La geografía y la topografía asociada de la cuenca alta del rio Sandia, permite formular oportunidades de aprovechamientos hidroeléctricos, sin regulación, para ampliar las capacidades del sistema interconectado nacional, bajo el modo de generación distribuida; no obstante, al ser una cuenca atendida eléctricamente en su totalidad.

El régimen de caudales extremos en periodos de avenidas y sequias, se establece la operación con factores de planta bajos, que son considerados, para controlar el sobredimensionamiento y optimizar una inversión futura. Se concluye demostrando la viabilidad técnica de la propuesta, que requerirá una posterior evaluación del sistema eléctrico y seguidamente la evaluación económica-financiera, para dar viabilidad completa con propósitos de inversión.

https://doc.uni75paime.org/03_APROVECHAMIENTOS_HIDROELECTRICOS_RIOSANDIA_V7.pdf

IDENTIFICACION DE APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRICOS EN CUENCA DEL RIO SANDIA

Ing. Pablo Salazar Cossio
Servicios Omega 4.0

Citar: J. PAIME, **2024**, 1, 12-25
20 de julio de 2024

RESUMEN

La geografía y la topografía asociada de la cuenca alta del rio Sandia, permite formular oportunidades de aprovechamientos hidroeléctricos, sin regulación, para ampliar las capacidades del sistema interconectado nacional, bajo el modo de generación distribuida; no obstante, al ser una cuenca atendida eléctricamente en su totalidad. El régimen de caudales extremos en periodos de avenidas y sequias, se establece la operación con factores de planta bajos, que son considerados, para controlar el sobredimensionamiento y optimizar una inversión futura. Se concluye demostrando la viabilidad técnica de la propuesta, que requerirá una posterior evaluación del sistema eléctrico y seguidamente la evaluación económica-financiera, para dar viabilidad completa con propósitos de inversión.

ABSTRACT

The geography and associated topography of the upper basin of the Sandia River allows the formulation of opportunities for hydroelectric exploitation, without regulation, to expand the capacities of the national interconnected system, under the mode of distributed generation; despite being a basin served electrically in its entirety. The regime of extreme flows in periods of floods and droughts, establishes operation with low plant factors, which are considered, to control oversizing and optimize future investment. It concludes by demonstrating the technical feasibility of the proposal, which will require a subsequent evaluation of the electrical system and then the economic-financial evaluation, to give complete viability, for investment purposes.

Condiciones Generales

Las características geográficas, de la quebrada alta del rio Sandia, otorgan facilidades para generación hidroeléctricas con mini centrales en cascada. Este río nace en los 4,500 msnm en Centro Poblado de Sallaco y termina en el ingreso a la ciudad de Sandia, ubicada a 2,200 msnm, y discurre a lo largo de 28 km de quebrada. El presente, es un Articulo académico, que busca establecer una ruta de trabajo, para el mejor aprovechamiento de los recursos naturales, como parte del uso de energía renovables, en las metas de des carbonización comprometida por el país, con herramientas de generación distribuida, para mejor eficiencia de la operación del sistema eléctrico y mayor confiabilidad de la operación.

Las lagunas existentes en la cordillera de la provincia de Sandia forman parte de la cuenca del lago Titicaca, no aprovechables para nuestros propósitos, por la necesidad de proteger el Lago Titicaca. En las siguientes imágenes, se muestra esa zona del Estudio y con la marca del “Divortium Aquarum”.

El total del suministro eléctrico a la provincia de Sandia, concordante con la cuenca hidrográfica del Rio Sandia; es atendida desde el Sistema Interconectado; por lo cual, lo planteado en el presente artículo, busca incrementar el aporte de energía electica, al sistema, en modo de generación distribuida, con las ventajas de calidad y confiabilidad del servicio, como de optimización de perdidas técnicas en la transmisión y distribución.

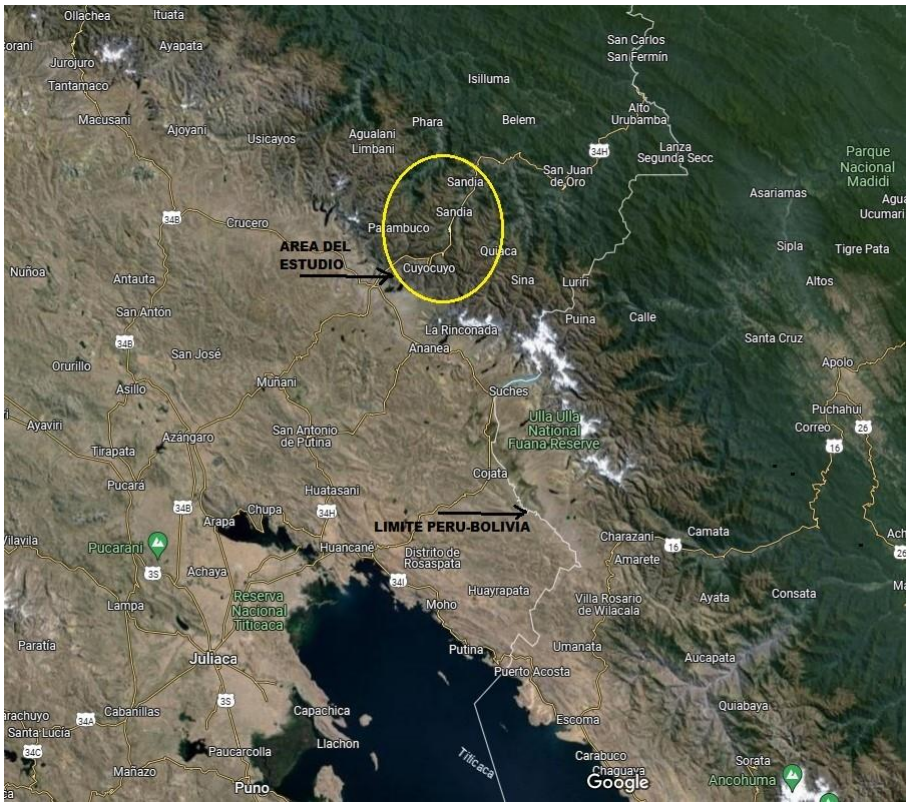

Imagen 1 – Ubicación del Área de Estudio

Ubicación del área del estudio, dentro del departamento de Puno, en límites con Bolivia, en la cordillera oriental de los andes peruanos.

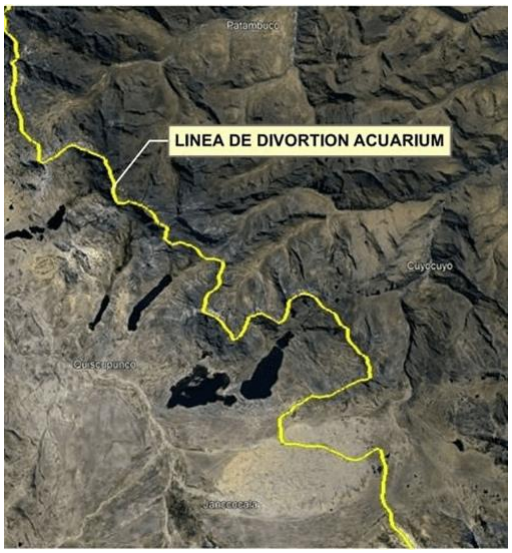

Imagen 2 – Demarcación de la Divisoria de Aguas en la parte Alta de la Cuenca del rio Sandia

Línea Divisoria de Aguas, entre Cuenca del Lago Titicaca (lado izquierdo) y la Cuenca del Rio Sandia (lado derecho), sobre la cordillera oriental de los andes peruanos.

La quebrada alta de Sandia, evaluada en el presente Artículo; comprende los tres ríos: Punalaqueque, Cuyocuyo y Ñacoreque; que conforman el rio Sandia.

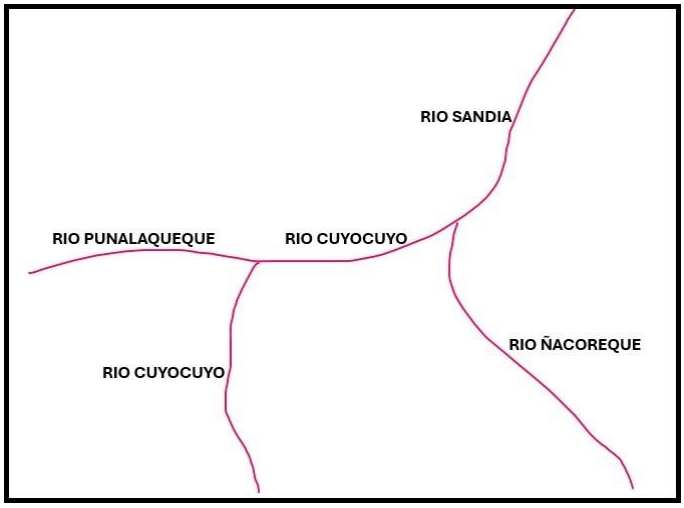

Imagen 3 - Ríos en Cuenca Alta de rio Sandia

Se muestra los ríos principales afluentes del rio Sandia, de los cuales se tomarán las aguas, para los Aprovechamientos Hidroeléctricos, materia del Articulo.

Recurso Hídrico

El régimen de caudales registrado en los cinco últimos años es atípico; con caudales externos en Avenidas y Sequia. Los registros históricos de la Mini central de Electro Puno, que utiliza el rio Sandia, ubicada a 4 km del ingreso a la ciudad de Sandia, a 2,350 msnm; tiene bajos Factores de Planta Promedio Anual, como se muestra.

REGISTRO PROMEDIO CAUDALES DE MINICENTRAL DE SHIJISIA (ELECTROPUNO) UTILIZADOS					
Caudal en M3/s y Factor de Planta / por año	2019	2020	2021	2022	2023
Q medio anual utilizado	1.140	1.111	0.845	0.934	0.848
Q medio fuera de Avenidas Utilizados	0.564	0.491	0.451	0.461	0.296
Caudal Maximo Anual Utilizado	1.934	1.904	1.739	1.774	1.885

Tabla 1 – Caudales Promedio y Factores de Planta

Los cálculos son en base a la información de generación de día a día, de los cinco últimos años, de la mini central hidroeléctrica Shijisia. Se muestran resultados en los cinco últimos años.

El autor del presente artículo, postula como premisa, la utilización de la data de caudales utilizados diariamente por Electro Puno, en la operación de su mini central hidroeléctrica de Shijisia; prevaleciéndola como basamento para el pronóstico de caudales disponibles “aguas arriba”, frente a métodos de regresiones de 50 años o más. El autor considera que, siendo mini centrales menores a 1 MW, y siendo evidente en la zona los efectos del cambio climático, con desglaciación de los nevados en la zona alta de

la cuenca del rio Sandia y áreas conexas en la cuenca del Lago Titicaca; no resulta útil tomar información de regresiones a más de 50 o más años, por lo cual se ha tomado información de los últimos cinco años.

Identificación Geográfica Referencial de Aprovechamientos

Las características de la topografía de su geografía, con un trabajo acucioso para la identificación, nos permite la ubicación de mini centrales hidroeléctricas, a lo largo de los 28 km de la quebrada alta de Sandia. La parametrización de las mini centrales propuestas, se formulan, luego del análisis de caudales.

Un detallado conocimiento de la zona y acucioso trabajo, en el Google Earth y ArcGis, permiten, determinar ubicaciones de los aprovechamientos propuestos. Tienen el soporte de verificaciones geológicas superficiales, La Ingeniería definitiva deberá asegurar superar las condiciones geológicas reales. El conocimiento de la geografía y la socialización de este objetivo, se concluye en las siguientes ubicaciones de las siguientes figuras.

En cada figura, mostrada más adelante, se indica las coordenadas Universal Transverse Mercator (UTM), en metros y georreferenciadas; de cada unidad principal, como; Bocatoma (BT), Cámara de Carga (CC), y Casa de Maquinas (CM).

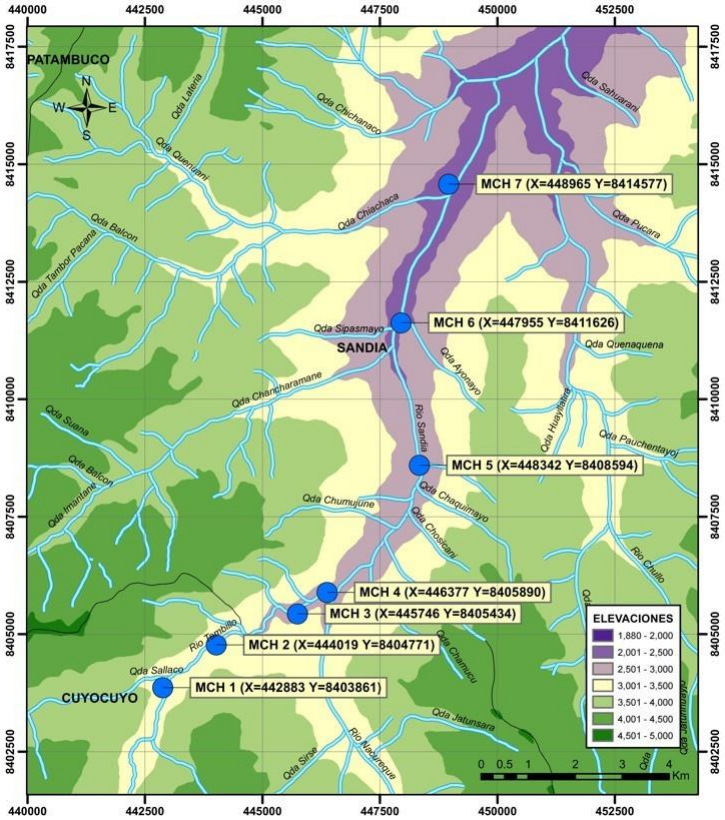

Imagen 4 - Ubicación de Mini centrales Hidroeléctricas

Ubicación de los Aprovechamientos Hidroeléctricos Propuestos (5) y Existentes (2); en la cuenca alta del Rio Sandia, en coordenadas UTL(m). La comunicación conectada a la fibra óptica de la red dorsal nacional, que corre a todo lo largo de la quebrada, permite realizar un Control y Operación Automatizada desde un Centro de Control y Mando en ciudad de Sandia. Las ubicaciones mostradas son las de las Casas de Maquinas, de cada mini central propuesta.

Las Mini centrales Hidroeléctricas en actual operación, que denominamos como MCH2, de la Municipalidad de Cuyocuyo y la MCH6, de Electro Puno; son de una Potencia Instalada Nominales de 1x250 kW y 3x1,000 kW, respectivamente. Operan con un Factor de Carga Promedio Anual, menor a 0.450, en el primer caso por falta de caudal; y en el segundo caso por operar en forma aislada del Sistema Interconectado.

Primera hidroeléctrica MCH1

La **primera hidroeléctrica la denominamos MCH1**; tendría una bocatoma en el rio Punalaqueque, para llevarla por un canal de 4,436 metros, hasta la cámara de carga, desde donde se establece una tubería forzada, hacia la casa de máquinas. El canal de aducción va paralelo a la carretera.

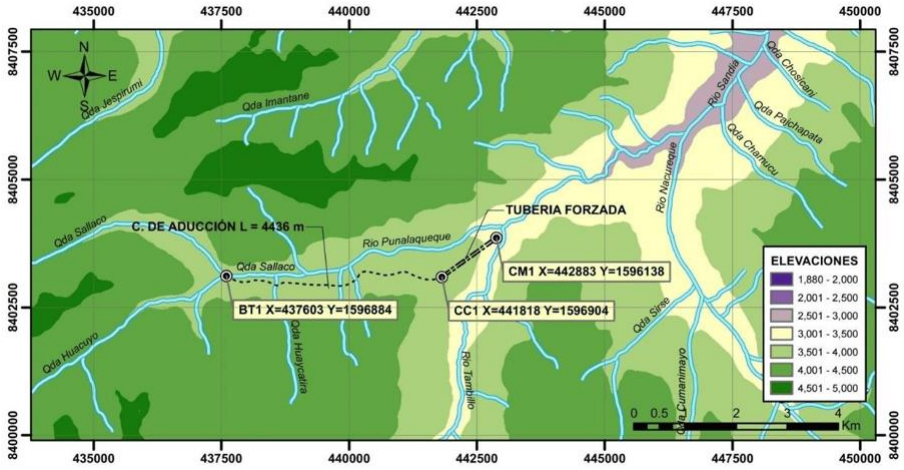

Imagen 5 - Mini central Hidroeléctrica MCH1, con precisión georreferenciada de: bocatoma (BT1), canal de aducción, cámara de carga (CC1), tubería forzada y casa de máquinas (CM1)

La ubicación de la infraestructura propuesta, en coordenadas UTM(m) y se sustenta en el conocimiento de la zona y de la topografía obtenida del Google Earth a través del ArcGIS. Se utilizan aguas del rio Punalaqueque.

Segunda hidroeléctrica existente MCH2

La **segunda hidroeléctrica, es existente y la denominamos MCH2**; tiene una bocatoma en el rio Cuyocuyo, inmediatamente después de la confluencia con rio Punalaqueque, para llevarla por un canal de 1,148 m, hasta la cámara de carga, desde donde se establece una tubería forzada, hacia la casa de máquinas. Actualmente, opera la Mini central de Lurini, propiedad de la Municipalidad de Cuyocuyo.

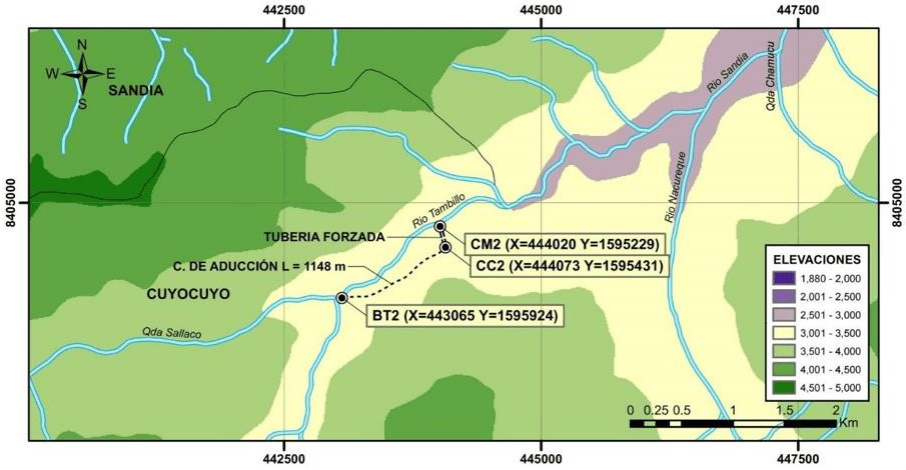

Imagen 6 - Mini central Hidroeléctrica MCH2, con precisión georreferenciada de: bocatoma (BT2), canal de aducción, cámara de carga (CC2), tubería forzada y casa de máquinas (CM2)

La ubicación de la infraestructura existente, en coordenadas UTM(m) y se sustenta en el conocimiento de la zona y de la topografía obtenida del Google Earth a través del ArcGIS. Esta operada por la Municipalidad de Cuyocuyo, tomándose aguas del rio Cuyocuyo, luego del aporte del rio Punalaqueque.

Tercera hidroeléctrica MCH3

La **tercera hidroeléctrica la denominamos MCH3**, tomaría las aguas turbinadas y tendría una bocatoma en el rio Cuyocuyo, para llevarla por un canal de 1,942 m, hasta la cámara de carga, desde donde se establece una tubería forzada, hacia la Casa de Maquinas.

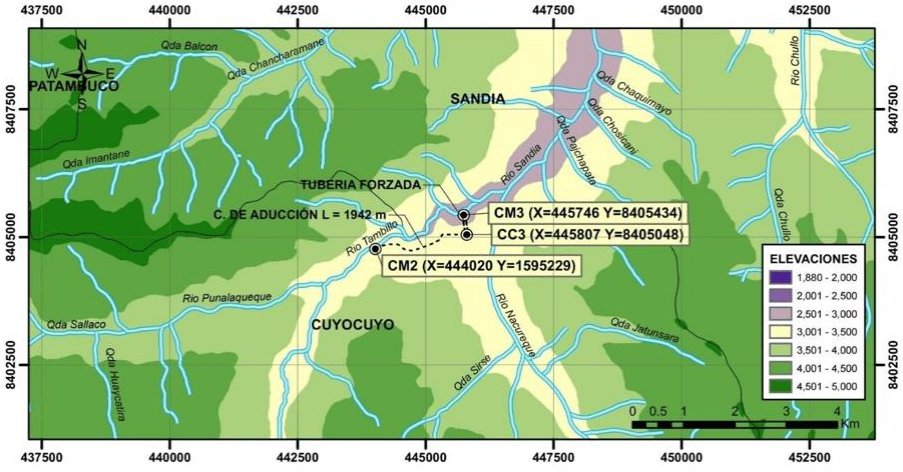

Imagen 7 - Mini central Hidroeléctrica MCH3, con precisión georreferenciada de: toma de aguas turbinadas de MCH 2 (CM 2), canal de aducción, cámara de carga (CC3), tubería forzada y casa de máquinas (CM 3)

La ubicación de la infraestructura propuesta, en coordenadas UTM(m) y se sustenta en el conocimiento de la zona y de la topografía obtenida del Google Earth a través del ArcGIS. Se toma aguas turbinadas de la MCH 2, iniciándose el canal de aducción.

Cuarta hidroeléctrica MCH4

La **cuarta hidroeléctrica la denominamos MCH4**, tendría una bocatoma en el rio Ñacoreque, inmediatamente antes del puente sobre rio Ñacoreque, para llevarla por un canal de 2,327 m, hasta la cámara de carga, desde donde se establece una tubería forzada, hacia la Casa de Maquinas.

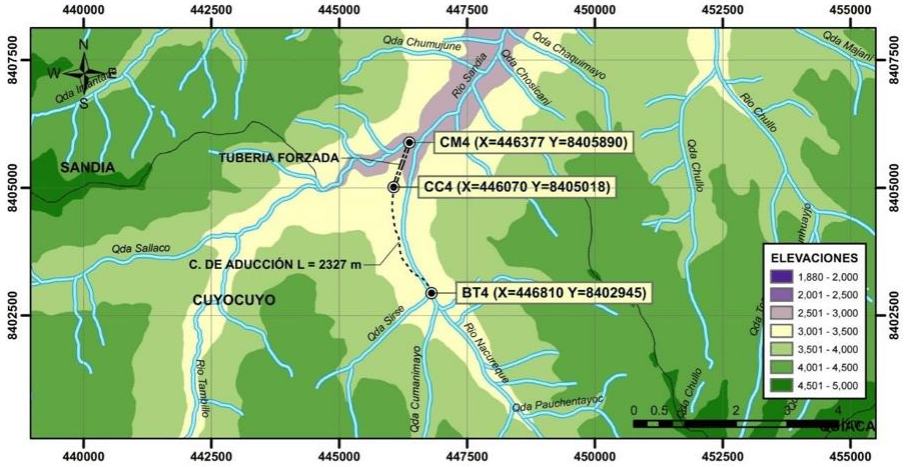

Imagen 8 - Mini central Hidroeléctrica MCH4, con precisión georreferenciada de: bocatoma (BT4), canal de aducción, cámara de carga (CC4), tubería forzada y casa de máquinas (CM4)

La ubicación de la infraestructura propuesta, en coordenadas UTM(m) y se sustenta en el conocimiento de la zona y de la topografía obtenida del Google Earth a través del ArcGIS. Se toman aguas del rio Ñacoreque.

Quinta hidroeléctrica MCH5

La **quinta hidroeléctrica la denominamos MCH5**, tendría una bocatoma en el rio Sandia, inmediatamente después de la confluencia de los ríos Cuyocuyo y Ñacoreque, para llevarla por un canal de 3,410 m, hasta la cámara de carga, desde donde se establece una tubería forzada, hacia la Casa de Maquinas.

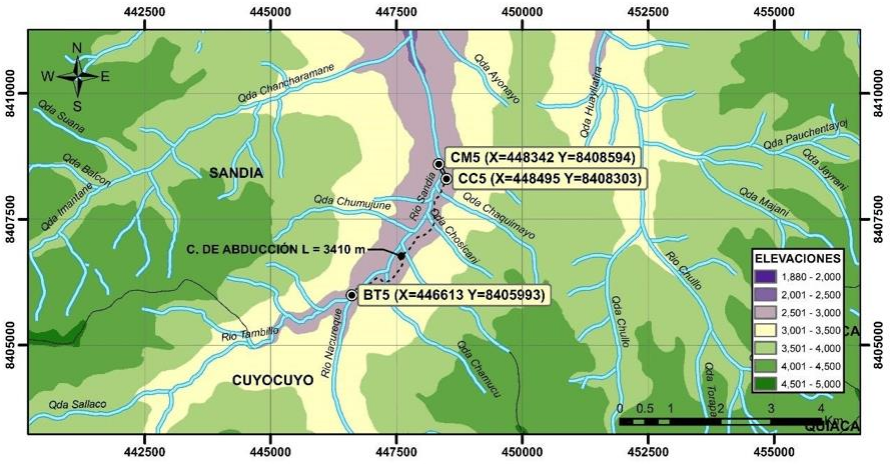

Imagen 9 - Mini central Hidroeléctrica MCH5, con precisión georreferenciada de: bocatoma (BT5), canal de aducción, cámara de carga (CC5), tubería forzada y casa de máquinas (CM5)

La ubicación de la infraestructura propuesta, en coordenadas UTM(m) y se sustenta en el conocimiento de la zona y de la topografía obtenida del Google Earth a través del ArcGIS. Toma aguas del rio Sandia, resultado de la confluencia del rio Cuyocuyo y el rio Ñacoreque, inmediatamente después de la unión de ambos.

Sexta hidroeléctrica existente MCH6

La **sexta hidroeléctrica la denominamos MCH6**, tiene una bocatoma en el rio Sandia, inmediatamente aguas abajo de la descarga de la mini central MCH5, para llevarla por canal de 1,959 m, hasta la cámara de carga, desde donde se establece una tubería forzada, hacia la Casa de Maquinas. Actualmente, opera la Mini central de Shijihia, propiedad de Electro Puno, en las mismas posiciones que la denominada MCH6. De manera que este Artículo, solo la menciona como referencia.

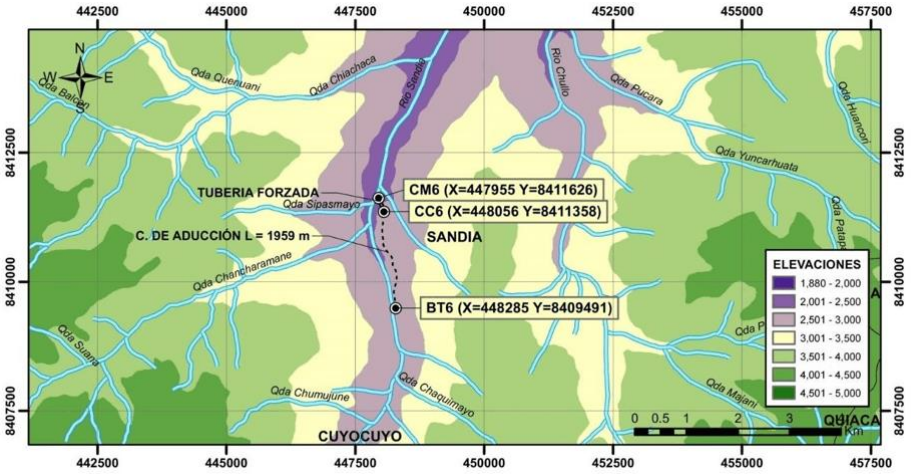

Imagen 10 - Mini central Hidroeléctrica MCH6, con precisión georreferenciada de: bocatoma (BT6), canal de aducción, chimenea de equilibrio (CC6), tubería forzada doble y casa de máquinas (CM 6)

La ubicación de la infraestructura existente, se sustenta en el conocimiento de la zona y de la topografía obtenida del Google Earth a través del ArcGIS. Esta operada por Electro Puno, tomándose aguas del rio Sandia, con una aducción con túnel, chimenea de equilibrio y dos tuberías forzadas, concluyendo en un pantalón de distribución.

Séptima hidroeléctrica MCH7

La **séptima hidroeléctrica la denominamos MCH7**, en coordenadas UTM(m) y tendría una bocatoma en el rio Sandia, aguas debajo de la descarga de la MCH6, para llevarla por un canal de 1,402 m en el lado izquierdo de la quebrada, hasta la cámara de carga, desde donde se establece una tubería forzada, hacia la Casa de Maquinas.

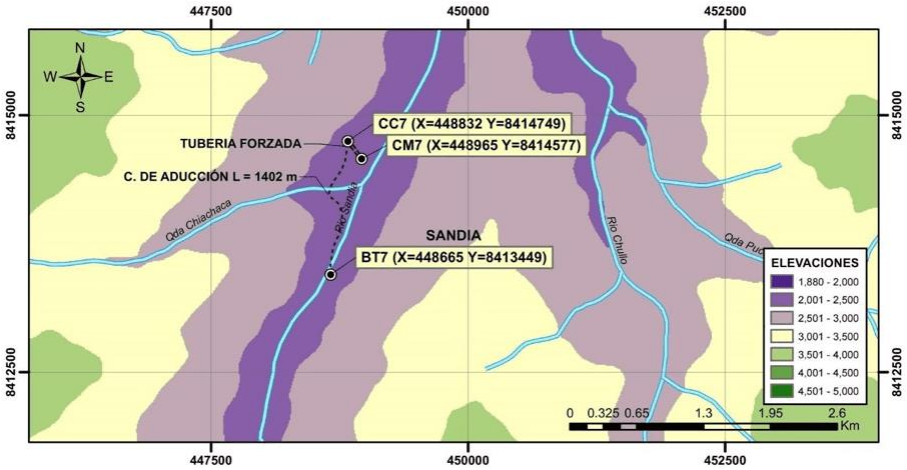

Imagen 11 - Mini central Hidroeléctrica MCH7, con precisión georreferenciada de: bocatoma (BT7), canal de aducción, chimenea de equilibrio (CC7), tubería forzada doble y casa de máquinas (CM 7)

La ubicación de la infraestructura propuesta, en coordenadas UTM(m) y se sustenta en el conocimiento de la zona y de la topografía obtenida del Google Earth a través del ArcGIS. Esta operada por Electro Puno, tomándose aguas del rio Sandia, con una aducción con túnel, chimenea de equilibrio y dos tuberías forzadas, concluyendo en un pantalón de distribución.

Evaluación de Caudales Disponibles

La determinación de ubicación de los aprovechamientos para la generación hidroeléctrica es independiente de los caudales. La determinación de los caudales disponibles será evaluada para determinar y definir los tamaños de la infraestructura, y pasar a la evaluación económica financiera.

Una primera observación, de la data histórica de la Mini central de Shijisia, que opera la Concesionaria Electro Puno, es la identificación de años "secos", con siete meses de sequía; aunque tampoco es mucha la diferencia con los años húmedos, en términos de promedios anuales.

REGISTRO PROMEDIO CAUDALES DE MINICENTRAL DE SHIJISIA (ELECTROPUNO) UTILIZADOS					
Caudal en M3/s y Factor de Planta / por año	2019	2020	2021	2022	2023
Ene	1.165	1.494	1.739	1.109	1.184
Feb	1.560	1.529	1.658	1.774	1.819
Mar	1.919	1.886	1.191	1.630	1.885
Abr	1.934	1.904	1.203	1.754	1.851
May	1.900	1.546	1.189	1.713	1.370
Jun	1.165	1.403	0.652	0.952	0.721
Jul	0.569	0.824	0.523	0.549	0.362
Ago	0.418	0.463	0.346	0.355	0.179
Set	0.589	0.375	0.273	0.255	0.085
Oct	0.596	0.398	0.299	0.255	0.093
Nov	0.647	0.397	0.230	0.236	0.119
Dic	1.220	1.109	0.831	0.625	0.510
Q medio anual utilizado	1.140	1.111	0.845	0.934	0.848
Q medio fuera de Avenida RIO SANDIA	0.564	**0.491**	0.451	0.461	0.296
Caudal Maximo Anual Utilizado	1.934	1.904	1.739	1.774	1.885

Tabla 2 - Caudales Promedio Mensual Utilizados, en la Mini central Hidroeléctrica de Shijisia, de Electro Puno, con fuente de su Registro de Caudales.

Los valores promedios mensuales, son obtenidos de los valores promedios diarios registrado por el Operador, sobre el cual se han depurado algunos días, con paralizaciones de contingencias varias, de manera de obtener valores de caudal promedio representativos. Lo remarcado en amarillo y blanco, son registros de caudales utilizados en periodos de avenidas. Lo marcado en celeste, son caudales en periodo de Estiaje. La última fila, es el valor de caudal máximo anual de promedio mensual.

Se accedió a la información oficial de las Estaciones del Sistema Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI; (1) Muñani, (2) Ananea, (3) Crucero, (4) Putina y (5) Cuyocuyo. Con el tratamiento de esa Data, se obtuvieron los siguientes caudales máximos de diseño:

AÑO	2021	2022	2023
Q medio fuera de Avenida RIO SANDIA	0.451	0.461	0.296
RIO	Punala-queque (1)	Cuyocuyo (2)	Ñacoreque (3)
Factor de Correlacion	21.5000	24.1000	31.5000
Caudal Q medio fuera de Avenidas (Q m3/s) Prom. 2021-2022-2023	**0.243**	**0.272**	**0.355**

Tabla 3 - Caudales Máximo para Diseño, del Estudio Hidrológico de Pro Vías Nacional en su Proyecto de Carretera Ananea-Sandia. Resultados aproximados, obtenidos con el tratamiento de la Data de las

cinco Estaciones de SENAMHI, de mediciones de precipitaciones en la zona, con una regresión de cinco años, por ser más realistas y conservadores.

Se recomienda la confirmación posterior, con los resultados de Estudios de Hidrología, desarrollado por Provias Nacional, en su proyecto: Mejoramiento de la Carretera Dv. Ananea-Cuyocuyo-Sandia, en 2023, aun no oficiales; y que identifican caudales máximos de diseño, útiles para extrapolar desde los caudales tomados de la Data de MCH Shijisia, para los caudales de los ríos: Punalaqueque, Cuyocuyo y Ñacoreque. Esta información será útil, para corroborar los factores de correlación e inferir los caudales aguas arriba de la Mini central de Shijisia.

Para la determinación de los caudales que recomendamos; adoptamos el criterio de tomar los caudales promedio secos, de los tres últimos años, para una operación con los mismos factores de planta, de la Mini central de Shijisia; con implicancias en un equipamiento por etapas.

Para esta correlación con los caudales de los ríos "aguas arriba" de la MCH Shijisia, utilizamos el caudal medio fuera de avenidas de la Tabla 1**,** de los años secos: 2021, 2022 y 2023, en periodo "fuera de avenidas", con los resultados de caudales en los ríos afluentes, mostrados en la primera fila, de la Tabla 4.

Con información de cotas, obtenidas del Google Earth, determinamos las alturas netas aprovechables en cada caso de las mini centrales hidráulicas, concluyendo en potencias técnicas en kW por cada una de ellas.

AÑO	2021	2022	2023
Caudal Q medio fuera de Avenidas (Q m3/s) Prom. 2021-2022-2023	0.243	0.272	0.355
MCH	Q (m3/s)	H (m)	P (kw)
MCH1 (+1)	0.243	450	819
MCH2 (+2)	0.272	120	245
MCH3 (1+2)	0.515	250	965
MCH4 (+3)	0.355	350	933
MCH5 (1+2+3)	0.870	196	1279
MCH7 (1+2+3)	0.870	129	842

Tabla 4 - Determinación de Caudales y Potencia de las MCH Proyectadas

Las alturas netas (H) son obtenidas del Google Earth, en las posiciones georreferenciadas, de las cámaras de carga y casa de máquinas. La potencia (P) calculada con P=7.5*Q*H, en kW y consideran eficiencia de 0.85 y 0.90 de turbina y generador respectivamente. La Tabla no incluye la MCH 6 de Electro Puno, que están en operación comercial. En cada mini central, se asigna los caudales de los ríos afluentes (1), (2) y (3); según su posición geográfica.

Dimensión de los Equipamientos

La definición de las potencias nominales instaladas, de las mini centrales hidroeléctricas proyectadas, las especificamos con tres grupos hidroeléctricos iguales, para alcanzar mayor confiabilidad de operación, y flexibilizar un equipamiento por etapas, con factores de planta similares a la mini central hidroeléctrica de Shijisia:

MCH	Potencia Tecnica Unitaria Turbina (kW)	Potencia Turbinas (kW)	Potencia Tecnica Unitaria Generador (KVA)	Potencias Generador (KVA)
MCH1 (+1)	273	3x280	287	3x300
MCH2 (+2)	245	1x245	258	1x260
MCH3 (1+2)	322	3x320	339	3x350
MCH4 (+3)	311	3x320	327	3x350
MCH5 (1+2+3)	426	3x425	449	3x450
MCH7 (1+2+3)	281	3x280	295	3x300

Tabla 5 - Potencias de las Mini centrales Proyectadas

La asignación de potencias nominales en KVA, están asociadas a las indicadas en la Tabla 4, y consideran una eficiencia de los generadores de un 90%.

Tres Grupos iguales, en paralelo, con equipamiento completo, incluye Válvula de Cierre, Turbina, Generador, Tablero de Control, Comunicaciones y Protección; conectados a la red dorsal nacional de Fibra Óptica, para conectar a un Centro de Control en la ciudad de Sandia.

En términos medios, sería una Inversión de Capital de $ 15,360,000.00, con tecnología de control y operación remota, y con índices de: $ 3,000.00 por kW de capacitad técnica.

Pronóstico de Generación Técnica

La mini central hidroeléctrica de Shijisia, tiene una producción de energía anual de: 11,870 Mwh, con una capacidad efectiva de: 3,500 kW de generación promedio de energía en los mismos años secos utilizados para el planteamiento de los equipamientos propuestos.

La configuración del sistema planteado pertenece a una misma cuenca geográfica, muy próxima entre ellas, de manera que inferimos el mismo factor de planta para cada una de las mini centrales. El conjunto de las nuevas mini centrales, tendrían una capacidad efectiva de: 5,120 kW, colocadas al sistema interconectado; entregando una energía total de: 17,360 Mwh.

El valor al 30 de junio 2024, de la energía técnica que entregarían en barras de 22,9 kV de la Sub Estación Ananea es de S/. 0.33 por Kwh. De manera que el valor económico de esta generación aportante, seria de: S/. 5,728,800.00 anuales promedios en un año seco medio y es equivalente a: $ 1,507,600.00

Conclusiones

1.- Se sustenta la viabilidad técnica de la generación hidroeléctrica distribuida; así mismo se muestra las condiciones de inicio para los estudios económico-financieros.

2.- De otro lado, se formulan las Potencias de forma conservadora con los datos de los últimos periodos de años secos: 2020-2021-2023. Sin embargo, con mejores caudales, los factores de planta serán mayores y por tanto mayor la energía entregada a la red. Esta sensibilidad positiva, debe considerarse en la evaluación económica-financiera.

Reconocimiento

El Ing. Carlo Yana Apaza, de la Universidad del Altiplano, colaboro en la formulación de las gráficas.

Referencias

• Registros de Generación Diaria en la Mini central Hidroeléctrica de Shijisia, operada Electro Puno SA, de los últimos cinco años.

• Registro de Estaciones Meteorológicas del SHENAMI, en la zona conexa al área del Estudio (Muñani, Ananea, Putina, Cuyocuyo, Crucero)

• Información de Google Earth, utilizando el ArcGis