

APLICACIÓN DE MÉTODOS OPTIMIZACIÓN PARA HIDROGENERACIÓN. ESTUDIO DEL SISTEMA DE LOS RÍOS LAS CAÑAS - GASTONA - MEDINA

SANTIAGO REYNA – TERESA REYNA – FABIÁN FULGINITI –MARÍA LÁBAQUE
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de
Córdoba

santiagoreyna@gmail.com-teresamaria.reyna@gmail.com
fabianfulginiti@gmail.com- mlabaque@gmail.com

Fechas recepción: Julio 2017 - Fecha aprobación: Abril 2018

RESUMEN

La energía hidroeléctrica se ha mostrado como una opción madura, accesible y eficiente para hacer frente a la creciente demanda de servicios energéticos. En Argentina existe un alto potencial de fuentes energéticas renovables con grandes ventajas sobre otras fuentes. La aplicación de métodos de optimización a los diseños hidroeléctricos permite que se adopten soluciones adecuadas para cada aprovechamiento. En este trabajo se presenta el modelo de optimización desarrollado para el estudio del Complejo Hídrico de los Ríos Las Cañas - Gastona – Medina en la Provincia de Tucumán en Argentina. Es un proyecto multipropósito con los siguientes objetivos: 1. Generación de energía hidroeléctrica estacional regularizada, 2. Protección contra inundaciones, 3. Abastecimiento de agua para consumo humano, para industria y para riego y 4. Turismo y recreación. Este modelo permitió disponer de un planteo de operación integral del sistema previo a la construcción del mismo. Esto posibilita realizar estudios de mercado más ajustados en la etapa de anteproyecto, ajustar los diversos diseños y contemplar el efecto de considerar variables ambientales que hoy son imprescindibles en obras de esta envergadura.

PALABRAS CLAVE: Energía – Análisis Multicriterio – Optimización – Medio Ambiente

ABSTRACT

Hydropower has proven to be a mature, accessible and efficient option to meet the growing demand for energy services. In Argentina there is a high potential for renewable energies with great advantages over other more traditional sources. The application of optimization methods to hydroelectric designs allows the adoption of appropriate solutions for each use. This article presents the optimization model developed for the study of the Water Complex of the Las Cañas - Gastona - Medina Rivers in Tucuman province, Argentina. It is a multipurpose project with the following objectives: 1. Generation of hydroelectric energy, 2. Flood protection, 3. Water supply for human consumption, for industry and for irrigation, and 4. Tourism and Recreation. This model allowed defining the operation of the system prior to its construction. This made it possible to carry out more accurate market studies

and to consider the effect of environmental variables that should be studied in works of this magnitude.

KEYWORDS: Energy – Multi Criteria Analysis – Optimization – Environment

1. INTRODUCCIÓN

Los servicios energéticos han fomentado el desarrollo económico y mejorado el nivel de vida de la población mundial, con efectos positivos sobre el desarrollo social aun cuando los modelos de suministro y consumo de energía actuales se han vuelto insostenibles. El cambio climático provocado por las emisiones de gases producidas por el uso de los hidrocarburos para la producción de energía representa un riesgo estratégico que está planteando el nuevo escenario energético. Ello sitúa al sector energético como prioridad y a las energías renovables como uno de sus principales instrumentos. En este contexto, las hidroeléctricas han tomado nuevamente protagonismo. El desarrollo de la tecnología ha permitido alcanzar altos niveles de eficiencia en la conversión de la energía hidráulica en energía eléctrica, así como la instalación de grandes módulos de producción eléctrica.

La decisión de construir centrales hidroeléctricas de base, semipunta o punta se relaciona con la curva de demanda diaria y horaria y se encuentra condicionada por la oferta hídrica del sistema. Existe una gran variedad de alternativas en relación a los caudales, saltos disponibles y número y ubicación de las centrales de generación y la elección de sus equipos.

En este trabajo se presenta la optimización de una de las alternativas estudiadas, sus variables y los resultados encontrados. El objetivo perseguido con la aplicación de este estudio de optimización multiobjetivo permitió analizar distintos escenarios y la adopción de la mejor selección de equipos y estrategias de operación del sistema hidroeléctrico analizado.

1.1. Sistema Hídrico de los Ríos Las Cañas - Gastona - Medina

El Sistema del Complejo Hídrico de los Ríos Las Cañas - Gastona - Medina es un proyecto ubicado en la Provincia de Tucumán (Argentina) con múltiples propósitos: generación hidroeléctrica, protección contra inundaciones, abastecimiento de agua para consumo humano, para industria, para riego, para turismo y recreación. El objetivo principal del emprendimiento es la generación hidroeléctrica y el aprovechamiento de los caudales del río Las Cañas y de los afluentes del río Cochuna. Este sistema de caudales moderados tiene la ventaja de tener una topografía con saltos importantes.

La alternativa que se presenta es solo una de las alternativas estudiadas para el proyecto y la misma considera el sistema de aprovechamiento formado por un embalse principal, un embalse compensador, azudes de toma para derivación de caudales y dos centrales hidroeléctricas. El sitio de emplazamiento propuesto para el embalse principal denominado Embalse Potrero del Clavillo se ubica sobre el río las Cañas. Este río es uno de los afluentes del Río Medina. El río Las Cañas se forma de

la unión de varios cursos de agua, los dos más importantes son el río Chacras y el río Potrero (FIGURA 1).

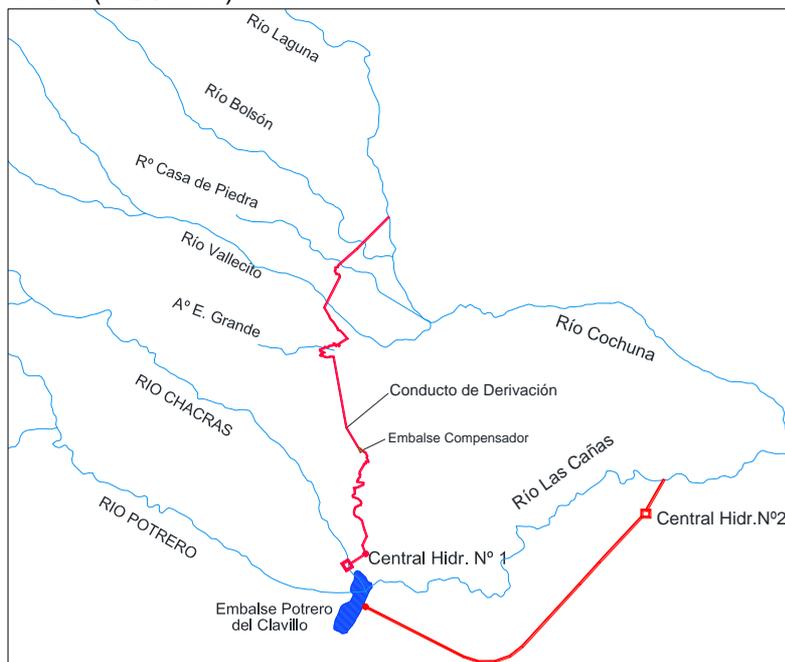


FIGURA 1. Ubicación de los elementos físicos del sistema

El sistema de aprovechamiento incorpora los aportes de algunos afluentes del Río Cochuna. Para esto se construyen azudes con obras de toma y un conducto que permite conducir los caudales de los afluentes del Río Cochuna tomados en las obras de toma a la Central Hidroeléctrica N° 1 ubicada aguas arriba del cierre de Potrero del Clavillo.

En la alternativa de aprovechamiento seleccionada considera las captaciones y derivaciones parciales de los caudales de los ríos de La Laguna, A° Bolsón, Casa de Piedra, Vallecito, Esquina Grande y A° La Quinta.

Antes del ingreso del agua de la conducción al embalse Potrero del Clavillo, los caudales son utilizados en la Central N°1. Luego de la salida de la Central N° 1, el agua ingresa al embalse Potrero del Clavillo. Desde la obra de toma de Potrero del Clavillo los caudales son conducidos por un conducto a presión hasta la central hidroeléctrica N° 2. Los caudales que salen de la Central Hidroeléctrica N° 2 reingresan en el cauce del Río Las Cañas aguas abajo del Embalse Potrero del Clavillo.

Para la alternativa seleccionada, el desnivel total entre la captación superior en el río La Laguna (1670 msnm) y la entrega en la central N°2 en el Río Las Cañas (785 msnm) representa un desnivel total posible de intervención de 885m (CEAS, 2014). La Central N°1 se ubica por arriba del

nivel máximo del embalse previsto en la zona denominada Potrero del Clavillo.

2. OPTIMIZACIÓN HIDROENERGÉTICA

En los sistemas de generación de potencia hidroeléctrica, la operación óptima de los mismos se concibe como un problema complejo de optimización dinámica, estocástica, a gran escala, planteado como la toma de decisiones con respecto a la descarga de agua o caudal turbinado para la generación hidroeléctrica durante un determinado horizonte de tiempo.

Para esto es necesario primero optimizar en la instancia de diseño los distintos elementos que integran el sistema hidroeléctrico. Esto requiere considerar una multiplicidad de factores, situación que se torna más compleja cuando el sistema posee propósitos múltiples.

En general un proceso de optimización para el desarrollo del proyecto de un sistema de hidrogenación debe cubrir los siguientes puntos: consideraciones Ambientales, aspectos Hidrometeorológicos y aspectos Hidráulicos. La afectación ambiental del proyecto fue considerada para el proceso de toma de decisión, construcción, diseño y operación.

Se destacan en particular dos instancias de decisión en que la afectación ambiental e hidroeléctrica juega un rol significativo particularmente en este diseño:

1. *Ubicación de las obras*: En esta instancia se valoró el entorno natural afectado, minimizando el sector de trasvase. Se prestó atención al efecto barrera generado por los tramos de canal de trasvase, planteando mecanismos apropiados para su mitigación.
2. *Normas de operación*: Se prestó atención a que la operación del sistema se garanticen los caudales ecológicos que permitan preservar el hábitat de especies a lo largo de cada cauce intervenido.

2.1. Aspectos Hidrometeorológicos

Los caudales fueron obtenidos por medio de modelos de transformación lluvia – caudal con HEC-HMS (U.S.A.C.E, 2013) dado que solo se contaba con registros de caudales en parte de la cuenca. Se efectuó también una simulación hidrológica semicontinua que permitió el diseño de los órganos de evacuación y ponderar la relación entre los embalses propuestos y los efectos de la estacionalidad climática.

2.2. Aspectos Hidráulicos

Los aspectos hidráulicos fueron contemplados a través en la optimización del diseño de los distintos elementos: captaciones, conducciones, almacenamientos, generación en las dos centrales y restitución. Este proceso de optimización consideró las restricciones técnico – económicas existentes para cada elemento. Se analizaron diversos criterios del emplazamiento para los embalses y las centrales propuestas. El perfil longitudinal de la alternativa definitiva se aprecia en la FIGURA 2.

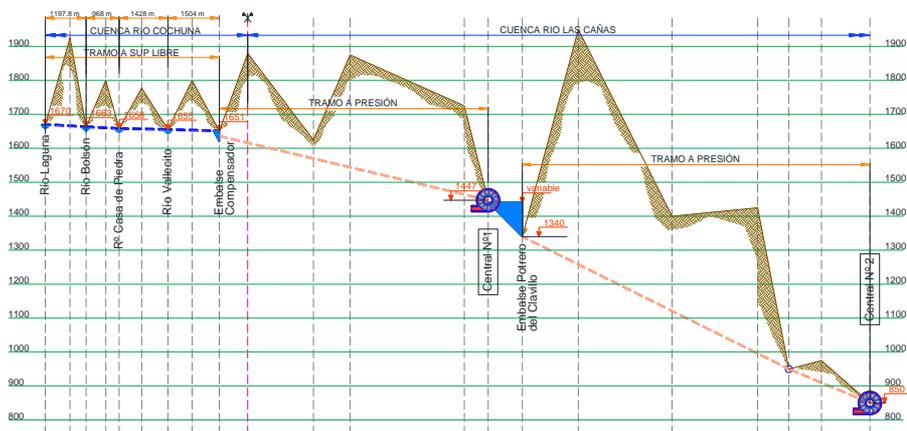


FIGURA 2. Perfil longitudinal de la alternativa definitiva. Centrales y puntos de derivación

3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN HIDROENERGÉTICA

Los análisis necesarios para definir las características del proyecto, requieren considerar una multiplicidad de variables.

Las variables consideradas en la optimización del proyecto fueron:

- ✓ Ubicación de la Presa
- ✓ Ubicación de las Derivaciones
- ✓ Capacidad del Embalse Principal
- ✓ Cantidad y Ubicación de las centrales Hidroeléctricas
- ✓ Selección del Grupo de Generadores
- ✓ Reglas de Operación

El análisis se llevó a cabo para cada escenario posible, esto implicó fijar el valor de algunas de las variables enunciadas variando las restantes de forma secuencial. En base al análisis de la oferta energética (Potencia instalada y Energía anual) para el sistema, se evaluaron cuatro (4) distintos emplazamientos para las obras de trasvase desde los ríos de La Laguna, Bolsón, Casa de Piedra, E. Grande y Vallecito.

Para cada escenario la secuencia de análisis, en general, se establece de la siguiente manera:

1. Modelación del ingreso de caudales al embalse (condicionado por la hidrología, la ubicación, el tamaño de la presa, la ubicación de las derivaciones y las reglas de operación).
2. Modelación de la generación hidroeléctrica (condicionado por el número de centrales, equipos generadores, reglas de operación y la ubicación de las centrales).

En el análisis que se presenta, se muestra solamente la instancia de optimización de las reglas de operación de las centrales del Complejo Hídrico para una configuración de sistema cuyas características restantes ya fueron optimizadas previamente.

La función objetivo seleccionada fue la generación anual (Gwh/año).

Mediante el Modelo de Simulación se analiza el comportamiento del sistema a lo largo de un periodo de tiempo dado; en este caso, el período correspondió a una serie histórica de 28/10/1956 al 31/08/1983.

En la instancia final se fijaron las reglas de operación para la generación bajo distintas bandas de actuación: Potencia en Base, Potencia en Semipunta, Potencia en Punta.

En la operación de un sistema de centrales hidroeléctricas interconectadas se deben satisfacer ciertas restricciones de balance hídrico temporal y espacial, además de restricciones técnicas tales como las capacidades de almacenamiento de agua en los embalses y caudales ecológicos. Por este motivo se generó un esquema de resolución para cada embalse cuyo paso de tiempo permite simular la generación en base y en punta cuyo proceso y variables se muestran en la FIGURA 3.

La potencia generada se calcula en función del volumen turbinable y la cota del pelo de agua en el embalse. En este cálculo interviene el tipo y número de máquinas al influir en la eficiencia y curva de operación. Mediante el esquema de resolución propuesto se elaboró una planilla de cálculo en MS-Excel que calcula automáticamente cada variable para el paso de tiempo i en base a los valores del paso de tiempo $i-1$ empleando las relaciones expuestas.

La aplicación de la planilla de generación en cada instancia del proceso de optimización permitió determinar cada variable o rango de factibilidad para acotar la toma de decisiones. La eficiencia técnica de las unidades de generación para el cálculo de la potencia generada fue estimada a partir de estaciones homólogas. Con los equipos definidos se obtienen los "Diagramas Colinares" de las máquinas (Eficiencia técnica en función de la altura neta y la descarga de agua) y se ajustan los cálculos preliminares.

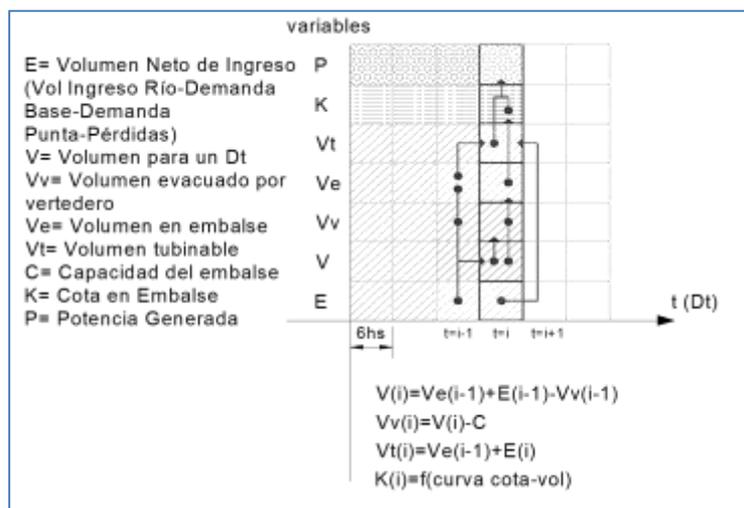


FIGURA 3. Esquema de cálculo y variables consideradas

De acuerdo a lo expresado se definió la función objetivo “Maximizar la Potencia”:

$$MaxP = f(H_m, Q_t, e) = \gamma \cdot Q_t \cdot H_m \cdot e$$

Donde:

P: Potencia media ponderada (unívocamente vinculada con la generación anual)

H_m : Altura media ponderada

Q_t : Caudal medio turbinable

e: eficiencia del grupo de generación

Sujeta a las siguientes restricciones:

Restricciones de balance hídrico temporal y espacial: Representado por la ecuación de balance de agua para cada embalse en cada período de tiempo, incluyendo las relaciones apropiadas para representar la conexión entre éstos.

La función de almacenamiento es:

$$V(t) = Ve(t - 1) + E(t - 1) - Vv(t - 1),$$

Donde:

E (t-1): Volumen Neto de Ingreso (Volumen de Ingreso del Ríos – Demanda Base – Demanda Punta – Pérdidas) en el tiempo t -1

V (t) = volumen para un tiempo t

Vv (t-1) = Volumen evacuado por el vertedero de la presa en el paso de tiempo t -1

Ve (t-1) = Volumen del embalse en el tiempo t - 1.

El volumen evacuado por el vertedero está definido por la capacidad de almacenamiento del embalse, es decir:

$$V_v(t) = V(t) - C \text{ si } V(t) > C$$

$$V_v(t) = 0 \text{ si } V(t) < \text{ ó } = C$$

Donde

C = Capacidad del embalse

Y el volumen turbinable es:

$$V_t(t) = V_e(t-1) + E(t)$$

Donde:

$V_t(t)$ = Volumen turbinable en el tiempo t

La función de la cota del embalse en el tiempo ($K(t)$) depende de la topografía del vaso es decir

$$K(t) = f(\text{curvacota} - \text{volumen})$$

La función de almacenamiento relaciona dos instantes de cálculo consecutivos del periodo de simulación, donde el volumen de agua en cada embalse al final de cada período es igual al volumen inicial más las entradas (descarga del embalse superior y afluencias hidrológicas) menos las salidas (descargas de agua para las turbinas, evaporación y desborde por el vertedero). Esta restricción se encuentra incorporada de forma implícita al proceso de cálculo en cada iteración. La altura media ponderada se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$H_m = f(V_t(t), H_t(t)) = \frac{\sum(V_t(t)H_t(t))}{\sum V_t(t)}$$

Donde:

H_m : Altura media ponderada

$H_t(t)$: Altura para el instante "t". Diferencia entre el nivel en el embalse y el nivel de restitución para el intervalo de tiempo t

$V_t(t)$: Volumen turbinable para el intervalo de tiempo t

El volumen turbinable y la altura instantánea se encuentran en función de las siguientes variables:

$$H_t(t) = f(V_t(t), Rest)$$

$$V_t(t) = f(C, V_e, V_v, Q_b, Q_p, Q_e, Evap)$$

Donde:

$H_t(t)$: Altura para el instante t.

$V_t(t)$: Volumen turbinable para el intervalo de tiempo t

C: Capacidad del embalse

V_e : Volumen en el embalse para el intervalo de tiempo t

V_v : Volumen evacuado por el vertedero para el intervalo de tiempo t

Q_b : Caudal turbinado en base para el intervalo de tiempo t-1

Q_p : Caudal turbinado en punta para el intervalo de tiempo t-1

Q_e : Caudal ecológico liberado para el intervalo de tiempo t-1
 Evap.: evaporación desde el embalse
 Rest.: nivel de restitución

Restricciones técnicas de generación: Restricciones sobre las características técnicas de las componentes del sistema tales como límites de almacenamiento de agua en los embalses, capacidad de las unidades de generación hidroeléctrica, límites mínimo y máximo para la descarga de agua y para la generación de potencia. Como se indicó, el volumen evacuado por el vertedero está definido por la capacidad de almacenamiento del embalse, es decir:

$$Vv(t) = V(t) - C \text{ si } V(t) > C$$

$$Vv(t) = 0 \text{ si } V(t) \leq C$$

Satisfacción de la demanda: Esta restricción no se considera de manera explícita. Por integrarse a un sistema interconectado el emprendimiento no debe satisfacer requerimientos específicos de demanda durante determinados períodos de tiempo, lo que permitió valorar distintos esquemas de generación considerando caudales en base, semipunta y punta. Se debe indicar que no se consideraron las restricciones técnicas de la red de transmisión. El sistema de transmisión deberá ser capaz de conducir la electricidad desde las centrales de generación hasta los centros de consumo. Esto está previsto en el proyecto general.

Por tratarse de un problema cuya solución depende de variables discretas y en muchos casos las mismas se encuentran preestablecidas por decisiones políticas o preferencias de las autoridades de aplicación (ubicación de los puntos de derivación, diámetro comercial de las conducciones...) las situaciones de análisis se valoraron de forma discreta. La ubicación de los puntos de derivación representó un punto particular de análisis, ya que cada emplazamiento implicó ajustar los caudales de aporte en función de la cuenca captada. Una vez determinada la locación más conveniente se procedió a valorar las alternativas de generación.

Las múltiples situaciones analizadas se encuentran condicionadas por la disponibilidad del recurso hídrico en el periodo de simulación, lo que constituye la principal restricción. Por este motivo la potencia media ponderada obtenida para cada configuración, alcanza un máximo a partir del cual se mantiene constante.

Se optimizó la configuración de caudal turbinado en base y en punta para cada central y se expresó por medio del máximo caudal de turbinado. Seguidamente se escogió la combinación que optimiza la potencia media ponderada. Esto puede apreciarse de forma gráfica en la FIGURA 4.

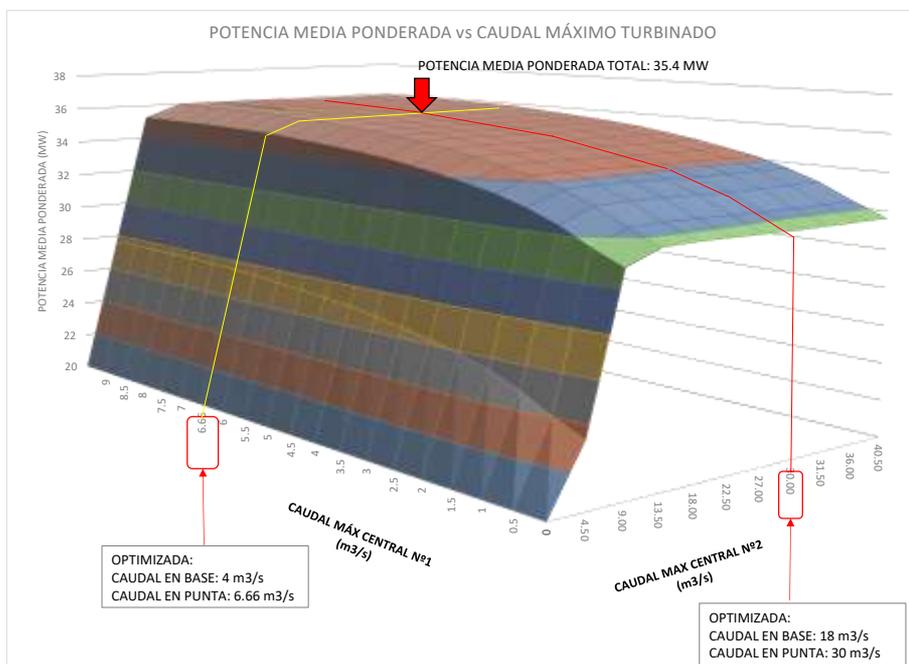


FIGURA 4. Potencia media ponderada en función del máximo caudal turbinado en cada central

Debido a que este portfolio incluye alternativas cuya materialización requeriría utilizar equipos de distintas potencias instaladas y la aplicación de esquemas de operación complejos que no son habituales; estas restricciones técnicas de generación limitaron el universo de soluciones simplificando las normas de operación y homogenizando el tipo de equipamiento a ser empleado. Estas restricciones excluyeron de la selección alternativas que se encuentran taxativamente en el sector de máximos absolutos (FIGURA5).

4. RESULTADOS

Como resultado se obtuvieron las cotas y volúmenes en los embalses, la producción de energía media por central, y los ingresos por venta de energía y por potencia operada. Los resultados avalaron la elección de máquinas Pelton para el embalse Compensador (Central 1) y Potrero del Clavillo (Central 2). La elección de la turbina depende del salto y el caudal. En la FIGURA 6 se presentan las regiones recomendables para los diferentes tipos de turbinas hidráulicas y en la FIGURA 7 las curvas de funcionamiento utilizadas para el grupo de turbinas de la central 1.

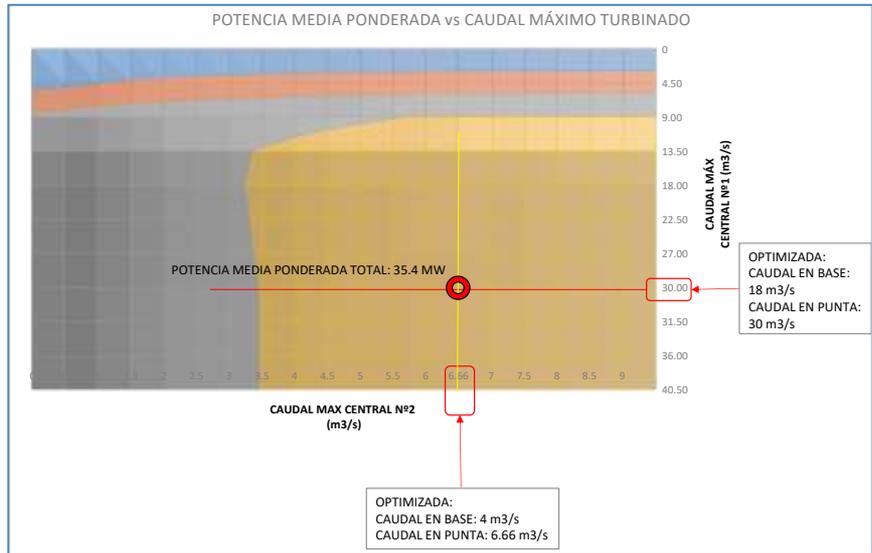


FIGURA 5. Potencia media ponderada en función del máximo caudal turbinado en cada central

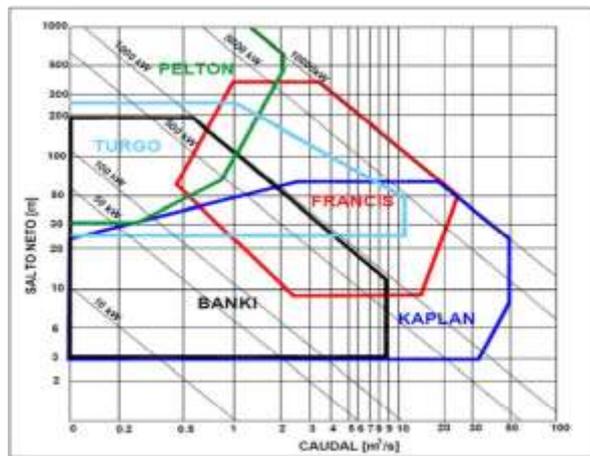


FIGURA 6. Rango de aplicación de distintos tipos de turbinas (Fernández Mosconi y otros, 2003)

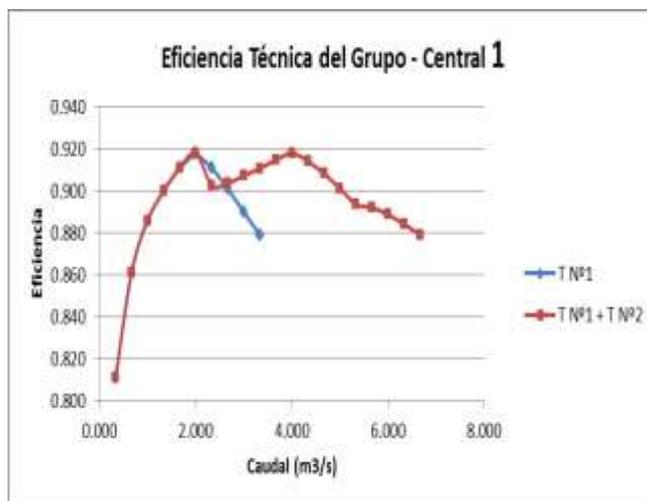


FIGURA 7. Curva de desempeño del grupo de turbinas

		Central 1	Central 2
Media de Caudal Derivado	m ³ /s	2.9	3.47
Caudal de Diseño por Turbina	m ³ /s	2	4.5
Cantidad de Turbinas		2	4
Máximo Caudal Turbinado en Resto / Valle	m ³ /s	4.00	18.00
Máximo Caudal Turbinado en Punta	m ³ /s	6.66	30.00
Volumen Embalse	Hm ³	0.70	55.91
Potencia Media Ponderada	MW	3.81	31.63
Energía	Gwh/año	33.35	277.05

TABLA 1. Resultados de generación con máquinas Pelton para el embalse Compensador y Potrero del Clavillo

Los resultados de Potencia y Energía se presentan en la TABLA 2.

Potencia Media Ponderada Total	MW	35.4
Energía Total	Gwh/año	310.4
Valor de La Energía Media Anual Generada	M U\$S	52.1

TABLA 2. Resultados potencia y energía con máquinas Pelton

5. CONCLUSIONES Y TAREAS FUTURAS

El modelo de optimización hidroenergética permite disponer de un planteo de operación integral del sistema previo a la construcción del mismo.

Esto posibilita realizar estudios de mercado más ajustados en la etapa de anteproyecto, ajustar los diversos diseños y contemplar el efecto de considerar variables ambientales que hoy son imprescindibles en obras de esta envergadura.

El modelo permite incorporar las adaptaciones a las dos variantes planteadas de máquinas hidráulicas y conductos además de las restricciones hidráulicas. Es posible evaluar diferentes alternativas de equipos y ubicaciones para optimizar la generación de energía cumpliendo las condiciones hidráulicas y ambientales planteadas. Además, permite identificar en un sistema complejo las áreas con problemas ("cuellos de botella").

Los resultados de la modelación permiten fijar Pautas Hidrológicas y de Seguridad en la operación del Sistema. Por tratarse de un emprendimiento para generación hidroeléctrica deberá verificarse el Nivel Mínimo Extraordinario (NME) por debajo del cual no podría funcionar sin consecuencias para sí mismo o para alguno de sus componentes.

En la determinación del Nivel Mínimo de Operación se consideran: Salto mínimo de operación de las turbinas; mínimo exigido para la potencia garantizada y el tarquinamiento del vaso. Una vez definida la conformación final del sistema se programa la ejecución y puesta en funcionamiento de los distintos elementos de generación. Esto permite diferir los montos de inversión ajustándolos con los ingresos esperados por generación. Se presentan también las bases para fijar el valor unitario de la potencia garantizada que será empleada en los análisis de costos y beneficios. Y, finalmente, se indican las principales incertidumbres asociadas a la evaluación y actualización de las corrientes de costes y beneficios (tasas de interés e inflación).

6. REFERENCIAS

CEAS (2014). "SISTEMA HÍDRICO POTRERO DEL CLAVILLO. PROVINCIA DE TUCUMÁN. ESTUDIOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS DE APLICACIÓN AL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LAS OBRAS". Informe Técnico.

FERNÁNDEZ MOSCONI, J.; AUDISIO, O.; MARCHEGANI, A. (2003). "PEQUEÑAS CENTRALES HIDRÁULICAS". Apuntes de clase. Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Neuquén, Argentina.

SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HIDRICOS DE LA NACIÓN. Base de Datos Hidrológica Integrada:http://www.hidricosargentina.gov.ar/acceso_bd.phpcomunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/.../capitulo17.pdf

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (2013). "HEC-HMS. HYDROLOGIC MODELING SYSTEM". User's Manual. Version 4.0. U.S.A.