

Estudio y diseño de una Microcentral Hidroeléctrica en Arroyo del Medio, empleando Turbinas de Arquímedes.

Godoy Christian A.^a, Kelm Lucas Jonathan.^b, Yanke Ariel Omar.^c

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^c Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: christian_agodoy@hotmail.com, yonikelm@hotmail.com, yankeomar_252@yahoo.com.ar

Resumen

El presente documento contiene el estado de avance del proyecto sobre el que se está trabajando, el cual tiene como objetivo la evaluación y diseño de una microcentral hidroeléctrica mediante el uso de turbinas de Arquímedes. Ésta se ubicara en el municipio de Campo Ramón en la provincia de Misiones sobre el cauce de Arroyo del Medio. El trabajo consiste en el relevamiento y evaluación de la zona, y concluye en la selección de los equipamientos necesarios para la instalación de la microcentral, y la conexión con el Sistema Interconectado Nacional.

Hasta el momento, en base al relevamiento realizado y aspectos analizados, se tiene el punto de emplazamiento de la obra de cierre de la presa, cálculo del caudal del arroyo, determinación de la cota y la cantidad de hectáreas afectadas para establecer el salto neto, así como una aproximación de la potencia hidráulica que se puede aprovechar.

Palabras Clave – Caudal, Cota, Demanda, Hidrotornillo, Microcentral, Potencia, Salto, Turbina.

1. Introducción

Según datos proporcionados por el Mercado Eléctrico Mayorista, para el mes de marzo del 2018, se ha registrado un aumento en la demanda eléctrica residencial del 1,1% e industrial del 1,7% respecto al mismo mes del año anterior [1]. En la Fig. 1, se puede apreciar dicha variación anual, y el incremento en la potencia instalada para suplirla en base a las diferentes fuentes de generación eléctrica.

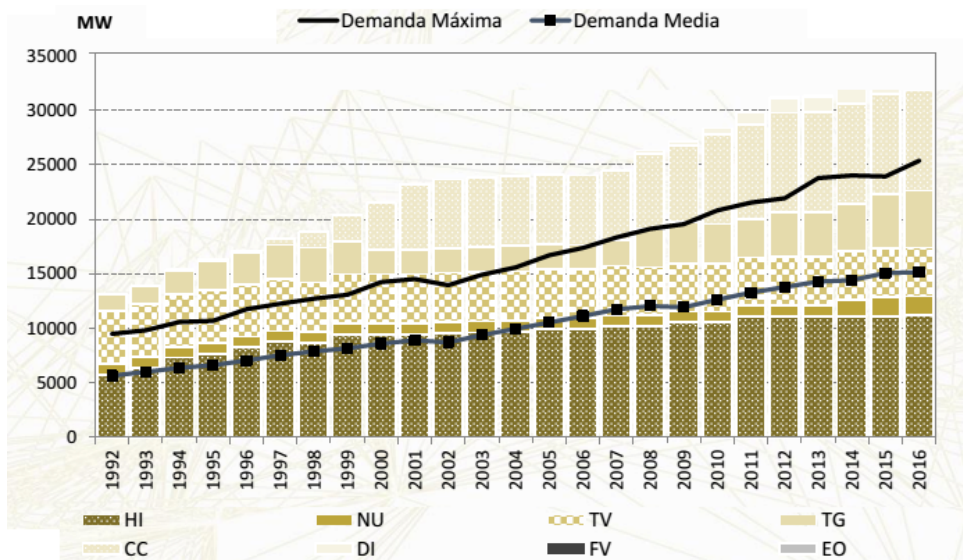


Fig. 1. Evolución anual de la potencia instalada y la demanda del SADI.

Así mismo, en la Fig. 2, se puede apreciar un gráfico del porcentaje de generación eléctrica aportada por cada tipo de fuente energética vinculada al Sistema Argentino de Interconexión para marzo del 2018.

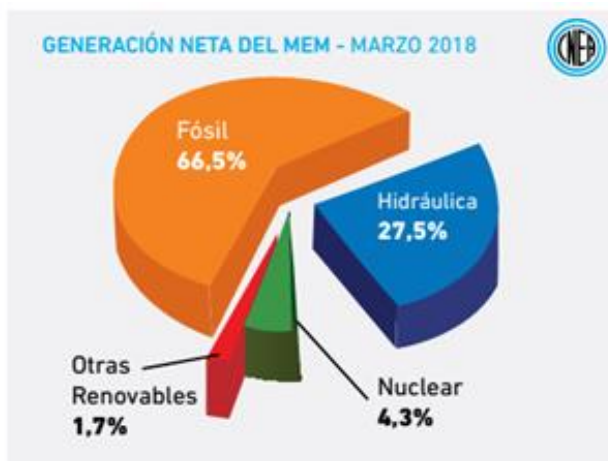


Fig. 2. Proporción de las fuentes energéticas empleadas para la generación eléctrica argentina, vinculadas al SADI.

De lo expuesto anteriormente, se puede ver la creciente demanda del sistema eléctrico y el incremento en la generación a través de la quema de combustibles fósiles para cubrirla. Ello conlleva a factores económicos dado el paulatino aumento en el precio de barril de petróleo, y a factores medioambientales provocados por la liberación directa al ambiente de los gases producto de la combustión de los hidrocarburos derivados.

Teniendo en cuenta estos aspectos, se plantea el diseño de una microcentral hidroeléctrica, surge de la necesidad de ampliar la oferta de energía eléctrica en base a una generación de carácter renovable, empleando para ello, una central hidroeléctrica menor a 50MW que en línea con la ley de energías renovables N° 27.191 CAMESA, la clasifica como hidráulicas renovables [2].

El emplazamiento del proyecto se lleva a cabo sobre el cauce del arroyo “Arroyo del medio” en el municipio de Campo Ramón, departamento de Oberá, provincia de Misiones. Dicha zona elegida está ubicada estratégicamente en cola de línea de media tensión, lo que hace que se tengan ventajas técnicas ya que mejora la regulación de tensión de la línea y además minimiza las pérdidas en éstas, mejorando así la prestación del servicio eléctrico. Se pretende que la generación se lleve a cabo a través de turbinas tipo tornillo de Arquímedes o comúnmente denominados hidrotornillos.

Según el artículo publicado por Guilhem DELLINGER et al (2015), el tornillo de Arquímedes es un dispositivo que se utilizaba en la antigüedad como bomba para la elevación de agua, transporte de granos, sustancias químicas y aguas residuales. No fue hasta el año 1992 que Karl-August Radlik lo presenta como turbina para la generación de energía eléctrica, y entre los años 1993 y 1995 se lo instala para tal fin [3].

En la actualidad la mayor parte de estas instalaciones se encuentran en Europa y Asia, en el resto del mundo son poco conocidas. NEHC (2017), anuncia que, en Estados Unidos en abril del 2017, se instaló la primera central hidroeléctrica de este tipo, mientras que en Argentina, hasta el año 2018, no se encuentra ninguna turbina de Arquímedes instalada [4].

El tornillo consta de un eje cilíndrico alrededor del cual se sitúan una o más superficies helicoidales. El agua entra a éste por la parte superior, siendo el propio peso del agua el que realiza la fuerza de empuje sobre el espiral helicoidal haciendo así girar al tornillo y desplazando el agua hacia abajo, aprovechando de este modo el par provocado en su eje para acoplar un generador eléctrico en su extremo superior.

Las ventajas que se pueden nombrar en este tipo de turbinas, son su alta eficiencia para saltos de agua que van desde 1 hasta 10 metros, caudales entre $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $15 \text{ m}^3/\text{s}$, disposición en serie o en paralelo según las condiciones del emplazamiento, bajo mantenimiento y costo de obra civil en comparación con los otros tipos de centrales hidroeléctricas, y un reducido impacto ambiental [5]. El rango de funcionamiento se muestra en la Fig. 3, y su estructura básica se muestra en la Fig. 4.

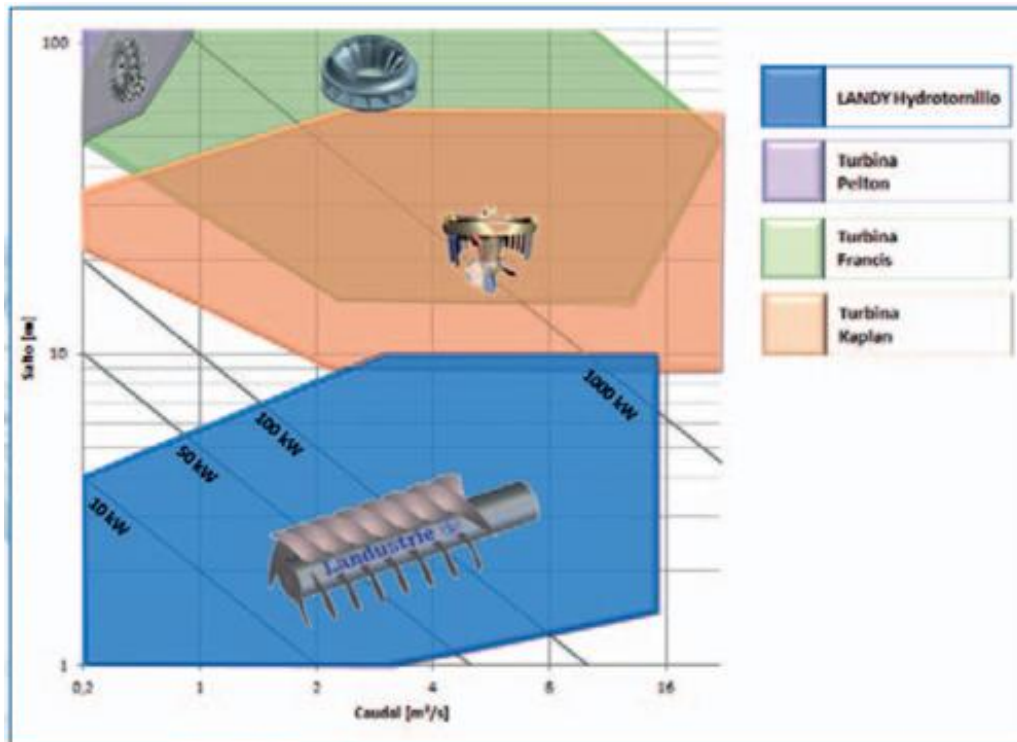


Fig. 3. Rango de funcionamiento de las turbinas (entre ellas el tornillo de Arquímedes) en función del caudal y el salto neto aprovechable.

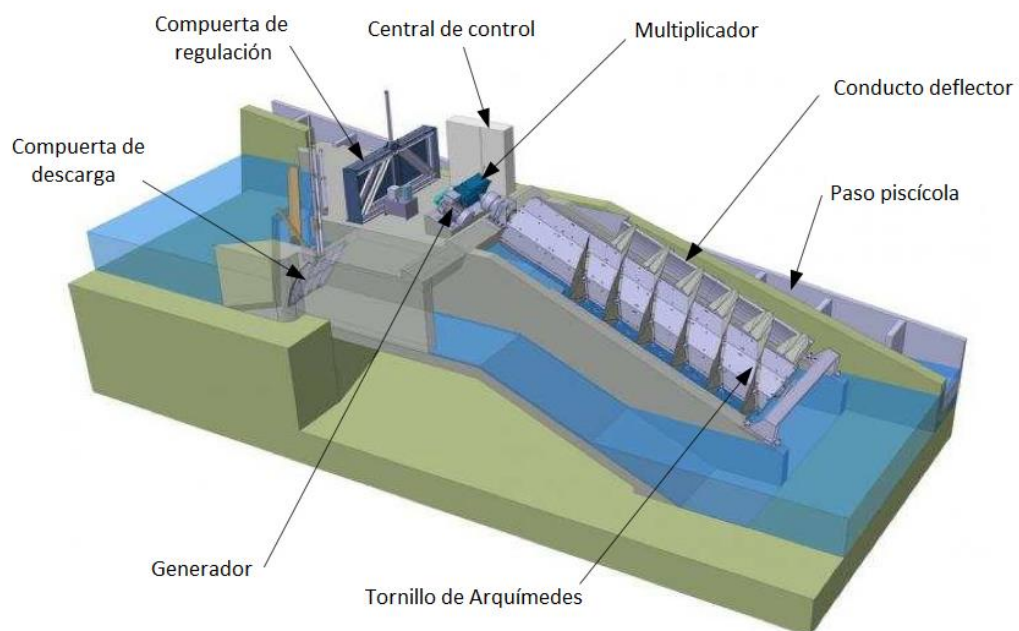


Fig. 4. Estructura básica de la instalación de una microcentral hidroeléctrica con turbina de Arquímedes.

2. Desarrollo técnico

2.1. Relevamiento de la zona de emplazamiento

El sitio de emplazamiento de la obra es el señalado con el punto rojo en la Fig. 5, las coordenadas del mismo son $27^{\circ} 24' 19''$ Sur – $54^{\circ} 59' 57,5''$ Oeste, situado a 6,5km de distancia de la Ruta Nacional N°14 y a 12km de la ciudad de Oberá aproximadamente [6].

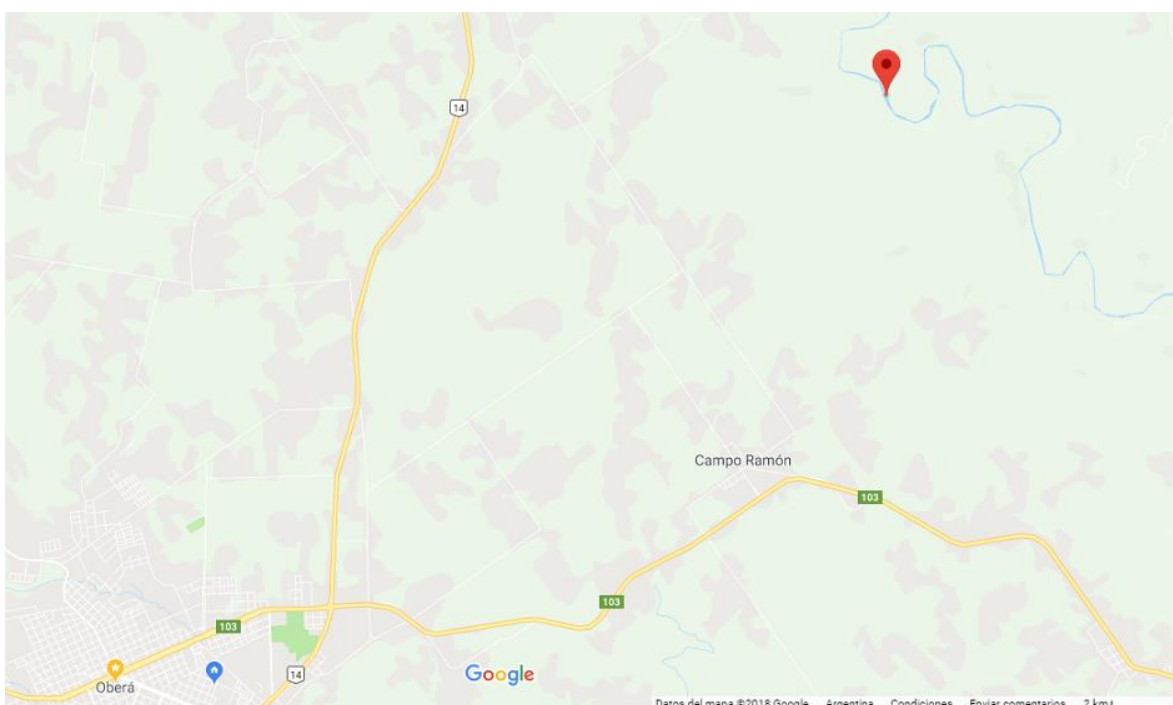


Fig. 5. Punto de emplazamiento de la obra.

Para la elección del lugar se consideraron los siguientes aspectos:

El pronunciado desnivel en las laderas del margen del arroyo en esta zona, lo que permite realizar la obra de cierre adecuada y afectar la menor cantidad de tierras aledañas al arroyo.

El abrupto desnivel en el cauce del arroyo, siendo éste de 2 metros, y la característica rocosa del lugar que se extiende entre sus costas, la que resulta favorable en cuanto al aprovechamiento del desnivel para la construcción de la obra de cierre en este punto.

Hasta el lugar de emplazamiento se tienen caminos transitables, ya que existe un viejo camping aguas abajo del punto elegido, lo que hace que sea accesible.

Otro aspecto relevante para la elección de este punto es la relativa cercanía a la línea eléctrica de media tensión de 13,2kV, la cual se encuentra a una distancia aproximada de 850 metros del lugar de emplazamiento.

2.2. Cota de embalse

La cota de embalse es un parámetro importante a tener en cuenta, ya que está relacionada directamente con la potencia a generar. Para la definición de la misma, se tienen en cuenta criterios técnicos en cuanto a la potencia de generación dada las alturas de salto definidas para los equipamientos comerciales; criterios económicos, ya que cotas mayores acarrearán mayores costos en la realización de la obra de cierre, así como también a la hora de realizar el desmonte y limpieza de la zona afectada; y criterios ambientales a modo de minimizar la cantidad de terreno inundado.

La cota elegida es de 197 metros sobre el nivel del mar, generando con esta una diferencia de altura entre la entrada y la salida del agua al tornillo de 7 metros, siendo éste el salto disponible.

El espejo de agua provocado con éste valor de cota es de 12,79 hectáreas, mientras que el área inundada es de 8,34 hectáreas [7].

En la Fig. 6, se muestra en color azul, el área delimitada para la cota de 197 m.s.n.m.



Fig. 6. Curvas de nivel y superficie encerrada.

2.3. Determinación del caudal

Uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta, es la determinación del caudal del cauce de Arroyo de Medio. Se debe recalcar que la determinación de éste valor en forma precisa, requiere de datos recopilados durante varios años para tener así un valor representativo tanto para los periodos de crecida del cauce, como así también los periodos de estiaje. El método propuesto que mejor se adapta a las condiciones técnicas disponibles, es el de aforo por flotadores el cual trata de flotadores arrojados en el filete líquido central de la corriente a la cual se desea determinar el caudal [8]. De éste modo, dichos flotadores adquieren prácticamente la misma velocidad superficial con la que escurre el líquido, la cual corresponde a la velocidad máxima. Tomando un espacio determinado de recorrido y midiendo el tiempo en que lleva recorrer tal espacio, se puede calcular su velocidad superficial máxima. A través de unos coeficientes determinados por Bazin en base a las condiciones geométricas del perfil transversal del cauce en la zona de medición y su superficie, puede determinarse así la velocidad media. Con ésta última, y el perfil transversal mencionado anteriormente, queda definido el caudal medio.

En primer lugar, se accede a la zona de estudio con las mejores condiciones técnicas para realizar las mediciones. Tal como se estableció en el relevamiento del lugar, la zona elegida dada las condiciones de accesibilidad, es de coordenadas 27° 24' 19" Sur – 54° 59' 57,5" Oeste, siendo ésta una zona de aguas poco profundas, lo que hace posible la determinación del perfil transversal del cauce sin el inconveniente técnico de la profundidad.

A partir de una distancia considerable del punto de lanzamiento de los flotadores, se comienza con la medición del tiempo ya que se considera que a partir de éste punto, los flotadores adquieren la velocidad del filete de agua. La medición de tiempo finaliza tras un recorrido de 16,5 metros.

Los valores medidos de tiempo expresados en segundos, pueden apreciarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de tiempos medidos.

Tiempo (segundos)				
Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
48	56	61	57	61

Se toma el tiempo promedio dado por:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (1)$$

donde: t es el tiempo promedio en segundos; n es la cantidad de mediciones realizadas (5 en éste caso); $\sum_{i=1}^n t_i$ es la sumatoria de los valores de tiempo medido en segundos.

$$t = \frac{(48 + 56 + 61 + 57 + 61)}{5} s = 56,6s$$

Haciendo la consideración de que los flotadores se desplazan con movimiento rectilíneo uniforme, su velocidad se determina mediante:

$$v_s = e/t \tag{2}$$

donde: v_s es la velocidad superficial en m/s ; e es el espacio recorrido en metros; t es el tiempo promedio en segundos.

Se tendrá por lo tanto:

$$v_s = \frac{16,5m}{56,6s} = 0,29 \text{ m/s}$$

Mediante las fórmulas empíricas determinadas por Bazin, se obtiene la velocidad media del flujo de agua, dada por la siguiente expresión.

$$v = \frac{v_s}{1 + 14 * \sqrt{b}} \quad b = \alpha + \beta/R_h \quad R_h = \Omega/X \tag{3}$$

donde: v es la velocidad media en m/s ; α, β son coeficientes que varían según la naturaleza de las paredes. Las mismas se pueden ver en la Tabla 2; R_h es el radio hidráulico de la sección transversal en metros; Ω es la sección transversal, en m^2 ; X es el perímetro mojado de la sección transversal, en metros.

Tabla 2. Valores de los coeficientes α y β .

Descripción	α	β
Canales de paredes muy lisas (tablas cepilladas, enlucidos de cemento, etc)	0,00015	0,000004
Canales con paredes lisas (tablas ordinarias de madera)	0,00019	0,000013
Canales con paredes poco lisas (mampostería ordinaria)	0,00024	0,00006
Canales con paredes de tierra	0,00028	0,00034
Canales y ríos con grava o hierbas	0,0004	0,0007

El perfil transversal del cauce en la zona de mediciones, se lleva a cabo midiendo las profundidades desde la superficie libre de agua hasta el fondo, a determinadas distancias desde las márgenes del arroyo. Sabiendo que en ancho de éste último en dicho sector, es de 22 metros, y tomando de referencia la margen lindante al ex camping, se traza de este modo, el correspondiente perfil, reflejado en la Fig. 7 (cabe recalcar que el perfil de dicha figura, es desde una vista aguas abajo del punto de medición, con lo que el punto cero, corresponde a la costa lindante al camping).

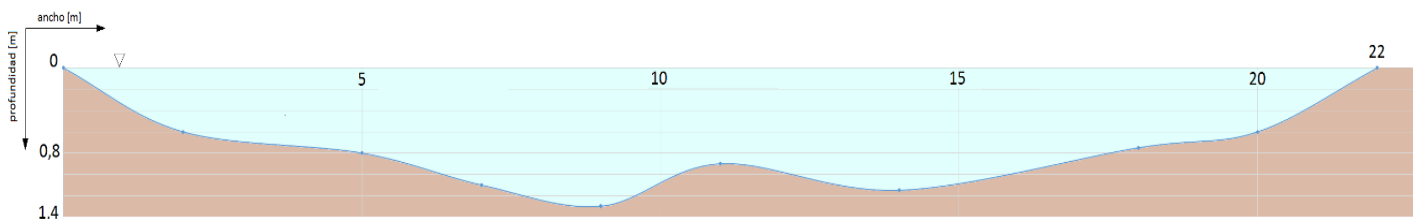


Fig. 7. Perfil transversal del cauce en la zona de emplazamiento de la obra de cierre.

Ya teniendo el perfil transversal, el valor del radio hidráulico será:

$$\Omega = 21,57m^2 \quad X = 22,3m \quad R_h = \frac{21,57m^2}{22,3m} = 0,967$$

De la Tabla 2, para canales y ríos con grava o hierba, se tiene los valores de $\alpha = 0,0004$ y $\beta = 0,0007$, y con ellos se tiene:

$$b = \alpha + \beta/R_h = 0,0004 + 0,0007/0,967 = 0,001124$$

La velocidad media será:

$$v = \frac{v_s}{1 + 14 * \sqrt{b}} = \frac{0,29 \text{ m/s}}{1 + 14 * \sqrt{0,001124}} = 0,197 \text{ m/s}$$

Y de este modo, mediante la ecuación de flujos de fluidos en régimen permanente e incompresible, se tiene:

$$Q = \Omega * v = 21,57m^2 * 0,197 \text{ m/s} = 4,25 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

2.4. Cálculo de Potencia

La potencia teórica, o bien, la potencia hidráulica puesta a disposición de la turbina es:

$$P = Q\rho gH \quad (4)$$

donde: Q es el caudal medio; ρ es la densidad del agua; g es la aceleración de la gravedad; H es el salto de agua disponible (entre la entrada y salida del tornillo) [9].

Teniendo en cuenta que la densidad del agua y la aceleración de la gravedad son prácticamente constantes, se puede calcular y graficar la variación de potencia hidráulica teórica en función de la altura o salto de agua, para un caudal medio de $4,25 \text{ m}^3/\text{s}$. Dichos valores calculados, se resumen en la Tabla 3 y graficados en la Fig. 8.

Tabla 3. Valores de potencia hidráulica calculada en función de la altura o salto de agua.

H [m]	Pt [kW]	H [m]	Pt [kW]
1	41,69	6	250,16
2	83,39	7	291,85
3	125,08	8	333,54
4	166,77	9	375,23
5	208,46		

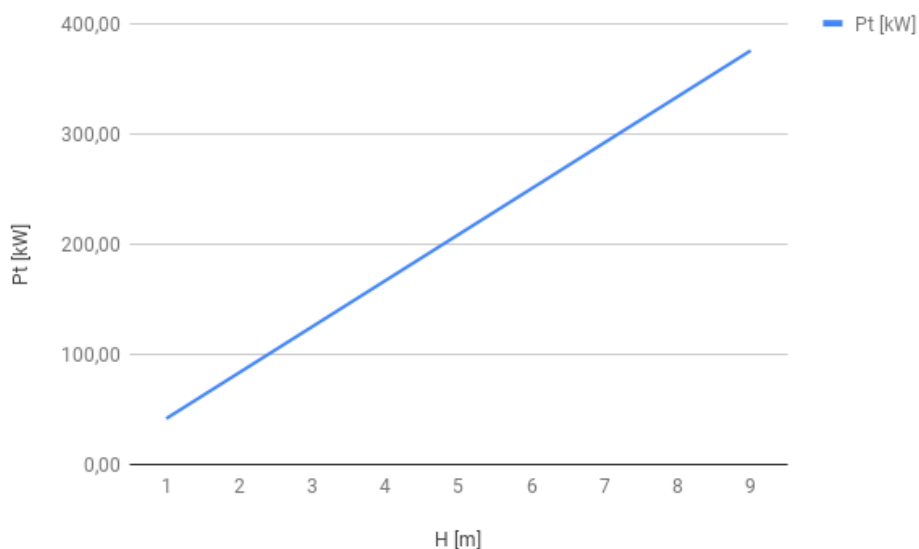


Fig. 8. Variación de la potencia teórica en función del salto disponible.

Considerando que la construcción de la obra de cierre o presa, permitirá obtener una diferencia de 7 metros entre aguas arriba y aguas debajo de la misma, será posible extraer una potencia hidráulica de 291,85kW. A este valor habrá que afectarle el rendimiento que proporciona el fabricante, que generalmente ronda en un 85% dependiendo del modelo comercial, obteniendo así la potencia mecánica disponible en el eje del tornillo de Arquímedes.

3. Conclusiones

Se debe resaltar que el proyecto al día de la fecha, aún sigue en fase de elaboración, por lo que las siguientes conclusiones son parciales.

El presente proyecto toma importancia debido a la creciente demanda de energía eléctrica que se tiene en el país. El estudio se enmarca en el área de energías renovables, enfocado precisamente en la generación hidráulica. La tecnología de turbinas de Arquímedes o hidrotornillo de sistema modular, es relativamente nueva, y las mismas presentan una alta eficiencia empleando pequeños saltos de agua, así como un elevado rendimiento para diferentes caudales, las cuales las hacen propicias para ser instaladas en cauces de pequeños arroyos con sus ventajas técnicas, económicas y medioambientales que provocan.

Con referencia al proyecto, la instalación de la microcentral pretende el incremento de potencia eléctrica disponible, y también según el lugar físico de emplazamiento de las obras, mejorar la calidad de servicio eléctrico.

Las etapas siguientes para la culminación del proyecto, corresponden al diseño de obra civil; operación, automatización y control de la microcentral; reglamentaciones legales; impacto ambiental y análisis económico.

Referencias

- [1] Secretaría de Energía Eléctrica – Ministerio de Energía y Minería, Síntesis del Mercado Eléctrico Mayorista de la República Argentina, p 1, marzo 2018.
- [2] Secretaría de Energía Eléctrica – Ministerio de Energía y Minería, Síntesis del Mercado Eléctrico Mayorista de la República Argentina, p 5, marzo 2018.
- [3] Dellinger G. et al. Optimisation d'une vis d'Archimède pour la production d'énergie dans les microcentrales hydroélectriques. 2 p. Francia, 2015.
- [4] New England Hydropower Company, LLC (NEHC), New England Hydropower Energizes First Archimedes Screw Turbine site in U. S., Meriden, 2017.
- [5] Landustrie, Landy Hidrotornillos, Sneek – Holanda, 2015.
- [6] Google Earth Pro 7.3.1.4507, software libre, © 2018 Google Inc.
- [7] Global Mapper v19.0.0, software bajo licencia, copyright © 2002-2017 Blue Marble Geographics.
- [8] Plessen, Antonio Rolando. Apuntes de la cátedra Centrales de Energía, compaginación Beck, Carlos; Beck Claudia; 2017.
- [9] Mataix, Claudio. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, 2da ed. Madrid, ISBN: 84-209-0175-3, p 493, 1986.