mediciones. El objetivo de estos trabajos fue confeccionar un plano de fabricación para cada pieza, y poder así arribar a un plano del conjunto armado tal como se ve en la figura 3. En ella se encuentran indicadas las partes principales de la turbomáquina.

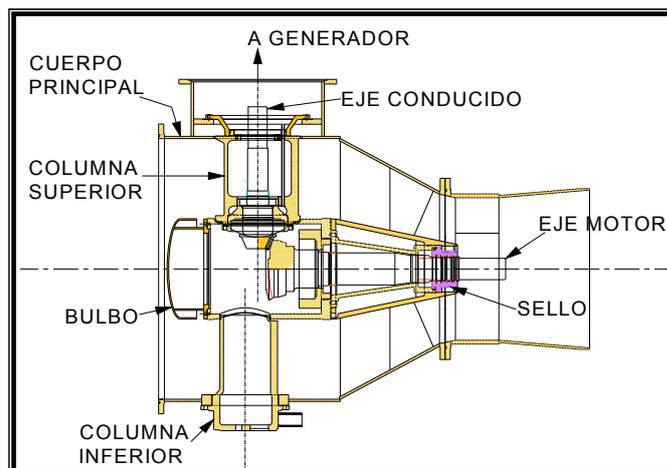


Fig. 3. Vista del conjunto cuerpo principal de la turbomáquina.

La totalidad de los planos fue realizada en el programa de dibujo Autocad 2D, generando así un trabajo progresivo de croquis de la pieza, medición en planta, confección de plano, verificación de compatibilidad entre piezas, revisión de croquis, corrección de medidas, y plano final.

El siguiente paso fue la utilización de un programa de Diseño en 3D, como es el Solid Works, con vistas a realizar en una etapa futura, cálculos mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM), sobre probables rediseños del conjunto. Los resultados gráficos de esta etapa pueden observarse en la figura 4, donde mediante un mejorado visual del conjunto, se hizo visible el interior del equipo, y vemos en amarillo el cuerpo denominado bulbo, sostenido por las columnas en gris, y en rojo se ven los álabes fijos del distribuidor.

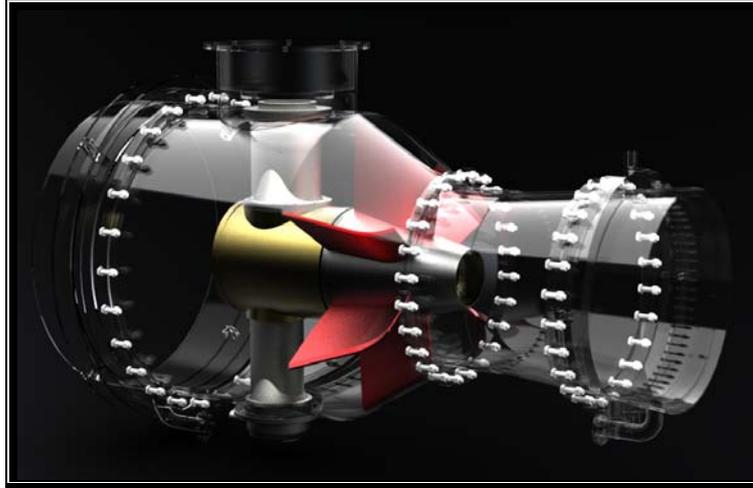


Fig. 4. Vista mejorada del conjunto cuerpo principal de la turbomáquina.

Descripción General del circuito de aceite

El aceite, indicado con rojo en el diagrama de piping de la figura 5, está alojado en el depósito de 350 l, que conforma la geometría básica de la central de aceite: un cubo de 0.7 m de lado construido en chapa con 1 entrada principal de 4", y 1 salida principal de 4" de donde toma la bomba hidráulica.

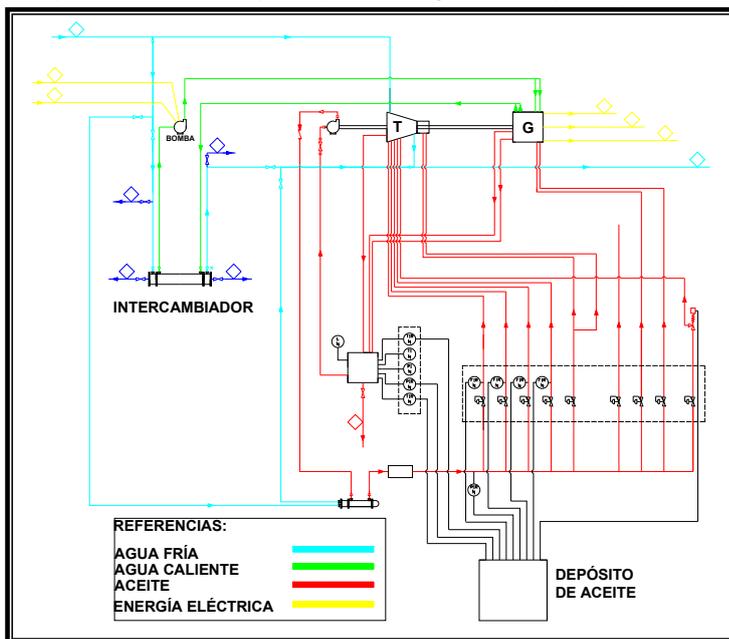


Fig. 5. Diagrama de piping de circuitos de agua, aceite y energía eléctrica.

Por esta cañería de 4", el aceite, es aspirado mediante la bomba hidráulica marca SCAM tipo IMO 50 PN 10, accionada por una derivación mecánica del eje de la turbina (que está ubicada debajo del cuerpo principal de la turbina), impulsándolo a través de una válvula exclusiva (80, PN 10) y de una válvula anti-retorno de 2". La salida de esta válvula está acoplada a un caño de 2" que conecta, en el otro extremo, con un intercambiador de calor, cuyo líquido refrigerante es agua. Luego ingresa al sistema de distribución previo paso por un filtro del tipo Tell Tale de Parker Hannifin Corp.

En el sistema de distribución, ubicado sobre el depósito de aceite, el caudal se divide en 9 circuitos: 8 de 1" y 1 de 2"; donde 7 de ellos poseen regulación individual del caudal y las 2 restantes se regulan en tándem (con el

mismo regulador en paralelo). Hay además 4 caudalímetros marca ASEA, con rango (24-72) l/min.

Una de las salidas de 1", está conectada a un sistema de regulación "fino" constituido por un diafragma (de membrana y resorte) y un sistema de válvula de seguridad de sobre presión. Esta corresponde al sello mecánico que está montado sobre el eje motor, y tiene la función de evitar la entrada de agua y la pérdida de aceite. Este es del tipo Radial Lip Seal.

De los 9 circuitos, 5 llevan aceite de lubricación y refrigeración a todas las partes móviles de turbina, por medio de 4 mangueras de 1" y el caño de 2", que se conectan a los caños ubicados debajo

de columna inferior. De los 4 circuitos restantes, 2 lubrican y refrigeran el generador (excepto al freno de Foucault, que se refrigera por agua), por medio de mangueras de 1" que se conectan en la base del generador, y 2 lubrican los rodamientos del eje conducido.

Sobre el depósito de aceite hay, también, un cuerpo de registro de datos, con 2 termómetro de rango (-10/60) °C que registran la temperatura del aceite en el depósito, 1 de ellos con timbre; y 3 barómetros, con rango (0/6) bar, 2 de ellos con timbre. Un termómetro y un barómetro monitorean el sistema distribuidor.

Los datos indicados en la chapa de características del generador, respecto de la lubricación de los rulemanes del mismo, son los siguientes:

- Aceite: viscosidad 15° Engler a 50°C.
- Gasto de aceite: Extremo del eje, 1 l/min. y en extremo opuesto del eje, 1 l/min.
- Presión de servicio: 0,5 bar

Retorno de aceite:

-*De la turbina:* luego de lubricar y refrigerar cada elemento, el aceite cae por gravedad y luego de atravesar la columna inferior llega a un pequeño estanque, donde un caño de 4" y lo lleva, también por gravedad, hasta el depósito.

-*Del generador:* el aceite vuelve al depósito por medio 2 de mangueras de 1", también por gravedad.

El mayor trabajo realizado fue la reconstrucción del conexionado de cañerías y mangueras de aceite y de agua de refrigeración. Para esto fue necesaria una reconstrucción virtual del conjunto como puede verse en la figura 6, donde a partir de algunos datos recopilados en etiquetas originales, de los registros fotográficos, de las señalizaciones que tenían algunas mangueras, y de las nociones técnicas y del sentido común se fueron realizando diferentes configuraciones hasta arribar al armado completo.

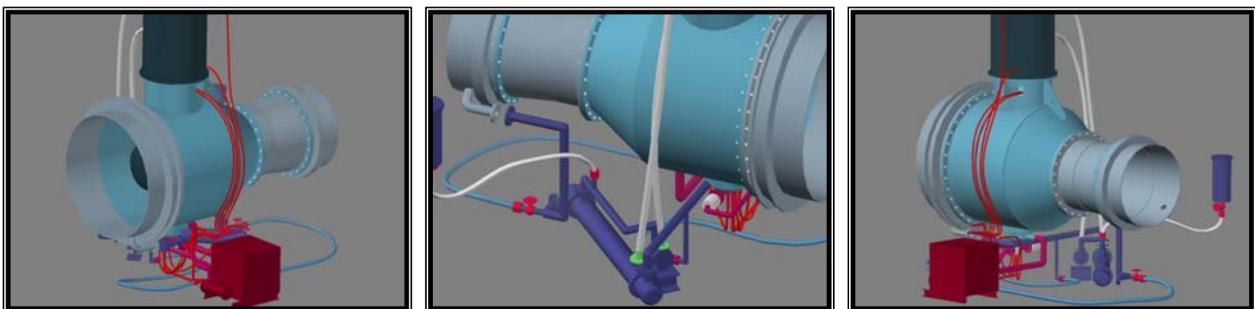


Fig. 6. Vista en 3D del conjunto armado con accesorios y cañerías.

ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL EMPLAZAMIENTO

Conociendo la existencia de una zona en que décadas atrás funcionó algo similar a lo aquí planteado, profesionales y estudiantes de Ingeniería Hidráulica realizaron una visita al lugar.

Dicha zona se encuentra comprendida por un lado por la Planta Industrial de Jáuregui perteneciente al Municipio de Luján y por el otro lado de la margen del río se localiza el club Náutico "El Timón".

El lugar de implantación de la obra tiene accesos pavimentados a las rutas nacionales N° 5 (Luján-Mercedes), N° 6, N° 7 (San Andrés de Giles-San Antonio de Areco-Carmen de Areco) y N° 8

(Pilar-Buenos Aires); ruta 192 y ferrocarril.

El inconveniente que presenta dicho lugar es la accesibilidad directa a la presa, ya que para llegar a la misma se debe ingresar por la fábrica textil contigua a la obra.



Fig. 7. Vista satelital del lugar de emplazamiento.

La infraestructura existente consiste en una pequeña presa por rebalse (ver figura 7) con todas las obras necesarias y complementarias (obra de toma, sala de máquinas, aliviaderos, etc.), para llevar adelante la explotación del recurso hídrico. Ver figuras 8 y 9.

El estado de las mismas correspondientes a las obras de H^o.A^o están en buenas condiciones siendo la parte metálica, lo mas comprometido en lo que hace a su estado de conservación.



Fig. 8. Vista fotográfica de la presa.

Perfil Longitudinal del Río Luján (ver figura 10)

- Tramo Superior: extendiéndose desde las nacientes hasta la localidad de Jáuregui, con una longitud aproximada de 47 km. Presenta una pendiente media del tramo de unos 0,45 m/km.
- Tramo Medio: de aproximadamente unos 30 km, desde la localidad de Jáuregui hasta las proximidades del cruce con la Ruta Nacional N° 8, en la localidad de Pilar. Con una pendiente media del tramo de 0,36 m/km.
- Tramo Inferior: se extiende desde las inmediaciones del cruce con la Ruta Nacional N° 8 hasta el cruce de la Ruta Nacional N° 9, atravesando algo más de 20 km de longitud. La pendiente media en este tramo es del orden de 0,04 m/km.

En lo relativo a la parte técnica, se puede decir que por la altura del salto útil (5.50 m) y el estado general de la obra existente sería viable la colocación de la turbina para el miniaprovechamiento hidroeléctrico y por otro lado habiéndose analizado a nivel de factibilidad los datos hidrológicos se puede decir que la misma estaría en condiciones de generar una energía media anual de aproximadamente unos 1015 MGh.

Estos datos hidrológicos aportados por la Autoridad del Agua (ADA)¹ de la provincia de Buenos Aires, corresponden a mediciones de caudales de dos estaciones limnimétricas en el Río Luján, una es la

estación 4050 ubicada en la localidad de Jáuregui, partido de Luján, Provincia de Buenos Aires, cercano a la presa, y la otra estación es la 4060, ubicada en la ciudad de Mercedes, Provincia de Buenos Aires.

Los datos de la estación 4050 van desde el 20 de Abril de 1971 hasta el 15 de Septiembre del 2008, los cuales no son continuos y representan en total 272 mediciones. En la estación correspondiente a la ciudad de Mercedes (4060) los registros van desde el 10 de Junio de 1988 hasta el 19 de Marzo de 2003, dicho periodo de datos diarios no son continuos y corresponden a 5.978 mediciones.

Para realizar la correlación entre estaciones limnimétricas comparamos las lecturas realizadas para un mismo día, en total se compararon 74 días y se obtuvo las siguientes expresiones:

Ajuste Lineal:
$$Q_{4050} = 1,0744 Q_{4060} - 0,1273 \quad (1)$$

Ajuste Exponencial:
$$Q_{4050} = 1,09 \cdot Q_{4060}^{0,97} - 0,03 \quad (2)$$

Si bien los dos métodos de correlaciones son buenos se adoptó el ajuste exponencial como forma de correlacionar dichas estaciones ya que es la que mejor se ajusta a la nube de puntos de los datos de aforos, luego de verificar esta semejanza se procedió a completar la serie de caudales en Jáuregui con los datos del río de la estación 4060, que representan mayor cantidad de días, y luego se obtuvo una serie de caudales medios mensuales no continuos desde Abril de 1971 hasta Septiembre de 2008, siendo un total de 284 datos mensuales. Se adoptó este tipo de serie de caudales mensuales por la falta de días medidos en varios periodos de la serie. Esto se considera válido como se dijo

anteriormente por analizarse a nivel de factibilidad. Ver figura 9 a).

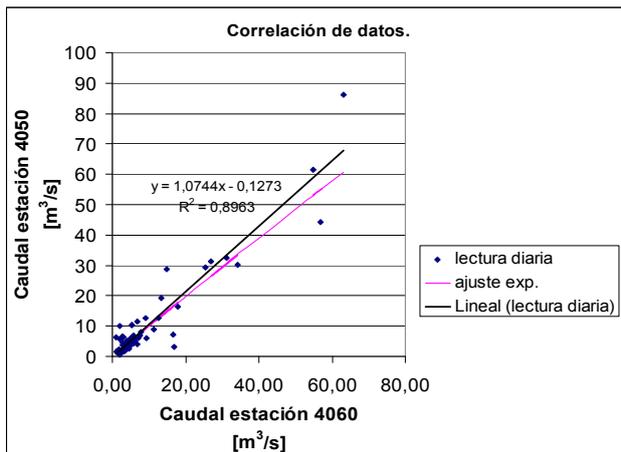
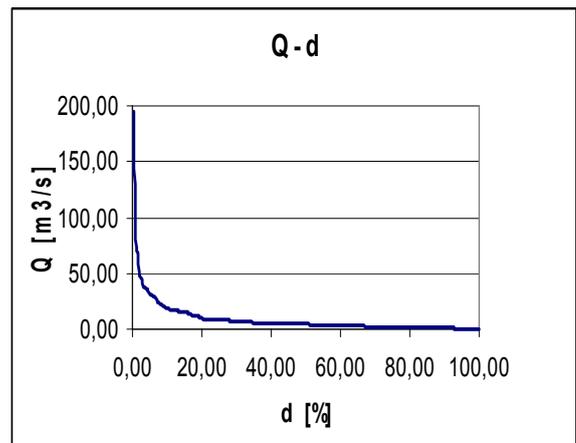


Fig. 9: a) Métodos de correlación de datos.



b) Curva de duración de caudales.

De la serie se obtiene como resultado que el caudal modulo de río es de $8,62 \text{ m}^3/\text{s}$ y la curva de duración de caudales es la de la figura 9 b).

Respecto al generador correspondiente a la turbina tubular a instalar, es necesario colocarlo por encima del nivel de inundación para una recurrencia centenaria. Este nivel de inundación es 23,3 m cota IGM (equivalente a un caudal pico de $877 \text{ m}^3/\text{s}$), por lo tanto la cota de instalación del generador deberá ser mayor a este valor.

Este nivel se obtuvo a partir de analizar el estudio de crecidas. Para poder cumplir con este requisito se deberá realizar una adaptación de la turbina existente, lo que requerirá extender el eje del generador una altura aproximada de 4.5 m.

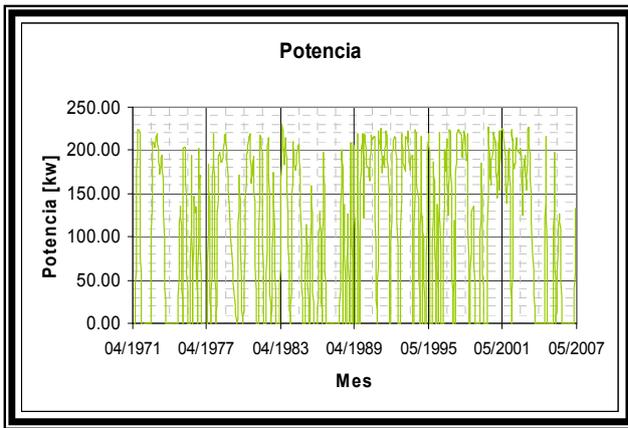
Con la serie de caudales se realizó el cálculo energético, teniendo como límites de caudal turbinado a un máximo de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ dado por las características de la máquina y siendo el mínimo adoptado de $3 \text{ m}^3/\text{s}$, necesario para poder dar movimiento al rodete. La ley H-Q de la restitución, necesaria para realizar el cálculo energético, fue obtenida a partir de la ecuación de Chezy-Manning conociendo la

pendiente de fondo, la sección transversal ubicada a 300 metros aguas abajo de la restitución en coincidencia con la estación limnimétrica, progresiva 49.1 km. (se consideró a esta distancia ya que se disponía de una sección relevada topográficamente) y de estimar el coeficiente de Manning, de acuerdo a lo observado en los viajes de campaña realizados.

La pendiente de fondo se adoptó del estudio realizado por el Instituto Nacional del Agua (INA)³, siendo $i=0,00036$ y el coeficiente de Manning $n=0,035$ (correspondiente a un terreno natural en tierra con poca vegetación). Con estos valores se realizó la estimación del nivel de restitución respectivo a cada caudal, con el fin de saber la variación del salto útil y luego poder realizar el cálculo energético.

La potencia en cada instante se calculó mediante la siguiente ecuación, la cual ya tiene en cuenta un rendimiento aproximado de 0.82 ($\sum \eta$: mecánico, hidráulico y eléctrico):

$$P_{[kW]} = 8 \cdot Q_T \cdot H_u \quad (3)$$



A la izquierda se observa el gráfico de potencia en función del tiempo (Figura 10) y a continuación se observan los gráficos correspondientes a la duración de caudales junto con el de potencia según caudal y el diagrama H – Q, en las figuras 11 a) y 11 b).

Fig. 10. Curva Potencia vs. Tiempo

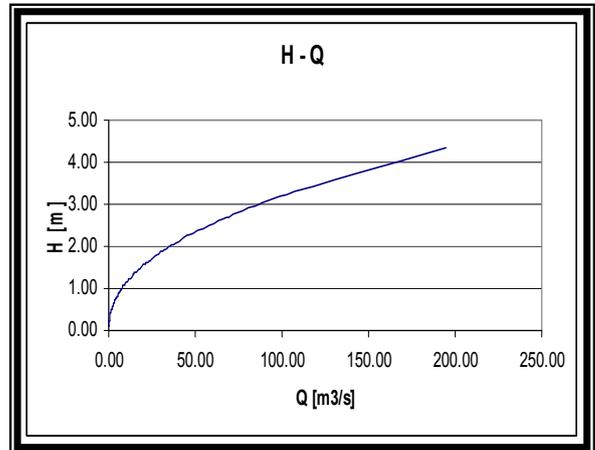
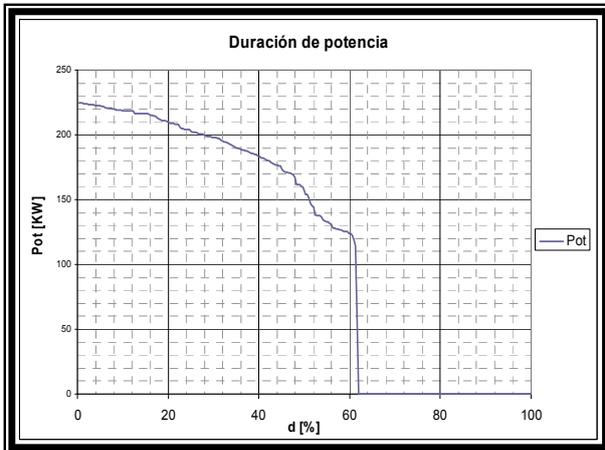


Fig. 11: a) Curva Duración de potencia.

b) Curva Altura vs. Caudal.

CONCLUSIONES

La energía media anual resultante del cálculo energético es de 1.014.083 kWh, considerando un precio del kWh de U\$S 0.040, se obtiene que el valor de la energía media anual de generación es U\$S 40.563.

Por lo expresado anteriormente se puede inferir que el proyecto es técnicamente viable y económicamente rentable, y sustentable desde el punto de vista ambiental.