



## Influencia de los volúmenes hídricos almacenados en la laguna Sibinacocha en la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu

Douglas Sarango<sup>\*1</sup>, Teresa Velásquez<sup>1,2</sup>, Guido Rozas<sup>1</sup> y Jorge Gástelo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Ingeniería Mecánica de Fluidos

<sup>2</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola, Departamento de Recursos Hídricos

Recibido 03 octubre 2018 – Aceptado 15 diciembre 2018

Esta investigación, está realizada en el sistema hidráulico de la central hidroeléctrica Machupicchu, la cual cuenta con las reservas de agua almacenadas en la laguna Sibinacocha, dicha laguna almacena en su máxima capacidad hasta 100 millones de m<sup>3</sup>. La central hidroeléctrica Mahupicchu, luego que fuera sepultada en febrero de 1998 por el deslizamiento de la quebrada Ahobamba, inicia una primera etapa de rehabilitación el 2001 logrando generar hasta 90 MW sostenidos y garantizados por la laguna Sibinacocha. En la 2da etapa de rehabilitación, iniciada el año 2009, tiene como objetivo incrementar la generación de 90 MW a 180 MW requiriendo 61 m<sup>3</sup>/s en épocas de avenidas y estiaje, lo cual significa requerimientos de mayores volúmenes almacenados en la laguna Sibinacocha. En esta investigación se simulará la operación de la laguna durante 47 años (1965 al 2011) considerando el requerimiento de la 1ra y 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica, usando el modelo Reservoir System Analysis (HEC-3). Los resultados de la simulación de la primera etapa de rehabilitación indican que el caudal de diseño de 30 m<sup>3</sup>/s es abastecido en un 100% del período simulado. En tanto que los resultados de la simulación para la operación de la segunda etapa de rehabilitación, indican que el caudal de diseño total de la central de 61 m<sup>3</sup>/s solo será abastecido en época de avenidas en un 100 %, mientras que en época de estiaje no se podrá abastecer este caudal.

**Palabras clave:** Río Vilcanota, modelo HEC-3, naturalización de caudales, central hidroeléctrica Machupicchu - 2da etapa de rehabilitación.

### Influence of water volumes stored in the Sibinacocha lake in the 2nd rehabilitation stage of Macchupicchu Hydropower Plant

This research was made in the hydraulic system of the Hydropower Plant Machupicchu, which has water reserves stored in Sibinacocha lake with a maximum capacity up to 100 million cubic meters. The power plant Mahupicchu was buried in February 1998 by slipping the Ahobamba streams, initiates a first stage of recovery in 2001 achieving sustained generate up to 90 MW and guaranteed by the reserves of the Sibinacocha lake. In the second stage of rehabilitation, initiated in 2009, it aims to increase the generation of 90 MW to 180 MW requiring 61 m<sup>3</sup>/s in times of flood and drought, which means requirements higher water volumes stored in Sibinacocha lake. The research simulates the operation of the lake for 47 years (1965 to 2011) considering the requirement of the first and second stage of rehabilitation. The simulation was done with the model Reservoir System Analysis (HEC-3). The simulation results of the first. rehabilitation stage indicate that the design flow of 30 m<sup>3</sup>/s is supplied by 100% over the simulation period. While the simulation results for the second rehabilitation stage, indicate that the total flow design of the plant of 61 m<sup>3</sup>/s will only be supplied in times of avenues by 100 %, while in the dry season can not supply this flow.

**Keywords:** Vilcanota river, HEC-3 model, natural flows, second stage of rehabilitation hydropower Plant Machupicchu.

\*dsarangoj@unmsm.edu.pe

## Introducción

El sistema hidroeléctrico de la Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu (EGEMSA) es uno de los principales generadores de energía del sur del país, y cuenta con la central hidroeléctrica Machupicchu, que en su situación actual - primera etapa de rehabilitación genera 90 MW (Figura 1), mientras que en su segunda etapa de rehabilitación, actualmente en operación genera 180 MW, ambas etapas operan con los caudales regulados de la laguna Sibinacocha y los caudales no regulados de la cuenca intermedia ubicada entre este embalse y la estación hidrométrica Km-105 (Figura 2), [1] [2].

La política de operación de este sistema hidráulico es utilizar al máximo los caudales no regulados de la cuenca intermedia entre Sibinacocha y la estación hidrométrica Km-105, especialmente durante la temporada de lluvias, período durante el cual se llena el embalse Sibinacocha.

La construcción de la 2da etapa de la rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu, se inició en junio del 2009, y por lo tanto es necesario conocer la generación de potencia y energía de esta central y su aporte al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) de nuestro país.

El período de análisis es de 47 años en base a la serie de caudales medios mensuales naturales del período 1965-2011. Los resultados de esta simulación han determinado los caudales mensuales a ser usados en la central hidroeléctrica Machupicchu, a partir de estos se deducirán la generación de potencia y energía a ser aportada al SEIN.

Se ha utilizado el modelo Reservoir System Analysis (HEC-3) del Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers (1978) [3] para simular la operación de la 1ra y 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu, que ha permitido determinar la generación de energía y potencia de la central.

## Materiales y métodos

### Área de aplicación

La cuenca del río Vilcanota tiene una extensión de 51000 km<sup>2</sup> hasta su confluencia con el río Tambo, ambos ríos dan origen al río Ucayali. El área de la cuenca hasta la toma de la central hidroeléctrica Machupicchu, ubicada en la cota 2069 msnm, es de 9384.3 km<sup>2</sup>, (EGEMSA, 1997) [1].

### Obras hidráulicas importantes en la cuenca del río Vilcanota

#### Central hidroeléctrica Machupicchu

La central contó con una potencia instalada de 115 MW construida en dos etapas. La 1ra etapa consta de 02 unidades Francis de 20 MW cada una y la 2da etapa consta de 03 unidades Pelton de 25 MW cada una. Debido al

huayco del 27 de febrero de 1998 producido en la quebrada Aobamba desde su nacimiento hasta el río Vilcanota, que sobre elevó el nivel de agua en 50 metros inundando la casa de máquinas, patio de llaves y el edificio de montaje y mando de la central hidroeléctrica Machupicchu, quedando fuera de servicio. EGEMSA inició la rehabilitación de la central que se desarrolló en dos etapas:

- 1ra Etapa de Rehabilitación: la rehabilitación y repotenciación de los tres grupos generadores con turbinas Pelton a una potencia de 90 MW y un caudal de diseño total de 30 m<sup>3</sup>/s (3 grupos), el patio de llaves, el edificio de mando y control y la modificación de todos los accesos, (EGEMSA, 1997) [1].
- 2da Etapa de Rehabilitación: cuya construcción empezó en junio del 2009, a cargo de Graña y Montero S.A., con una inversión total de 143.8 millones de dólares. El proyecto considera el reemplazo de las turbinas Francis por una turbina Pelton de 90 MW y caudal de diseño de 31 m<sup>3</sup>/s. Al terminar la segunda etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu, está turbinará 61 m<sup>3</sup>/s con una potencia efectiva de 180 MW, (EGEMSA, 1997), [1] (Figura 3).

#### Embalse Sibinacocha

El embalse Sibinacocha fue terminado de construir el año 1996, con una capacidad útil de 100 millones de metros cúbicos, lo que permite afianzar en la época de estiaje la operación de la central hidroeléctrica Machupicchu.

### Recursos hídricos a ser usados por la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu

Los recursos hídricos de la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu son: los caudales mensuales de ingreso al embalse Sibinacocha, su volumen de regulación, y los caudales aportados por la cuenca intermedia del río Vilcanota, entre el embalse y la ubicación de la estación hidrométrica Km-105. El área de drenaje de la cuenca del Vilcanota que será captada en la estación Km-105, es de 9160 km<sup>2</sup>, parte de ella (137 km<sup>2</sup>) es regulada en la laguna Sibinacocha (EGEMSA, 2012) [2].

Las partes de este sistema hidráulico son (MEM, 2009) [4]:

- a) Represamiento de la laguna Sibinacocha mediante presa de 12 m de altura máxima, 356.50 m de longitud en la coronación y 100 millones de metros cúbicos de volumen útil.
- b) La estación hidrométrica Km-105, que controla el caudal disponible para la central hidroeléctrica Machupicchu, opera desde el año 1958 hasta la fecha.



Figura 1: Tubería forzada y sala de máquinas de la 1ra etapa rehabilitación Central Hidroeléctrica Machupicchu. Fuente: EGEMSA, 2012.

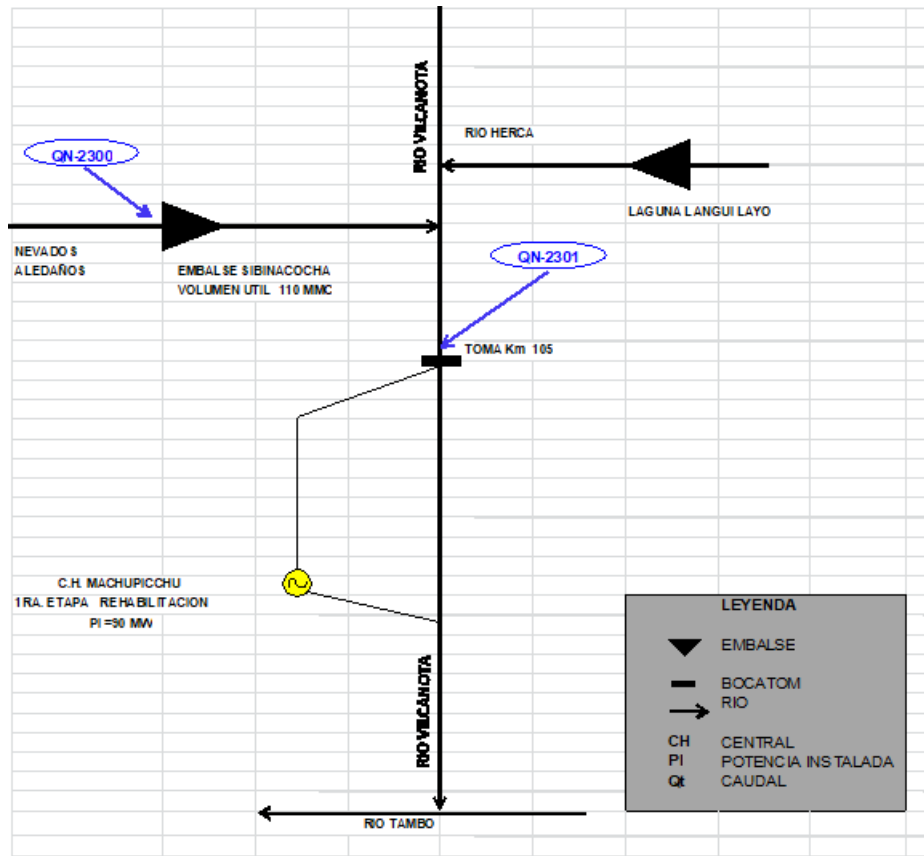


Figura 2: Diagrama topológico del sistema hidráulico de la cuenca del río Vilcanota. Fuente: Elaboración propia



Figura 3: Trabajos de ingreso a la casa de máquinas y vaciado de concreto en la Sub Estación en caverna de la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu. Fuente: EGEMSA, 2012.

- c) Central hidroeléctrica – 1ra Etapa: la rehabilitación y repotenciación de los tres grupos de la caverna No. 2 (con turbinas Pelton) a una potencia de 90 MW y un caudal de diseño total de 30 m<sup>3</sup>/s (3 grupos).
- d) Central hidroeléctrica – 2da Etapa: reemplazo de las turbinas Francis por una turbina Pelton de 90 MW y caudal de diseño de 31 m<sup>3</sup>/s. Al finalizar la 2da etapa de rehabilitación de la central, está tendrá un caudal de diseño de 61 m<sup>3</sup>/s con una potencia efectiva de 180 MW.

## Materiales

### Información climatológica disponible (OSINERGMIN, 2012)

- a. **Temperatura** La temperatura media anual en zonas de interés del área de estudio de la cuenca del río Vilcanota se presenta en la Tabla 1.

Zona	Elevación (msnm)	Temperatura Media (°)
Huancarane	3910	7.73
Tinquiña	4256	4.94
Cayacpata	4425	3.57
Sibinacocha	4900	-0.26
Machupicchu	2000	11.60

**Tabla 1:** Temperatura media Anual en Zonas de interés cuencas del río Vilcanota. Fuente: EGEMSA (2012) [2].

- b. **Humedad Relativa** La fluctuación estacional de la humedad es relativamente pequeña; en la estación Combapata ubicada a 3525 msnm el valor medio anual es

de 57 %, el valor medio máximo es de 71 % y el mínimo de 40 %, correspondiendo estos valores a los meses de febrero y setiembre respectivamente.

- c. **Evaporación** En la cuenca del río Vilcanota la estación a mayor altitud que registra la evaporación es la estación de Combapata, que se encuentra a una altitud de 3525 msnm. Se ha efectuado un análisis regional de la evaporación, considerándose para ello la información de la cuenca del Vilcanota (Combapata), del Apurímac (Caylloma y Angostura), del Ramis (Pampahuata), del Colca (Sibayo y Pañe) y del Chili (Aguada Blanca), ver Tabla 2 y Figura 3.

Estación	Altitud (msnm)	Evaporación (mm)	Instrumento
Combapata	3525	1657.4	Evaporación Piche
Pañe	4524	1301.0	Tanque Clase A
Pampahuata	4350	1417.4	Tanque Clase A
Caylloma	4320	1455.5	Tanque Clase A
Angostura	4155	1405.0	Tanque Clase A
Sibayo	3810	1588.0	Tanque Clase A
Agua Blanca	3725	1729.0	Tanque Clase A

**Tabla 2:** Relación de estaciones de Evaporación. Fuente: Elaboración propia.

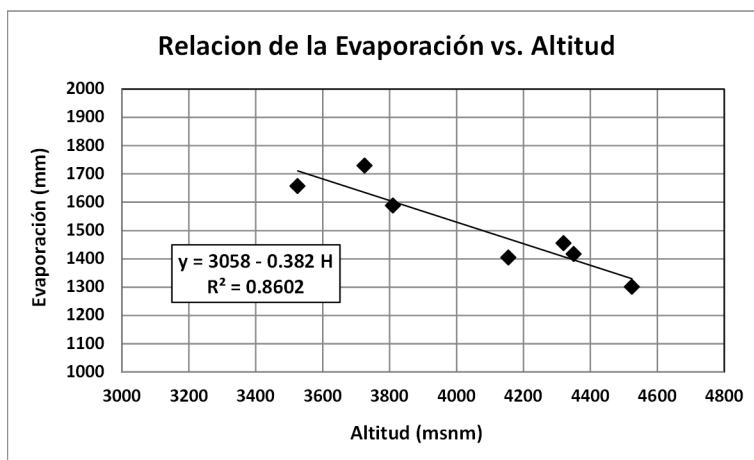


Figura 4: Relación de la Evaporación vs. Altitud. Fuente: Elaboración propia.

Se analizó la relación de la evaporación con la altitud sobre el nivel del mar, obteniéndose la siguiente relación:

$$E = 3058 - 0.382H \quad (1)$$

$$R^2 = 0.86$$

Donde:

- E = evaporación anual (mm)
- H = altitud (msnm)
- R = coeficiente de correlación

Mes	Precipitación (mm)
Enero	95.07
Febrero	85.50
Marzo	88.13
Abril	87.65
Mayo	88.73
Junio	79.64
Julio	85.38
Agosto	100.57
Setiembre	112.29
Octubre	130.22
Noviembre	119.42
Diciembre	113.60
Total	1186.20

Tabla 3: Evaporación total (mm) mensual en el embalse Sibinacocha (Año 2011). Elaboración propia.

La relación encontrada nos indica una variación inversa entre la evaporación y la altitud, es decir que la evaporación disminuye conforme aumenta la altitud, así aplicando la relación (1) a Sibinacocha se obtuvo una evaporación total anual de 1186.2 mm que se puede

descomponer mensualmente utilizando la información de las estaciones Pampahuata, Angostura y Cailloma, ver Tabla 3.

d. **Precipitación** La precipitación total mensual en el embalse Sibinacocha para el año 2011 se muestra en la Tabla 4, siendo la precipitación total anual del orden de 300.1 mm/año.

Mes	Evaporación (mm)
Enero	93.8
Febrero	96.4
Marzo	26.8
Abril	16.1
Mayo	1.1
Junio	0.0
Julio	0.0
Agosto	0.0
Setiembre	30.5
Octubre	0.4
Noviembre	5.9
Diciembre	29.1
Total	300.1

Tabla 4: Precipitación total (mm) mensual en el embalse Sibinacocha (Año 2011). Elaboración propia.

### Estaciones de aforos

La cuenca del río Vilcanota cuenta con 5 estaciones hidrométricas, cuyas características se muestran en la Tabla 5. La estación Km-105 controla el caudal disponible para la central hidroeléctrica Machupicchu, y la estación Sibinacocha se ubica en la descarga de la laguna del mismo nombre, y reporta la información de la operación del embalse [5]

Estación	Río	Altitud Cuenca (msnm)	Area (km <sup>2</sup> )	Operador
km 105	Vilcanota	2069	9160	EGEMSA
Pisac	Vilcanota	2971	6911	SENAMHI
Huancarane	Salcca	3910	2035	EGEMSA
Sibinacocha	Sibina	4870	137	EGEMSA
Pte. Acco	Acco	3900	305	EGEMSA

**Tabla 5:** Relación de estaciones hidrométricas en cuenca río Vilcanota. Fuente: EGEMSA 2012 [2].

### Análisis de la información hidrométrica

#### a. Estación hidrométrica Km-105

La información histórica de caudales fue corregida en el período 1970-1996, considerando que los caudales en época de estiaje estuvieron subestimados, (S&Z Consultores Asociados, 1997) [6]. Para obtener los caudales naturales en la central hidroeléctrica Machupicchu hasta el año 1996 se considera la estadística de la estación Km-105 y para los años 1997 al 2006 se debe corregir por el efecto de la regulación del embalse Sibinacocha con la siguiente relación, (OSINERGMIN, 2012) [5]:

$$QN_{machupicchu} = QH_{Km105} - QR_{sibinacocha} - QN_{sibinacocha} \quad (2)$$

Dónde:

QR = caudal regulado (m<sup>3</sup>/s)  
 QN = caudal natural (m<sup>3</sup>/s)  
 QH = caudal histórico (m<sup>3</sup>/s)

#### b. Estación Pisac

En el proceso de naturalización, es importante tener los caudales naturales en la estación Pisac. Desde 1997 a la fecha la naturalización se realizó con la siguiente expresión, (OSINERGMIN, 2012):

$$QN_{pisac} = QH_{pisac} - QR_{sibinacocha} - QN_{sibinacocha} \quad (3)$$

Pero como la información histórica de la estación Pisac no es completa, el período sin información será estimada en base a los caudales naturales de la estación Km-105 mediante la expresión siguiente:

$$QN_{pisac} = 1.50 * QN_{machupicchu}^{0.79} \quad (4)$$

#### c. Estación Sibinacocha

Para determinar las descargas naturales medias mensuales en Sibinacocha se consideran dos fases distintas: antes que se construya el embalse y después de la construcción del embalse. En la primera fase se estimaron mediante correlaciones con la estación Huancarane mientras que en la segunda fase se reconstruyeron los caudales naturales mediante la siguiente ecuación de naturalización, (OSINERGMIN, 2012) [5]:

$$Q_n = Q_s + \frac{(V_i - V_{i-1})}{\Delta t} + \frac{(A_i - A_{i-1})}{2} \frac{(CE - P)}{\Delta t} + Q_f \quad (5)$$

Dónde:

Q<sub>n</sub> = caudal natural (m<sup>3</sup>/s)  
 Q<sub>s</sub> = caudal de salida (m<sup>3</sup>/s)  
 V<sub>i</sub> = volumen almacenado en tiempo i (MMC)  
 V<sub>i-1</sub> = volumen almacenado en tiempo i-1 (MMC)  
 A<sub>i</sub> = área del espejo de agua, en tiempo i (km<sup>2</sup>)  
 A<sub>i-1</sub> = área del espejo de agua, en el tiempo i-1 (km<sup>2</sup>)  
 Q<sub>s</sub> = caudal de salida (m<sup>3</sup>/s)  
 C = coeficiente de tanque  
 E = evaporación medida en tanque evaporímetro (mm)  
 P = precipitación sobre el espejo de agua (mm)  
 Q<sub>f</sub> = caudal perdido por filtración (m<sup>3</sup>/s)

El coeficiente de tanque utilizado en la presente investigación fue de 0.96. Las descargas medias mensuales en el embalse Sibinacocha se obtuvieron tomando como base los caudales mensuales en la estación Huancarane desde 1965 hasta 1995 y mediante la relación obtenida por correlación para el período común obteniéndose una expresión polinómica.

$$Q_{sibinacocha} = 0.1026 * Q_{huancarane} - 0.0071 * Q_{huancarane}^2 + 0.0000089 * Q_{huancarane}^3 \quad (6)$$

Mediante la relación (6) se obtuvo la estadística mensual de la estación Sibinacocha desde 1965 a 1995. Para el período 1996-2011 se hizo mediante la ecuación de naturalización antes mencionada.

#### Demandas de agua

El sistema actual de abastecimiento de agua potable a la ciudad del Cuzco se sirve del recurso hídrico de una serie de lagunas y pozos de agua subterránea y no afectan la escorrentía natural del río Vilcanota, así como no existen demandas de uso minero en esta cuenca. La demanda agrícola es de 0.15 m<sup>3</sup>/s, que es el requerimiento de agua para la mini central hidroeléctrica de Sibinacocha que abastece de energía para el campamento de EGEMSA, y que luego esta agua es aprovechada para fines agrícolas, (MEN, 2009) [4].

**Información hidrológica disponible generada para la evaluación de la 2da etapa rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu**

Con la finalidad de efectuar la simulación de la operación (1965-2011) de la 1ra etapa y de la 2da etapa de reha-

bilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu con el modelo HEC-3, se han determinado la serie de caudales medios mensuales de ingreso al embalse Sabinacocha (Tabla 6) y el aporte intermedio de la cuenca entre Sabinacocha y la estación hidrométrica Km-105 (Tabla 7).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom
Prom	5.86	7.58	7.08	3.89	1.52	1.01	0.73	0.80	1.13	1.39	1.97	2.81	2.98
Des. Est	3.22	6.48	6.18	3.65	1.16	0.81	0.37	0.51	1.26	1.19	1.40	1.30	1.24
Max	18.70	40.56	35.05	20.05	8.33	5.54	2.00	2.72	8.77	8.33	9.98	8.33	7.15
Min	2.02	3.01	0.00	0.27	0.15	0.20	0.18	0.12	0.15	0.22	0.90	0.65	1.74

**Tabla 6:** Resumen estadístico serie de caudales medios mensuales naturales (m<sup>3</sup>/s) de ingreso al embalse Sabinacocha (1965-2011). Fuente: Elaboración propia.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom
Prom	245.4	295.8	292.4	172.6	75.3	46.8	38.3	33.3	33.6	43.5	69.6	122.1	122.4
Des. Est	79.1	81.4	78.1	57.7	19.9	8.5	7.2	5.0	4.6	8.9	31.8	43.2	22.9
Max	498.5	493.9	441.9	311.0	115.9	79.7	65.3	53.8	47.2	74.5	169.6	213.3	174.8
Min	112.3	124.8	135.1	73.1	44.9	34.5	30.1	26.0	25.6	30.1	40.3	57.4	85.9

**Tabla 7:** Resumen estadístico serie de caudales medios mensuales naturales (m<sup>3</sup>/s) de cuenca intermedia entre Sabinacocha y Km-105 (1965-2011). Fuente: Elaboración propia.

**Resultados y discusión**

**Modelo de simulación de la operación de la central hidroeléctrica Machupicchu**

El modelo HEC-3, realiza la simulación de la operación de la 1ra y 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu con la siguiente información:

- a) El periodo de análisis 1965-2011 en base a series de caudales mensuales.
- b) Caudales mensuales naturales de ingreso al embalse Sabinacocha y los caudales mensuales naturales aportados por la cuenca intermedia entre Sabinacocha y la estación hidrométrica Km-105.
- c) La demanda de 30 m<sup>3</sup>/s de la 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (90 MW).
- d) Datos de evaporación total mensual en el embalse Sabinacocha.
- e) Las curvas Área-Altura-Volumen del embalse Sabinacocha.
- f) La demanda de 61 m<sup>3</sup>/s de la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW).
- g) Archivo de datos del modelo HEC-3 para la 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (90 MW).

- h) Archivo de datos del modelo HEC-3 para la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW).

**Resultados de la simulación de la 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (90 MW)**

- a) En la Tabla 8 se presenta los resultados del modelo HEC-3 de la simulación de la operación de la 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (90 MW), referente al número de veces a nivel mensual que el embalse Sabinacocha se encuentra lleno o vacío, en el período 1965-2011. Los resultados indican que la mayor parte del tiempo de este período el embalse Sabinacocha se encontrará lleno en un 99 % a 100 %, y no llegará a estar vacío en ningún mes del período de simulación, es decir 0 % - 1 %.
- b) Se cumple la meta de abastecer el caudal de diseño de la central hidroeléctrica Machupicchu de 30 m<sup>3</sup>/s en todo el período de simulación de 46 años (1965-2011), ver Tabla 9.
- c) En la Tabla 10 se presenta el resumen estadístico de la serie de generación de energía en el período de simulación (1965-2011) de la 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu, generando una energía total anual de 801.06 GWh.

	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
99-100 PCT	18	19	31	38	44	45	45	45	42	40	34	19
95-99 PCT	13	13	3	2	1	0	0	0	3	5	10	19
90-95 PCT	6	5	6	3	0	0	0	0	0	1	2	4
80-90 PCT	6	6	5	2	0	0	1	1	1	0	0	4
70-80 PCT	2	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
60-70 PCT	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
40-60 PCT	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
20-40 PCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1-20 PCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0-1 PCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 8:** Estado del embalse Sibinacocha a nivel mensual en porcentaje (1965-2011) 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (90 MW). Fuente: Elaboración propia.

Año	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
Prom	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Max	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Min	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

**Tabla 9:** Resumen estadístico de caudales mensuales utilizados ( $m^3/s$ ) 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (90 MW). Fuente: Elaboración propia.

Año	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
Prom	65.84	68.04	65.84	68.04	68.04	61.45	68.04	65.84	68.04	65.84	68.04	68.04	801.06
Max	65.84	68.04	65.84	68.04	68.04	61.45	68.04	65.84	68.04	65.84	68.04	68.04	801.06
Min	65.84	68.04	65.84	68.04	68.04	61.45	68.04	65.84	68.04	65.84	68.04	68.04	801.06

**Tabla 10:** Resumen estadístico de la serie de energía mensual (GWh) generada (1965-2011) 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (90 MW). Fuente: Elaboración propia.

### Resultados de la simulación de la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW)

a) En la Tabla 11 se presenta los resultados del modelo HEC-3 de la simulación de la 2da etapa de rehabilitación central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW), referente al número de veces a nivel mensual que el embalse Sibinacocha se encuentra lleno o vacío, en el periodo 1965-2011. Estos resultados indican que la mayor parte del periodo simulado el embalse Sibinacocha se encontrara 40% - 60% del volumen útil y totalmente vacío en un 0% - 1%.

b) Solo se lograra tener los  $61 m^3/s$  en el periodo de pre avenidas y avenidas (dic-may), y no pudiéndose cumplir en el resto de los meses del año, tal como se puede apreciar en la Tabla 12.

c) En la Tabla 13 se presenta el resumen estadístico de la serie de generación de energía de la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW), en el periodo de simulación (1965-2011). Los resultados muestran que en la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu esta producirá en promedio anual 1390 GWh.



	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
99-100 PCT	0	0	0	0	0	1	5	8	9	0	0	0
95-99 PCT	0	0	0	0	0	0	1	4	2	1	1	0
90-95 PCT	0	0	0	0	0	1	1	1	5	1	0	0
80-90 PCT	0	0	0	0	1	0	4	4	1	3	0	0
70-80 PCT	0	0	0	0	0	3	5	1	1	3	0	1
60-70 PCT	0	0	0	1	0	3	3	8	8	4	0	0
40-60 PCT	0	0	1	0	4	18	21	19	11	5	1	0
20-40 PCT	1	1	0	0	30	19	6	1	4	8	5	0
1-20 PCT	0	1	17	44	11	1	0	0	5	8	5	0
0-1 PCT	45	44	28	1	0	0	0	0	0	13	34	45

**Tabla 11:** Estado del embalse Sibinacocha a nivel mensual en porcentaje (1965-2011) 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW). Fuente: Elaboración propia.

Año	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
Prom	34.67	43.65	54.38	60.95	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	58.01	47.50	35.90	53.34
Max	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	60.08
Min	26.40	30.30	40.90	58.70	61.00	61.00	61.00	61.00	61.00	38.60	30.10	26.00	48.03

**Tabla 12:** Resumen estadístico de los caudales mensuales utilizados ( $m^3/s$ ) (1965-2011) 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW). Fuente: Elaboración propia.

Año	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Prom
Prom	80.2	101.5	118.1	133.9	133.9	120.9	133.9	129.6	133.9	120.9	102.9	84.9	1397.0
Max	129.6	133.9	129.6	133.9	133.9	120.9	133.9	129.6	133.9	129.6	133.9	132.9	1564.7
Min	57.9	68.8	89.8	133.2	133.9	120.9	133.9	129.6	133.9	84.8	68.4	59.1	1254.9

**Tabla 13:** Resumen estadístico de la serie de energía mensual (GWh) generada (1965-2011) 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW). Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

- La simulación de la operación de la 1ra etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (90 MW), indica que el caudal de diseño de la central de 30  $m^3/s$  es abastecido en un 100 % en el periodo simulado (1965-2011).
- La simulación de la operación de la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu (180 MW), muestran que el caudal de diseño de la central de 61  $m^3/s$  solo será abastecido en época avenidas en un 100 % del periodo simulados (1965-2011).
- De acuerdo a los resultados expuestos en el punto (b), será necesario buscar un afianzamiento hídrico para la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu para poder alcanzar el caudal de 61  $m^3/s$  en época de estiaje en el periodo 1965-2011.
- Por los resultados obtenidos en la presente investigación, se concluye que el modelo Reservoir System

Analysis For Conservation (HEC-3), es adecuado para ser utilizado en la gestión y planeamiento de los recursos hídricos de la cuenca del río Vilcanota.

- Recomendar a EGEMSA la implementación del proyecto del embalse Acco, cuyo volumen útil sería de 233 millones de metros cúbicos y estaría ubicado en la cuenca del río Salca, tributario por la margen derecha del río Vilcanota, cuyo objetivo será incrementar el caudal en época de estiaje a ser usado en la operación de la 2da etapa de rehabilitación de la central hidroeléctrica Machupicchu.

## Agradecimientos

El autor agradece al equipo de profesores que participaron y a los revisores de la Revista de Investigación de la Facultad de Ciencias Físicas de la UNMSM, quienes con sus aportes y correcciones contribuyeron a mejorar este artículo.

## Referencias

- [1] EGEMSA (1997). La cuenca del Vilcanota en el Sistema Amazónico. Cuzco.
- [2] EGEMSA (2012). Naturalización de la Información Hidrológica de la Cuenca del Río Vilcanota 2011. Cuzco.
- [3] Hydrologic Engineering Center of US Army Corps of Engineers (1978). Reservoir System Analysis For Conservation (HEC-3). [https://books.google.com.pe/books/about/HEC\\_3\\_Reservoir\\_System\\_Analysis\\_for\\_Conservation.html?id=qSEjvgAACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.pe/books/about/HEC_3_Reservoir_System_Analysis_for_Conservation.html?id=qSEjvgAACAAJ&redir_esc=y)
- [4] MEM (2009). Plan Referencial de Electricidad 2008–2017. Lima
- [5] OSINERMIN (2012). Estudio Técnico Económico de determinación de Precios de Potencia y Energía para la Fijación Tarifaria de Mayo 2012 - Abril 2013. Lima.
- [6] S&Z Consultores Asociados (1997). Estudio de análisis y Corrección de información de los Registros de Caudales del Río Vilcanota de los años 1958 a 1996. Lima.