

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**ESTUDIO DE DESARROLLO DE UN PROYECTO DE
GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA**

Tesis para optar el Título de **INGENIERO CIVIL**, que presentan los bachilleres:

ASTOCAZA GUZMÁN, HÉCTOR ABEL

ALBÚJAR ARRIOLA, DEYVIS CALEP

ASESOR: GARCIA NARANJO BUSTOS, MANUEL ENRIQUE

Lima, febrero de 2019

RESUMEN

El ingreso del Perú a mercados internacionales dinamizó la economía de servicios y productos, tal como lo refleja el incremento del PBI en 86% entre 2003 y 2013; en consecuencia, el consumo de recursos energéticos aumentó en 92% para electricidad [Plan Energético Nacional 2014 - 2025].

Un proyecto de inversión en generación eléctrica tiene por finalidad suministrar energía; esto involucra la planificación integral de aspectos administrativos y técnicos con la finalidad de obtener la concesión definitiva del proyecto. La parte administrativa se tramita ante entidades oficiales; los requerimientos técnicos se reúnen en los términos de referencia de un Estudio de Factibilidad.

En ese sentido, la Tesis se orientó al desarrollo de un Estudio de Prefactibilidad de un proyecto de pequeña central hidroeléctrica (PCH) en la Región Pasco, a fin de promover la inversión en proyectos de generación hidroeléctrica.

El aprovechamiento comprende los recursos hídricos de la microcuenca Quebrada Raymondi, afluente de la subcuenca del Río Paucartambo por la margen derecha; se abordó los siguientes capítulos:

En el **Primer Capítulo**, Generalidades, se presentó la justificación del estudio, y los objetivos de la Tesis.

En el **Segundo Capítulo**, Fundamentos de Generación Hidroeléctrica, se expuso las bases teóricas de la generación hidráulica de una PCH, y su relación con estudios básicos del área del Proyecto.

En el **Tercer Capítulo**, Zona de Estudio, se delimitó la ubicación geográfica del recurso hídrico en aprovechamiento, y las vías de acceso desde la Capital. El Proyecto se ubica en el distrito y provincia de Oxapampa; el acceso se realiza por vía terrestre, aproximadamente a 280 km de Lima.

En el **Cuarto Capítulo**, Estudio de Mercado Eléctrico, se identificó la producción de energía nacional en relación con la energía requerida por fuente no convencional, y se hizo una proyección de la energía requerida y de la tarifa eléctrica para el proyecto. Se proyectó que la energía requerida para una quinta Subasta RER sería 456.6 GW-h, a 45.5 US\$/MW-h como tarifa de venta de energía para centrales mini hidráulicas.

En el **Quinto Capítulo**, Evaluación de Geología, permitió identificar que la margen izquierda posee las condiciones geotécnicas suficientes para emplazar la central (no Karst, cavernas de disolución).

En el **Sexto Capítulo**, Evaluación de Hidrología, se calculó la disponibilidad hídrica superficial de la Quebrada Raymondi en la sección de captación del Proyecto. La precipitación total multianual es 1,781 mm; el caudal medio multianual es 5.6 m³/s,

En el **Séptimo Capítulo**, Potencial Hidroeléctrico, se estableció el caudal instalado en la PCH, y se calculó la producción de energía y el factor de planta del Proyecto. El caudal de diseño es 2.7 m³/s y un mínimo de 0.25 m³/s, con 10.7 MW de potencia instalada y 82.0 GW-h/año.

En el **Octavo Capítulo**, Estudio de Alternativas, se realizó una evaluación técnico-económica de esquemas hidráulicos de las obras civiles del proyecto. El estudio de reveló que el mejor esquema es la Alternativa A-1, por tener el costo de oportunidad más bajo para producir energía eléctrica, con 116.8 US\$/MW-h.

En el **Noveno Capítulo**, Ingeniería Básica, se efectuó el diseño de ingeniería hidráulica de las componentes civiles del Proyecto. El arreglo comprende obras de captación en superficie, bocatoma alpina de 2.7 m³/s y una nave de desarenación de 22.0 m de longitud; obras de conducción a pelo libre de 3,135 m de longitud, y salto neto aprovechable de 432.3 m; y obras de generación, por una turbina Pelton y canal de restitución.

En el **Décimo Capítulo**, Evaluación Socio-Ambiental, se identificó el área de influencia y el medio físico, biológico y económico del Proyecto. El área de influencia directa es de 77.4 Ha; dada la modalidad de aprovechamiento central *run-of-river* y la capacidad de la central (10.7 MW), se expedirá la certificación ambiental para la categoría I.

En el **Décimo Primer Capítulo**, Presupuesto, se estimó los costos de inversión (capex) para la concesión definitiva y puesta en marcha del Proyecto. El costo del Proyecto asciende a 17.2 millones US\$, equivalente a un ratio de inversión de 1.9 millones US\$/MW instalado.

En el **Décimo Segundo Capítulo**, Análisis Económico y Financiero, se evaluó la rentabilidad económica de invertir en el Proyecto, tanto con capital propio como con apalancamiento de una entidad bancaria. La evaluación comprobó que con capitales propios el Proyecto sería una inversión atractiva, ya que alcanzaría un VAN de 3,520,886 US\$ y TIR de 18.3%; en caso de apalancarlo con endeudamiento bancario, mejoraría las ganancias con un VAN de 8.823.439 US\$ y TIR de 24.8%.

En el **Décimo Tercer Capítulo**, Conclusiones y Recomendaciones, se reflexionó sobre los objetivos logrados en el desarrollo de la Tesis, y las recomendaciones pertinentes para futuros estudios del Proyecto.

Palabras Clave: Potencial Hidroeléctrico, Ingeniería, Rentabilidad del Proyecto.

Dedicatoria de Héctor

A Dios y a mis padres Yolanda y Héctor, que me formaron con su ejemplo y amor.



Dedicatoria de Deyvis

A Dios, a la Virgen y a todos los que ayudaron en el desarrollo del presente proyecto.



TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

| | |
|--|----|
| RESUMEN | i |
| TABLA DE CONTENIDOS | 1 |
| 1. GENERALIDADES | 9 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN | 10 |
| 1.3 ANTECEDENTES | 10 |
| 1.4 OBJETIVOS | 11 |
| 1.4.1 Principal | 11 |
| 1.4.2 Específicos | 11 |
| 1.5 ALCANCES | 11 |
| 1.6 METODOLOGÍA | 11 |
| 2. FUNDAMENTOS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA | 12 |
| 2.1 LA ELECTRICIDAD EN PERÚ..... | 12 |
| 2.2 GENERACIÓN HIDRÁULICA..... | 12 |
| 2.2.1 Centrales de agua fluyente | 13 |
| 2.2.2 Centrales con embalses de regulación..... | 13 |
| 2.2.3 Centrales de almacenamiento por bombeo | 13 |
| 2.3 MERCADO ELÉCTRICO..... | 14 |
| 2.4 ESTUDIOS BÁSICOS | 14 |
| 2.4.1 Estudio de Geología..... | 14 |
| 2.4.2 Estudio de Hidrología | 14 |
| 2.5 POTENCIAL HIDROELÉCTRICO..... | 15 |
| 2.5.1 Caudal de Diseño | 16 |
| 2.5.2 Modelo de Generación | 17 |
| 2.6 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS..... | 17 |
| 2.7 INGENIERÍA CONCEPTUAL | 17 |
| 2.7.1 Bocatoma | 18 |
| 2.7.2 Desarenador | 18 |
| 2.7.3 Conducción | 18 |
| 2.7.4 Cámara de Carga..... | 18 |
| 2.7.5 Tubería Forzada | 18 |

| | | |
|--------|-------------------------------------|----|
| 2.7.6 | Casa de Máquinas | 18 |
| 2.8 | DIAGNÓSTICO SOCIO-AMBIENTAL | 19 |
| 2.9 | PRESUPUESTO | 19 |
| 2.10 | ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO | 19 |
| 2.10.1 | Costos de Capital | 19 |
| 2.10.2 | Egresos Anuales..... | 20 |
| 2.10.3 | Ingresos Anuales..... | 20 |
| 3. | ZONA DE ESTUDIO | 21 |
| 3.1 | UBICACIÓN | 21 |
| 3.2 | ACCESOS..... | 21 |
| 4. | ESTUDIO DE MERCADO ELÉCTRICO | 23 |
| 4.1 | Producción de Energía | 23 |
| 4.2 | Generación No Convencional..... | 24 |
| 4.2.1 | Energía RER | 24 |
| 4.2.2 | Tarifas de Venta..... | 25 |
| 4.3 | Futura Subasta RER..... | 25 |
| 4.3.1 | Proyección de Energía RER..... | 25 |
| 4.3.2 | Proyección de Tarifa RER | 26 |
| 5. | EVALUACIÓN DE GEOLOGÍA | 27 |
| 5.1 | Geomorfología..... | 27 |
| 5.2 | Lito-estratigrafía | 27 |
| 5.3 | Litología..... | 27 |
| 5.3.1 | Depósitos de Cobertura..... | 28 |
| 5.3.2 | Geología Estructural | 28 |
| 5.4 | Hidrogeología | 29 |
| 5.5 | Geodinámica del Proyecto | 30 |
| 5.5.1 | Externa | 30 |
| 5.5.2 | Interna | 30 |
| 6. | EVALUACIÓN DE HIDROLOGÍA | 31 |
| 6.1 | Información Cartográfica..... | 31 |
| 6.2 | Cuenca Hidrográfica | 31 |
| 6.2.1 | Descripción | 31 |
| 6.2.2 | Fisiografía | 32 |
| 6.2.3 | Ecología | 33 |

| | | |
|-------|-------------------------------------|----|
| 6.3 | Régimen de Lluvias | 33 |
| 6.3.1 | Información Base | 33 |
| 6.3.2 | Tratamiento | 34 |
| 6.3.3 | Distribución Temporal | 36 |
| 6.3.4 | Distribución Espacial | 36 |
| 6.4 | Escurrimientos Superficiales..... | 37 |
| 6.4.1 | Información Base | 37 |
| 6.4.2 | Tratamiento | 38 |
| 6.4.3 | Generación de Caudales..... | 39 |
| 6.5 | Persistencia de Caudales | 40 |
| 6.6 | Caudal Ecológico | 41 |
| 6.7 | Máximas Avenidas..... | 43 |
| 7. | POTENCIAL HIDROELÉCTRICO..... | 44 |
| 7.1 | Definición de Aprovechamiento | 44 |
| 7.2 | Costes de Construcción..... | 44 |
| 7.3 | Caudal de Diseño | 45 |
| 7.3.1 | Opciones | 45 |
| 7.3.2 | Análisis Técnico..... | 46 |
| 7.3.3 | Análisis Económico | 47 |
| 7.4 | Modelo de Generación | 48 |
| 7.5 | Balance Hídrico | 50 |
| 8. | ESTUDIO DE ALTERNATIVAS..... | 52 |
| 8.1 | Planeamiento..... | 52 |
| 8.1.1 | Alternativa A-1 | 52 |
| 8.1.2 | Alternativa A-2 | 53 |
| 8.1.3 | Alternativa B-1..... | 54 |
| 8.2 | Evaluación Técnico-Económica | 55 |
| 8.2.1 | Valoración Técnica | 55 |
| 8.2.2 | Valoración Económica..... | 56 |
| 9. | INGENIERÍA BÁSICA..... | 57 |
| 9.1 | HIDRÁULICA DEL CAUCE | 57 |
| 9.1.1 | Condiciones Iniciales | 57 |
| 9.1.2 | Niveles de Inundación..... | 57 |
| 9.2 | BOCATOMA..... | 59 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|----|
| 9.2.1 | Criterios de Diseño..... | 59 |
| 9.2.2 | Dimensiones..... | 60 |
| 9.3 | DESARENADOR..... | 61 |
| 9.3.1 | Criterios de Diseño..... | 61 |
| 9.3.2 | Dimensiones..... | 63 |
| 9.4 | CONDUCCIÓN..... | 64 |
| 9.4.1 | Criterios de Diseño..... | 64 |
| 9.4.2 | Dimensiones..... | 65 |
| 9.5 | CÁMARA DE CARGA..... | 67 |
| 9.5.1 | Criterios de Diseño..... | 67 |
| 9.5.2 | Dimensiones..... | 68 |
| 9.6 | TUBERÍA FORZADA | 69 |
| 9.6.1 | Criterios de Diseño..... | 69 |
| 9.6.2 | Dimensiones..... | 72 |
| 9.7 | ANCLAJES..... | 73 |
| 9.7.1 | Criterios de Diseño..... | 73 |
| 9.7.2 | Dimensiones..... | 74 |
| 9.8 | APOYOS..... | 75 |
| 9.8.1 | Criterios de Diseño..... | 75 |
| 9.8.2 | Dimensiones..... | 75 |
| 9.9 | PÉRDIDAS DE CARGA..... | 76 |
| 9.9.1 | Criterios de Diseño..... | 76 |
| 9.9.2 | Dimensiones..... | 77 |
| 9.10 | CASA DE MÁQUINAS | 77 |
| 9.10.1 | Criterios de Diseño..... | 77 |
| 9.10.2 | Dimensiones..... | 79 |
| 9.11 | CONEXIÓN ELÉCTRICA..... | 79 |
| 10. | EVALUACIÓN SOCIO-AMBIENTAL..... | 80 |
| 10.1 | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO..... | 80 |
| 10.1.1 | Características Técnicas | 80 |
| 10.1.2 | Obras Provisionales..... | 80 |
| 10.2 | ÁREA DE INFLUENCIA | 81 |
| 10.2.1 | Área de Influencia Directa | 81 |
| 10.2.2 | Área de Influencia Indirecta..... | 81 |

| | | |
|--------|--------------------------------------|-----------|
| 10.3 | SITUACIÓN SOCIO-AMBIENTAL | 82 |
| 10.3.1 | Medio Físico | 82 |
| 10.3.2 | Medio Biológico | 82 |
| 10.3.3 | Medio Socio-económico | 83 |
| 10.4 | CLASIFICACIÓN AMBIENTAL..... | 85 |
| 11. | PRESUPUESTO | 87 |
| 11.1 | COSTOS DE INVERSIÓN | 87 |
| 11.2 | COSTOS DE CONCESIÓN | 87 |
| 11.3 | COSTO DE INVERSIÓN..... | 88 |
| 12. | ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO | 89 |
| 12.1 | COSTES DEL PROYECTO..... | 89 |
| 12.1.1 | Costos de Capital | 89 |
| 12.1.2 | Costos O&M | 89 |
| 12.1.3 | Licencias de Uso | 89 |
| 12.2 | INGRESOS DEL PROYECTO | 90 |
| 12.3 | EVALUACIÓN ECONÓMICA | 90 |
| 12.3.1 | Flujo de Caja Económico..... | 90 |
| 12.3.2 | Análisis de Sensibilidad | 92 |
| 12.4 | EVALUACIÓN FINANCIERA | 92 |
| 13. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 95 |
| 13.1 | CONCLUSIONES | 95 |
| 13.2 | RECOMENDACIONES..... | 95 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 96 |
| | ANEXO..... | 98 |
| | Planos del Proyecto..... | 98 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | | |
|-----------------|--|----|
| Ilustración 1.1 | Centrales hidroeléctricas RER en operación al 2016..... | 9 |
| Ilustración 2.1 | Infraestructura y operación en centrales hidroeléctricas. | 13 |
| Ilustración 2.2 | Costos de obra para proyectos nuevos. | 16 |
| Ilustración 2.3 | Esquema de una central de agua fluyente. | 18 |
| Ilustración 9.1 | Esquema de toma tirolesa. | 60 |
| Ilustración 9.2 | Esquema de un desarenador convencional..... | 62 |
| Ilustración 9.3 | Sección de máxima eficiencia hidráulica. | 65 |
| Ilustración 9.4 | Esquema de sumergencia mínima..... | 68 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 9.5 Criterio del diámetro económicamente óptimo..... | 70 |
| Ilustración 9.6 Esquema de fuerzas en anclaje..... | 74 |
| Ilustración 9.7 Esquema de planta y secciones de apoyos..... | 75 |
| Ilustración 9.8 Esquema de salto útil para generación hidroeléctrica..... | 77 |
| Ilustración 9.10 Esquema de saltos para hidroeléctricas..... | 78 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 6.1 Hojas cartográficas del IG, proyecto C.H. FELFE..... | 31 |
| Tabla 6.2 Comparación de métodos de caudal ecológico..... | 42 |
| Tabla 10.1 Estudios ambientales para proyectos de inversión..... | 86 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Estudio a nivel de perfil, proyecto C.H. FELFE..... | 11 |
| Figura 3.1 Ubicación política de la zona de estudio, proyecto C.H. FELFE..... | 21 |
| Figura 3.2 Accesos generales a zona de estudio, proyecto C.H. FELFE..... | 22 |
| Figura 4.1 Producción de energía para el SEIN, por fuentes de generación..... | 23 |
| Figura 4.2 Producción de energía RER..... | 24 |
| Figura 4.3 Récord de tarifas de energía en subastas RER, en US\$/MW-h..... | 25 |
| Figura 4.4 Proyección de la energía requerida RER..... | 26 |
| Figura 4.5 Proyección de la tarifa eléctrica RER, en US\$/MW-h..... | 26 |
| Figura 5.1 Condición lito-tectónicas del terreno, escala 1:100'000..... | 29 |
| Figura 5.2 Aceleraciones sísmicas para 10% de excedencia y $T_R = 100$ años..... | 30 |
| Figura 6.1 Cuenca hidrográfica del proyecto. C.H. FELFE..... | 32 |
| Figura 6.2 Zonas de vida de la micro cuenca Raymondi, C.H. FELFE..... | 33 |
| Figura 6.3 Isoyetas multianual promedio en la Oya Perené..... | 35 |
| Figura 6.4 Polígonos Thiessen en la Oya Perené..... | 35 |
| Figura 6.5 Distribución temporal de las precipitaciones. micro cuenca Raymondi..... | 36 |
| Figura 6.6 Distribución espacial de las precipitaciones. micro cuenca Raymondi..... | 36 |
| Figura 6.7 Estadísticas de caudales en sección de captación, proyecto C.H. FELFE..... | 40 |
| Figura 6.8 Curvas de caudales clasificados a nivel mensual, proyecto C.H. FELFE..... | 41 |
| Figura 6.9 Enfoques de cálculo de caudales ecológicos, proyecto C.H. FELFE..... | 42 |
| Figura 6.10 Coeficientes Creager, proyecto C.H. FELFE..... | 43 |
| Figura 7.1 Costos de inversión en función de la capacidad, proyecto C.H. FELFE..... | 44 |
| Figura 7.2 Persistencias mensuales de caudal, proyecto C.H. FELFE..... | 45 |
| Figura 7.3 Capacidad de generación de opciones de caudal de diseño, proyecto C.H. FELFE..... | 46 |
| Figura 7.4 Beneficios económicos de opciones de caudal de diseño, proyecto C.H. FELFE..... | 47 |
| Figura 7.5 Generación de potencia y producción de energías anuales, proyecto C.H. FELFE..... | 50 |
| Figura 8.1 Planta de la Alternativa A-1, proyecto C.H. FELFE..... | 53 |
| Figura 8.2 Perfil de la Alternativa A-1, proyecto C.H. FELFE..... | 53 |
| Figura 8.3 Planta de la Alternativa A-2, proyecto C.H. FELFE..... | 54 |
| Figura 8.4 Perfil de la Alternativa A-2, proyecto C.H. FELFE..... | 54 |
| Figura 8.5 Planta de la Alternativa B-1, proyecto C.H. FELFE..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 8.6 Perfil de la Alternativa B-1, proyecto C.H. FELFE. | 55 |
| Figura 9.1 Hidráulica de avenidas en zona de captación, proyecto C.H. FELFE. | 58 |
| Figura 9.2 Hidráulica de avenidas en zona de descarga, proyecto C. H. FELFE. | 59 |
| Figura 9.3 Bocatoma tipo tirolesa, proyecto C.H. FELFE. | 61 |
| Figura 9.4 Desarenador. proyecto C.H. FELFE. | 64 |
| Figura 9.5 Alternativas de pendiente longitudinal, proyecto C.H. FELFE. | 66 |
| Figura 9.6 Canal de conducción, proyecto C.H. FELFE. | 66 |
| Figura 9.7 Cámara de carga, proyecto C.H. FELFE. | 69 |
| Figura 9.8 Perfil hidráulico de Tubería Forzada, proyecto C.H. FELFE. | 72 |
| Figura 9.9 Casa de máquinas, proyecto C.H. FELFE. | 79 |
| Figura 10.1 Área de influencia directa, proyecto C.H. FELFE. | 81 |
| Figura 10.2 Vista de flora y fauna del medio biológico. | 83 |
| Figura 10.3 Centros poblados del medio social cercano al Proyecto. | 84 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 6.1 Fisiografía de la micro cuenca Quebrada Raymondi, C.H. FELFE. | 32 |
| Cuadro 6.2 Información pluviométrica media multianual, Oya Perené. | 34 |
| Cuadro 6.3 Estación hidrométrica de referencia, Oya Tarma. | 37 |
| Cuadro 6.4 Información hidrométrica base, estación Puente Chuquisunca. | 38 |
| Cuadro 6.5 Parámetros de transferencia hidrológica. | 38 |
| Cuadro 6.6 Caudales naturalizados en sección de captación, proyecto C.H. FELFE. | 40 |
| Cuadro 6.7. Caudales ecológicos en m ³ /s, proyecto C.H. FELFE. | 43 |
| Cuadro 6.8 Caudales de máximas avenidas, proyecto C.H. FELFE. | 43 |
| Cuadro 7.1 Opciones de caudal instalado en m ³ /s, proyecto C.H. FELFE. | 45 |
| Cuadro 7.2 Análisis técnico de opciones de caudal de diseño, proyecto C.H. FELFE. | 46 |
| Cuadro 7.3 Análisis económico de opciones de caudal de diseño, proyecto C.H. FELFE. | 47 |
| Cuadro 7.4 Serie de caudales turbinables, proyecto C.H. FELFE. | 49 |
| Cuadro 7.5 Balance hídrico de caudales, en m ³ /s; proyecto C.H. FELFE. | 50 |
| Cuadro 8.1 Evaluación económica de esquemas hidráulicos, proyecto C.H. FELFE. | 56 |
| Cuadro 9.1 Respuesta hidráulica en eje de captación, TR = 100 años; proyecto C.H. FELFE. | 58 |
| Cuadro 9.2 Respuesta hidráulica en eje de descarga, TR = 100 años; proyecto C. H. FELFE. | 59 |
| Cuadro 9.3 Criterios de sumergencia mínima, proyecto C.H. FELFE. | 68 |
| Cuadro 9.4 Reporte de espesores de Tubería Forzada, proyecto C.H. FELFE. | 73 |
| Cuadro 9.5 Lista de dimensiones principales de anclajes, proyecto C.H. FELFE. | 74 |
| Cuadro 9.6 Dimensiones de apoyos en la tubería forzada, proyecto C.H. FELFE. | 76 |
| Cuadro 9.7 Relación de pérdidas de carga en conducto forzado, proyecto C.H. FELFE. | 77 |
| Cuadro 10.1 Ficha técnica, proyecto C.H. FELFE. | 80 |
| Cuadro 10.2 Usos de agua, proyecto C.H. FELFE. | 82 |
| Cuadro 10.3 Zonas de vida de la micro cuenca Raymondi, proyecto C.H. FELFE. | 83 |
| Cuadro 10.4 Demografía del medio social, proyecto C.H. FELFE. | 84 |
| Cuadro 10.5 Demografía del medio social, proyecto C.H. FELFE. | 85 |
| Cuadro 11.1 Presupuesto de inversión, proyecto C.H. FELFE. | 88 |
| Cuadro 12.1 Costos de capital en dólares, proyecto C.H. FELFE. | 89 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 12.2 Flujo de caja económico en US\$, proyecto C.H. FELFE..... | 91 |
| Cuadro 12.3 Sensibilidad al costo de inversión, proyecto C.H. FELFE..... | 92 |
| Cuadro 12.4 Sensibilidad a la tarifa de venta de energía, proyecto C.H. FELFE..... | 92 |
| Cuadro 12.5 Evaluación financiera, proyecto C.H. FELFE..... | 94 |



1. GENERALIDADES

En este capítulo se expone objetivos de la Tesis, y utilidad de la Energía Hidráulica en Perú.

1.1 INTRODUCCIÓN

A nivel regional, Perú ocupa el segundo lugar en lo que respecta a potencial de generación hidroeléctrica, antes se encuentra Brasil y después Venezuela, Colombia y México [OLADE, 2015]. La mayor riqueza en salto de agua se encuentra en el relieve accidentado de los Andes, sumado a la fuente de recursos hídricos que se desprende desde nevados y lagos; además de otras posibilidades de aprovechamientos hidráulicos en la selva. Todo ello hace al Perú un centro atractivo de inversión en generación hidroeléctrica, a la vez que posibilita la movilización global hacia una matriz energética renovable.

La Ley de Concesiones Eléctricas (D. L. Ley N° 25844), en el Capítulo III, señala los procedimientos administrativos y requisitos técnicos para solicitar la concesión definitiva de proyectos de generación eléctrica. Los procedimientos administrativos comprenden la presentación de carta fianza, permisos de uso de recursos del Estado, y licencias de operación comercial; los requisitos técnicos comprenden la elaboración de un Estudio de Factibilidad (Artículo 23).

En la actualidad, el Decreto Legislativo N° 1002 / 2008, establece las bases para la promoción de la inversión en sistemas renovables de generación eléctrica; entre ellas, pequeñas centrales hidroeléctricas no mayor a 20 MW de capacidad.

En la Ilustración 1.1 se lista pequeñas centrales hidroeléctricas puestas en marcha al 2016.

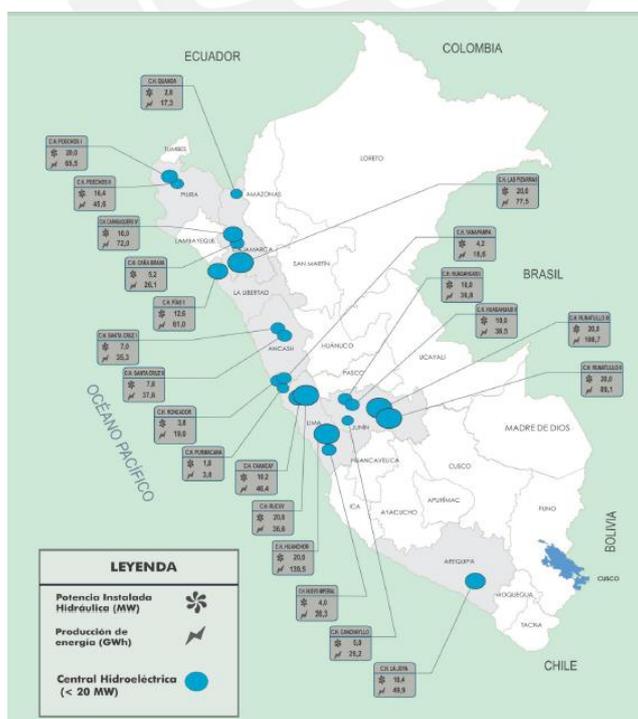


Ilustración 1.1 Centrales hidroeléctricas RER en operación al 2016.
Fuente: OSINERGMIN, 2016.

La Cuenca del Atlántico, en donde se ubica el proyecto de Tesis, dispone de 13,800 MW técnicamente aprovechables.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Santiago Antúnez de Mayolo fue el pionero y promotor de aprovechamientos hidroeléctricos en el país. Más adelante, en 1968 el Gobierno publicó un estudio de identificación del potencial hidroeléctrico teórico nacional (Evaluación del Potencial Hidroeléctrico Nacional), que dio cuenta de 60,000 MW aprovechables en hidroeléctricas en esquemas de grandes caídas; y en 2011, un estudio de perfil del potencial hidroeléctrico técnico aprovechable (Atlas del Potencial Hidroeléctrico del Perú), que contabilizó 70,000 MW en esquemas de 1 a 100 MW de potencia instalada.

En 2009 Perú puso de manifiesto su interés por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y migrar a una matriz energética renovable, a través de un nuevo reglamento del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), denominado Decreto Legislativo N° 1002, que establece las bases para la promoción de la generación No Convencional con Recursos Energéticos Renovables (Subasta RER, siglas en inglés); entre ellas, las pequeñas centrales hidroeléctricas de capacidad no mayor a 20 MW.

En 2015, el Ministerio de Energía y Minas, en el Plan Energético Nacional 2014 a 2025, consideró que parte de las nuevas centrales de generación sean del tipo hidroeléctricas; en promedio, 35,000 GW-h/año como producción de energía hidráulica.

Es en este contexto que la Tesis, denominado proyecto Central Hidroeléctrica FELFE, justifica su estudio, a fin de fomentar la inversión en la generación hidroeléctrica mediante Subasta RER.

1.3 ANTECEDENTES

En el visor del HIDROGIS figura un portafolio de estudios a nivel de perfil; todos a una escala no mayor a 100 MW. La interfaz virtualiza la ubicación de un proyecto de forma global, y da como resultado cantidades que influyen en la generación de energía; éstas son el potencial óptimo (denominado “técnicamente aprovechable”) y las utilidades por producción de energía (“índice costo/beneficio energético”).

Por tanto, para el desarrollo de la Tesis se ha seleccionado los recursos hídricos de la Quebrada Raymondi, ubicado en la Región Pasco, provincia y distrito de Oxapampa.

En la Figura 1.1 se presenta los indicadores hidroenergéticos del Proyecto.

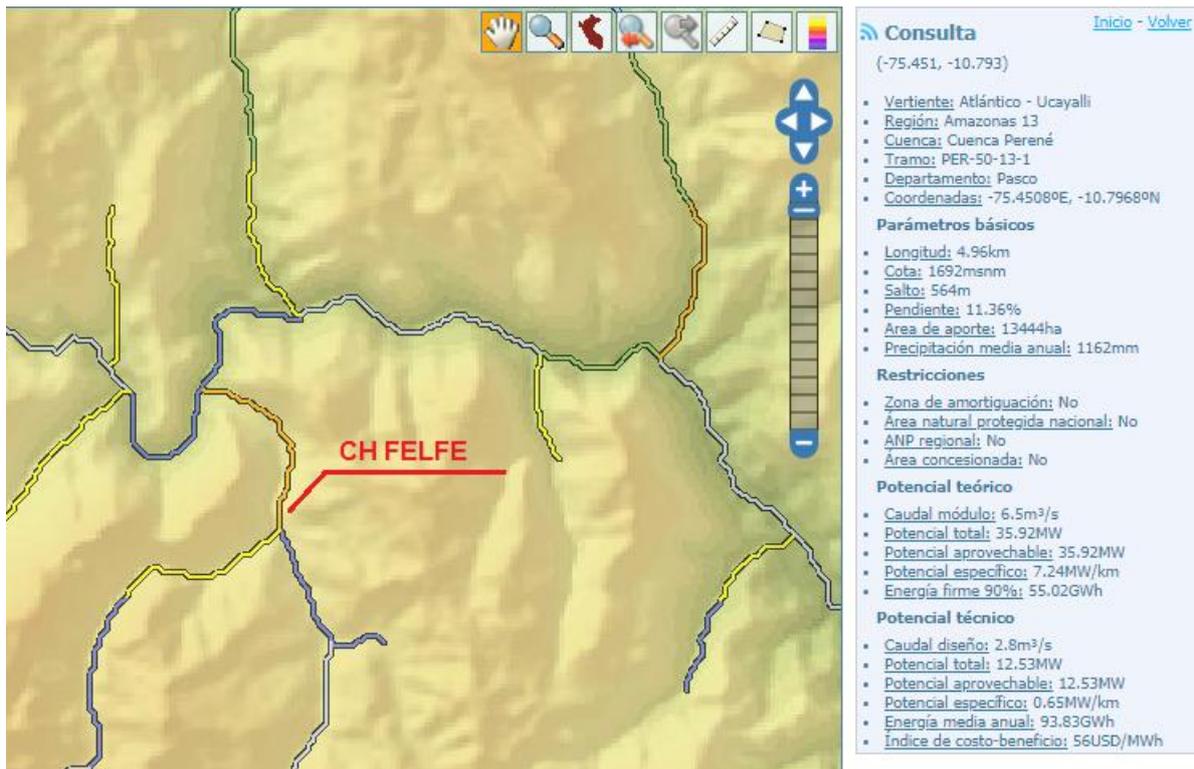


Figura 1.1 Estudio a nivel de perfil, proyecto C.H. FELFE.
Fuente: HidroGIS – Visualizador web.

1.4 OBJETIVOS

Los objetivos, tanto principal como específicos, de la Tesis son los siguientes:

1.4.1 Principal

El objetivo principal es el desarrollo de estudios técnicos a nivel de prefactibilidad de un proyecto de generación hidroeléctrica, a fin de promover la inversión en energías renovables mediante Subasta RER.

1.4.2 Específicos

De manera específica, se realizan estudios básicos que permiten definir una oportunidad de aprovechamiento hidroeléctrico técnicamente óptima en la Quebrada Raymondi, por medio de la selección del caudal de diseño, el estudio de alternativas de esquemas hidráulicos, y el análisis de la rentabilidad del Proyecto.

1.5 ALCANCES

La Tesis comprende la elaboración de estudios de mercado eléctrico para la comercialización de la energía, estudios de geología e hidrología del área del Proyecto, la definición del potencial hidroeléctrico técnicamente óptimo, la selección del arreglo hidráulico más económico, el diseño de ingeniería de los componentes principales de la central, evaluación socio-ambiental, y una evaluación económico-financiera del Proyecto.

1.6 METODOLOGÍA

La metodología utilizada en la Tesis sigue las pautas del Artículo 25 del Decreto Ley N° 25844, Ley de Concesiones Eléctricas, como referencia son las bases de licitación de Concesión Eléctrica.

2. FUNDAMENTOS DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

En este capítulo se presenta el marco teórico en que se sustenta los estudios y diseño de ingeniería del Proyecto.

2.1 LA ELECTRICIDAD EN PERÚ

En Perú, el suministro de electricidad llegó en 1857, con el iluminado a base de gas; y a partir de 1940, se iniciaron exploraciones en el interior del país para el aprovechamiento de la capacidad hidroeléctrica. Con el tiempo, el mercado eléctrico ha pasado a ser más competitivo, y el sistema ha ido evolucionando hasta convertirse lo que hoy es el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN).

A partir del 2000, las mayores fuentes de suministro a la matriz energética del SEIN han sido la generación termoeléctrica (gas natural) y la hidroeléctrica, seguido de iniciativas renovables no convencionales [OSIRGMIN, 2016]. Actualmente, las térmicas operan como base del sistema; mientras que las hidroeléctricas y resto de renovables cubren las fluctuaciones de la demanda nacional.

Por todo ello, las centrales hidroeléctricas significan para el Perú un brazo importante para el suministro de electricidad, e impulsa la economía a través del desarrollo de la Industria.

2.2 GENERACIÓN HIDRÁULICA

Las formas de generar electricidad van desde las fuentes fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, hasta las más limpias y renovables como la geotérmica, la solar, la eólica y la hidráulica.

La generación hidráulica consiste en aprovechar la energía potencial o gravitatoria del agua, por medio de una infraestructura ad-doc, para su circulación a presión desde una cierta altura, con el fin de convertirla en energía mecánica y luego en eléctrica, por medio de grupos de generación [R. Flores, 2011].

La edificación que alberga estos grupos se denomina “casa de máquinas”; y la comprendida entre el suministro de energía potencial y la fuente de generación eléctrica, “central hidroeléctrica”.

Los requerimientos de operación comercial y la infraestructura hidráulica de una central hidroeléctrica definen el tipo de esquema hidroeléctrico. En forma general, las hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo a su capacidad, medido en unidades de potencia; disponibilidad del salto de agua, en unidades de metro; y por el régimen de operación.

Según el régimen de operación de la central, los esquemas se clasifican en:

2.2.1 Centrales de agua fluyente

Los esquemas fluviales (*run of river* en inglés) generan electricidad mediante el uso inmediato, o a tiempo real, de la masa de agua entrante; están sujetas a variaciones climáticas y estacionales. Estas condiciones dan como resultado una generación de energía variable en el tiempo, en donde la producción máxima de la energía se alcanza por unas pocas horas.

Este proceso crea eficiencias entre 60% y 90% de factor de planta [FICHTNER, 2015]. Este tipo de esquema hidroeléctrico generalmente es denominado como Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH), y ha sido desarrollada en esta Tesis.

2.2.2 Centrales con embalses de regulación

Los esquemas de almacenamiento (*reservoir* en inglés) tienen un régimen de operación opuesto a las *run of river*, ya que la finalidad es alcanzar la producción máxima de la energía incluso durante períodos de bajo flujo. Para ello la disponibilidad de agua es asegurada mediante la instalación de estructuras de presas y creación de reservorios artificiales para el acopio de agua.

Este proceso crea eficiencias de hasta 70% de factor de planta [FICHTNER, 2015].

2.2.3 Centrales de almacenamiento por bombeo

Este esquema utiliza una estructura de presa para formar dos niveles de regulación del flujo. A partir del reservorio de almacenamiento a pie de presa, se bombea hacia otro reservorio aguas arriba de la estructura de barraje durante horas de menor demanda de energía (“horas no punta”); la central produce energía en horas punta, y el agua descargada vuelve a acumularse en el embalse a pie de presa hasta su próxima intervención.

Este proceso crea eficiencias de hasta 80% de factor de planta [FICHTNER, 2015].

En la Ilustración 2.1 se presenta los esquemas según el régimen de operación.



Ilustración 2.1 Infraestructura y operación en centrales hidroeléctricas.
Adaptado de FICHTNER, 2015.

Adicionalmente a lo antes expuesto, por medio del D.S. N° 1002 – Art. 3 en Perú se establece como sistemas renovables no convencionales para la generación de energía (RER, siglas en

inglés) a las centrales eólicas, solares, geotérmicas, biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) menores a 20 MW, con facilidades de ser conectados al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

Por tanto, en términos comerciales, una PCH podría operar como central de agua fluyente en horas no pico, y como de regulación para suministrar la máxima potencia en horas pico.

2.3 MERCADO ELÉCTRICO

El Mercado Eléctrico está conformado por empresas de generación, distribución y transmisión, entre el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) y los Usuarios Libres.

Históricamente, se encuentra que el SEIN tiene una mayor participación en la generación para mercado eléctrico, en términos de potencia instalada.

La generación permite la producción de energía eléctrica, el desarrollo industrial, y el combustible para el transporte. A su vez la producción de energía eléctrica puede provenir de fuentes convencionales y no convencionales.

Por tanto, el Estudio de Mercado Eléctrico permite estimar la producción de energía y las tarifas de venta de energía de cierto mercado del país, que deberán ser suplidas por nuevas plantas de electricidad, a fin de justificar el ingreso de una nueva central en el parque energético.

2.4 ESTUDIOS BÁSICOS

En este acápite se realizó una breve descripción de los estudios, que caracterizan la cuenca hidrográfica y el tramo en aprovechamiento:

2.4.1 Estudio de Geología

La evaluación geológica consiste en establecer el origen geológico y las características geotécnicas de los materiales del suelo que comprenden los inmuebles de la central y sus accesos, ya que permiten asegurar la estabilidad superficial (taludes) y subterránea (cimentaciones), durante las etapas de diseño, construcción y operación de una central.

En este nivel de estudio se describen los siguientes aspectos:

- el relieve del terreno (geomorfología)
- la secuencia estratigráfica de la formación de rocas (lito-estratigrafía)
- los peligros geológicos (geodinámica). que deberán ser atendidos por posteriores soluciones geotécnicas
- la disponibilidad de materiales. a ser evaluadas por investigaciones de laboratorio (materiales de construcción)

2.4.2 Estudio de Hidrología

La evaluación hidrológica consiste en establecer la disponibilidad hídrica en el punto de captación del aprovechamiento, generalmente a escala mensual, tomando en cuenta otros

usos y demandas de agua. La disponibilidad proviene de mediciones hidrométricas, que se calibran y automatizan con curvas de descarga; o de la elaboración de una matriz de caudales superficiales, en base a modelos hidrológicos de simulación de la cuenca.

En este nivel de estudio se describen los siguientes aspectos:

- la caracterización de la cuenca y su curso de agua (cuenca hidrográfica)
- la influencia espacial de los pluviómetros (régimen de lluvias)
- el aprovechamiento del Proyecto (disponibilidad hídrica)
- la preservación del ecosistema fluvial (caudales ecológicos)
- la determinación de descargas extraordinarias (máximas avenidas)

2.5 POTENCIAL HIDROELÉCTRICO

El potencial hidroeléctrico es un parámetro que conjuga los conceptos de caudal instalado (Q_d) y salto hidráulico (H), a fin de medir la disponibilidad del recurso hídrico, como aprovechamiento no consuntivo, en la generación de potencia (P) y energía (E).

Este potencial es calculado, en base a los datos de cota y caudal, como la suma del potencial correspondiente a cada tramo de un curso de agua, que se inicia y termina en un nodo [HIDROGIS, 2011].

El potencial hidroeléctrico de un tramo se calcula de la siguiente manera:

$$P = g * H_b * Q_d * n$$

$$E_i = P_i * t$$

$$E_m = \sum_1^m E_i / m$$

donde: P es la potencia instalada, en MW; H es el salto hidráulico bruto, en m; Q_d es el caudal de diseño, en m^3/s ; g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2 ; E_m es la energía anual promedio de una serie de años, en GW-h; i es la cantidad del tiempo de generación, en meses; n es la eficiencia de los equipos, $n=0.877$; t es la cantidad de tiempo en generación, en horas; m es el periodo de tiempo de datos de la matriz de caudales, en años.

Identificado un tramo del curso con fuerte pendiente, que por recomendaciones prácticas se encuentra por encima de 3%, la cota aprovechable queda fijada al inicio del tramo. En cambio, el caudal de diseño ha de pasar por una evaluación económica, en donde se prefiera la mayor rentabilidad de la inversión.

En este nivel de estudio se describen los siguientes aspectos:

- la rentabilidad de la inversión (caudal de diseño)
- los caudales turbinables (modelo de generación)
- disponibilidad hídrica (balance hídrico)

2.5.1 Caudal de Diseño

En un año hidrológico, a mayor caudal, menor probabilidad de persistencia en el tiempo [G. Monsalve, 1999]. Por tanto, la selección del Caudal de Diseño debe tener una componente económica, entre los ingresos por generación y los costes de construcción.

En los costes de construcción se hace referencia sólo a las obras civiles y de equipamiento electromecánico de cada aprovechamiento; otros costos comprenden la operación y mantenimiento de puesta en marcha, que tienen una significancia mínima en la inversión (aproximadamente, 3% del costo de construcción).

Los costes de obras civiles se relacionan con la topografía y criterios de construcción; los de equipamiento electromecánico, por su origen (fabricación, distribución y montaje) y tecnología, representan costos globales [G. Zoppetti, 1979].

En proyectos hidroeléctricos nuevos, una primera estimación de la inversión de la central se estima en función de su capacidad; ver Ilustración 2.2.

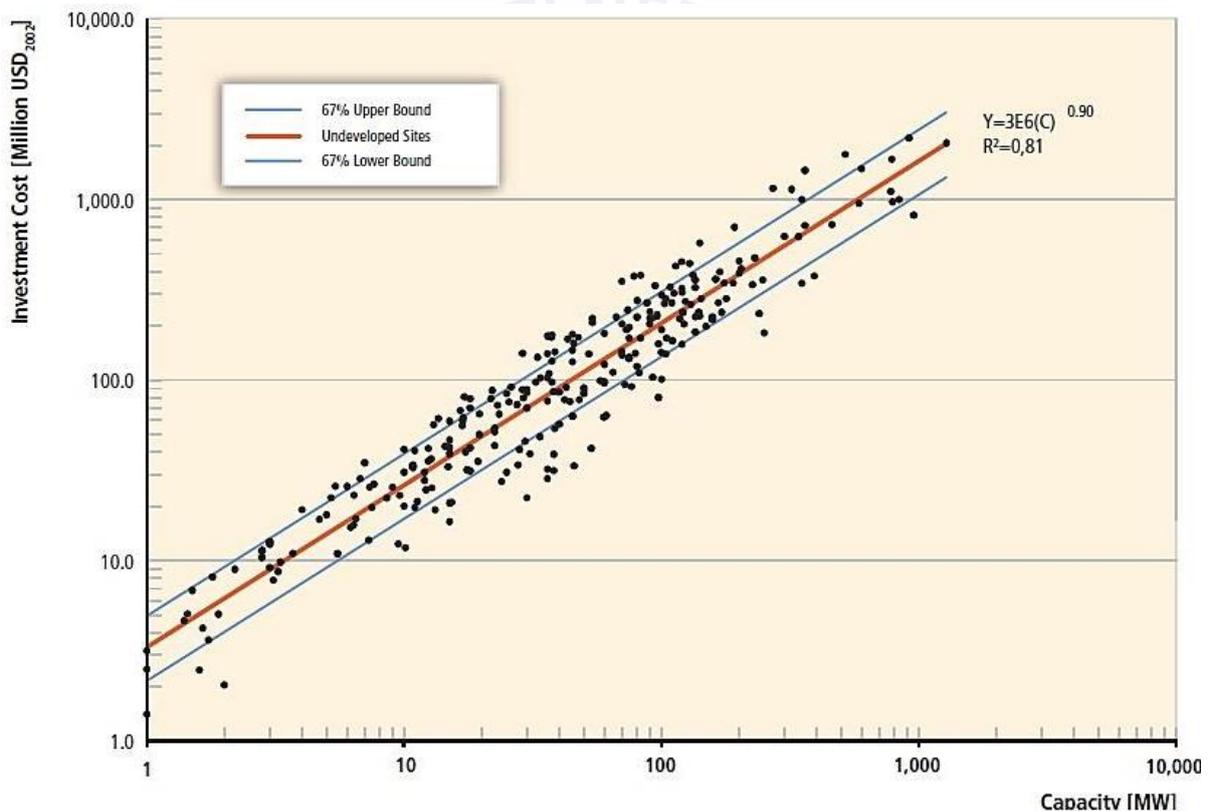


Ilustración 2.2 Costos de obra para proyectos nuevos.
Fuente: RESCCM, 2011.

Por otro lado, los ingresos por generación resultan del producto, traído a valor presente, entre la energía promedio multianual y la tarifa de venta de energía. Los ingresos por generación se calculan de la siguiente manera:

$$II = E_m * TG * \frac{(1 + i)^n - 1}{i * (1 + i)^n}$$

donde: Π son los ingresos por venta de energía a valor presente, en MM\$; E_m es la energía anual promedio, en GW-h; TG es la tarifa de venta de energía, en \$/MW-h; i es la tasa de interés; y n es el tiempo de operación comercial de la central.

Finalmente, se realiza un análisis técnico-económico de los costes de construcción y los ingresos por generación (similar al concepto de *Diámetro Económico*); la mayor diferencia de ambos términos viene a ser el beneficio económico.

2.5.2 Modelo de Generación

El Modelo de Generación consiste en establecer los caudales turbinables en la central (Q_t), en concordancia de los caudales del río (Q_R), los caudales ambientales (Q_{eco}) y los mínimos turbinables por los grupos de generación (Q_{min}). A su vez, los caudales turbinables permiten determinar la generación de potencia y energía a nivel mensual.

El cálculo de los caudales turbinables sigue las siguientes situaciones de funcionamiento:

$$Q_R - Q_{eco} < Q_{min} \rightarrow Q_t = 0$$

$$Q_{min} < Q_R - Q_{eco} < Q_d \rightarrow Q_t = Q_R - Q_{eco}$$

$$Q_R - Q_{eco} \geq Q_d \rightarrow Q_t = Q_d$$

donde: Q_t es el caudal turbinable, en m^3/s ; Q_R es el caudal natural del río, en m^3/s ; Q_{eco} es el caudal de demanda ecológica, en m^3/s ; Q_{min} es el caudal mínimo turbinable, en m^3/s (para turbinas Pelton es 8% del caudal de diseño).

2.6 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

El Estudio de Alternativas consiste en plantear esquemas hidráulicos de aprovechamiento hidroenergético, los cuales comprenden obras de captación, de conducción y de generación.

El planteamiento está asociado a diseños de ingeniería, costos de construcción, licencias de concesión, e impactos ambientales y/o sociales. Finalmente, se realiza una valoración técnica y económica de las mismas, llegando a seleccionar la de menor costo de inversión y mayores beneficios económicos.

2.7 INGENIERÍA CONCEPTUAL

La ingeniería conceptual del Proyecto comprende los criterios de diseño civil, principalmente hidráulico, de las estructuras que conforman el aprovechamiento hidráulico en una central tipo agua fluyente; ver Ilustración 2.3.

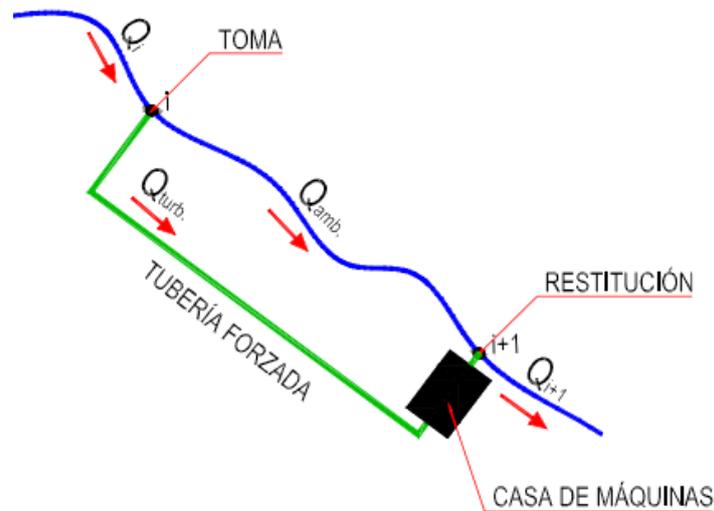


Ilustración 2.3 Esquema de una central de agua fluyente.
Fuente: HIDROGIS, 2011.

A continuación, se realiza una breve descripción de las obras civiles:

2.7.1 Bocatoma

La bocatoma tiene por finalidad derivar un curso natural de río, un caudal de diseño determinado para el caudal de diseño. En pequeños aprovechamientos los tipos de bocatoma son la toma convencional y la toma de fondo o tirolesa; en los dos casos, se proyecta una ventana o rejilla para evitar el ingreso de sólidos flotantes.

2.7.2 Desarenador

El desarenador decanta y luego expulsa material de grano fino dentro de sus naves, para evitar la abrasión de las turbinas. El diámetro de partícula depende del tipo de turbina y la altura de caída. El agua limpia de sedimentos es drenada por un vertedero.

2.7.3 Conducción

La conducción puede estar dada por un canal o por una tubería a flujo subcrítico, en donde el agua limpia es transportada a una cámara de carga. Por lo general, la pendiente de transporte y la velocidad son pequeñas.

2.7.4 Cámara de Carga

Ésta obra hidráulica suministra de energía potencial a la central, y regula las oscilaciones del agua por el cierre y apertura de la válvula de admisión. Es necesario proyectar un vertedero de alivio para la evacuación del agua ante fenómenos transitorios.

2.7.5 Tubería Forzada

El diseño de la tubería forzada considera las presiones ejercidas por la gradiente de energía y por la presión producida por el golpe de ariete, y el criterio del “diámetro económico”.

2.7.6 Casa de Máquinas

La casa de máquinas es el lugar donde se encuentra el equipamiento electromecánico que generará la energía eléctrica. De forma general, la selección de las turbinas depende de la altura de caída y el caudal turbinado.

2.8 DIAGNÓSTICO SOCIO-AMBIENTAL

El diagnóstico socio-ambiental busca identificar el área de influencia y el medio físico, biológico y económico del Proyecto, que servirán para el diagnóstico de los impactos ambientales sobre el ecosistema y los medios de vida de la población como consecuencia de las actividades de construcción y operación.

2.9 PRESUPUESTO

El Presupuesto es una estimación del costo de construcción de un proyecto, que elabora en base a medición de materiales (metrados) y precios unitarios de las partidas que componen la obra, en orden jerárquico de los procesos constructivos.

Los planos contienen la información de los metrados, y las especificaciones técnicas definen los precios unitarios; el producto de ambos factores permite asignar los recursos apropiados para la ejecución de la obra en un tiempo determinado.

2.10 ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

El estudio económico permite determinar los beneficios, después de impuestos, de los activos del Proyecto en operación; y permite calificar la rentabilidad de la inversión o capital [G. Baca. 2001]. El análisis financiero explica cómo ha sido costeadado el Proyecto.

La valoración económica de proyectos hidroeléctricos, adaptada al Perú de acuerdo a la Ley de Concesiones Eléctricas, considera los siguientes aspectos:

- **Costos de Capital**
 - estudios de línea base
 - diseño de ingeniería de obras civiles
 - acondicionamiento de equipamiento electromecánico
 - adquisición de predios de servidumbre
 - supervisión de obras durante la construcción
 - contingencias o costos imprevistos
- **Egresos Anuales**
 - administración de la operación
 - mantenimiento mayor de equipos
 - licencias de explotación de recursos
- **Ingresos por venta de energía**

2.10.1 Costos de Capital

En cuanto a los Costos de Capital, los de estudios de línea base y supervisión se acuerdan entre el inversionista y firmas consultoras; los de ingeniería de obras civiles, a partir del diseño, cantidad de componentes y precios unitarios; el de equipamiento electromecánico, se determina por cotizaciones de proveedores; y las tierras de servidumbre dependen directamente de la valorización de cada región y/o provincia.

2.10.2 Egresos Anuales

Respecto a los Egresos Anuales, la administración de operación representa los pagos del personal del monitoreo de la planta, en lo posible mínimos gracias a coordinaciones teledirigidas desde un centro de control automáticamente; los costos de mantenimiento se refieren a los repuestos de equipos electromecánicos, periódicamente; y las licencias de uso permiten la vigencia de explotación del agua, entre otros.

2.10.3 Ingresos Anuales

Los Ingresos Anuales vienen a ser los generados por la variabilidad natural del régimen de flujo para la producción de energía. Que, por ser perennes durante la vida del Proyecto, son considerados fijos; es decir, se espera que las descargas promedio anuales del recurso hídrico produzcan una constante de producción de energía cíclica, e igual a la producción anual promedio.

Con estos valores se desarrolla el flujo de caja interno, y se analiza el costo/beneficio. Los indicadores financieros de rentabilidad del proyecto más comunes son el Valor Actual Neto (VAN), y la Tasa Interna de Retorno (TIR).



3. ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se describió la ubicación y formas de acceso a la zona de estudio, la cual comprende el proyecto Central Hidroeléctrica FELFE. En esta actividad se utilizó herramientas digitales a través del Sistema de Información Geográfica QGIS.

3.1 UBICACIÓN

A nivel político, el Proyecto C. H. FELFE se ubica en el Departamento Pasco, en la latitud central del país; presenta un relieve variado, que incluye altas mesetas, montañas cubiertas por nevados, y selva alta hacia el este.

A nivel local, el Proyecto se sitúa en la provincia y distrito de Oxapampa, el cual es uno de los ocho distritos que conforman la Provincia de Oxapampa, que a su vez es una de las tres provincias que conforman el Departamento de Pasco.

En la Figura 3.1 se presenta la ubicación del Proyecto.

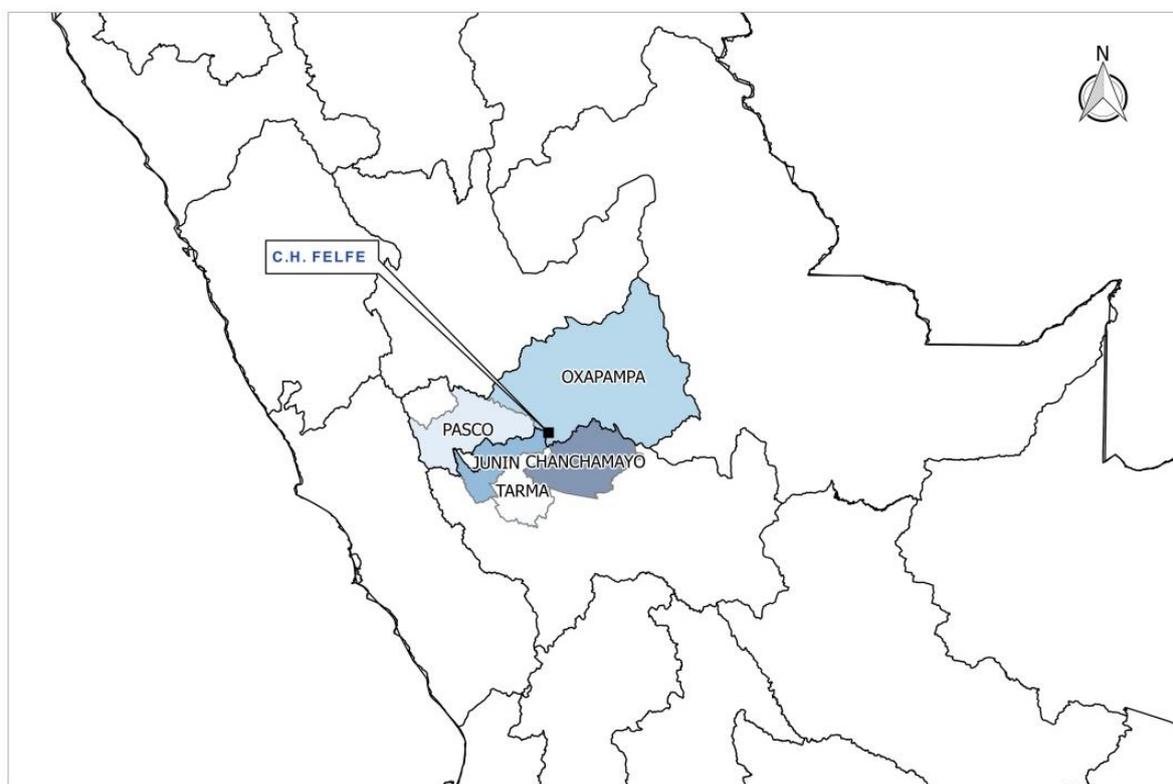


Figura 3.1 Ubicación política de la zona de estudio, proyecto C.H. FELFE.
Adaptado de: Bing Maps.

3.2 ACCESOS

Para acceder a la zona del Proyecto desde la capital (Lima), se toma la Carretera Central en dirección Nor-Este, hasta ingresar al distrito de Carhuamayo, Departamento de Pasco; enseguida continuar por un desvío en dirección Este, hasta la zona del Proyecto.

En cuanto a los accesos específicos al Proyecto, se desarrollará vías afirmadas para tanto para las obras de captación como para las de generación; un total de 4.7 km y un puente para la bocatoma, y 1.5 km para el acceso a la casa de máquinas.

En la Figura 3.2 se proyecta los accesos propios al área del Proyecto.

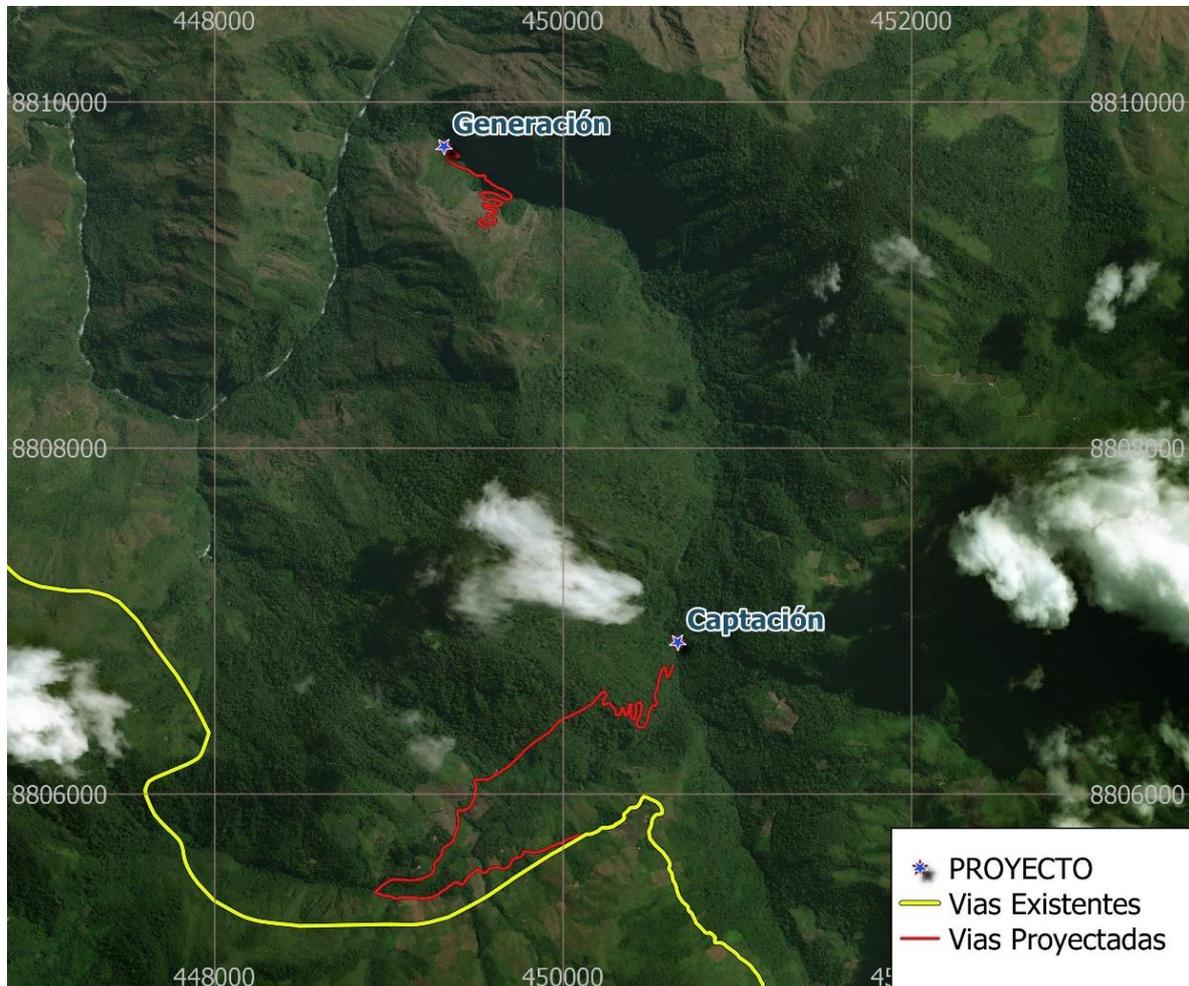


Figura 3.2 Accesos generales a zona de estudio, proyecto C.H. FELFE.
Adaptado de: Bing Maps.

4. ESTUDIO DE MERCADO ELÉCTRICO

En este capítulo se evaluó la energía a nivel de generación y las tarifas de electricidad en subastas RER, para fin de justificar la inyección del Proyecto Hidroeléctrico FELFE.

4.1 Producción de Energía

La producción de energía es el mecanismo de generación de electricidad; a nivel nacional, el Sistema de Electricidad Interconectado Nacional (SEIN) presenta el mayor despacho del Mercado Eléctrico.

Las fuentes convencionales de generación de electricidad son la hidráulica y térmica; mientras que las no convencionales son la eólica, solar, geotermal, biomasa y pequeñas hidráulicas menores a 20 MW.

A partir del año 2000, las mayores fuentes de suministro de energía al SEIN fueron la de generación hidroeléctrica y termoeléctrica (gas natural). Según el Anuario Estadístico del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSIRGMIN, 2016), en la última década la generación por fuente hidráulica ha tenido una participación promedio de 50% dentro del SEIN.

En la Figura 4.1 se presenta la participación de cada fuente de generación eléctrica en el Mercado Eléctrico nacional, desde 2009.

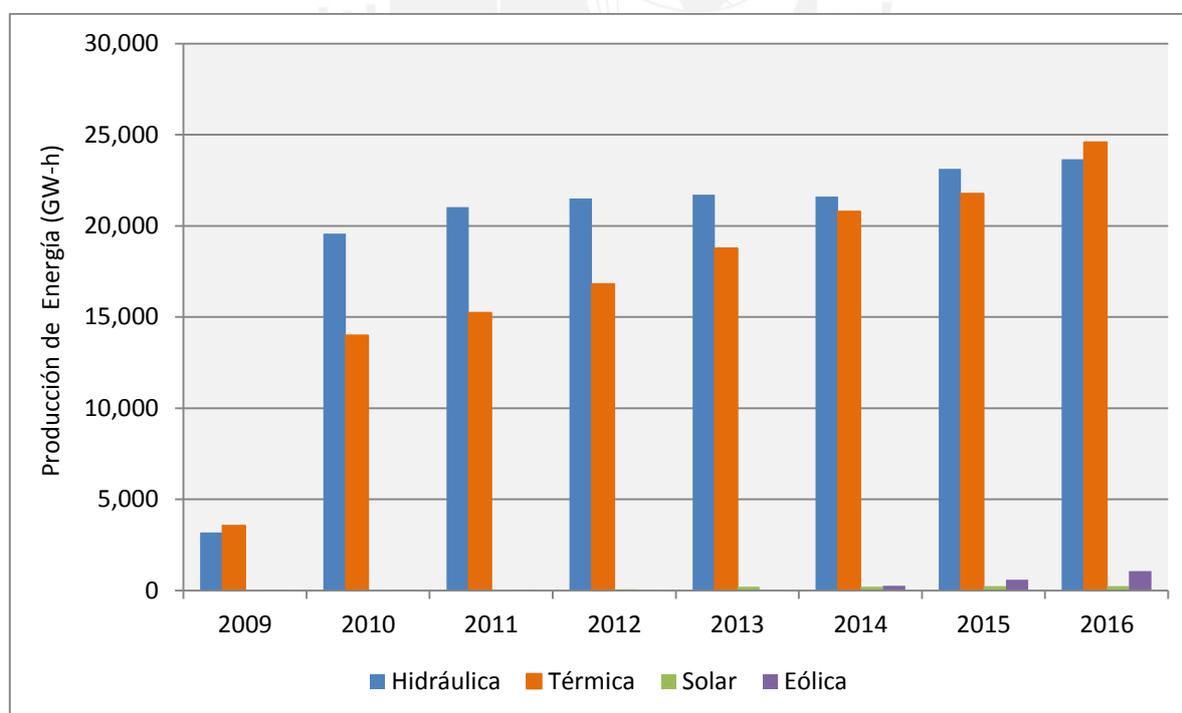


Figura 4.1 Producción de energía para el SEIN, por fuentes de generación.
Fuente: OSINERGMIN, 2016.

Estos datos ponen de manifiesto que la generación hidráulica es la fuente líder, y puede cubrir hasta el 50% de la demanda eléctrica nacional.

4.2 Generación No Convencional

La generación No Convencional se concibe como la producción de energía por fuentes con Recursos Energéticos Renovables (RER), que son las siguientes: eólica, solar, mini hidráulica (menores a 20 MW) y biomasa.

El Estado desde el 2008 ha fomentado la generación No Convencional con Recursos Energéticos Renovables (RER, siglas en inglés), por medio de un instrumento administrativo llamado “Subasta RER”. Este tipo de licitación se convoca para suplir una fracción del consumo nacional energético por medio de tecnologías RER; actualmente al 5%, según se refiere en el Artículo 2 del D. L. N° 1002 –” Ley de Promoción de la inversión en generación de electricidad promueve el uso de energías renovables”.

4.2.1 Energía RER

Según el D.L. N° 1002, la producción de energía RER equivalente al 5% del consumo nacional del último año se denomina “Energía Requerida”, en la cual los postores de generación RER ofertan una cantidad de energía (en MW-h/año), bajo un precio de venta de energía (en US\$/MW-h).

En lo que va de los procesos de Subastas RER a la actualidad, las Pequeñas Hidroeléctricas (PCH, en adelante) adjudicadas han suplido alrededor de la tercera parte de la energía requerida, respecto a otras fuentes de generación; salvo la tercera subasta, donde el MINEM no licitó energías por otras fuentes que no sean hidroeléctricas.

En la Figura 4.2 se presenta el récord de energía requerida por el Estado, desde la promoción de las fuentes RER.

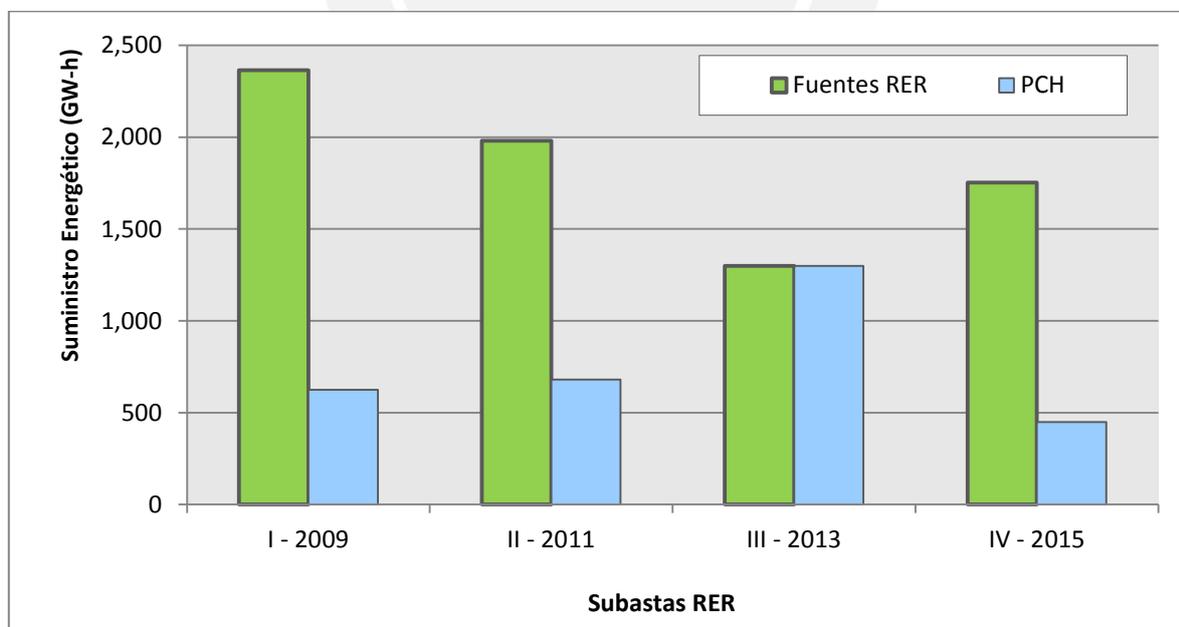


Figura 4.2 Producción de energía RER.

Fuente: OSINERGMIN, 2016.

Del gráfico anterior se ratifica la generación eléctrica por fuente hidráulica como la más importante del país, en parte dada por su confiabilidad del suministro en el tiempo.

4.2.2 Tarifas de Venta

En el caso de las PCH, en las subastas precedentes la tarifa de venta de energía ha tenido un comportamiento regular respecto a las otras tecnologías, cuyos precios en las primeras subastas eran hasta cuatro veces el precio adjudicado por hidroeléctricas.

En el Figura 4.3 se muestra el récord de tarifas promedio por tecnología.

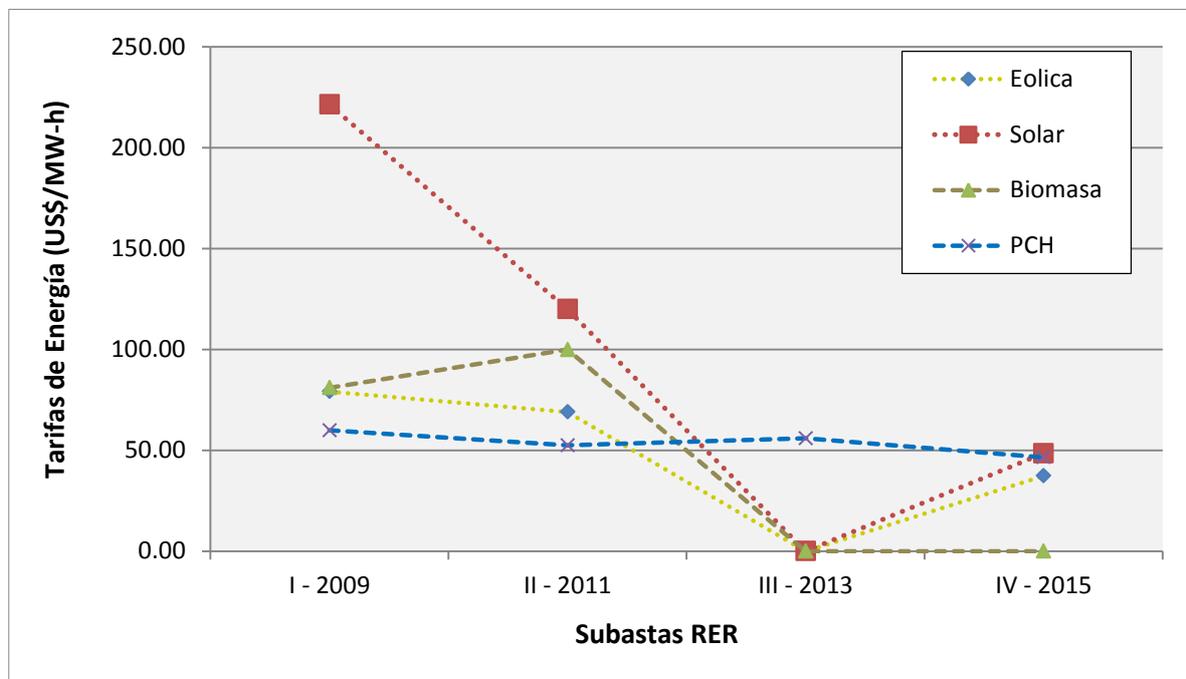


Figura 4.3 Récord de tarifas de energía en subastas RER, en US\$/MW-h.
Fuente: OSINERGMIN, 2016.

Del gráfico anterior se observó que los precios adjudicados de producción de energía de las PCH son estables, ya que desde el inicio del fomento de las Subastas RER éstas han variado alrededor de 53.7 USD/MW-h con una ligera tendencia decreciente, lo que se traduce en una optimización de los recursos para aprovechamiento hidroeléctrico.

Por tanto, en términos de tarifa eléctrica, las centrales hidráulicas RER también poseen precios de generación competitivos a comparación de otras tecnologías.

4.3 Futura Subasta RER

A continuación, se presenta una proyección de la energía requerida y de la tarifa eléctrica para mini centrales hidráulicas, dentro de un escenario de quinta subasta.

4.3.1 Proyección de Energía RER

A partir de los datos históricos oficiales de adjudicación, se observó que las PCH han suplido el 30% de la energía requerida.

Entonces, en base al consumo de electricidad nacional del 2017 y el factor de participación de fuentes RER (5%), se proyectó la producción de energía requerida nacional, y se derivó el adjudicado por PCH.

En la Figura 4.4 se presenta el resultado de la proyección de energía requerida.

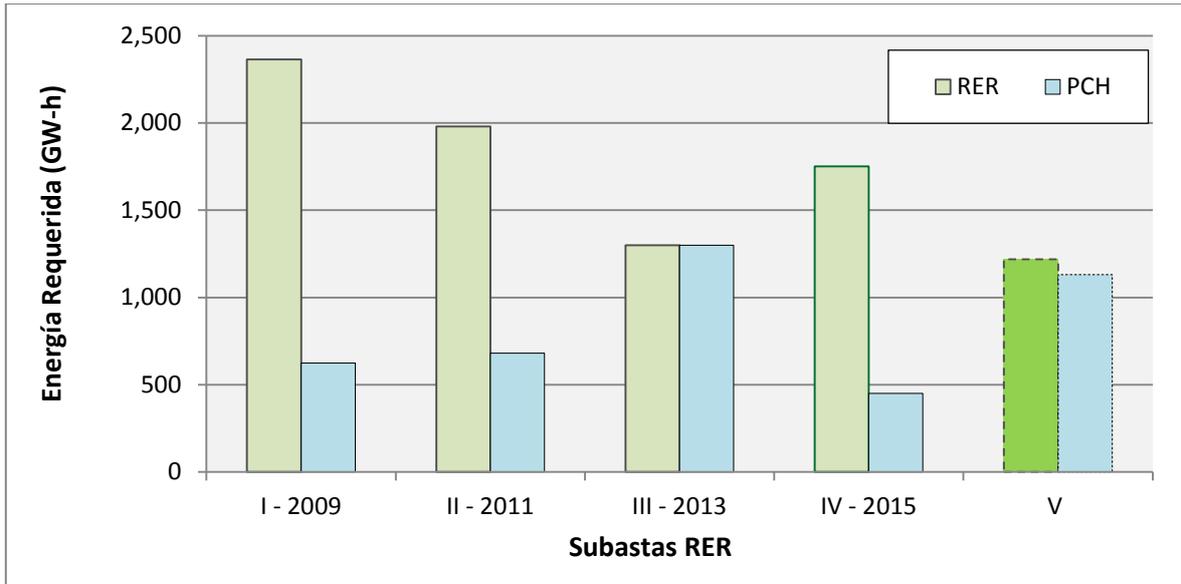


Figura 4.4 Proyección de la energía requerida RER.

De la figura anterior se obtuvo que la energía requerida por tecnologías RER sería igual a 1,220.0 GW-h; particularmente para PCH, 1,131 GW-h.

4.3.2 Proyección de Tarifa RER

Los datos históricos oficiales de adjudicación registran precios de venta de energía para PCH con un comportamiento decreciente, en US\$/MW-h. Entonces, se proyectó una recta con pendiente negativa y constante con el valor del primer precio adjudicado, y se derivó el otorgado para una siguiente subasta.

En la Figura 4.5 se presenta el resultado de los precios de venta de energía.

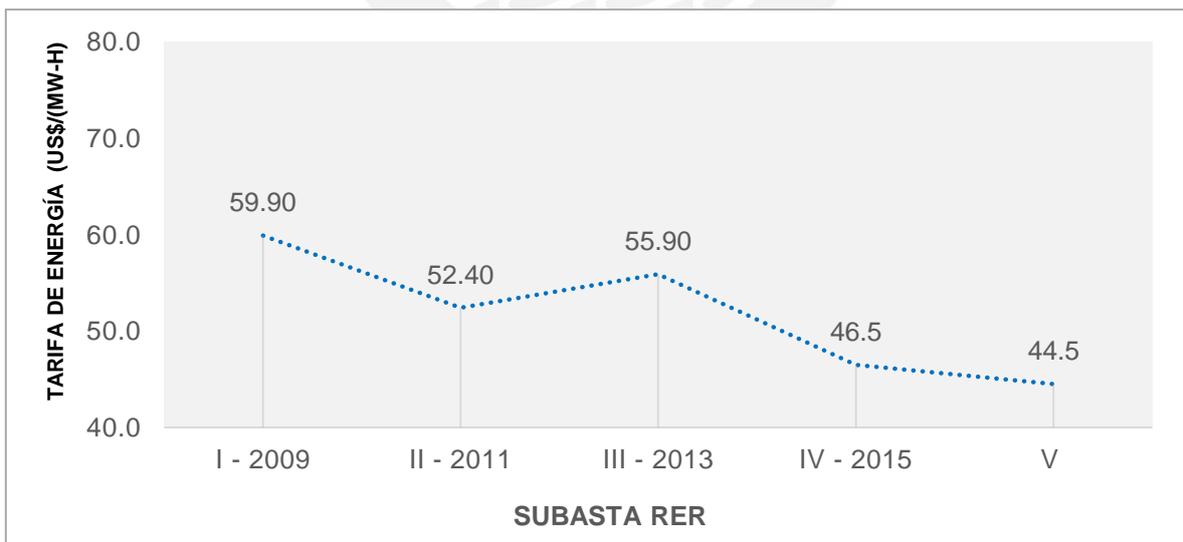


Figura 4.5 Proyección de la tarifa eléctrica RER, en US\$/MW-h.

Del gráfico anterior se concluyó que la venta de energía podría adjudicarse en una tarifa igual a 44.5 US\$/MW-h, la cual garantiza la inyección de energía del Proyecto Central Hidroeléctrica FELFE.

5. EVALUACIÓN DE GEOLOGÍA

En este capítulo se evaluó las condiciones geológicas a nivel regional, para fines energéticos del proyecto Central Hidroeléctrica FELFE. En esta actividad se utilizó herramientas digitales a través del Sistema de Información Geográfica QGIS.

Para la presente evaluación, se utilizó los siguientes estudios antecedentes:

- Boletín N° 78. Serie A. Geología de los cuadrángulos Chuchurras, Ulcumayo, Oxapampa y La Merced. INGEMMET, 1996.
- Mapa geológico del Cuadrángulo de Oxapampa, 22-m; escala 1'100'000.
- Zonas críticas por peligros geológicos en la Región Pasco. Primer Reporte. INGEMMET, 2013.

5.1 Geomorfología

La zona del Proyecto se ubica en la ladera de la Cordillera Oriental, entre los cerros Camello y Tigretambo. El relieve del terreno es accidentado, con flancos pronunciados y continuas rupturas de pendiente, así como de exuberante vegetación.

Entre la captación y la descarga del Proyecto se distinguen las siguientes geounidades:

- i. Ladera de valle subandina: caracterizado por relieves con pendientes moderadas a pronunciadas, siendo en algunos casos flancos subverticales y escarpados; se encuentra interrumpida por quebradas pequeñas, de fondo angosto, y cubiertas de abundante vegetación arbórea.
- ii. Valle fluvial subandino: caracterizado por relieves con pendiente encañonada y de fondo amplio, afectado por una intensa erosión; el flujo de la Q. Raymondi tiene presencia de meandros.

5.2 Lito-estratigrafía

Los afloramientos rocosos que comprende el Proyecto presentan la siguiente secuencia de rocas y depósitos cuaternarios:

5.3 Litología

Las distintas litologías se asocian a la evolución sedimentaria y estructural en la cuenca. La unidad litológica más antigua es la Mesozoica, del Sistema Jurásico, donde predominan las siguientes familias de rocas de la unidad Grupo Pucará:

- i. Formación Chambará (Ts-Ch)

Esta formación representa la base del Grupo Pucará. Esta familia aflora en forma alargada e interclástica, y se extiende por la margen derecha del valle Raymondi. Litológicamente, está compuesta por dolomita y caliza gris oscuro, con abundante contenido de cuarzo detrítico y nódulos de chert. En contacto con aguas ácidas, estas litoformas reaccionan y forman Karst (cavernas de disolución).

Esta formación no presenta una granulometría homogénea, a la vez que su composición se encuentra fragmentada, que la hace menos competente en sus condiciones geotécnicas.

ii. Formación Aramachay (Ji-A)

Esta formación representa la parte intermedia del Grupo Pucará. Esta familia aflora con materia orgánica, y se extiende por la margen izquierda del valle Raymondi. Litológicamente, está compuesta por calizas bituminosas y arcillosas; también presenta intercalaciones de dolomitas.

Esta formación presenta una mayor granulometría homogénea, bajo poca erosión, que la hace más competente en sus condiciones geotécnicas a la hora de realizar obras de corte (estabilidad de taludes).

iii. Formación Condorsinga (Ji-C)

Esta formación representa la parte superior del Grupo Pucará. Esta familia aflora en secuencia estratificada de areniscas calcáreas, y calizas falladas; en algunos casos como deslizamientos, y se extiende por la margen izquierda del valle Raymondi. Litológicamente, está compuesta por calizas resistentes a la erosión, que forman farallones y escarpas pronunciadas; también presenta algunas intercalaciones de dolomitas.

Esta formación presenta la mejor granulometría del Grupo, lo que la hace más competente en sus condiciones geotécnicas a la hora de realizar obras de terraceo.

Por otro lado, en el área del Proyecto no se presentan rocas ígneas.

5.3.1 Depósitos de Cobertura

Estos depósitos corresponden a la Era Cenozoica, Sistema Cuaternario, que cubren las rocas y son el resultado de la intensa meteorización física, mecánica y biológica. En el área del proyecto se presentan los siguientes depósitos:

- iii. Fluviales: lo conforma depósitos de arena y grava que se ubican a lo largo de la Quebrada Raymondi, formando barreras, islas y terrazas.
- iv. Aluviales: conformados por bloques de gravas, arenas y limos, están unidos por una matriz arcillosa a arenosa, y son transportados por flujos a través de los torrentes tributarios a la Quebrada Raymondi; también se originan por deslizamientos.
- v. Coluviales: depósitos de roca ubicados al pie de las laderas que se han acumulado por la caída de rocas y que se caracterizan por la heterogeneidad de los fragmentos de roca.

5.3.2 Geología Estructural

La estructura que circunscribe la zona del Proyecto es la Faja Plegada Subandina, en donde se ha formado pliegues, provenientes de deformaciones moderadas a apretadas; además, está afectada por fallas inversas y normales, con desplazamiento subvertical.

En la Figura 5.1 se presenta el resumen de las condiciones geológicas del Proyecto.

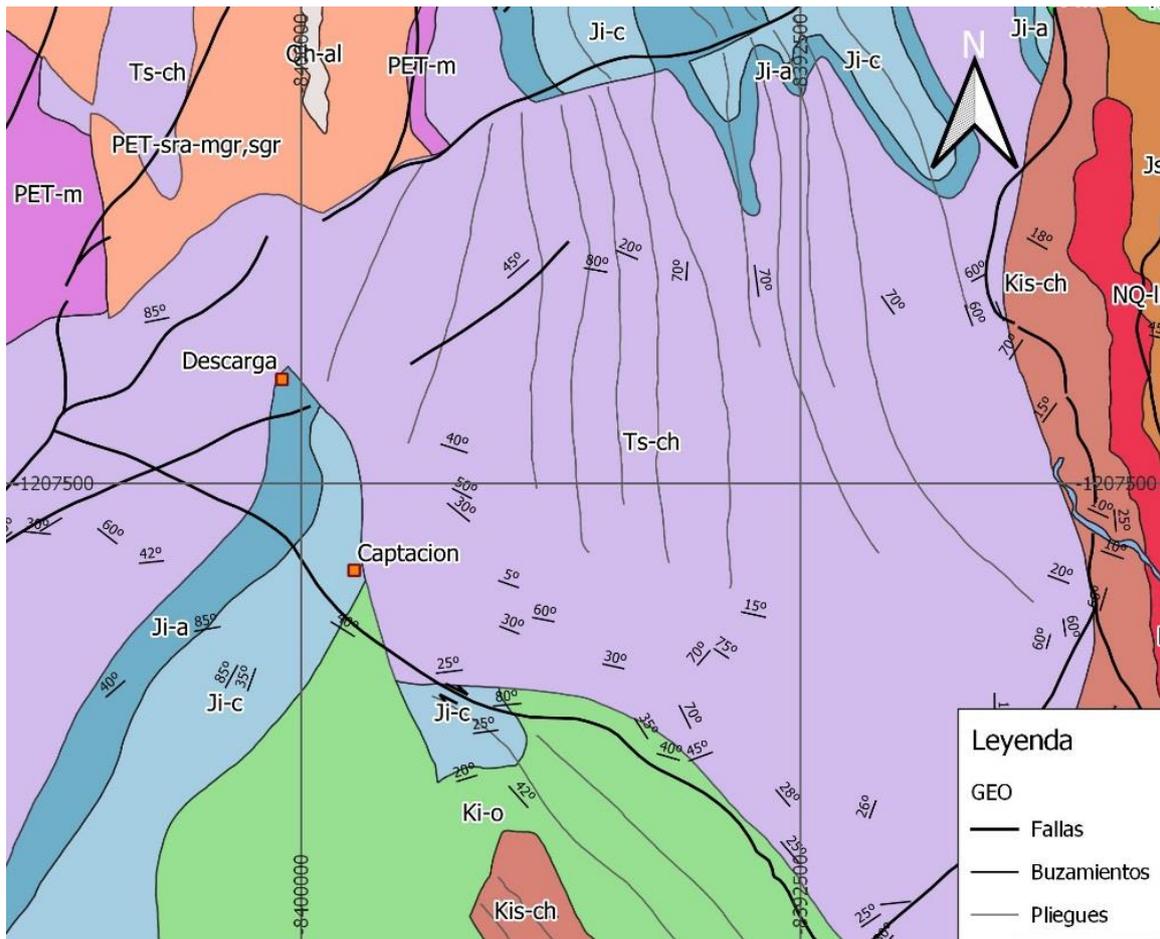


Figura 5.1 Condición lito-tectónicas del terreno, escala 1:100'000.
Adaptado de: INGEMMET, 1996.

5.4 Hidrogeología

Los procesos tectónicos en el valle de Raymondí, sobre todo compresivos, se tradujeron en fallamientos tipo bloques y estructuras ondulantes, que han propiciado condiciones geológicas e hidráulicas favorables para el almacenamiento y flujo de aguas subterráneas.

A continuación, se describe el comportamiento hidrogeológico del valle de Raymondí:

- las dolomitas y calizas de la Formación Chambará, en contacto con aguas ácidas, reaccionan y forman Karst (cavernas de disolución); se extiende por la margen derecha del valle
- las calizas de la Formación Aramachay tienen características de porosidad y conductividad hidráulica; se extiende por la margen derecha del valle
- las calizas de la Formación Condorsinga son resistentes a la erosión, y afloran de manera escarpada, en algunos casos como deslizamientos; se extiende por la margen izquierda del valle

5.5 Geodinámica del Proyecto

5.5.1 Externa

Todo lo señalado líneas arriba configura el área del Proyecto como una zona de abundantes movimientos en masa, inundaciones, y erosión fluvial, que en su mayoría son causados por su topografía, intensas precipitaciones de lluvia y procesos de deforestación.

En estudios posteriores será oportuno identificar la actividad actual de los peligros mencionados, cuantificarlos y establecer las soluciones ingenieriles para la protección de la planta.

5.5.2 Interna

De acuerdo al mapa de zonificación sísmica del Perú del Instituto Geofísico del Perú (IGP), según la Norma Sismo Resistente (NTE E-30. 2016), el área del Proyecto se encuentra en la zona sísmica 2 ($Z=0.25$), con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años.

El peligro sísmico en el área del Proyecto se evaluó preliminarmente por medio del mapa de aceleraciones sísmicas del Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), elaborado por Castillo y Alva en 1993.

En la Figura 5.2 se presenta el peligro sísmico en el área del Proyecto.

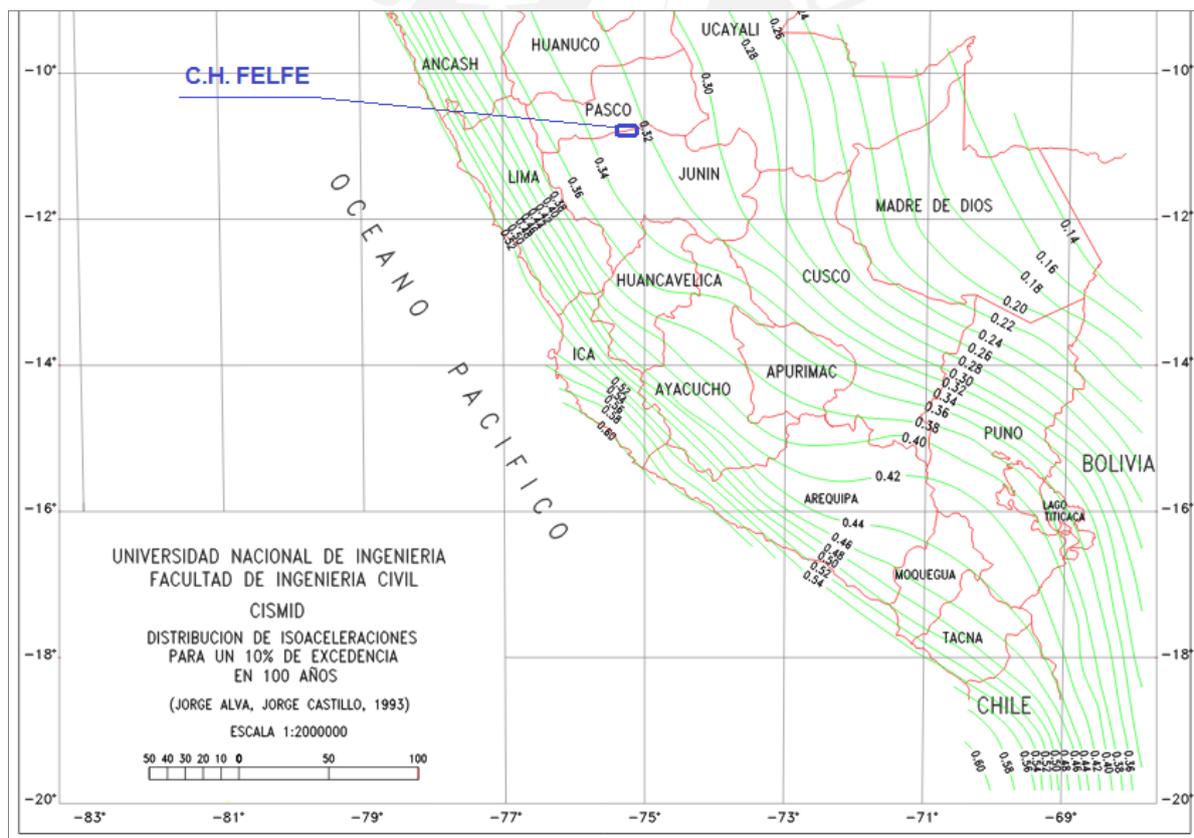


Figura 5.2 Aceleraciones sísmicas para 10% de excedencia y $T_R = 100$ años.

Adaptado de: CISMID, 2009.

Del gráfico anterior se desprende que las aceleraciones sísmicas máximas estarían entre 0.27g y 0.33g, para 50 y 100 años de periodo de retorno respectivamente.

6. EVALUACIÓN DE HIDROLOGÍA

En este capítulo se estimó la disponibilidad hídrica superficial de la Quebrada Raymondi, para fines de del proyecto Central Hidroeléctrica FELFE. En esta actividad se utilizó herramientas digitales a través del Sistema de Información Geográfica QGIS.

6.1 Información Cartográfica

Para describir las características de la cuenca se utilizó curvas de nivel a 50 m de cartas nacionales, elaboradas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

En la Tabla 6.1 se muestra la información cartográfica de base:

| Carta | Descripción |
|------------------|-------------|
| 22- L | Utcumayo |
| 22- M | Oxapampa |
| Escala 1:100'000 | |

Tabla 6.1 Hojas cartográficas del IG, proyecto C.H. FELFE.

6.2 Cuenca Hidrográfica

El sistema de drenaje del área del Proyecto comprende los siguientes aspectos:

6.2.1 Descripción

A nivel regional, el área del Proyecto pertenece a la cuenca del Río Perené, que está conformado por cinco principales subcuencas: Río Paucartambo, Río Tulumayo, Río Oxabamba, Río Pucusani, y Río Aladino. Hidrográficamente, la cuenca del Río Perené se caracteriza por tener un caudal voluminoso, cauce amplio y meándrico, con una extensión aproximada de 12,820 km²; sus aguas fluyen en dirección O-E, hasta su desembocadura en el Río Ene.

A su vez, el Río Paucartambo, nace de los nevados de la Cordillera Huachón y de las lagunas del flanco oriental de la Cordillera de Los Andes; sus aguas discurren en dirección O-E, hasta su desembocadura en el Río Perené. Hidrográficamente, la subcuenca del Río Paucartambo, hasta la confluencia con la Quebrada Raymondi, tiene una extensión aproximada de 2,980 km².

La micro cuenca Quebrada Raymondi es un afluente del Río Paucartambo por la margen derecha, en el tramo previo a su confluencia con el Río Chanchamayo, a partir del cual dan lugar al Río Perené. Así, la Quebrada Raymondi integra la gran unidad hidrográfica del Ucayali, y ésta pertenece a la Vertiente del Atlántico.

La red hídrica de la Quebrada Raymondi está conformada por la Quebrada Villena por la margen izquierda; y por la Quebrada Bagre, en la margen derecha hasta su desembocadura en el Río Paucartambo. Hidrográficamente, la micro cuenca Quebrada Raymondi, hasta su desembocadura en el Río Paucartambo, tiene una extensión aproximada de 142 km².

El clima de la micro cuenca Quebrada Raymondi es cálido y húmedo, con calor intenso en el día y cierta sensación de frío en la noche. Las lluvias son copiosas entre noviembre y abril, y escasas el resto del año. La temperatura media anual varía entre 21°C y 23°C.

En la Figura 6.1 se presenta la delimitación hidrográfica del área del Proyecto.



Figura 6.1 Cuenca hidrográfica del proyecto. C.H. FELFE.
Adaptado de: Bing Maps.

6.2.2 Fisiografía

La Quebrada Raymondi, afluente del Río Paucartambo por la margen derecha, tiene una extensión longitudinal de 13,700 m aproximadamente. El recurso hídrico se forma de la confluencia de las quebradas Villena y Bagre, hasta su vertimiento en el Río Paucartambo.

La fisiografía comprende el estudio del funcionamiento de una cuenca y su red de drenaje, por medio de relaciones matemáticas como el coeficiente de compacidad (Kc), el factor de forma (Kf), entre otros, que permiten establecer parámetros de comparación entre cuencas hidrológicamente similares.

En el Cuadro 6.1 se presenta las características de forma de la micro cuenca de la Quebrada Raymondi, hasta la zona de captación del Proyecto:

| Ac | Pc | Hm | Lr | Sr | Kc | Kf | Dd | Tc |
|-----------------|------|-------|------|------|-----|-----|-----------------------|-----|
| km ² | km | msnm | km | % | | | (km/km ²) | (h) |
| 133.0 | 51.0 | 2,760 | 13.7 | 11.8 | 1.2 | 0.7 | 0.2 | 2.6 |

Cuadro 6.1 Fisiografía de la micro cuenca Quebrada Raymondi, C.H. FELFE.

Del cuadro anterior se la micro cuenca tiene forma ovalada, con producción de inundaciones ante avenidas, y drenaje bajo. Asimismo, se estima que una gota de

lluvia tarda 2.6 horas para recorrer desde la divisoria de aguas hasta la zona de captación del Proyecto.

6.2.3 Ecología

La ecología del Proyecto ha sido caracterizada por el método de Zonas de Vida de Holdridge (1967), que sugiere que los ecosistemas partieron de la interacción en el tiempo entre elementos químicos básicos existentes en la atmósfera, de la capa del suelo derivada de la descomposición de la roca, del agua como medio para la disolución, el calor y la luz como fuente de energía para la generación de vida.

Según esta teoría, la micro cuenca Raymondi comprende las siguientes zonas de vida: páramo pluvial subalpino Tropical (pp-sat), bosque muy húmedo montano bajo tropical (bmh-mbt), y bosque húmedo premontano tropical (bh-pt).

En la Figura 6.2 se resume las características de la micro cuenca Raymondi.

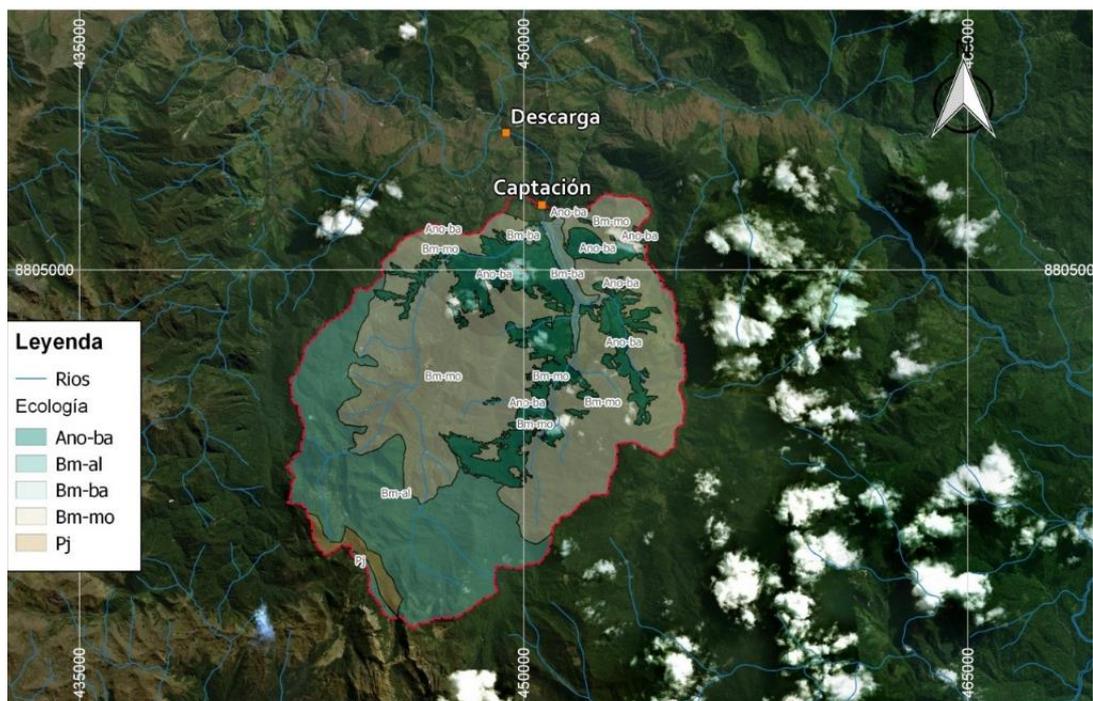


Figura 6.2 Zonas de vida de la micro cuenca Raymondi, C.H. FELFE.

6.3 Régimen de Lluvias

En este acápite se estimó la precipitación media anual en la micro cuenca Raymondi y su distribución espacial, en base a información de datos históricos medios mensuales.

6.3.1 Información Base

En vista de que la micro cuenca Raymondi se encuentra en un área geográficamente apartada, no dispone de información pluviométrica. Por ello, se utilizó el informe “Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca Ene-Perené”, elaborado en 2015, que cuenta con registros pluviométricos a nivel medio mensual.

Dentro de las cuencas delimitadas en el estudio líneas arriba mencionado, se seleccionó un área que corresponde a la confluencia de los ríos Paucartambo y Chanchamayo, la cual da origen al Río Perené; en adelante se denominará “Oya Perené”.

La red de la Oya Perené recoge mediciones de una cuenca de 10,580 km², comprendido en el periodo 1965 a 2013. Se asumió la confiabilidad de los datos, tanto en su consistencia como en su completación y extensión.

En el Cuadro 6.2 se presenta la información base, a nivel medio mensual.

| Estación | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | TOTAL |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Altos Machay | 207.0 | 220.7 | 220.5 | 125.6 | 56.7 | 30.9 | 29.8 | 46.8 | 77.6 | 137.1 | 148.2 | 176.2 | 1477.0 |
| Huangush Alto | 236.4 | 248.1 | 257.9 | 138.1 | 68.6 | 41.5 | 40.5 | 57.7 | 101.8 | 162.4 | 159.9 | 208.7 | 1721.8 |
| Huangush Bajo | 232.8 | 253.3 | 265.0 | 144.7 | 68.7 | 40.1 | 38.7 | 56.0 | 98.2 | 165.2 | 164.0 | 204.2 | 1730.9 |
| Jaico | 212.6 | 224.0 | 228.8 | 128.9 | 60.6 | 33.9 | 32.9 | 50.4 | 81.9 | 142.2 | 148.3 | 182.6 | 1527.1 |
| Lechecocha | 214.8 | 223.0 | 231.7 | 128.2 | 59.8 | 37.1 | 33.5 | 48.9 | 84.7 | 143.5 | 148.1 | 180.1 | 1533.6 |
| Pacchapata | 196.4 | 211.1 | 211.5 | 116.3 | 51.9 | 30.1 | 26.3 | 42.0 | 73.2 | 128.1 | 138.1 | 163.7 | 1388.8 |
| Oxapampa | 232.3 | 252.5 | 216.3 | 119.1 | 54.6 | 45.2 | 50.5 | 51.5 | 65.9 | 127.8 | 141.2 | 218.7 | 1 575.5 |
| Pichanaky | 297.9 | 225.4 | 213.6 | 109.1 | 62.3 | 28.3 | 40.8 | 45.1 | 62.8 | 114.9 | 161.1 | 314.5 | 1 675.6 |
| Tarma | 56.1 | 59.4 | 62.7 | 24.8 | 9.8 | 5.0 | 4.8 | 8.3 | 14.9 | 33.4 | 34.5 | 49.8 | 363.4 |
| Huasahuasi | 78.1 | 83.3 | 91.6 | 43.7 | 19.5 | 10.0 | 9.6 | 14.9 | 25.8 | 50.1 | 42.7 | 67.3 | 536.8 |
| Pampa Whaley | 226.1 | 181.8 | 177.0 | 114.8 | 87.6 | 41.5 | 45.9 | 54.8 | 72.4 | 119.8 | 101.5 | 191.6 | 1414.7 |
| Comas | 128.3 | 146.4 | 135.8 | 56.7 | 26.7 | 14.2 | 20.1 | 26.4 | 54.0 | 86.3 | 88.5 | 118.5 | 901.9 |
| Satipo | 272.8 | 242.4 | 208.9 | 130.6 | 98.0 | 63.0 | 65.9 | 83.9 | 97.4 | 179.1 | 189.7 | 236.8 | 1 868.4 |
| Puerto Ocopa | 175.9 | 180.8 | 126.1 | 67.0 | 38.1 | 30.9 | 30.5 | 38.5 | 59.9 | 85.3 | 109.5 | 184.5 | 1 127.0 |
| Ricrán | 104.7 | 114.3 | 109.1 | 59.2 | 22.2 | 9.3 | 9.3 | 13.5 | 29.5 | 69.7 | 71.6 | 104.0 | 716.5 |
| San Eloy | 261.1 | 253.5 | 250.8 | 192.0 | 109.4 | 78.5 | 87.1 | 72.2 | 105.2 | 180.9 | 168.1 | 214.4 | 1973.1 |
| Runatullo | 151.2 | 159.1 | 141.0 | 68.3 | 30.9 | 20.6 | 26.8 | 33.8 | 65.7 | 98.4 | 93.1 | 131.9 | 1 020.7 |
| Meza Pata | 335.0 | 318.3 | 252.6 | 174.4 | 97.9 | 76.5 | 82.8 | 85.8 | 106.0 | 152.9 | 170.1 | 247.8 | 2 099.9 |
| Machente | 351.5 | 339.8 | 346.5 | 187.8 | 95.4 | 53.6 | 47.7 | 118.4 | 169.7 | 213.2 | 220.6 | 247.0 | 2 391.2 |

Cuadro 6.2 Información pluviométrica media multianual, Oya Perené.

6.3.2 Tratamiento

La precipitación media de la micro cuenca se determinó con el siguiente tratamiento:

- i. se localizó geográficamente un total de 27 estaciones pluviométricas, entre reales y virtuales, de información validada en la Oya; es decir, con información consistente, completa y extendida para el periodo 1965 – 2013
- ii. en cada pluviómetro se asignó el total de precipitaciones medias anuales y mensuales, en mm
- iii. se generó isoyetas medias anuales en la Oya, por medio de la interpolación tipo “inversa de la distancia” (IDW, siglas en inglés), ya que ésta considera la posición geográfica de los pluviómetros (ver Figura 6.3)

- iv. se generó polígonos de Thiessen con los pluviómetros disponibles para determinar la influencia de las lluvias mensuales de cada estación en la micro cuenca Raymondi (ver Figura 6.4)

En las Figuras 6.3 y 6.4 se presenta los resultados del tratamiento de datos.

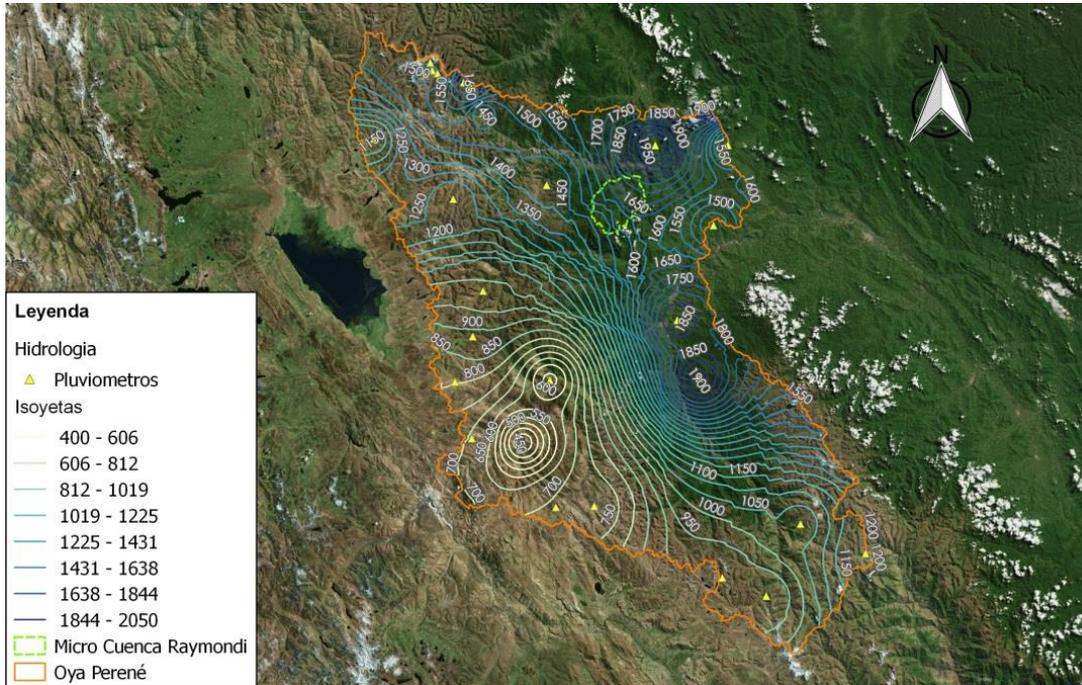


Figura 6.3 Isoyetas multianual promedio en la Oya Perené.

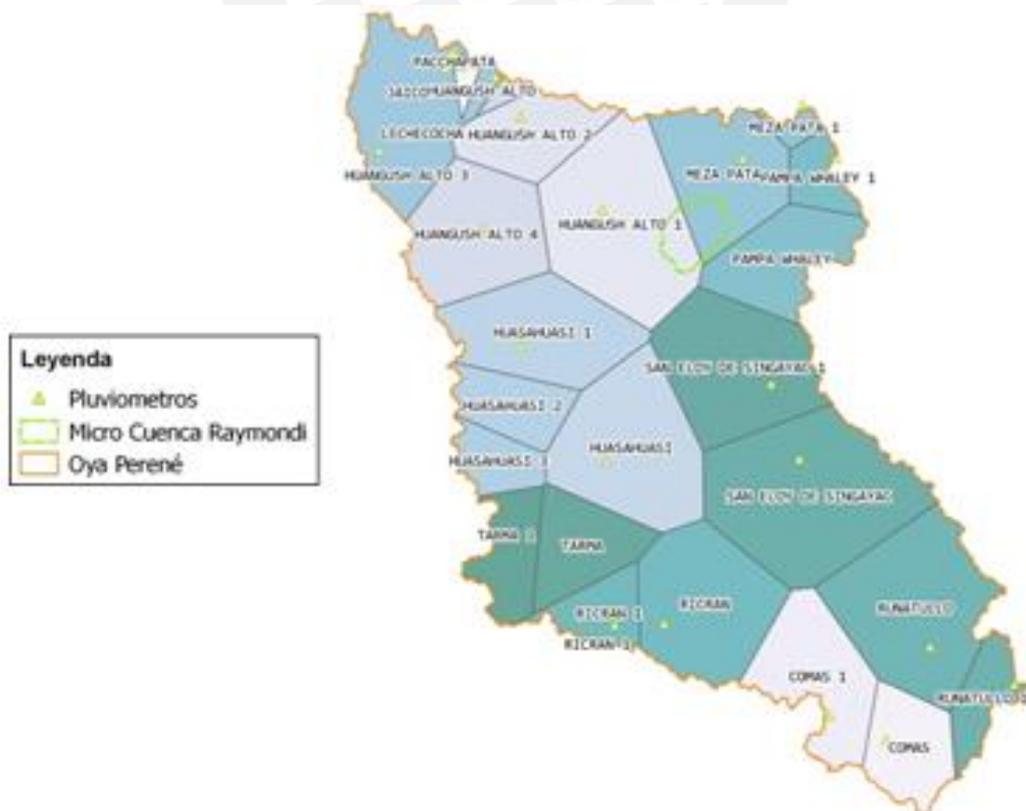


Figura 6.4 Polígonos Thiessen en la Oya Perené.

6.3.3 Distribución Temporal

La distribución temporal de las precipitaciones consiste en una serie de valores medios mensuales, comprendidos entre 1965 y 2013.

En la Figura 6.5 se presenta los resultados de distribución temporal de precipitaciones.

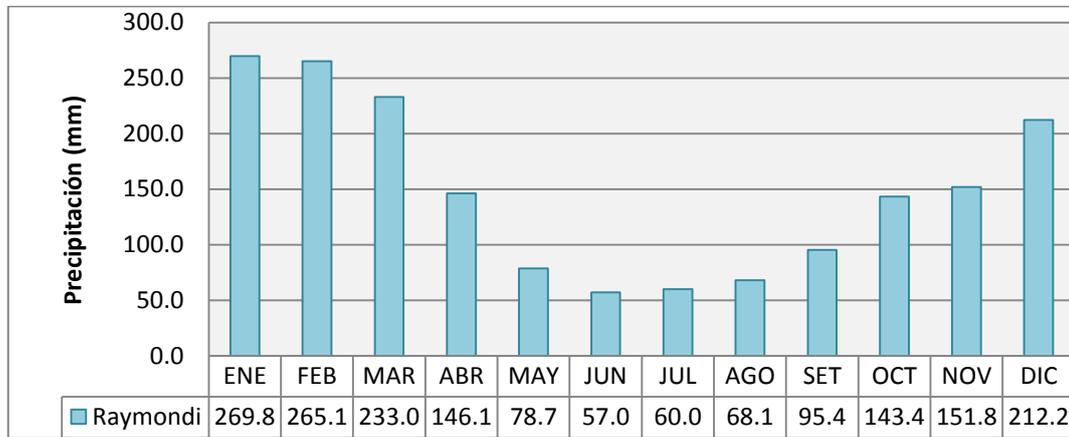


Figura 6.5 Distribución temporal de las precipitaciones. micro cuenca Raymondi.

Del gráfico anterior se observó que las lluvias son regulares todo el año, con mayor intensidad entre setiembre y abril, típico de regiones climáticas tipo bosque muy húmedo.

El rango de lluvias mensual varía entre 57 mm hasta 270 mm. La precipitación total multianual es 1,781 mm; y la precipitación media multianual, 148 mm/año.

6.3.4 Distribución Espacial

La distribución espacial se realizó por medio de isoyetas de valores medios multianuales, comprendidos entre 1965 y 2013.

En la Figura 6.6 se presenta la distribución espacial en el área del Proyecto.

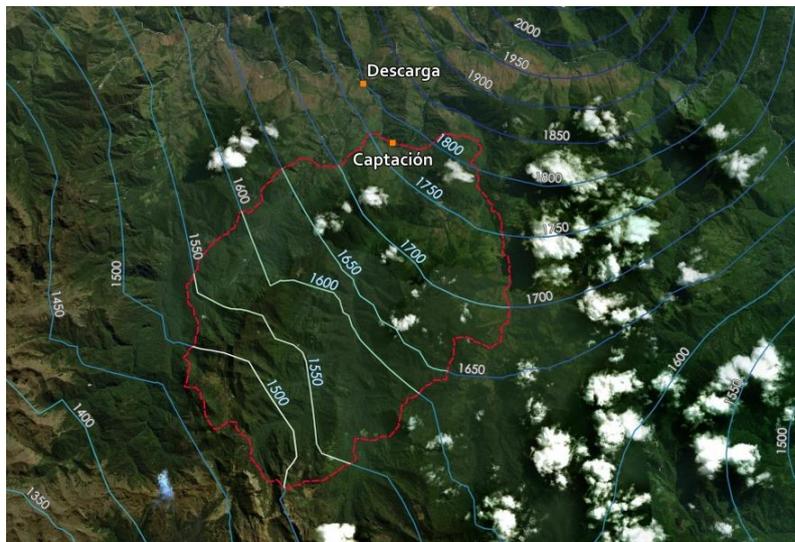


Figura 6.6 Distribución espacial de las precipitaciones. micro cuenca Raymondi.

6.4 Escurrimientos Superficiales

En este acápite se estimó un registro de escurrimientos superficiales, a nivel medio mensual, en la zona de captación del Proyecto.

6.4.1 Información Base

Al igual que con los de lluvia, la micro cuenca Raymondi no dispone de información hidrométrica. Por ello, se utilizó el informe “Evaluación de Recursos Hídricos en subcuencas del Río Tarma”, elaborado en 2013, que cuenta con registros de escurrimientos a nivel medio mensual.

Dentro de las unidades hidrográficas del Río Perené, descritas en el estudio líneas arriba mencionado, existen ríos importantes que lo forman, entre ellos se encuentra el Río Paucartambo por la margen izquierda; y por la margen derecha, el Río Tarma, que cuenta con una estación hidrométrica denominada “Estación Puente Chuquisunca”. Por tanto, se seleccionó el área correspondiente al Río Tarma; en adelante se denominará “Oya Tarma”.

La matriz de datos histórica, de escurrimientos superficiales, corresponde a la estación hidrométrica Puente Chuquisunca, en el Río Tarma (pertenece a la empresa EDEGEL). La estación recoge escurrimientos de una cuenca de 1,948 km². Se asumió la confiabilidad de los datos, tanto en su consistencia como en su completación y extensión.

La información original de registros históricos del Puente Chuquisunca comprende el periodo 1993 a 2008; los valores son medios mensuales.

En el Cuadro 6.3 y 6.4 se presenta la información base de caudales.

| Estación | Este | Norte | Altitud |
|--------------------|---------|-----------|---------|
| | (m) | (m) | (msnm) |
| Puente Chuquisunca | 443 584 | 8 758 212 | 1,868 |

Cuadro 6.3 Estación hidrométrica de referencia, Oya Tarma.

| AÑO | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1993 | 21.9 | 31.1 | 34.7 | 27.1 | 20.7 | 12.8 | 10.4 | 11.3 | 13.6 | 12.8 | 23.8 | 63.4 |
| 1994 | 40.5 | 64.4 | 47.6 | 31.1 | 16.1 | 12.4 | 10.6 | 9.3 | 9 | 9.2 | 10.5 | 11.6 |
| 1995 | 16.9 | 18.3 | 44.1 | 17.9 | 12.7 | 9 | 8.6 | 7.6 | 7.8 | 7.9 | 15.2 | 13.7 |
| 1996 | 20.7 | 25.4 | 36.9 | 33.5 | 13 | 9.5 | 8.6 | 8.4 | 8.8 | 9 | 9.9 | 11.7 |
| 1997 | 20.6 | 59.9 | 36.2 | 10.7 | 10.3 | 8.1 | 8 | 8.5 | 9.8 | 11.7 | 14 | 26.5 |
| 1998 | 31.1 | 45.9 | 49 | 21.8 | 8.5 | 9.6 | 9.3 | 8.2 | 9.2 | 11.7 | 17.7 | 16.5 |
| 1999 | 51.9 | 80.4 | 57.3 | 48 | 25.9 | 16.1 | 13.1 | 10.9 | 11.1 | 12 | 14.1 | 19.3 |
| 2000 | 42.2 | 43.2 | 54.4 | 38.6 | 19.1 | 12.9 | 10.1 | 9.3 | 8.5 | 9.2 | 8 | 16.1 |
| 2001 | 43.7 | 48.9 | 48.6 | 33 | 17.2 | 11.1 | 9.4 | 7.8 | 7.3 | 9.8 | 12.6 | 19.3 |
| 2002 | 10.6 | 35.3 | 40.5 | 30.9 | 15 | 9.1 | 14.4 | 7.8 | 10.3 | 15.3 | 25 | 26.4 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2003 | 22.1 | 33.9 | 39.8 | 27.6 | 15.4 | 9.9 | 8.1 | 8.5 | 7.4 | 7.5 | 6.4 | 18.7 |
| 2004 | 14.7 | 22.7 | 22.2 | 12.8 | 8.7 | 7 | 7.8 | 7.8 | 8.9 | 18.8 | 12.8 | 24.2 |
| 2005 | 19.7 | 22.4 | 27.6 | 16.1 | 8.5 | 6.3 | 6.1 | 5.1 | 5.4 | 8.8 | 6.3 | 13.3 |
| 2006 | 26.2 | 27.2 | 33.2 | 30.5 | 11.5 | 8.8 | 6.5 | 6.5 | 6.1 | 11 | 16.6 | 18.9 |
| 2007 | 29 | 26 | 38.8 | 21.3 | 14 | 8.3 | 7.4 | 6.1 | 6.1 | 10.3 | 10.9 | 17.3 |
| 2008 | 29.8 | 35.4 | 31.1 | 23.1 | 11.8 | 8.3 | 6.4 | 5.9 | 5.2 | 10.7 | 7.6 | 15.1 |
| MEDIA | 27.6 | 38.8 | 40.1 | 26.5 | 14.3 | 10.0 | 9.1 | 8.1 | 8.4 | 11.0 | 13.2 | 20.8 |
| MAX | 51.9 | 80.4 | 57.3 | 48 | 25.9 | 16.1 | 14.4 | 11.3 | 13.6 | 18.8 | 25 | 63.4 |
| MIN | 10.6 | 18.3 | 22.2 | 10.7 | 8.5 | 6.3 | 6.1 | 5.1 | 5.2 | 7.5 | 6.3 | 11.6 |

Cuadro 6.4 Información hidrométrica base, estación Puente Chuquisunca.

6.4.2 Tratamiento

Los ecosistemas se forman de la combinación de calor, luz, humedad y suelo, que habitan en una unidad hidrográfica. Entonces, mediante una comparación cualitativa ecológica entre cuencas, se espera que las respuestas hidrológicas sean similares; esta técnica se denomina “similitud de cuencas”.

La escorrentía superficial naturalizada se determinó con el siguiente tratamiento:

- i. se estimó el escurrimiento promedio anual de las cuencas Oya Tarma y Raymondi, por el criterio de zonas de vida (nomogramas)
- ii. se determinó la similitud de cuencas entre Oya Tarma y Raymondi, por medio del rendimiento hídrico de sus respuestas hidrológicas
- iii. se realizó la transferencia hidrológica de escurrimientos a la micro cuenca Raymondi en la zona de captación del Proyecto

Finalmente, se realizó la transferencia hidrológica, que consiste en transponer los escurrimientos de una cuenca en otra por medio de factores hidrológicos que reflejan la similitud entre cuencas; se define como sigue:

$$Q_S = \left(\frac{A_S}{A_C}\right)\left(\frac{P_S}{P_C}\right)Q_C$$

donde: Q_S es el caudal de la cuenca sin información, en m^3/s ; Q_C es el caudal de la cuenca con información, en m^3/s ; A_S es el área de la cuenca sin información, en m^2 ; A_C es el área de la cuenca con información, en m^2 ; P_S es la precipitación de la cuenca sin información, en mm; P_C es la precipitación de la cuenca con información, en mm.

En el Cuadro 6.5 se presenta los factores empleados en la transferencia hidrológica:

| Sección de Aforo | Área | Precipitación |
|-----------------------|------------|---------------|
| | (km^2) | (mm) |
| Bocatoma del Proyecto | 133.0 | 1,780.6 |
| Oya Tarma | 2,04 | 381.7 |

Cuadro 6.5 Parámetros de transferencia hidrológica.

6.4.3 Generación de Caudales

La serie de caudales del Proyecto fue estimada mediante la técnica de transferencia hidrológica, cuya formulación fue citada líneas arriba. a nivel medio mensual.

En Cuadro 6.6 y Figura 6.7 se presenta los caudales medios mensuales del Proyecto:

| AÑO | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | MEDIA |
|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|
| 1964 | 3.5 | 7.5 | 9.2 | 8.6 | 7.0 | 5.5 | 4.2 | 3.2 | 3.2 | 2.6 | 4.5 | 4.7 | 5.3 |
| 1965 | 6.3 | 9.2 | 8.8 | 8.5 | 6.4 | 4.9 | 3.3 | 3.0 | 4.6 | 3.6 | 3.0 | 4.2 | 5.5 |
| 1966 | 8.4 | 9.0 | 10.1 | 7.8 | 6.0 | 4.3 | 3.1 | 2.3 | 1.7 | 3.7 | 4.9 | 4.3 | 5.5 |
| 1967 | 5.9 | 13.5 | 13.2 | 9.3 | 6.8 | 5.4 | 4.6 | 3.5 | 2.5 | 4.4 | 3.3 | 3.5 | 6.3 |
| 1968 | 6.0 | 6.9 | 11.3 | 7.1 | 4.9 | 3.6 | 2.6 | 2.8 | 2.3 | 2.7 | 3.0 | 4.6 | 4.8 |
| 1969 | 5.7 | 10.3 | 10.6 | 11.0 | 7.0 | 5.7 | 3.8 | 2.5 | 1.8 | 1.8 | 1.5 | 3.3 | 5.4 |
| 1970 | 5.3 | 6.4 | 6.4 | 6.9 | 5.0 | 4.0 | 3.1 | 2.1 | 4.1 | 3.1 | 2.8 | 4.7 | 4.5 |
| 1971 | 9.6 | 10.4 | 11.5 | 9.0 | 6.6 | 4.8 | 3.2 | 2.1 | 1.6 | 1.2 | 1.6 | 4.6 | 5.5 |
| 1972 | 5.7 | 9.2 | 14.4 | 11.6 | 7.9 | 5.5 | 3.8 | 2.6 | 2.1 | 3.2 | 4.1 | 5.5 | 6.3 |
| 1973 | 7.0 | 8.5 | 8.8 | 6.9 | 4.7 | 3.5 | 2.6 | 1.9 | 1.6 | 2.3 | 2.2 | 9.0 | 4.9 |
| 1974 | 15.5 | 17.3 | 13.8 | 11.8 | 7.3 | 5.2 | 3.6 | 3.0 | 2.8 | 3.0 | 2.5 | 2.9 | 7.4 |
| 1975 | 7.1 | 10.4 | 13.1 | 9.5 | 7.1 | 5.5 | 3.6 | 2.6 | 3.1 | 2.4 | 2.1 | 3.3 | 5.8 |
| 1976 | 7.6 | 8.8 | 8.1 | 6.3 | 4.9 | 3.5 | 2.7 | 1.9 | 2.1 | 1.3 | 0.6 | 0.5 | 4.0 |
| 1977 | 3.4 | 3.5 | 3.9 | 3.1 | 2.8 | 2.3 | 1.7 | 1.1 | 1.3 | 0.9 | 3.7 | 5.2 | 2.7 |
| 1978 | 6.5 | 6.8 | 6.0 | 4.2 | 3.1 | 2.5 | 1.7 | 1.2 | 1.1 | 2.9 | 3.0 | 2.4 | 3.4 |
| 1979 | 4.3 | 11.5 | 18.8 | 11.0 | 6.8 | 4.7 | 3.1 | 2.0 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.4 | 5.6 |
| 1980 | 2.1 | 7.9 | 8.3 | 6.4 | 4.4 | 3.3 | 2.4 | 1.6 | 1.1 | 2.1 | 2.6 | 3.1 | 3.8 |
| 1981 | 4.8 | 15.0 | 13.3 | 9.1 | 6.1 | 4.7 | 3.1 | 2.3 | 1.8 | 3.7 | 7.0 | 7.5 | 6.5 |
| 1982 | 8.2 | 14.8 | 15.3 | 10.3 | 6.5 | 5.0 | 3.5 | 3.2 | 3.5 | 4.0 | 5.8 | 7.1 | 7.3 |
| 1983 | 9.5 | 12.0 | 12.5 | 8.9 | 6.1 | 4.9 | 3.3 | 2.3 | 2.3 | 1.6 | 1.2 | 1.2 | 5.5 |
| 1984 | 2.8 | 4.3 | 5.1 | 3.7 | 3.1 | 2.6 | 1.9 | 1.3 | 1.2 | 2.2 | 1.7 | 3.0 | 2.7 |
| 1985 | 4.5 | 10.0 | 13.5 | 12.9 | 10.4 | 7.4 | 4.8 | 3.3 | 3.5 | 3.6 | 5.1 | 6.9 | 7.2 |
| 1986 | 8.6 | 17.7 | 18.7 | 19.0 | 12.5 | 8.0 | 5.0 | 3.5 | 2.9 | 3.7 | 2.3 | 2.8 | 8.7 |
| 1987 | 5.7 | 9.1 | 7.1 | 5.6 | 4.9 | 3.7 | 2.6 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.8 | 4.3 | 4.1 |
| 1988 | 11.5 | 13.6 | 13.3 | 8.9 | 6.5 | 5.1 | 3.4 | 2.3 | 1.8 | 1.8 | 2.1 | 3.0 | 6.1 |
| 1989 | 4.8 | 9.7 | 9.5 | 7.6 | 6.5 | 5.1 | 3.5 | 2.7 | 2.7 | 7.1 | 4.7 | 3.9 | 5.7 |
| 1990 | 6.2 | 8.9 | 7.9 | 5.6 | 4.3 | 4.0 | 3.0 | 3.2 | 4.9 | 6.2 | 7.2 | 8.2 | 5.8 |
| 1991 | 9.8 | 10.2 | 12.1 | 10.1 | 8.9 | 7.5 | 4.9 | 3.1 | 2.2 | 2.4 | 1.6 | 1.4 | 6.2 |
| 1992 | 1.9 | 2.8 | 5.3 | 4.3 | 3.1 | 2.6 | 1.8 | 1.7 | 1.9 | 1.8 | 2.4 | 2.9 | 2.7 |
| 1993 | 6.7 | 9.5 | 10.6 | 8.2 | 6.3 | 3.9 | 3.2 | 3.4 | 4.1 | 3.9 | 7.2 | 19.3 | 7.2 |
| 1994 | 12.3 | 19.6 | 14.5 | 9.5 | 4.9 | 3.8 | 3.2 | 2.8 | 2.7 | 2.8 | 3.2 | 3.5 | 6.9 |
| 1995 | 5.1 | 5.6 | 13.4 | 5.4 | 3.9 | 2.7 | 2.6 | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 4.6 | 4.2 | 4.6 |
| 1996 | 6.3 | 7.7 | 11.2 | 10.2 | 4.0 | 2.9 | 2.6 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 3.0 | 3.6 | 5.0 |
| 1997 | 6.3 | 18.2 | 11.0 | 3.3 | 3.1 | 2.5 | 2.4 | 2.6 | 3.0 | 3.6 | 4.3 | 8.1 | 5.7 |
| 1998 | 9.5 | 14.0 | 14.9 | 6.6 | 2.6 | 2.9 | 2.8 | 2.5 | 2.8 | 3.6 | 5.4 | 5.0 | 6.0 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| 1999 | 15.8 | 24.5 | 17.4 | 14.6 | 7.9 | 4.9 | 4.0 | 3.3 | 3.4 | 3.6 | 4.3 | 5.9 | 9.1 |
| 2000 | 12.8 | 13.1 | 16.5 | 11.7 | 5.8 | 3.9 | 3.1 | 2.8 | 2.6 | 2.8 | 2.4 | 4.9 | 6.9 |
| 2001 | 13.3 | 14.9 | 14.8 | 10.0 | 5.2 | 3.4 | 2.9 | 2.4 | 2.2 | 3.0 | 3.8 | 5.9 | 6.8 |
| 2002 | 3.2 | 10.7 | 12.3 | 9.4 | 4.6 | 2.8 | 4.4 | 2.4 | 3.1 | 4.7 | 7.6 | 8.0 | 6.1 |
| 2003 | 6.7 | 10.3 | 12.1 | 8.4 | 4.7 | 3.0 | 2.5 | 2.6 | 2.3 | 2.3 | 1.9 | 5.7 | 5.2 |
| 2004 | 4.5 | 6.9 | 6.8 | 3.9 | 2.6 | 2.1 | 2.4 | 2.4 | 2.7 | 5.7 | 3.9 | 7.4 | 4.3 |
| 2005 | 6.0 | 6.8 | 8.4 | 4.9 | 2.6 | 1.9 | 1.9 | 1.6 | 1.6 | 2.7 | 1.9 | 4.0 | 3.7 |
| 2006 | 8.0 | 8.3 | 10.1 | 9.3 | 3.5 | 2.7 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 3.3 | 5.0 | 5.7 | 5.1 |
| 2007 | 8.8 | 7.9 | 11.8 | 6.5 | 4.3 | 2.5 | 2.3 | 1.9 | 1.9 | 3.1 | 3.3 | 5.3 | 5.0 |
| 2008 | 9.1 | 10.8 | 9.5 | 7.0 | 3.6 | 2.5 | 1.9 | 1.8 | 1.6 | 3.3 | 2.3 | 4.6 | 4.8 |
| 2009 | 8.5 | 10.3 | 12.8 | 8.9 | 5.5 | 6.4 | 4.6 | 3.4 | 2.6 | 2.3 | 4.7 | 6.4 | 6.4 |
| 2010 | 8.9 | 14.9 | 14.2 | 10.7 | 6.9 | 5.0 | 3.3 | 2.2 | 2.1 | 3.5 | 3.0 | 7.2 | 6.8 |
| 2011 | 12.6 | 15.8 | 17.8 | 14.1 | 9.4 | 6.3 | 4.1 | 2.7 | 1.9 | 4.2 | 4.9 | 9.1 | 8.6 |
| 2012 | 9.6 | 12.3 | 10.2 | 12.2 | 7.7 | 5.6 | 3.7 | 2.6 | 2.3 | 3.9 | 4.8 | 12.9 | 7.3 |
| MEDIA | 7.4 | 10.8 | 11.4 | 8.6 | 5.6 | 4.2 | 3.1 | 2.5 | 2.4 | 3.0 | 3.5 | 5.2 | 5.6 |

Cuadro 6.6 Caudales naturalizados en sección de captación, proyecto C.H. FELFE.

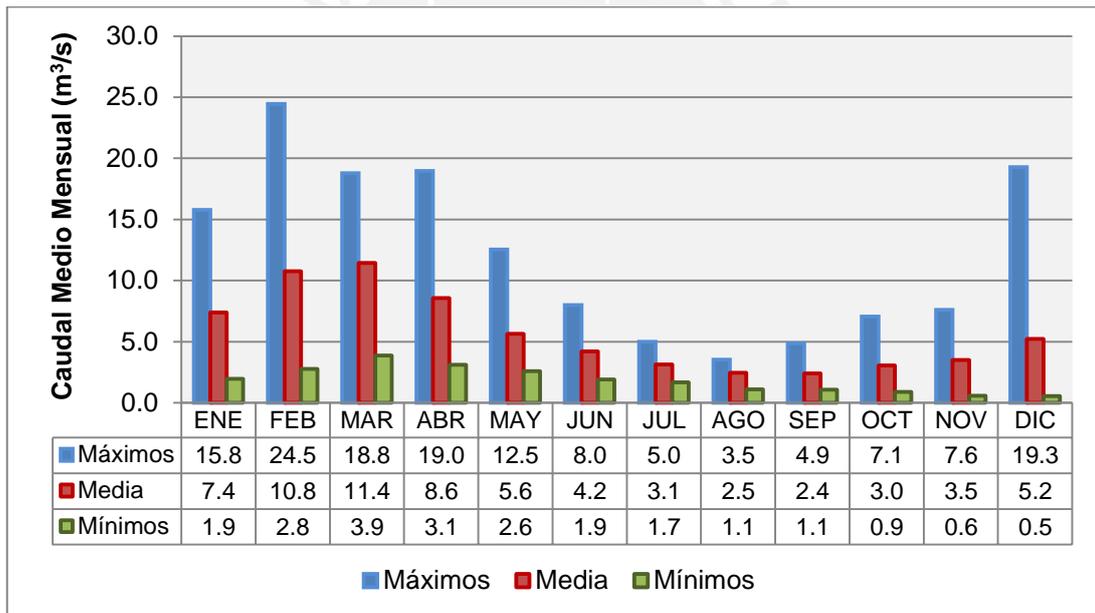


Figura 6.7 Estadísticas de caudales en sección de captación, proyecto C.H. FELFE.

6.5 Persistencia de Caudales

El registro de escurrimientos naturalizados en la sección de captación del Proyecto muestra que el caudal medio multianual es de $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$; sin embargo, a nivel mensual son variables. entre $11.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$. Por ello, se procedió a calcular la clasificación o persistencia de caudales a nivel mensual. mediante la distribución Weibull.

En la Figura 6.8 se presenta los resultados de la clasificación de caudales.

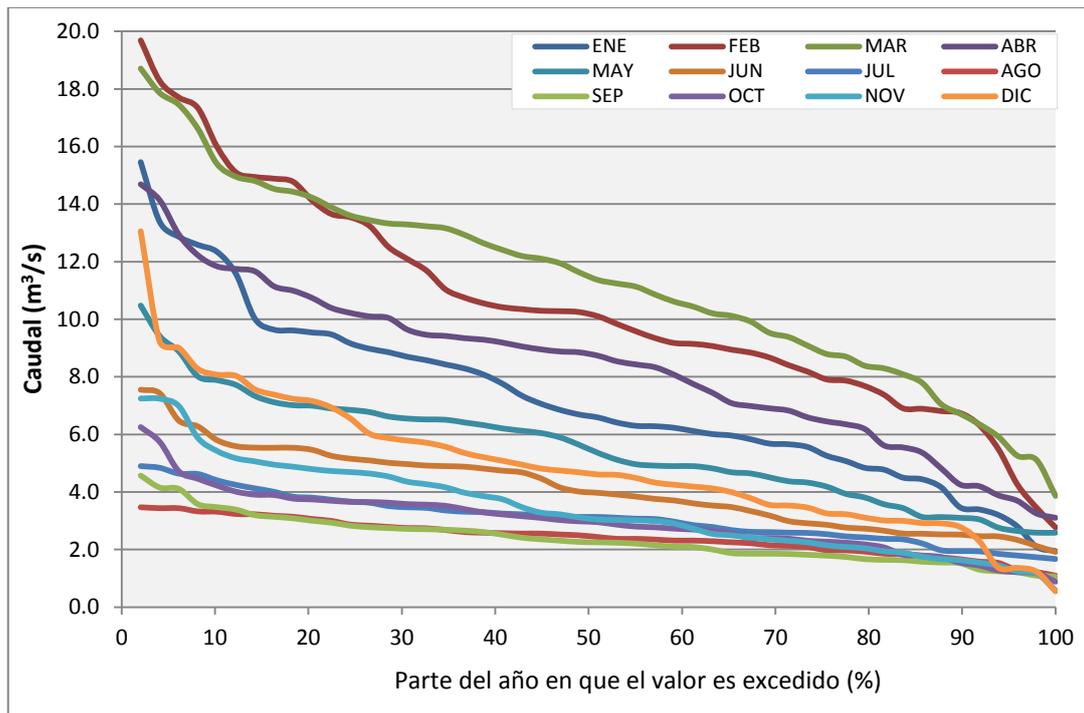


Figura 6.8 Curvas de caudales clasificados a nivel mensual, proyecto C.H. FELFE.

Del gráfico anterior se comprobó que la disponibilidad hídrica varía no sólo por percentiles, sino también por meses; por ejemplo, para el PE50%, los caudales podrían variar entre 0.23 m³/s y 11.6 m³/s.

Por tanto, el caudal de aprovechamiento de una central de pasada será aquella que cuente con un percentil y mes específicos; el resto del tiempo empezará a decrecer dicho valor, a menos que se instale una estructura de regulación, para garantizar el caudal instalado durante un cierto tiempo extra al percentil correspondiente.

6.6 Caudal Ecológico

En primer lugar, indicar que el caudal ecológico es el mínimo que debieran tener los ríos para mantener los ecosistemas, preservando la calidad ecológica, el cual es regulado en Perú por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

En segundo lugar, la Resolución Jefatural 154-2016-ANA establece el cálculo de los caudales ecológicos: uno referencial, descrito en el Art. 6; y otro de estudios específicos, descrito en el Art. 7.

Tercero, continuando con la promoción del Proyecto como una central menor a 20 MW, desde el punto de vista ambiental calificaría como Proyecto con Declaración de Impacto Ambiental.

Por tanto, se utilizó el método hidrológico de Tennant (1976), cuyo enfoque considera el grado de conservación ecológica del río, ya que se encontró que los

valores de caudal ecológico calculado por la metodología referencial implicarían demandas de agua elevadas para los fines del Proyecto; ver Figura 6.9.

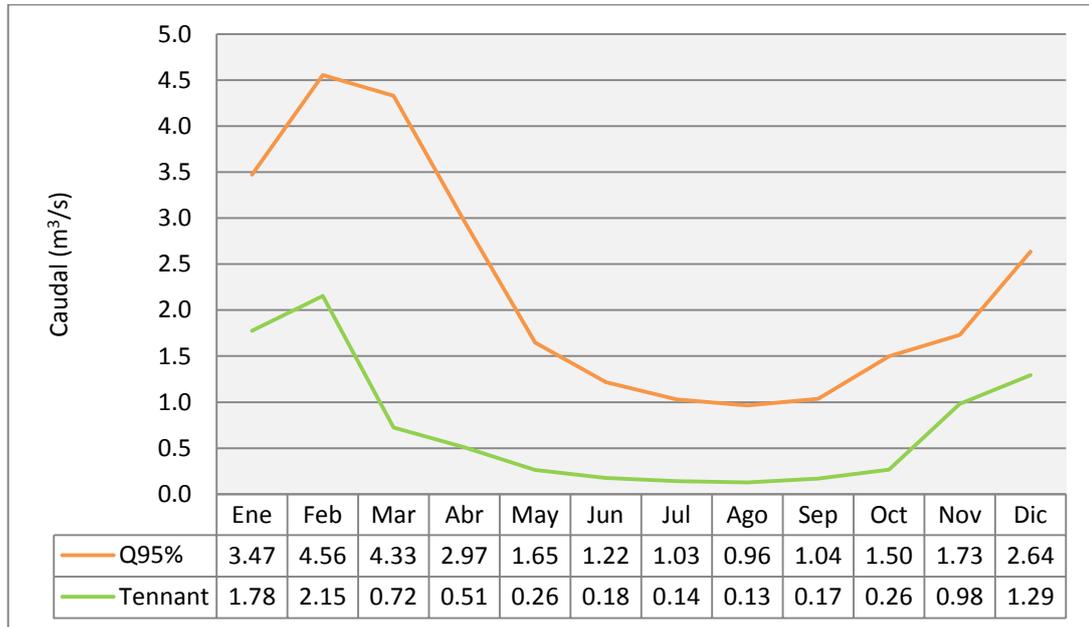


Figura 6.9 Enfoques de cálculo de caudales ecológicos, proyecto C.H. FELFE.

El método de Tennant fue desarrollado por hidrobiólogos de la ciudad de Montana – E.E.U.U, considerando datos de once ríos con poblaciones de salmónidos y de ciprínidos, según porcentaje de caudal medio anual; ver Tabla 6.2.

| Caudal Mínimo | | Clasificación | Efectos en el ecosistema |
|--------------------------|-----------|---------------|---|
| % del Caudal Medio Anual | | | |
| OCT - MAR | ABR - SET | | |
| 10 | 10 | Insuficiente | Severa degradación de la mayor parte de los elementos del entorno |
| 10 | 20 | Débil | Mínimo. Permite salvaguardar algunos hábitats para la vida acuática |
| 10 | 30 | Aceptable | Caudal recomendado para mantener los hábitats y la vida |
| 20 | 40 | Bueno | |
| 30 | 50 | Excelente | |
| 40 | 60 | Excepcional | Para los primeros periodos de crecimiento de la mayor parte de las formas de vida |
| 60 | 100 | Óptimo | |
| 200 | 0 | Limpieza | Limpieza del sustrato para evitar el estancamiento |

Tabla 6.2 Comparación de métodos de caudal ecológico.

Fuente: Tennant, 1976.

En ese sentido, bajo el supuesto de que en el tramo de la Quebrada Raymondí en aprovechamiento por el Proyecto no existen vertimientos domésticos y/o de actividades agropecuarias, que puedan poner en riesgo la calidad del agua, se asignó el grado de conservación ecológica tipo “aceptable”, con cargo a verificación en campo.

En el Cuadro 6.7 se presenta el resultado de los caudales ecológicos del Proyecto:

| Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | ANUAL |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|
| 2.2 | 3.2 | 1.1 | 0.8 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 1.0 | 1.5 | 1.0 |

Cuadro 6.7. Caudales ecológicos en m³/s, proyecto C.H. FELFE.

Cabe resaltar que la validación del método hidrológico seleccionado sólo podrá ser verificable con un posterior estudio de evaluación ambiental.

6.7 Máximas Avenidas

En el análisis de máximas avenidas para el Proyecto se utilizó el método regional Creager adaptado a Perú, que toma en cuenta el periodo de retorno de la avenida, la extensión de la cuenca y unos coeficientes dependientes de la zona del país; los periodos de retorno seleccionados fueron 25, 50 y 100 años.

Los caudales máximos, por Creager, se calculan de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Q_{max} = (C_1 + C_2) * \log(T) * A^{mA^{-n}}$$

donde: $Q_{m\acute{a}x}$ es el caudal máximo, en m³/s; T_R es el periodo de retorno, en años; A es el área de cuenca, en km²; C_1 , C_2 , m y n son las constantes hidrológicas para regiones del Perú.

En la Figura 6.10 se presenta los parámetros para el cálculo de avenidas del Proyecto.



Figura 6.10 Coeficientes Creager, proyecto C.H. FELFE.

En el Cuadro 6.8 se presenta el resultado de avenidas para el Proyecto:

| TR | Captación | Descarga |
|-----|-----------|----------|
| 25 | 120.8 | 126.3 |
| 50 | 146.8 | 153.5 |
| 100 | 172.8 | 180.7 |

Cuadro 6.8 Caudales de máximas avenidas, proyecto C.H. FELFE.

Estos valores se utilizarán en el capítulo de Ingeniería, para definir niveles de inundación tanto en bocatoma como en casa de máquinas.

7. POTENCIAL HIDROELÉCTRICO

En este capítulo se definió el caudal instalado, la capacidad de la central, y la producción de energía del proyecto Central Hidroeléctrica FELFE.

7.1 Definición de Aprovechamiento

El presente capítulo fue desarrollado en base al estudio “Evaluación Preliminar del Potencial Hidroeléctrico del Perú – HIDROGIS”, publicado en 2011 por la Dirección General de Electrificación Rural del Ministerio de Energía y Minas del Perú.

La evaluación del potencial hidroeléctrico del Proyecto planteó una serie de alternativas de capacidad, basado en criterios técnicos y económicos. En todas las alternativas, se consideró la instalación de una central de agua fluyente, con los siguientes componentes civiles:

- bocatoma
- desarenador
- canal aductor
- cámara de carga
- tubería forzada
- casa de máquinas

7.2 Costes de Construcción

Los costes de construcción fueron estimados siguiendo la pauta de la Ilustración 2.1, pero adaptado al contexto peruano. Por ello, se recopiló información de montos de inversión de hidroeléctricas de pasada, únicamente de mini centrales (menores a 20 MW), en base a las cuatro subastas RER realizadas a la fecha.

En el Figura 7.1 se muestra ratios de construcción de proyectos hidroeléctricos:

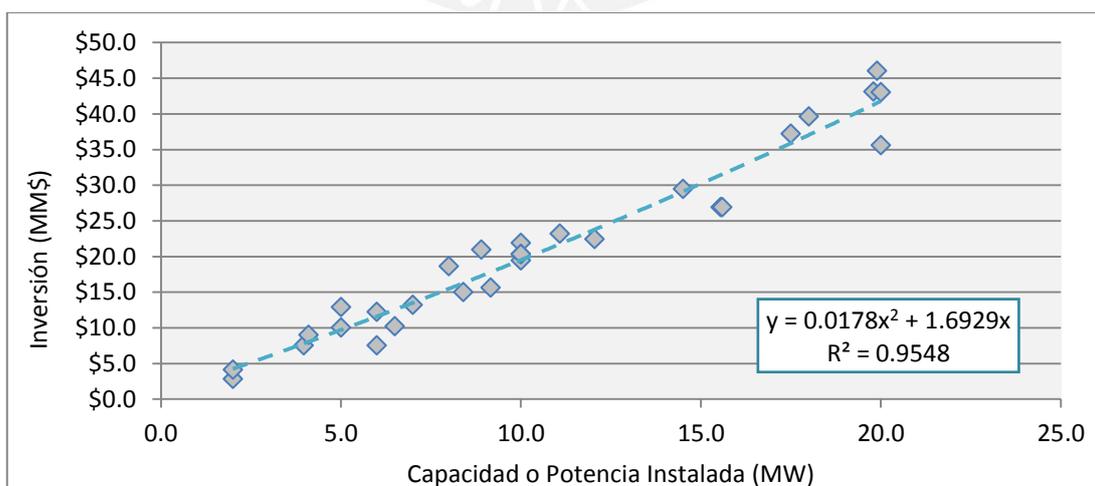


Figura 7.1 Costos de inversión en función de la capacidad, proyecto C.H. FELFE.

Del gráfico anterior se estableció una relación con buen grado de confiabilidad ($R^2=0.95$) entre la capacidad de la central y los costes de inversión, como sigue:

$$CC = 0.018 * P^2 + 1.693 * P$$

donde: CC es el costo de inversión de la central, en MM\$; P es la potencia instalada en la central, en MW. El tiempo de construcción estimado es de dos años.

Si bien existen costos de operación y mantenimiento, así como costes indirectos, en este nivel de análisis éstos no han sido considerados, ya que sus cantidades no influyen significativamente en el análisis económico.

7.3 Caudal de Diseño

En este acápite se estimó el caudal de diseño del Proyecto, en m³/s.

7.3.1 Opciones

A nivel anual, el caudal promedio del Proyecto (ítem 6.4.3) es igual a 5.6 m³/s: 8.7 m³/s en avenidas (diciembre a abril) y 3.5 m³/s en estiaje (mayo a noviembre). A nivel mensual, la duración de los caudales presenta mayor dispersión.

En la Figura 7.2 se presenta el comportamiento hidrológico para 3 persistencias mensuales.

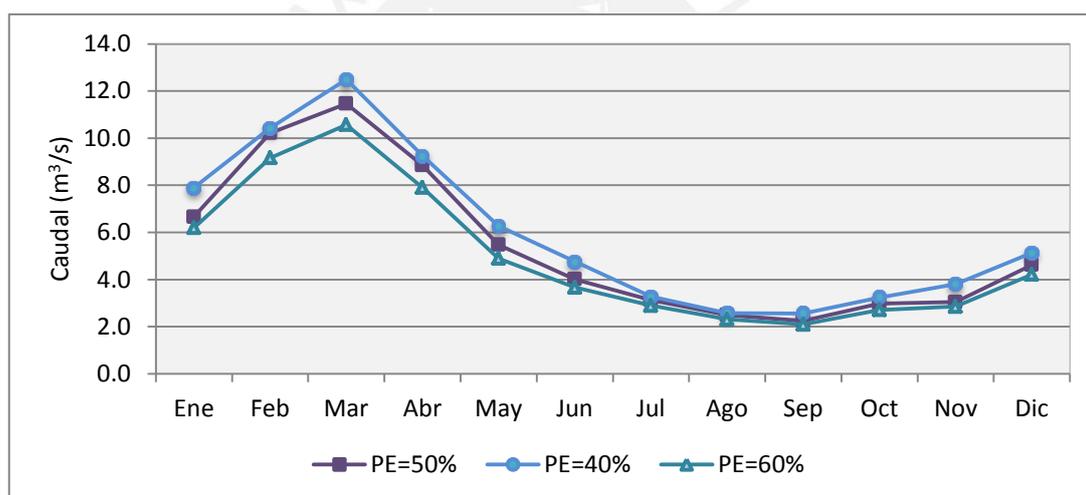


Figura 7.2 Persistencias mensuales de caudal, proyecto C.H. FELFE.

Por tanto, el HIDROGIS define que el Proyecto se encuentra en la Región 13 – Alta, con lo cual la persistencia del caudal de diseño corresponde al 60% (PE₆₀).

En el Cuadro 7.1 se presenta las opciones de caudal de diseño.

| Opción | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Caudal P ₆₀ | 4.0 | 5.9 | 9.4 | 7.0 | 4.3 | 3.2 | 2.6 | 2.1 | 1.9 | 2.4 | 1.8 | 2.6 |

Cuadro 7.1 Opciones de caudal instalado en m³/s, proyecto C.H. FELFE.

Una vez definidas las opciones de caudal de diseño, se procedió a seleccionar la más óptima de acuerdo a un análisis técnico y económico.

7.3.2 Análisis Técnico

El análisis técnico comprendió la evaluación de las opciones, en cuanto a la estimación de la potencia instalada (P_i), la energía total promedio producida (E_m) y el factor de planta (FP), dentro de un aprovechamiento de agua fluyente.

En Cuadro 7.2 y Figura 7.3 se presenta resultados de las alternativas de generación.

| Opción | Q_d | P | E_m | FP |
|--------|---------|------|-------|------|
| Nº | m^3/s | MW | GW-h | |
| I | 4.0 | 15.9 | 105.1 | 0.76 |
| II | 5.9 | 23.8 | 128.1 | 0.62 |
| III | 9.4 | 37.8 | 148.7 | 0.45 |
| IV | 7.0 | 28.2 | 136.9 | 0.56 |
| V | 4.3 | 17.4 | 110.2 | 0.73 |
| VI | 3.2 | 13.0 | 93.1 | 0.83 |
| VII | 2.6 | 10.3 | 79.3 | 0.89 |
| VIII | 2.1 | 8.3 | 66.4 | 0.93 |
| IX | 1.9 | 7.4 | 60.5 | 0.94 |
| X | 2.4 | 9.7 | 75.2 | 0.90 |
| XI | 1.8 | 7.2 | 59.0 | 0.94 |
| XII | 2.6 | 10.6 | 80.8 | 0.88 |

Cuadro 7.2 Análisis técnico de opciones de caudal de diseño, proyecto C.H. FELFE.

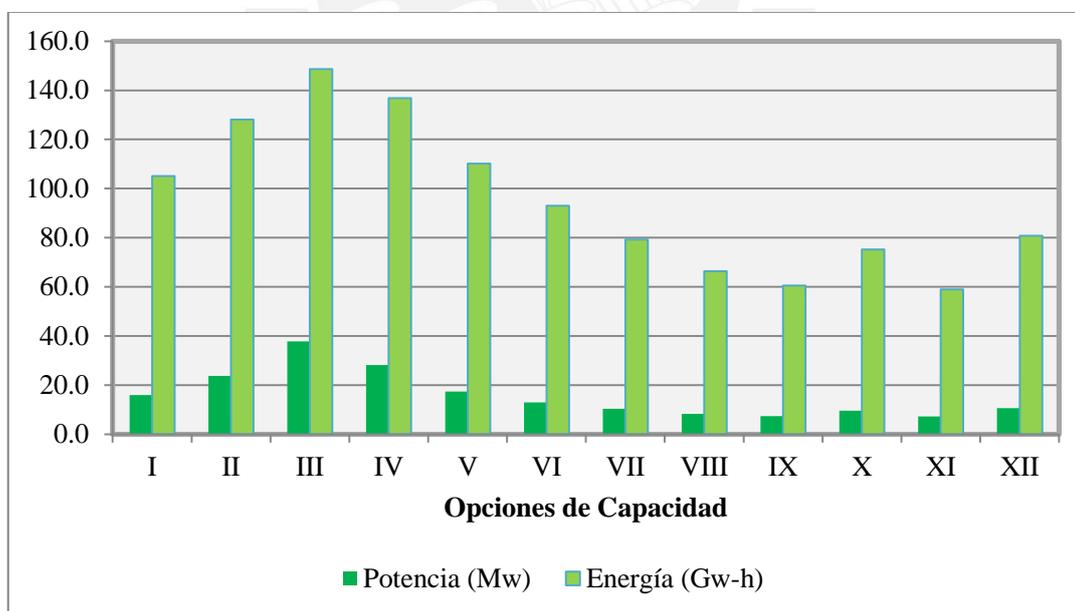


Figura 7.3 Capacidad de generación de opciones de caudal de diseño, proyecto C.H. FELFE.

Entonces, las alternativas de capacidad mayor a 20 MW perdieron su calificativo como renovables según Art.º 2. D.L. Nº 1002. Asimismo, según costumbres de buenas prácticas en aprovechamiento hidroeléctrico, las plantas con factores de planta menores a 0.75 quedaron descartadas. Por tanto, las alternativas II, III, IV y V fueron descartadas para la evaluación del caudal de diseño.

7.3.3 Análisis Económico

El análisis económico consistió en la optimización del análisis técnico, al incorporar criterios económicos a la evaluación: establecer el beneficio económico de cada alternativa, que resulta de la diferencia entre los ingresos por venta de energía y los costes de inversión de la central; la alternativa de mayor beneficio económico será la seleccionada.

Entonces, para cada opción de caudal de diseño se procedió a calcular los montos de inversión con apoyo de la Figura 7.1; y los ingresos totales a valor presente en 20 años de operación comercial, con la tarifa antes calculada (Figura 4.5).

En el Cuadro 7.3 y Figura 7.4 se presenta el resumen del análisis económico.

| Opción | Q _d | P | E _m | FP | Inversión | Ingresos | Beneficios |
|--------|-------------------|------|----------------|------|-----------|----------|------------|
| Nº | m ³ /s | MW | GW-h | | MM\$ | MM\$ | MM\$ |
| XI | 1.8 | 7.2 | 59.0 | 0.94 | 14.0 | 22.9 | 8.9 |
| IX | 1.9 | 7.4 | 60.5 | 0.94 | 14.4 | 23.4 | 9.1 |
| VIII | 2.1 | 8.3 | 66.4 | 0.93 | 16.0 | 25.7 | 9.7 |
| X | 2.4 | 9.7 | 75.2 | 0.90 | 18.8 | 29.1 | 10.3 |
| VII | 2.6 | 10.3 | 79.3 | 0.89 | 20.2 | 30.7 | 10.5 |
| XII | 2.7 | 10.7 | 80.8 | 0.88 | 20.8 | 31.4 | 10.6 |
| VI | 3.2 | 13.0 | 93.1 | 0.83 | 25.8 | 36.1 | 10.2 |
| I | 4.0 | 15.9 | 105.1 | 0.76 | 32.3 | 40.7 | 8.4 |

Cuadro 7.3 Análisis económico de opciones de caudal de diseño, proyecto C.H. FELFE.

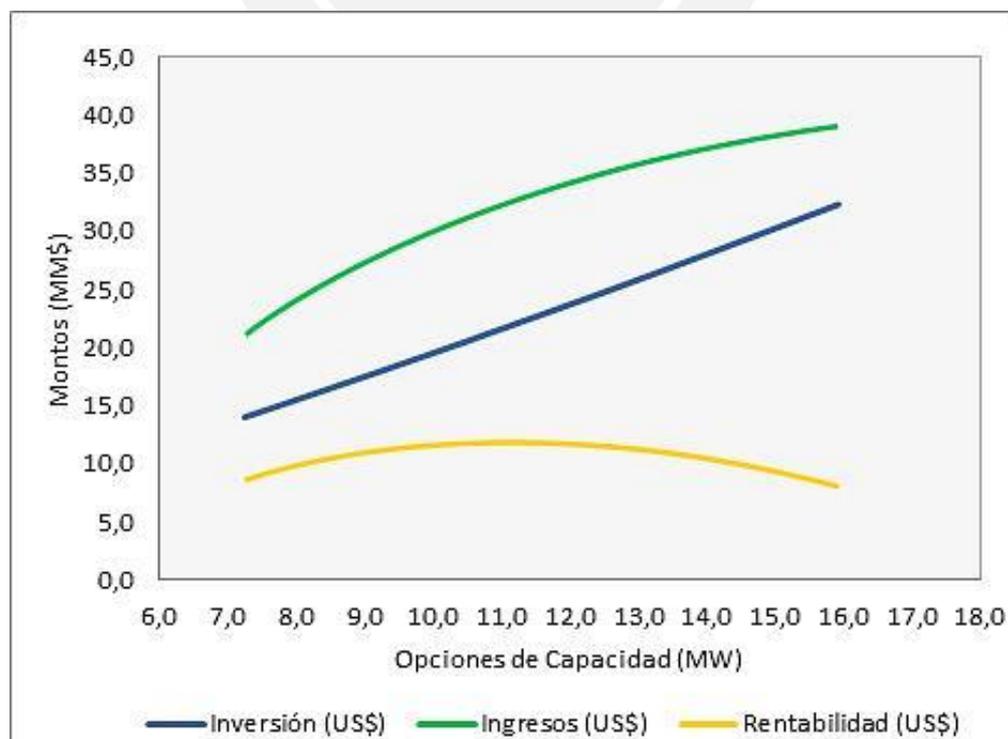


Figura 7.4 Beneficios económicos de opciones de caudal de diseño, proyecto C.H. FELFE.

Del gráfico anterior se encontró que la rentabilidad del Proyecto tiene un comportamiento parabólico invertido. El máximo valor de la función Rentabilidad indica el caudal de diseño óptimo:

$$R(P) = -0.10P^2 + 2.29P - 2.38$$

donde: R es la rentabilidad del proyecto, en MM\$; P es la capacidad de la central, en MW.

Por tanto, se obtuvo 10.7 MW de potencia óptima, y 2.7 m³/s. De esta manera se estableció el caudal de diseño instalado para el proyecto C.H. FELFE en 2.7 m³/s.

7.4 Modelo de Generación

Definido el caudal de diseño del proyecto, en 2.7 m³/s, se determinó los caudales turbinables para generación hidroeléctrica, en base a la serie hidrológica; éstos se denominaron caudales turbinables (Q_t).

Para efectos del Proyecto, los caudales turbinables resultan de la diferencia entre los naturales del recurso hídrico y las demandas de agua para otros usos, de acuerdo a la siguiente sentencia de selección:

$$Q_{min} \leq Q_t \leq Q_d$$

donde: Q_t es el caudal turbinable, en m³/s; Q_{min} es el caudal mínimo turbinable, que para turbinas Pelton es el 8.0% del caudal de diseño, en m³/s; y Q_d es el caudal de diseño, en m³/s.

En la Cuadro 7.4 se presenta los caudales turbinables del Proyecto.

| Año | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic | ANUAL |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 1964 | 1.2 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 2.7 | 2.7 | 30.6 |
| 1965 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2 | 2.6 | 31.6 |
| 1966 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2 | 1.4 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 30.4 |
| 1967 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.2 | 2.7 | 2.2 | 2 | 30.7 |
| 1968 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.2 | 2.5 | 2 | 2.4 | 2 | 2.7 | 30.1 |
| 1969 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.2 | 1.6 | 1.5 | 0.4 | 1.7 | 26.3 |
| 1970 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 2.7 | 2.7 | 1.8 | 2.7 | 30.7 |
| 1971 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 1.3 | 0.9 | 0.6 | 2.7 | 26.3 |
| 1972 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 1.9 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 31.2 |
| 1973 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 1.7 | 1.4 | 1.9 | 1.1 | 2.7 | 27.3 |
| 1974 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 2.7 | 1.5 | 1.4 | 29.6 |
| 1975 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 2.7 | 2.1 | 1.1 | 1.7 | 28.7 |
| 1976 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.4 | 1.6 | 1.8 | 1 | 0 | 0 | 23 |
| 1977 | 1.2 | 0.2 | 2.7 | 2.2 | 2.2 | 1.9 | 1.4 | 0.8 | 1.1 | 0.6 | 2.6 | 2.7 | 19.7 |
| 1978 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.6 | 2 | 1.4 | 1 | 0.9 | 2.6 | 1.9 | 0.8 | 24 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 1979 | 2 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.7 | 1 | 0.9 | 0 | 0 | 21.9 |
| 1980 | 0 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.1 | 1.3 | 0.8 | 1.8 | 1.5 | 1.6 | 22.6 |
| 1981 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.1 | 1.5 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 30.5 |
| 1982 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 32.4 |
| 1983 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.1 | 2 | 1.2 | 0 | 0 | 24.2 |
| 1984 | 0.6 | 1.1 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 2.1 | 1.6 | 1 | 1 | 1.9 | 0.6 | 1.4 | 19.3 |
| 1985 | 2.3 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 32 |
| 1986 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.2 | 1.3 | 29.5 |
| 1987 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 0.7 | 2.7 | 25.8 |
| 1988 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2 | 1.6 | 1.5 | 1 | 1.4 | 26.5 |
| 1989 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 2.5 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 31.5 |
| 1990 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 32.4 |
| 1991 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 2.1 | 0.5 | 0 | 26.2 |
| 1992 | 0 | 0 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 2.1 | 1.5 | 1.5 | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 1.4 | 18.8 |
| 1993 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 32.4 |
| 1994 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.6 | 2.5 | 2.5 | 2.1 | 2 | 30.6 |
| 1995 | 2.7 | 2.3 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 2.3 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.7 | 2.6 | 29.4 |
| 1996 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 2.3 | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 2 | 2 | 29.4 |
| 1997 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.4 | 2.6 | 2 | 2.1 | 2.3 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 30.4 |
| 1998 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2 | 2.5 | 2.5 | 2.2 | 2.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 30.7 |
| 1999 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 32.4 |
| 2000 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.6 | 2.3 | 2.5 | 1.4 | 2.7 | 30.4 |
| 2001 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 2.1 | 2 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 30.9 |
| 2002 | 1 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 2.7 | 2.1 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 29.8 |
| 2003 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.6 | 2.1 | 2.3 | 2 | 2 | 0.9 | 2.7 | 28.2 |
| 2004 | 2.3 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.1 | 1.7 | 2.1 | 2.1 | 2.5 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 28.9 |
| 2005 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.3 | 1.4 | 2.4 | 0.9 | 2.5 | 24.3 |
| 2006 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 28.9 |
| 2007 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.1 | 1.9 | 1.6 | 1.6 | 2.7 | 2.3 | 2.7 | 28.4 |
| 2008 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.1 | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 2.7 | 1.3 | 2.7 | 26.8 |
| 2009 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.4 | 2 | 2.7 | 2.7 | 31.4 |
| 2010 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 1.9 | 1.9 | 2.7 | 2 | 2.7 | 30.1 |
| 2011 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.5 | 1.6 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 31.1 |
| 2012 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.4 | 2.1 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 31.5 |

Cuadro 7.4 Serie de caudales turbinables, proyecto C.H. FELFE.

Del cuadro anterior se concluye que los caudales turbinables para el Proyecto a nivel anual, en promedio, ascienden a 28.4 m³/s. En los mismos términos, la generación media anual de potencia es 112.3 MW; entre tanto, la producción media anual de energía, a 82.0 GW-h.

Por lo tanto, en la Quebrada Raymondi, el factor de planta del proyecto Central Hidroeléctrica FELFE es 88%; el resto fluye libremente porque se trata de una central de pasada.

En la Figura 7.5 se presenta el resumen del potencial hidroeléctrico del Proyecto.

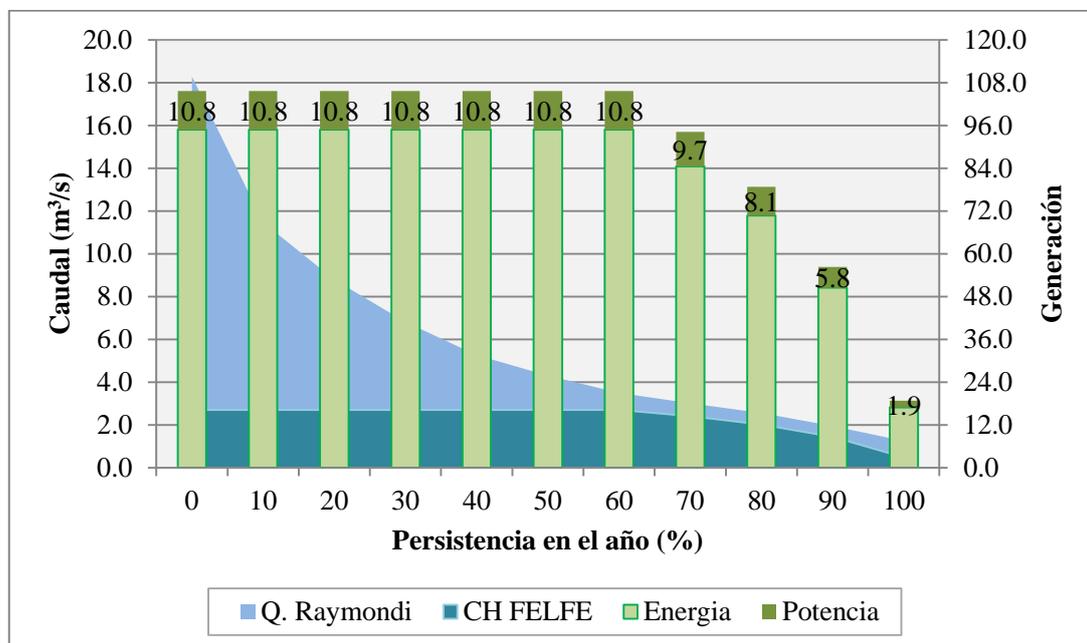


Figura 7.5 Generación de potencia y producción de energías anuales, proyecto C.H. FELFE.

7.5 Balance Hídrico

Dentro de un contexto de aprovechamiento de recursos hídricos para la obtención de la licencia de uso del agua superficial (acreditación de disponibilidad hídrica, ADH en siglas), el balance hídrico permite presentar el estado hídrico del Proyecto, en la zona de captación.

De esta manera, se elaboró el balance hídrico a nivel medio mensual. La oferta hídrica se basó en persistencias mensuales de 75% de duración, debido a la variabilidad hidrológica en los meses de estiaje; las demandas de uso por terceros fueron contabilizadas sólo para caudal ecológico, ya que en la zona se considera que no se presentan actividades agropecuarias o de uso de poblacional.

En la Cuadro 7.5 se presenta los resultados del balance hídrico del Proyecto.

| Descripción | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Oferta Hídrica | 5.4 | 8.0 | 8.8 | 6.4 | 4.0 | 2.8 | 2.5 | 2.0 | 1.8 | 2.3 | 2.1 | 3.3 |
| Demanda Ecológica | 2.2 | 3.2 | 1.1 | 0.9 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 1.0 | 1.6 |
| Caudal Disponible | 3.2 | 4.8 | 7.6 | 5.5 | 3.5 | 2.4 | 2.2 | 1.7 | 1.5 | 2 | 1.1 | 1.7 |
| Caudal Instalado | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 |
| Caudales C.H. FELFE | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.4 | 2.2 | 1.7 | 1.5 | 2 | 1.1 | 1.7 |

Cuadro 7.5 Balance hídrico de caudales, en m³/s; proyecto C.H. FELFE.

De la tabla anterior se desprende que el Proyecto tiene una eficiencia de aprovechamiento anual promedio no consuntivo de agua del 81% del año.

Asimismo, se podría mejorar el aprovechamiento a plena capacidad, siempre y cuando se habilite un reservorio de 16.6 Hm³; es decir, completar el caudal instalado entre los meses de junio a diciembre.



8. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

En este capítulo se presenta una evaluación técnico-económica de esquemas hidráulicos para la generación hidroeléctrica en la Quebrada Raymondi, con el fin de seleccionar la mejor alternativa del proyecto Central Hidroeléctrica FELFE.

8.1 Planeamiento

Una vez definido el caudal de diseño (Capítulo 7) del Proyecto, corresponde planear las instalaciones idóneas sobre las cuales discurrirá este caudal; las obras electromecánicas no son materia de evaluación en este estudio.

El terreno del cauce presenta una pendiente promedio de 11.8%, equivalente a un desnivel máximo de 490 m, que refleja condiciones de salto de agua muy interesantes para aprovechar su energía potencial y transformarla en energía eléctrica. Por ello, se evaluó las condiciones de terreno, tal que pudieran facilitar las obras del Proyecto.

De esta manera, de la evaluación geológica se identificó que el material de la margen derecha del valle Raymondi tiene condiciones geológicas (Formación Chambará, Ts-Ch) que no cuentan con la suficiente competencia geotécnica para realizar obras de corte.

Por tanto, la margen derecha del valle quedó descartada del planteamiento de alternativas; de otro modo, dicha condición del terreno podría incrementar los costos, debido a importantes obras de estabilización de talud ante obras de movimiento de tierras, como el canal de conducción, cámara de carga, entre otras.

La estructura de captación se ubicará en el nivel 1,680 msnm, conformada por una obra de captación y barraje de descarga de avenidas; la casa de máquinas se proyectará a 1,200 msnm, que define un salto de agua máximo de 480 m. La casa de máquinas se ubicará en superficie, equipada con un grupo de generación.

Entonces, el estudio de las alternativas se centra en la margen izquierda, con una línea de conducción a pelo libre; se planteó los siguientes esquemas hidráulicos:

- tipo A: aprovechamiento con obras de conducción superficial
- tipo B: aprovechamiento con obras de conducción subterránea

A continuación, se describe las alternativas de esquema hidráulico para el Proyecto:

8.1.1 Alternativa A-1

En la alternativa A-1 se propone una estructura de captación, que incluye barraje fijo para la descarga de avenidas. Al interior del circuito, un desarenador convencional, seguido de un canal de conducción de 3,300 m de longitud, en concreto armado. Los lodos decantados en la nave serán removidos de la planta por medio de un canal de purgas.

Aguas debajo de la conducción, se proyectará una cámara de carga, desde donde se suministrará de energía (potencial hidráulico) a la central, por medio de una tubería de presión hacia una casa de máquinas. Los excedentes de agua en la cámara descargarán por un aliviadero de demasías hacia una quebrada.

En Figuras 8.1 y 8.2 se presenta alineamiento en planta y perfil de la alternativa A-1.



Figura 8.1 Planta de la Alternativa A-1, proyecto C.H. FELFE.

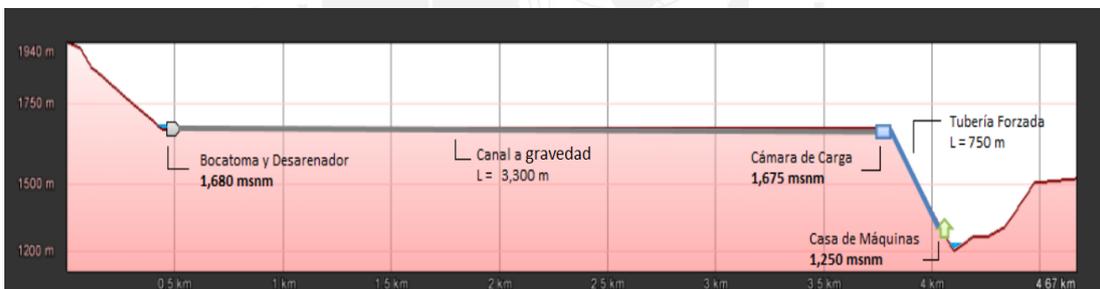


Figura 8.2 Perfil de la Alternativa A-1, proyecto C.H. FELFE.

8.1.2 Alternativa A-2

En la alternativa A-2 se propone una estructura de captación, que incluye barraje fijo para la descarga de avenidas. Al interior del circuito, un desarenador convencional, seguido de una tubería de conducción de 3,280 m de longitud, en tubería GRP (Glass Reinforcent Pipe, en inglés). Los lodos decantados en la nave serán removidos de la planta por medio de un canal de purgas.

Aguas debajo de la conducción, se proyectará una cámara de carga, desde donde se suministrará de energía (potencial hidráulico) a la central, por medio de una tubería de presión hacia una casa de máquinas. Los excedentes de agua en la cámara descargarán por un aliviadero de demasías hacia una quebrada.

En las Figuras 8.3 y 8.4 se presenta la alternativa A-2 en planta y perfil.



Figura 8.3 Planta de la Alternativa A-2, proyecto C.H. FELFE.

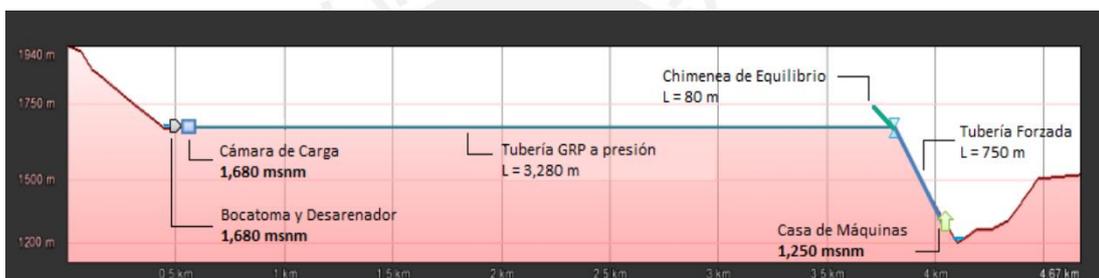


Figura 8.4 Perfil de la Alternativa A-2, proyecto C.H. FELFE.

8.1.3 Alternativa B-1

En la alternativa A-2 se propone una estructura de captación, que incluye barraje fijo para la descarga de avenidas. Al interior del circuito, un desarenador convencional, seguido de un túnel de aducción de 2,700 m de longitud, que incluye obras de sostenimiento según caracterización geomecánica de roca. Los lodos decantados en la nave serán removidos de la planta por medio de un canal de purgas.

Aguas debajo de la conducción, se proyectará una cámara de carga, desde donde se suministrará de energía (potencial hidráulico) a la central, por medio de una tubería de presión hacia una casa de máquinas. Los fenómenos transitorios por efecto del golpe de ariete se controlarán por medio de una chimenea de equilibrio, dispuesta en superficie. Los excedentes de agua en la cámara descargarán por un aliviadero de demasías hacia una quebrada.

En las Figuras 8.5 y 8.6 se presenta el alineamiento en planta y perfil de la alternativa A-3.



Figura 8.5 Planta de la Alternativa B-1, proyecto C.H. FELFE.

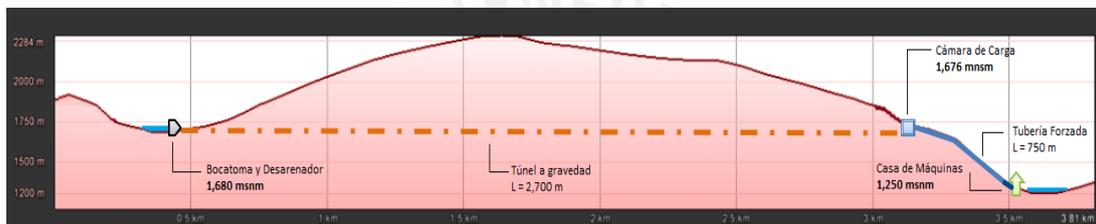


Figura 8.6 Perfil de la Alternativa B-1, proyecto C.H. FELFE.

8.2 Evaluación Técnico-Económica

Definidas las alternativas de esquemas, se hizo una valoración técnico-económica de las mismas. La componente técnica comprende los costos de construcción y eficiencia hidráulica; mientras que la económica, la proporción de los beneficios de generación de energía sobre los costos de construcción (C/E).

La alternativa de menor relación C/E será la alternativa seleccionada.

8.2.1 Valoración Técnica

Desde el punto de vista constructivo, la alternativa A-1 tiene una sección de la conducción ampliamente conocida en cuanto a su construcción, a tal punto que su ejecución podría realizarse de manera artesanal, con un personal mínimamente capacitado; los materiales para concreto armado, como agregados, podrían seleccionarse de las riberas del cauce.

En cambio, el esquema A-2 requiere, además de similares obras de movimientos de tierra que la A-1, de materiales complementarios para asegurar su estabilidad en el terreno, como accesorios del mismo material y apoyos de concreto en los cambios de dirección, que se traduce en incrementos en los costos de construcción, además del

plazo, por las condiciones de suministro desde planta, a diferencia que la primera alternativa, que puede surtir simplemente a pie de obra.

La alternativa A-3, por el hecho mismo de plantearse como una obra subterránea (túnel), ya pone en duda la conveniencia de su uso, salvo que por condiciones de estabilidad de talud obligue a trazar la conducción dentro de la montaña a fin de garantizar la durabilidad de la operación de la central. Además, la proyección de un túnel requiere más estudios específicos, como investigaciones geotécnicas del terreno, mapeos geomecánicos, sondajes diamantinos, entre otros; así como mayor plazo para el avance de excavación, que encarecerían el Proyecto. En todo caso, la conveniencia de esta solución dependerá de una evaluación geológico-geotécnica del alineamiento, por un profesional especializado.

Finalmente, desde el punto de vista de eficiencia hidráulica, sólo la aducción A-2 incrementa las pérdidas de carga al circuito, debido a que la presión de agua incluye la conducción de agua (previa a la alta presión); en el resto de alternativas, las pérdidas de energía se presentan aguas debajo de la línea de conducción.

8.2.2 Valoración Económica

La valoración económica consistió en determinar el costo de oportunidad para producción de energía eléctrica; es decir, el precio unitario de las obras civiles (ya que las obras electromecánicas son similares entre todas las alternativas) por unidad de energía producida en un año promedio por cada alternativa, en unidades de US\$/MW-h.

En el Cuadro 8.1 se muestran los costos de obras civiles de cada alternativa.

| ITEM | Componentes Principales | A - 1 | A - 2 | B - 1 |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 01 | Bocatoma | 570,000 | 570,000 | 570,000 |
| 02 | Desarenador | 82,700 | 82,700 | 82,700 |
| 03 | Aducción | 5,350,000 | 5,460,000 | 14,400,000 |
| 04 | Cámara de Carga | 185,000 | 185,000 | 185,000 |
| 05 | Tubería Forzada | 1,860,000 | 1,860,000 | 1,860,000 |
| 06 | Chimenea de Equilibrio | 0 | 610,400 | 0 |
| 07 | Casa de Máquinas | 1,390,000 | 1,390,000 | 1,390,000 |
| 08 | Canal de Descarga | 140,000 | 140,000 | 140,000 |
| Costo de Obras (USD) | | 9,577,700 | 10,298,100 | 18,627,700 |
| Producción de Energía (MW-h) | | 82,000 | 78,000 | 82,000 |
| C/E (USD / MW-h) | | 116.8 | 132.0 | 227.2 |

Cuadro 8.1 Evaluación económica de esquemas hidráulicos, proyecto C.H. FELFE.

Del cuadro anterior se concluye que el mejor esquema de circuito hidráulico es la Alternativa A-1, por tener el costo de oportunidad más bajo para producir energía eléctrica, con 116.8 US\$/MW-h.

9. INGENIERÍA BÁSICA

En este capítulo se realizó el diseño hidráulico de las obras civiles que conforman el circuito hidráulico del proyecto Central Hidroeléctrica FELFE.

9.1 HIDRÁULICA DEL CAUCE

En este acápite se estudió las condiciones hidráulicas del cauce de la Quebrada Raymondi sobre las estructuras del Proyecto, ante el paso de avenidas extraordinarias. De esta manera, se generaron perfiles longitudinales de agua y energía para determinar niveles de inundación en las obras de cabecera, así como en las de descarga.

El modelamiento del cauce se realizó en el programa HEC-RAS, propiedad del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, siglas en inglés), que permite analizar fluidos newtonianos en canales abiertos.

9.1.1 Condiciones Iniciales

El flujo del cauce fue modelado como un elemento unidimensional, debido a la topografía disponible en este estudio (curvas de nivel cada 10 m). Un modelo bidimensional sería mejor aprovechado con una mayor resolución topográfica, donde un enfoque grillado por elementos finitos podría describir con más fidelidad la morfología del cauce.

El volumen de control abarcó secciones transversales cada 10 m, desde la convergencia de las quebradas que la preceden (Tigretambo y Bague) hasta su desembocadura al Río Paucartambo; un total de 4,600 m.

La geoforma del valle y los materiales comprendidos en los depósitos cuaternarios del cauce (Capítulo 5), en concordancia con la recomendación de V. T. Chow para coeficiente de rugosidad, permitieron indicar los factores que afectan el coeficiente de rugosidad de Manning del cauce. Por tanto, se asignó n de Manning igual a 0.030 para el fondo del canal; y 0.020.

9.1.2 Niveles de Inundación

Entonces, la hidráulica del cauce consistió en el estudio de inundación en las obras, tanto de captación como de descarga; se consideró 25, 50 y 100 años como períodos de retorno. En el modelamiento hidráulico del flujo ante avenidas, se simuló 100 m aguas arriba y abajo de la estructura en análisis.

En la Figuras 9.1 Cuadro 9.1 se presenta los resultados en la sección de captación.

En la Figuras 9.2 Cuadro 9.2 se presenta los resultados en la sección de descarga.

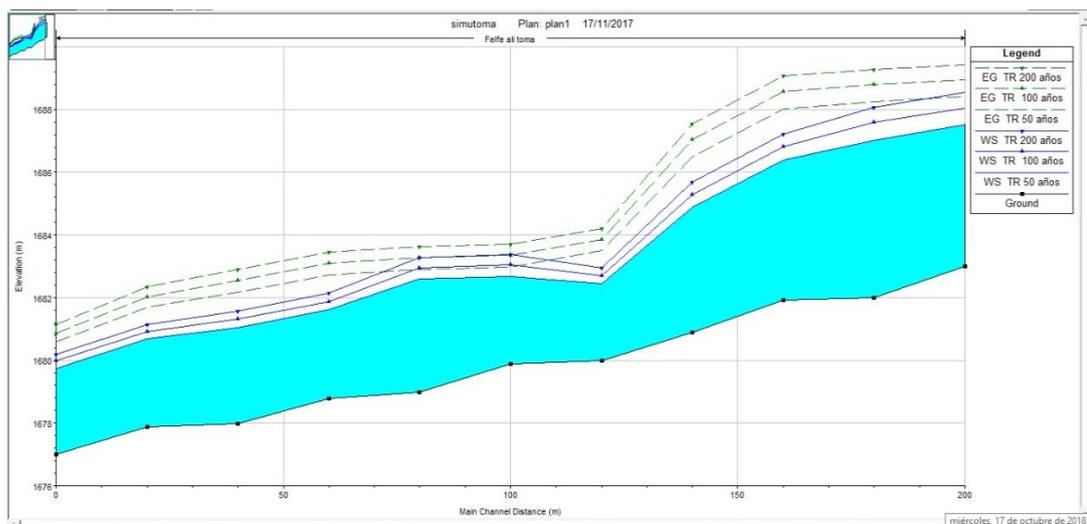


Figura 9.1 Hidráulica de avenidas en zona de captación, proyecto C.H. FELFE.

| River Sta | Q-TR100 | Min Ch El | W.S. Elev | E.G. Elev | Vel Chnl | Flow Area | Top Width | Froude |
|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|--------|
| 0+200 | 180,70 | 1682,99 | 1688,06 | 1688,94 | 5,63 | 59,62 | 18,24 | 0,80 |
| 0+180 | 180,70 | 1682,00 | 1687,58 | 1688,79 | 6,23 | 53,37 | 15,99 | 0,85 |
| 0+160 | 180,70 | 1681,91 | 1686,82 | 1688,57 | 7,06 | 43,88 | 13,93 | 1,02 |
| 0+140 | 180,70 | 1680,88 | 1685,29 | 1687,05 | 6,77 | 41,28 | 13,31 | 1,03 |
| 0+120 | 180,70 | 1679,98 | 1682,69 | 1683,86 | 5,90 | 45,78 | 20,90 | 1,14 |
| 0+100 | 180,70 | 1679,88 | 1683,04 | 1683,35 | 3,22 | 85,32 | 31,20 | 0,58 |
| 0+080 | 180,70 | 1678,98 | 1682,96 | 1683,28 | 3,29 | 88,22 | 28,99 | 0,53 |
| 0+060 | 180,70 | 1678,80 | 1681,88 | 1683,09 | 5,92 | 45,99 | 20,00 | 1,09 |
| 0+040 | 180,70 | 1677,99 | 1681,33 | 1682,55 | 5,50 | 45,40 | 19,62 | 0,98 |
| 0+020 | 180,70 | 1677,88 | 1680,93 | 1682,02 | 5,22 | 47,76 | 22,59 | 0,98 |
| 0+000 | 180,70 | 1677,00 | 1679,98 | 1680,88 | 4,59 | 53,15 | 31,94 | 0,90 |

Cuadro 9.1 Respuesta hidráulica en eje de captación, TR = 100 años; proyecto C.H. FELFE.

De los resultados se concluye que la bocatoma debe ubicarse por encima del nivel 1,683.04 msnm. La velocidad del flujo natural en esta zona (3.22 m/s) sugiere proyectar obras de defensa ribereña, a fin de estabilizar el cauce.

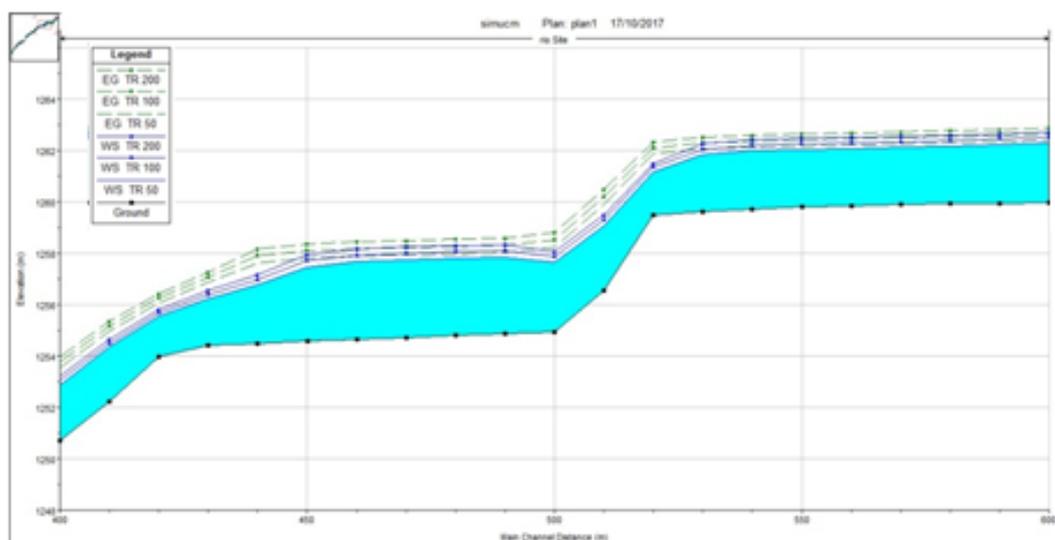


Figura 9.2 Hidráulica de avenidas en zona de descarga, proyecto C. H. FELFE.

| River Sta | Q-TR100 | Min Ch El | W.S. Elev | E.G. Elev | Vel Chnl | Flow Area | Top Width | Froude |
|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|--------|
| 0+600 | 180,70 | 1259,94 | 1262,44 | 1262,60 | 1,75 | 104,38 | 47,55 | 0,37 |
| 0+580 | 180,70 | 1259,89 | 1262,34 | 1262,50 | 1,80 | 101,39 | 46,05 | 0,38 |
| 0+560 | 180,70 | 1259,82 | 1262,26 | 1262,41 | 1,74 | 107,10 | 48,80 | 0,36 |
| 0+540 | 180,70 | 1259,60 | 1262,05 | 1262,30 | 2,27 | 81,93 | 40,97 | 0,50 |
| 0+520 | 180,70 | 1256,55 | 1259,28 | 1260,20 | 4,33 | 43,68 | 24,80 | 0,95 |
| 0+500 | 180,70 | 1254,87 | 1258,09 | 1258,31 | 2,25 | 88,66 | 32,92 | 0,40 |
| 0+480 | 180,70 | 1254,72 | 1258,01 | 1258,23 | 2,23 | 90,31 | 33,57 | 0,40 |
| 0+460 | 180,70 | 1254,57 | 1257,71 | 1258,09 | 2,91 | 68,65 | 30,97 | 0,55 |
| 0+440 | 180,70 | 1254,41 | 1256,40 | 1257,08 | 3,87 | 51,32 | 39,27 | 0,97 |
| 0+420 | 180,70 | 1252,21 | 1254,50 | 1255,16 | 3,72 | 50,09 | 38,24 | 1,01 |
| 0+400 | 180,70 | 1249,84 | 1252,04 | 1252,80 | 4,18 | 48,29 | 32,43 | 0,98 |

Cuadro 9.2 Respuesta hidráulica en eje de descarga, TR = 100 años; proyecto C. H. FELFE.

De los resultados se concluye que la casa de máquinas debe ubicarse por encima del nivel 1,258.09 msnm. La velocidad del flujo natural en esta zona (2.25 m/s) indica que no amerita obras de defensa ribereña.

9.2 BOCATOMA

La bocatoma del Proyecto fue configurada tomando en cuenta las condiciones del terreno y la cantidad del recurso superficial.

A continuación, se describe los criterios de diseño y sus respectivas dimensiones:

9.2.1 Criterios de Diseño

La estructura de captación comprenderá de muros de encauzamiento. losa de aproximación y una galería de toma por la margen izquierda de la quebrada; de

manera complementaria dispondrá de losas de protección. y plataforma de izaje de los equipos hidromecánicos.

La altura de los muros de encauzamiento responderá a una evaluación de avenidas extraordinarias, específicamente para un periodo de retorno de 200 años.

La captación se proyectó en una galería de toma tipo Tirolesa o Montaña. por la fuerte pendiente longitudinal de la Quebrada Raymondi entre la captación y la descarga del Proyecto (7 %). Para garantizar la captación completa de la bocatoma, la captación dispondrá de un barraje fijo, tipo vertedero curvo, de cresta gruesa.

El caudal líquido y sólido en suspensión atravesarán una reja retensora de sólidos flotantes, para luego ingresar por gravedad a una galería excavada en el lecho del cauce, y finalmente dar paso a una poza de colección, desde la cual los sedimentos retornarán al cauce por medio de un canal desrapiador.

En la Ilustración 9.1 se presenta el diseño hidráulico de la captación Tirolesa.

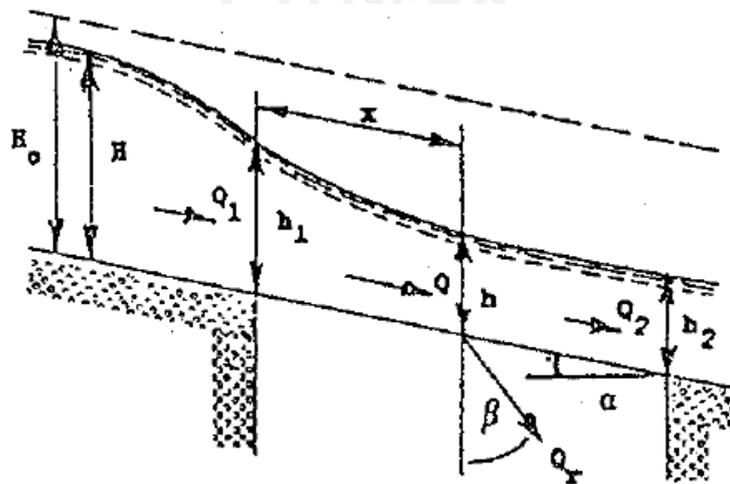


Ilustración 9.1 Esquema de toma tirolesa.
Fuente: S. Krochin, 1982.

9.2.2 Dimensiones

La losa de aproximación. de 25.0 m X 3.0 m. se ubicará en el nivel 1,680.50 msnm. A continuación, se proyectará la toma tipo tirolesa, a partir del nivel 1,684.05 msnm. De manera complementaria, se instalará un vertedero fijo, de 15.0 m de longitud; cresta de vertimiento en el nivel 1,684.45 msnm.

La galería de toma tendrá 10.0 m de longitud, de forma descendente, para la captación de $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$. hasta su descarga en una poza colectora, ubicada en el nivel 1,682.00 msnm.

El canal desrapiador, de 0.9 m X 0.9 m, se abrirá paso desde la poza colectora para la remoción de grava y arena gruesa; nivel 1,680.80 msnm. Asimismo, por medio de una compuerta plana, los sedimentos serán purgados desde una plataforma de maniobras; nivel 1,685.80 msnm. Finalmente, el canal de derivación, de 1.8 m X 1.1

m, iniciará el transporte del agua para el aprovechamiento del Proyecto; nivel 1,681.50 msnm.

Por último, los muros de encauzamiento tendrán 8.0 m de longitud, incluida la cimentación; desde el nivel 1,679.00 msnm.

En la Figura 9.3 se presenta una vista isométrica de la bocatoma del Proyecto.

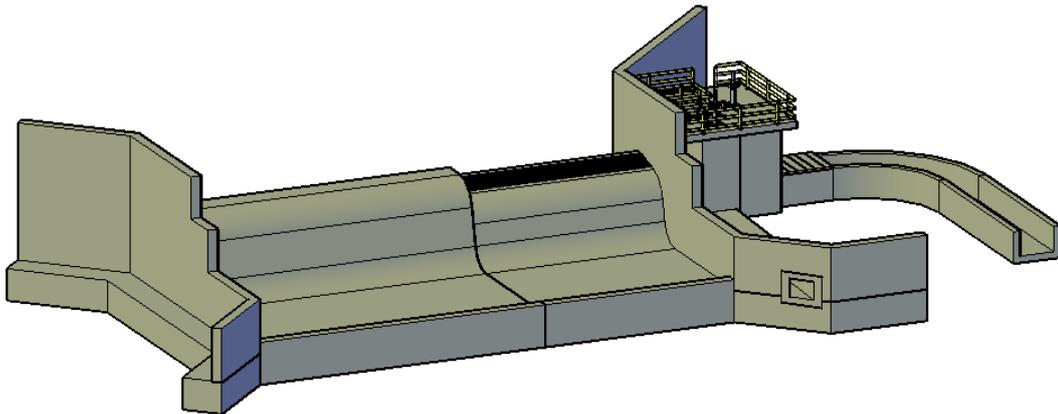


Figura 9.3 Bocatoma tipo tirolesa, proyecto C.H. FELFE.

El detalle de la bocatoma se encuentra en planos FELFE-BO-001 y FELFE-BO-002.

9.3 DESARENADOR

El desarenador del Proyecto fue configurado tomando en cuenta la cantidad del recurso superficial y el tipo de turbina.

A continuación, se describe los criterios de diseño y sus respectivas dimensiones:

9.3.1 Criterios de Diseño

El principal componente de la estructura consiste en cuencos rectilíneos, que operen a pelo libre, en régimen laminar ($Re < 1$), cuya velocidad de flujo constante favorezca la decantación de partículas finas. De manera complementaria, se dispondrá de canales de transición, y canal de purga para la remoción de los finos.

La longitud de la nave, o cuenco, se diseña de acuerdo al tamaño de partícula seleccionada para decantar, en milímetros; la literatura especializada recomienda que la velocidad para la decantación (V_s) se encuentra entre arcilla (0.08 m/s) y arena gruesa (0.20 m/s).

Finalmente, un tirante de agua recuperará el caudal para los fines del Proyecto, por medio de un vertedero de pared delgada, ubicado a la salida del cuenco.

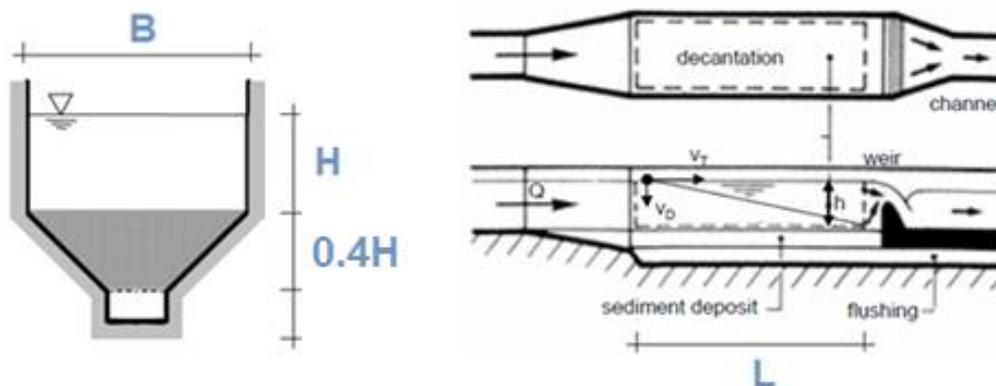


Ilustración 9.2 Esquema de un desarenador convencional.

Fuente: ESHA, 2006.

La sección transversal de la nave retensora de los finos generalmente es rectangular, cuyas dimensiones responden a instaurar velocidades de sedimentación (o caída) entre 0.1 m/s y 0.4 m/s dentro del cuenco. Por convención, se estima que la profundidad de nave varíe entre 1.5 m y 4.0 m.

De manera preliminar, la fórmula de Owens (1976) permite estimar la velocidad de sedimentación, V_s :

$$V_s = K\sqrt{d(\gamma_s - 1)}$$

Donde V_s es la velocidad de sedimentación, en m/s; d es el diámetro de partícula, en m; γ_s es el peso específico del material, en g/cm^3 ; y K es una constante hidráulica que varía de acuerdo con la forma y naturaleza de los granos.

A continuación, se presentan las fórmulas que definen el tamaño de las trampas de finos:

- Ancho de un cuenco o nave. $b = Q/h.v$
- Reducción de la velocidad por efectos de turbulencia. $\omega' = \frac{v}{5.7+2.3h}$
- Largo de un cuenco o nave. $L = \frac{h.v}{(V_s - \omega')}$
- Tiempo de sedimentación. $t = h/V_s$
- Verificar la capacidad del cuenco o nave. $Q.t <> b.h.L$

Donde Q es el caudal pasante por la nave, en m^3/s ; b es el ancho de la nave, en m; h es la carga de agua de decantación, en m; y v es la velocidad del flujo dentro de la nave, en m/s.

Como estructuras hidráulicas complementarias a la nave se proyectan las siguientes:

- canales de transición de ingreso y de salida de la nave. para disminuir y restituir la velocidad del flujo respectivamente
- un canal de fuerte pendiente dentro de la nave. entre 2.0 % y 6 %. para favorecer la evacuación de los lodos

El flujo libre de sedimentos descargará por un vertedero fijo de pared delgada sin contracciones laterales. El caudal circulante se estima con las siguientes consideraciones de diseño:

$$Q_v = C \cdot L \cdot H^{3/2}$$

$$V_v \leq 1.0$$

Donde Q_v es el caudal circulante al final de las naves, en m^3/s ; V_v es la velocidad del flujo sobre el vertedero, en m/s ; C es una constante hidráulica, que para vertederos de pared delgada es 1.84; L es la longitud del vertedero, en m ; y H es la carga de agua sobre la cresta del vertedero, en m .

El canal de purga de lodos se proyecta para la remoción final de lodos, en donde el flujo opera como un orificio de descarga, como sigue:

$$Q_f = C_d \cdot A_n \cdot \sqrt{2gh}$$

Donde Q_f es el caudal circulante por el orificio. en m^3/s ; C_d es el coeficiente de descarga, que para pared delgada es 0.6; A_n es el área del orificio desde la superficie libre del agua hasta su centro, en m^2 ; y h es la carga de agua sobre el orificio desde la superficie libre del agua hasta el centro de la compuerta, en m .

9.3.2 Dimensiones

En general, 0.20 mm es el tamaño máximo de partícula usualmente utilizado en centrales hidroeléctricas (ESHA, 1998), puesto que permite reducir el daño de las unidades de generación, especialmente las turbinas Francis. Por tanto, este valor será adoptado para fines de este Proyecto.

La estructura iniciará en el nivel 1,680.20 msnm, con una reducción de la velocidad de flujo por medio de un canal de transición de entrada de 8.0 m de longitud y sección rectangular descendente hasta la nave; nivel 1,678.50 msnm.

Aguas abajo se encontrará el cuenco desarenador, con velocidad de flujo para la decantación de partículas no mayores a 0.20 mm de diámetro igual a 0.20 m/s. Las dimensiones de la estructura son 22.0 m de largo X 5.2 m de ancho y altura variable; fondo a partir del nivel 1,678.50 msnm. Los lodos serán evacuados por un canal colector, emplazado en el cuerpo de la nave, para desembocar en un canal de purga; nivel 1,676.60 msnm hacia el cauce del río.

Finalmente, el agua limpia pasará sobre un vertedero de flujo libre, sin contracciones y con cresta en el nivel 1,680.65 msnm, con una velocidad de 1.1 m/s, para continuar con el aprovechamiento hidráulico; previamente, otro canal de transición de salida, de 8.0 m de longitud, hasta conectar con el canal de conducción, desde el nivel 1,680.20 msnm.

En la Figura 9.4 se presenta una vista isométrica de la estructura de desarenación del Proyecto.

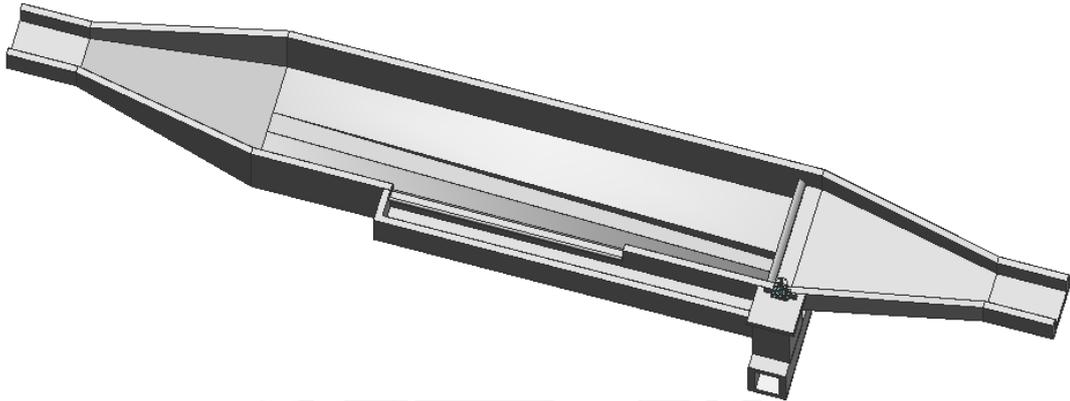


Figura 9.4 Desarenador. proyecto C.H. FELFE.

El detalle del desarenador se encuentra en planos FELFE-DE-001 y FELFE-DE-002.

9.4 CONDUCCIÓN

El agua, que operará en la central, será transportada por medio de un canal a pelo libre, en concreto armado, hasta la fuente de energía potencial.

A continuación, se describe los criterios de diseño y sus respectivas dimensiones:

9.4.1 Criterios de Diseño

El canal es una estructura, que para efectos de modelamiento hidráulico se la considera unidimensional, de flujo libre o a presión, que se utiliza para el transporte de agua de un punto a otro. Existen varios tipos de canales de acuerdo a su uso, entre ellos, cunetas, sifón invertido. Acueductos, túneles y rápidas.

El criterio de diseño seleccionado fue de la pendiente económicamente óptima, la cual se apoya en el concepto de máxima eficiencia hidráulica (MEH) y evaluación costo/beneficio de alternativas de pendiente longitudinal. Para ello se consideró los siguientes parámetros:

- un ratio de costo de construcción del canal = $700.0 \text{ \$/m}^3$
- tarifa de venta de energía = $45.5 \text{ \$/MW-h}$

La ecuación de Manning gobierna el flujo de un canal abierto en condiciones normales (flujo uniforme y permanente). En el Sistema Internacional, la ecuación de Manning es la siguiente:

$$v = \frac{R^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n}$$

Donde v , la velocidad de flujo en m/s; n , el coeficiente de rugosidad del canal; R , el radio hidráulico en m; y S , la pendiente longitudinal, en m/m.

En la Ilustración 9.3 se muestra criterios de secciones de máxima eficiencia.

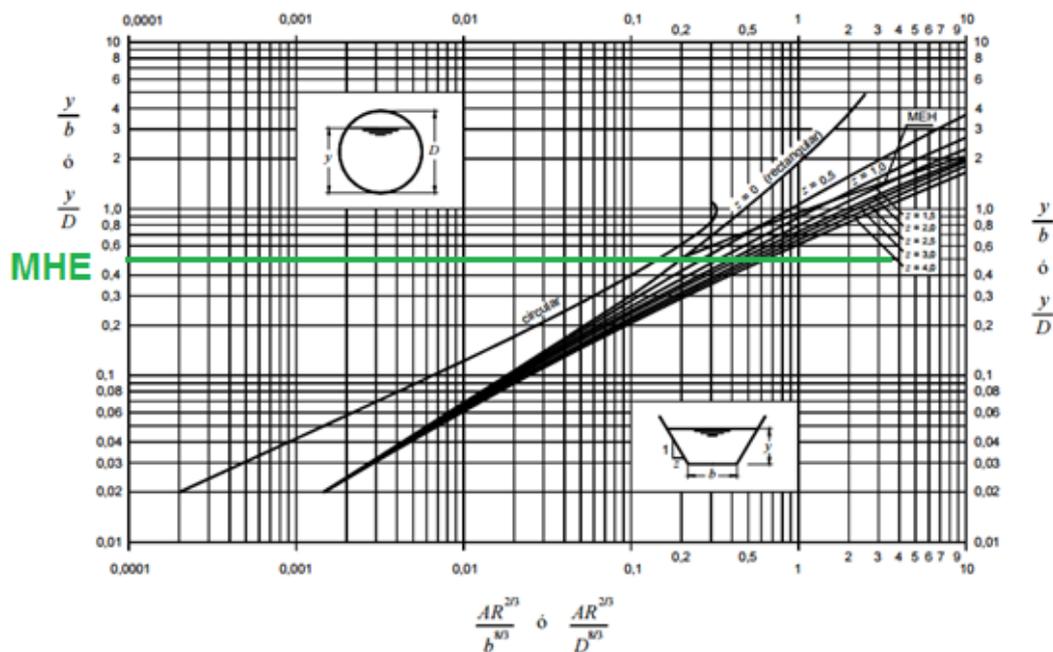


Ilustración 9.3 Sección de máxima eficiencia hidráulica.
Fuente: V. T. Chow, 1994.

Por tanto, se estimó la pérdida de carga, su costo de energía a valor presente y su respectivo costo de construcción para cada alternativa de pendiente longitudinal. Se selecciona la alternativa de menor costo.

9.4.2 Dimensiones

Se planteó un total de 20 alternativas de pendiente longitudinal, bajo los supuestos líneas arriba mencionadas, y tomando en cuenta tres opciones de material: concreto, tierra y tubo pvc. Se analizó la implicancia de la pendiente longitudinal sobre los costos de construcción, en función de sección de máxima eficiencia.

Los resultados del análisis económico se presentan en la Figura 9.5.

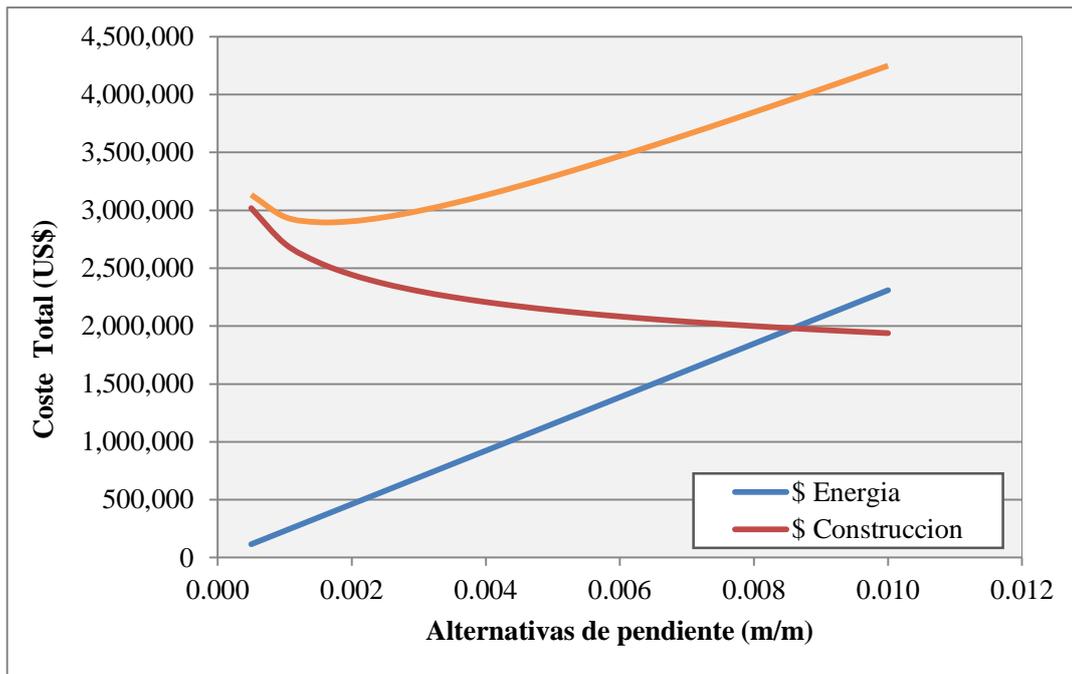


Figura 9.5 Alternativas de pendiente longitudinal, proyecto C.H. FELFE.

Del gráfico anterior se determinó que 0.0015 m/m es la pendiente longitudinal económicamente más óptima para el proyecto. Por tanto, el canal quedó definido con una sección transversal interna de 1.8 m x 1.1 m, para transportar $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ en flujo subcrítico, a razón de 1.70 m/s.

El canal tendrá una extensión de 3,135 m. proyectado a pelo libre con una tapa. Se extiende desde la cota de rasante 1,680.20 msnm hasta el nivel 1,675.50 msnm. Asimismo, dispondrá de un acceso vial para inspección de mantenimiento, así como de una cuneta lateral para el drenaje de escurrimientos eventuales en las laderas.

En la Figura 9.6 se presenta la sección típica del canal de conducción del Proyecto.

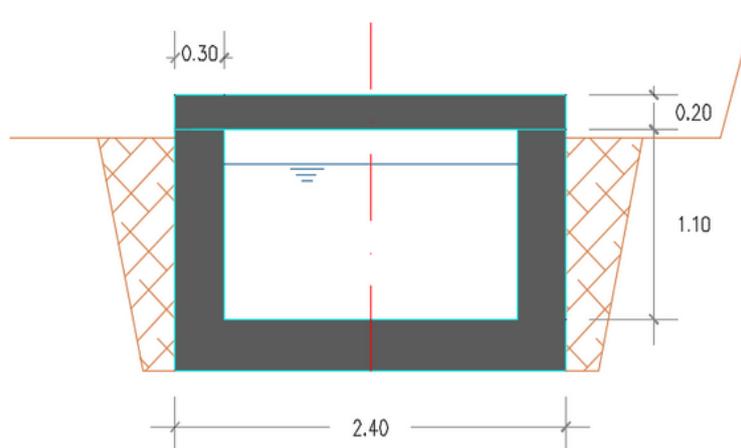


Figura 9.6 Canal de conducción, proyecto C.H. FELFE.

El detalle del canal de conducción se encuentra en los planos FELFE-CC-001, FELFE-CC-002, FELFE-CC-003 y FELFE-CC-004.

9.5 CÁMARA DE CARGA

La cámara de carga tiene por funciones la regulación de la producción de la central, la remoción de sedimentos y la evacuación de agua en exceso. En términos de operación, la cámara de carga suministra energía potencial del tipo hidráulica a los grupos generadores, a partir del nivel de agua máximo de operación (NAMO); el nivel agua mínima de operación (NAMIN), por una distancia vertical denominada sumergencia.

A continuación, se describe los criterios de diseño y sus respectivas dimensiones:

9.5.1 Criterios de Diseño

Las transiciones son canales diseñados para cambiar el área mojada, tanto en la entrada como en la salida de una estructura hidráulica. En la admisión a la cámara de carga, la transición consiste en un ensanchamiento del canal para favorecer la disminución de la velocidad de flujo, hasta lograr la estanqueidad de la misma dentro de la cámara.

La transición de entrada, en régimen subcrítico, se determina con la siguiente expresión:

$$L_t = \frac{T_1 - T_2}{2 * Tg(12.5^\circ)}$$

Donde L_t es la longitud de la transición de entrada o salida, en m; T_1 es el tirante aguas arriba de la nave, en m; T_2 es el tirante aguas abajo de las naves, en m.

Aguas debajo de la transición, el nivel de agua mínimo de operación (NAMIN) se estima como una profundidad vertical, que contribuye a evitar la formación de vórtices, así como la entrada de aire al conducto de alta presión; ésta es la sumergencia.

La sumergencia, o inmersión, se diseña en base a ensayos experimentales que plantean las siguientes ecuaciones:

- Polikovki $S \geq 0.5 * D * \left(\frac{V}{\sqrt{2 * D}}\right)^{0.55}$
- Proser $S \geq 1.5 * D$
- Gordon $S \geq 0.5 * V * \sqrt{D} * (1 + 0.5 * \text{sen}(A) + \text{sen}(B))$

donde S es la sugerencia mínima, en m; D es el diámetro interno de la tubería forzada, en m; V es la velocidad del flujo en la tubería, en m/s; A y B son los ángulos horizontal y vertical del agua respecto del eje de toma, en $^\circ$.

De manera conservadora, se elegirá el mayor valor de los criterios antes mencionados.

En la salida de la cámara, se proyecta la porta-rejilla, la cual está conformada por una rejilla de admisión y una transición curva graduada, para la conexión hacia la tubería forzada. El parámetro de diseño para la rejilla es una velocidad de admisión no mayor a 1.0 m/s, para contribuir a la no formación de vórtices en el tanque de carga; ver Ilustración 9.4.

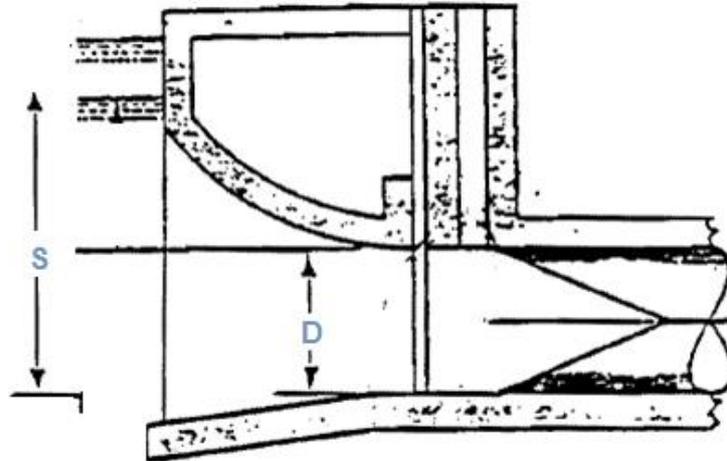


Ilustración 9.4 Esquema de sumergencia mínima.
Adaptado de: S. Krochin, 1986.

En caso en que el caudal suministrado supere el volumen del NAMO, éste evacuará por medio de un aliviadero lateral, ubicado en uno de los flancos de la cámara de carga.

La descarga libre del vertedero queda definida por la siguiente ecuación:

$$Q_v = C \cdot L \cdot H_d^{3/2}$$

Donde Q_v es el caudal circulante al final de las naves, en m^3/s ; C es una constante hidráulica, y entre ellas en pared delgada es 1.84; L es la longitud del vertedero, en m; y H_d es carga hidráulica sobre la cresta del vertedero, en m.

9.5.2 Dimensiones

La estructura iniciará en el nivel 1,675.50 msnm, con una reducción de la velocidad de flujo por medio de un canal de transición de entrada de 8.0 m de longitud y sección rectangular descendente hasta la nave; nivel 1,674.60 msnm.

La altura de agua para evitar vórtices y burbujas en la entrada de la tubería forzada fue estimada preliminarmente por varios métodos de sumergencia (ver Cuadro 9.3). Por tanto, se seleccionó una sumergencia de 3.2 m, para asegurar la inmersión de la tubería forzada.

| Diámetro m | Velocidad m/s | Froude | Sumergencia Mínima | | |
|---------------|------------------|--------|--------------------|--------|--------|
| | | | Polikovki | Proser | Gordon |
| 0.85 | 4.76 | 1.65 | 0.87 | 1.28 | 3.24 |

Cuadro 9.3 Criterios de sumergencia mínima, proyecto C.H. FELFE.

De esta manera, se determinó el nivel de agua mínimo en operación (N.A.M.I.) en 1,674.00 msnm; asimismo, el nivel de agua máximo de operación (N.A.M.O.) se ubicará en el nivel 1,676.40 msnm.

La cámara de carga, de dimensiones 5.2 m X 24.0 m. X 6.0 m, fue diseñada tomando en cuenta las características hidráulicas del canal de llegada, y del tiempo de llenado de la tubería forzada; se consideró en 90.0 s el tiempo de operación de la cámara. Por tanto, el volumen útil para las condiciones de agua fluyente a plena carga asciende a 249.00 m³.

El recurso hídrico superior al de diseño será descargado por un aliviadero de demasías lateral, de 7.00 m de longitud, ubicado en el flanco izquierdo de la cámara de carga; nivel de cresta de alivio igual a 1,676.40 msnm. Las aguas excedentes serán evacuadas hacia una quebrada para su retorno, por medio de un canal de demasías; nivel 1,669.60 msnm.

En la Figura 9.7 se presenta la sección típica de la estructura de conducción del Proyecto.

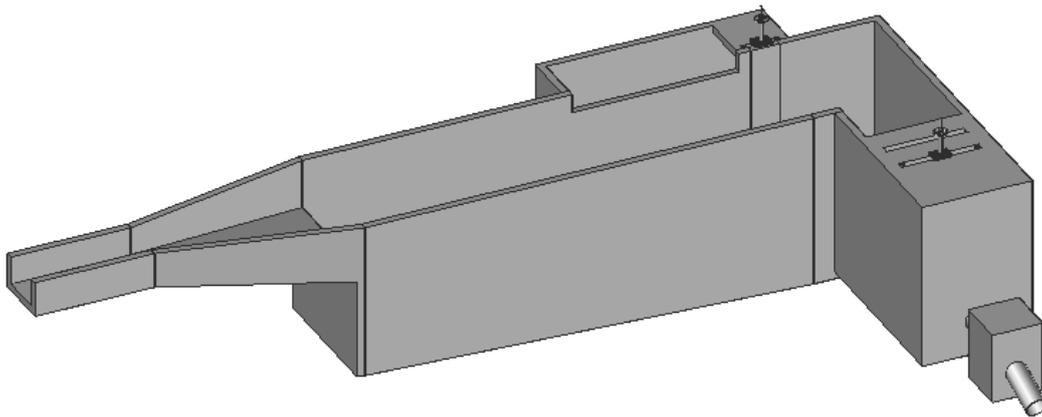


Figura 9.7 Cámara de carga, proyecto C.H. FELFE.

El detalle de la estructura de suministro de energía potencial se encuentra en planos FELFE-CC-001 y FELFE-CC-002.

9.6 TUBERÍA FORZADA

La tubería forzada del Proyecto fue configurada tomando en cuenta la cantidad del recurso superficial y las solicitaciones de presión hidrostática.

A continuación, se describe los criterios de diseño y sus respectivas dimensiones:

9.6.1 Criterios de Diseño

Las tuberías forzadas son estructuras, generalmente, de acero, por su gran capacidad para controlar las solicitaciones de sobrepresiones por fenómenos transitorios. Éstas operan a presión, colocadas en superficie o enterradas.

La elección del diámetro pasa por un análisis óptimo, en donde evalúa alternativas de diámetro dentro de un margen admisible de velocidades (entre 4.0 m/s y 6.0 m/s), estableciendo costos de tubería y de la energía perdida por fricción del material (S. Krochin, 1986): ver Ilustración 9.5.

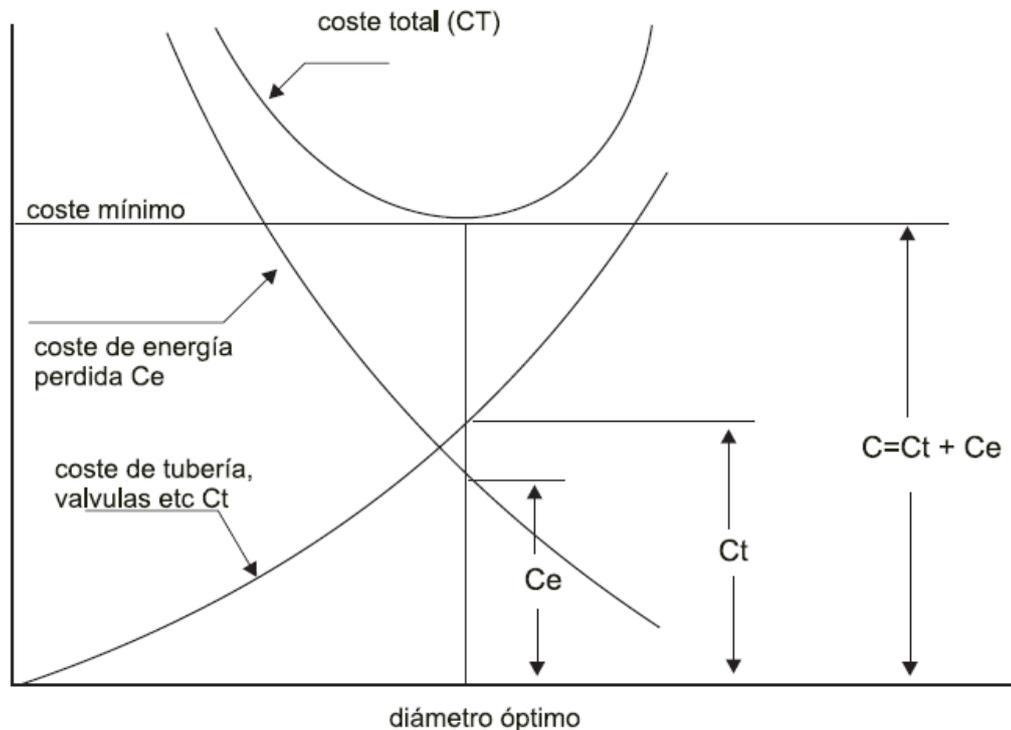


Ilustración 9.5 Criterio del diámetro económicamente óptimo.
Fuente: ESHA, 2006.

No obstante, el diámetro se puede estimar de manera preliminar con la fórmula de Mosonyi (1965):

$$D = 1.12 \frac{Q^{0.45}}{H^{0.12}}$$

donde: D es el diámetro de la tubería forzada, en m; Q es el caudal de diseño, en m³/s; y H es el salto, en m.

La tubería debería tener la rigidez necesaria para manejarla en obra. El espesor mínimo puede estimarse de manera preliminar con la recomendación ASME:

$$e = 2.5D + 1.2$$

donde: e es el espesor del conducto a presión, en mm; D es el diámetro de la tubería forzada, en mm.

Por otro lado, durante la operación normal de una central hidroeléctrica podría ocurrir un cierre brusco de la válvula de admisión; o al iniciar las operaciones, una apertura brusca del distribuidor de turbina. En cualquier situación, se produce

fenómenos transitorios en el fluido, que originan sobrepresiones y subpresiones, conocidas como “golpe de ariete”.

Las características mecánicas de la tubería y del agua definen la celeridad de onda, que influirá en el golpe de ariete:

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + GD/e}}$$

donde: c es la celeridad de onda, en m/s; G es un factor adimensional, 0.5 para acero; D es el diámetro interior de la conducción, en mm; y e es el espesor de la conducción, en mm.

En términos hidráulicos, las sobrepresiones por cierre brusco suelen ser más significativas que las producidas por aceptación de carga (G. Zoppetti, 1987). El tiempo de ejecución cierre. de la válvula de admisión, determina la forma de cuantificar el golpe de ariete:

$$T < 2L/c \quad : \quad \text{cierre rápido}$$

$$T > 2L/c \quad : \quad \text{cierre lento}$$

donde: T es el tiempo de apertura o cierre de válvula. en s; L es la longitud de la conducción aguas arriba de la válvula, en m; y c es la celeridad de onda, en m/s.

A nivel preliminar, entre los métodos de cálculo de golpe de ariete por cierre rápido. Allievi es un método confiable, ya que toma en cuenta la compresibilidad del fluido y la elasticidad del conducto (teoría elástica). Por tanto, en el presente estudio se ha realizado el cálculo del espesor de la tubería forzada por medio del Método de Allievi.

$$\Delta H = cV/g$$

donde: ΔH es la sobrepresión (golpe ariete), en m; c es la celeridad de onda. en m/s; V es la velocidad de flujo en la tubería, en m/s; g es la aceleración de la gravedad. 9.81 m/s².

De esta manera, bajo el supuesto de tubería de pared fina, el espesor de la tubería forzada se calcula con la fórmula clásica de tuberías:

$$e = \frac{PD}{2\sigma_f k_f}$$

donde: e es el espesor de la conducción; en mm; presión hidrostática incluida por golpe de ariete, en KN/mm²; D es el diámetro interno del tubo, en m; σ_f es la resistencia a la tracción del material, 1,200 KN/mm² en acero; k_f es el factor por tipo de unión de las piezas del material, 0.9 para uniones soldadas.

9.6.2 Dimensiones

El relieve accidentado del eje del conducto a presión planteó establecer un equilibrio entre la longitud de la tubería y los movimientos de tierra asociados para su construcción; es decir, definir el alineamiento económicamente óptimo del eje longitudinal. Asimismo, dada la altura de salto de agua, se eligió el acero como material de la tubería, considerando uniones soldadas.

Entonces, la tubería forzada tendrá una longitud de 620.2 m, y 443.6 m de salto bruto de agua, correspondiente entre el N.A.M.O. y el eje de la válvula de admisión en la casa de máquinas. El diámetro económicamente óptimo es 0.85 m.

Por tanto, se calculó las sobrepresiones por el método de Allievi, de acuerdo a los cambios de dirección del perfil de la tubería.

En la Figura 9.8 se muestra el resumen de las sobrepresiones de la tubería forzada:

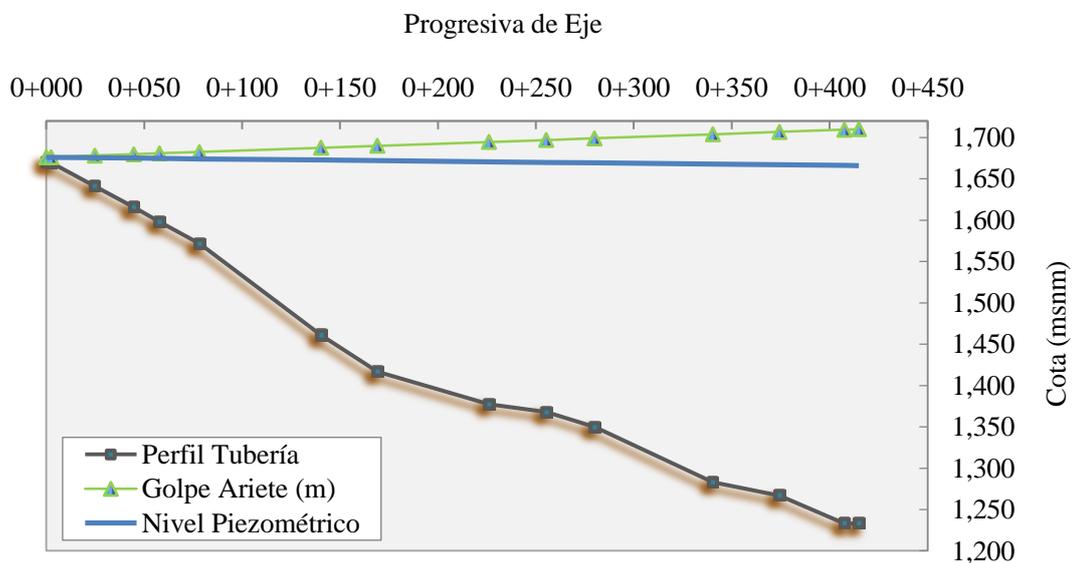


Figura 9.8 Perfil hidráulico de Tubería Forzada, proyecto C.H. FELFE.

De esta manera, se definió el espesor de la tubería de acero, de acuerdo a la sobrepresión calculada en cada cambio de dirección.

En el Cuadro 9.4 se presenta el resumen de los espesores de la tubería forzada.

| Progresiva | Golpe de Ariete | Sobre Presión | Espesor Mínimo | Espesor Comercial |
|------------|-----------------|---------------|----------------|-------------------|
| | m | m | mm | mm |
| 0+000 | 0 | 5.3 | 4.0 | 5.0 |
| 0+002 | 0.2 | 6.7 | 4.0 | 5.0 |
| 0+024 | 2.1 | 36.9 | 5.0 | 5.0 |
| 0+044 | 3.7 | 64 | 5.0 | 5.0 |
| 0+057 | 4.8 | 82.9 | 6.0 | 10.0 |
| 0+078 | 6.5 | 111 | 7.0 | 10.0 |

| | | | | |
|-------|------|-------|------|------|
| 0+140 | 11.7 | 226.8 | 10.0 | 10.0 |
| 0+169 | 14.1 | 273.5 | 12.0 | 15.0 |
| 0+226 | 18.8 | 317.3 | 13.0 | 15.0 |
| 0+255 | 21.2 | 329.3 | 13.0 | 15.0 |
| 0+280 | 23.3 | 349.4 | 14.0 | 15.0 |
| 0+340 | 28.3 | 421.3 | 16.0 | 20.0 |
| 0+374 | 31.2 | 440.2 | 17.0 | 20.0 |
| 0+407 | 33.9 | 476.8 | 18.0 | 20.0 |
| 0+420 | 33.9 | 476.8 | 18.0 | 20.0 |

Cuadro 9.4 Reporte de espesores de Tubería Forzada, proyecto C.H. FELFE.

El detalle del diseño de la tubería forzada se encuentra en planos FELFE-TF-001 y FELFE-TF-002.

9.7 ANCLAJES

Los anclajes del Proyecto fueron proyectados para soportar el peso de la tubería y las cargas dinámicas propias del agua.

A continuación, se describe los criterios de diseño y sus respectivas dimensiones:

9.7.1 Criterios de Diseño

Los anclajes son estructuras macizas de concreto que se proyectan a lo largo de la tubería forzada en cada cambio de dirección, conocido como “nudo”; de esta manera se logra restringir el movimiento axial de la tubería y el fluido, y transferir las cargas al terreno.

Las cargas que configuran las dimensiones de un bloque de anclaje se inscriben en un volumen de control, dentro del cual se calculan las fuerzas transmitidas por la tubería aguas arriba y aguas abajo.

De forma general, se utilizó un total de 16 fuerzas, de acuerdo a S. Krochin (1986):

- F1 – componente del peso propio de tubería. normal al eje de la misma
- F2 – componente del peso propio de tubería. paralelo al eje de la misma
- F3 – rozamiento entre tubería y anclaje. por gradiente térmico
- F4 – rozamiento entre tubería y empaquetadura. por gradiente térmico
- F5 – rozamiento entre tubería y junta de dilatación. por gradiente térmico
- F6 – presión del agua hacia anclaje. paralelo al eje de tubería
- F7 – rozamiento entre agua y tubería. por gradiente térmico
- F8. F9. F10. F11. F12. F13 y F14 son fuerzas hacia aguas abajo del anclaje
- F15 y F16 – fuerza centrífuga en nudo. por cambio de dirección

En la Ilustración 9.6 se indica la ubicación de cada fuerza.

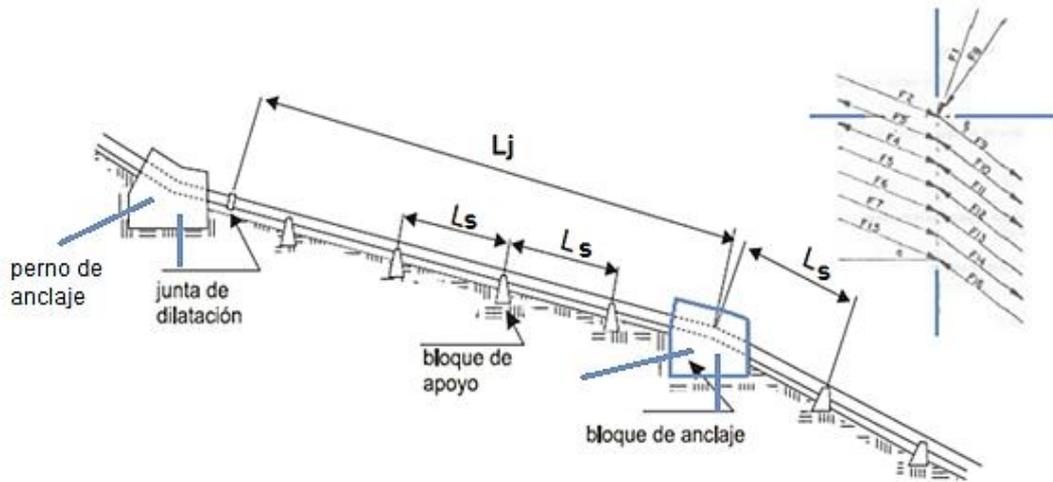


Ilustración 9.6 Esquema de fuerzas en anclaje.
Adaptado de: S. Krochin, 1986.

En la actualidad, los bloques van acompañados de elementos de soporte en talud, que otorgan mayor estabilidad ante deslizamientos y una reducción en el volumen del dado; en el presente estudio se ha seleccionado los pernos helicoidales no tensado.

9.7.2 Dimensiones

La tubería forzada consta de un diámetro de 0.85 m, y una longitud de 620.20 m. El alineamiento vertical de la tubería determinó establecer 13 nudos o macizos, en donde se eligió 2.0 m para el ancho de los macizos. En cada nudo se determinó la fuerza horizontal y vertical resultante, así como la cantidad de pernos de anclaje, que garanticen el equilibrio estático global del nudo.

Entonces, el diseño de los pernos anclajes consideró los siguientes parámetros:

- $f_y = 4,200 \text{ kg-f/cm}^2$, límite elástico de tracción para perno de acero
- $\varnothing = 25 \text{ mm}$, diámetro de la barra helicoidal
- $f'c = 180 \text{ kg-f/cm}^2$, resistencia a compresión del concreto lanzado
- $FS = 1.2$, factor de seguridad

Por tanto, la longitud de anclaje se calculó con la siguiente expresión:

$$L = \frac{\varnothing f_y}{0.4 f'c} FS$$

En Cuadro 9.5 se muestra el resultado de la longitud axial de macizo para cada nudo (L_a), y el número de anclajes horizontales (Ph) y verticales (Pv); longitudes en m.

| Anclaje | A-1 | A-2 | A-3 | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | A-8 | A-9 | A-10 | A-11 | A-12 | A-13 |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| L_a | 2.0 | 2.5 | 2.2 | 2.5 | 3.4 | 3.4 | 4.0 | 3.8 | 4.0 | 3.8 | 4.8 | 5.0 | 6.0 |
| Ph | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 6.0 | 5.0 | 5.0 | 4.0 | 7.0 | 8.0 | 10.0 |
| Pv | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 4.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 4.0 | 9.0 | 7.0 | 17.0 |

Cuadro 9.5 Lista de dimensiones principales de anclajes, proyecto C.H. FELFE.

El detalle de los anclajes se encuentra en el plano FELFE-TF-002.

9.8 APOYOS

Las sillas o apoyos son estructuras de concreto, que permiten soportar tanto los esfuerzos provocados por el peso de la tubería de presión y agua, así como por el deslizamiento axial ante variaciones de temperatura.

A continuación, se describe los criterios de diseño y sus respectivas dimensiones:

9.8.1 Criterios de Diseño

Continuando con el enfoque de anclajes, las únicas fuerzas que actúan son las equivalentes a F1 y F3. Por tanto, la longitud entre apoyos se determina con la siguiente expresión:

$$L_s = 182.6 \sqrt[3]{\frac{(D + 2e)^4 - D^4}{785.4D^2 + 24.662e(D + e)}}$$

donde: L_s es la longitud entre apoyos, en m; D y e son el diámetro y el espesor de la tubería forzada.

En la Ilustración 9.7 se indica las dimensiones típicas de un apoyo.

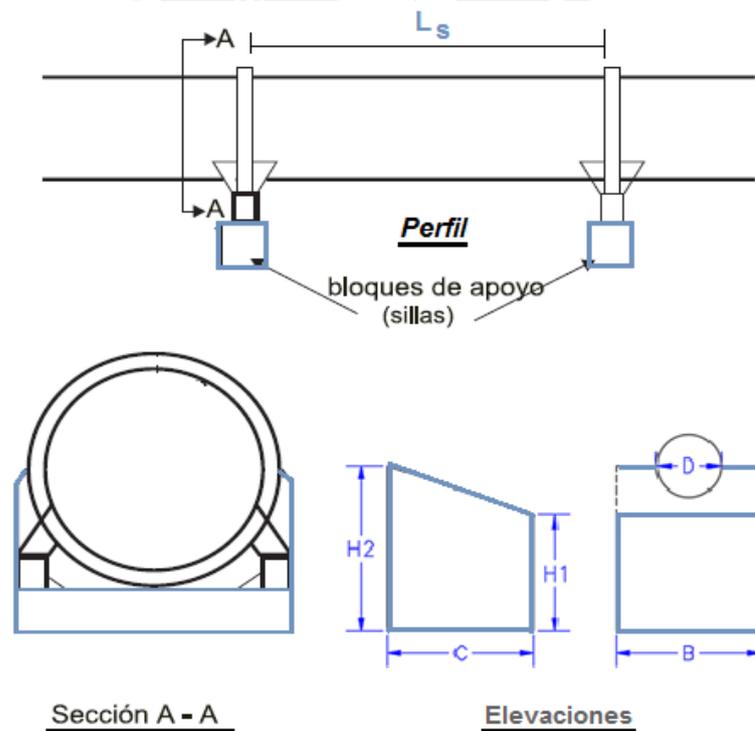


Ilustración 9.7 Esquema de planta y secciones de apoyos.
Adaptado de: R. Ortiz, 2013.

9.8.2 Dimensiones

Para el diseño de un apoyo típico se calculó una fuerza (P_s), conformada por propiedades geométricas de la tubería (D y e), a ser soportadas por una longitud máxima entre apoyos (L_s). Luego, se planteó un diagrama de cuerpo libre, en

función de la longitud máxima entre apoyos, a fin de controlar efectos de volteo y deslizamiento.

Entonces, haciendo el trazo de una rasante estable (es decir, libre de deslizamientos de talud), se definió las dimensiones de los parámetros H1 y H2; el resto, fue calculado por estabilidad al deslizamiento y volteo.

En el Cuadro 9.6 se presentan las dimensiones finales de los apoyos.

| Apoyo | C | B |
|-----------|------|------|
| | m | m |
| S1 @ S6 | 1.20 | 1.20 |
| S7 @ S9 | 1.30 | 1.30 |
| S10 @ S12 | 1.40 | 1.40 |

Cuadro 9.6 Dimensiones de apoyos en la tubería forzada, proyecto C.H. FELFE.

9.9 PÉRDIDAS DE CARGA

Las pérdidas de carga son condiciones estacionarias del flujo, producto del rozamiento entre el fluido y el material que lo contiene, y de los cambios de dirección.

A continuación, se describe los criterios de diseño y sus respectivas dimensiones:

9.9.1 Criterios de Diseño

Las pérdidas de carga por fricción se estiman de acuerdo a la ecuación de Manning:

$$h_f = \lambda \frac{L V^2}{\emptyset 2g}$$

donde: h_f son las pérdidas por fricción, en m; λ es el coeficiente de rugosidad en el tubo, adimensional; L es la longitud de la tubería, en m; \emptyset es el diámetro de la tubería, en m; V es la velocidad de flujo, en m/s; y g es la aceleración de la gravedad, 9.8 m/s².

Las pérdidas de carga locales se estiman de la siguiente manera:

$$h_l = \frac{K \cdot V^2}{2g}$$

donde: h_l son las pérdidas locales, en m; V es la velocidad de flujo, en m/s.

Por tanto, el salto de agua útil para el aprovechamiento hidroeléctrico resulta de la diferencia entre la caída bruta (Hb), contabilizada a partir del nivel de agua de máxima operación (NAMO) y las pérdidas de carga totales hasta la válvula de admisión a los equipos de turbinación; ver Ilustración 9.8.

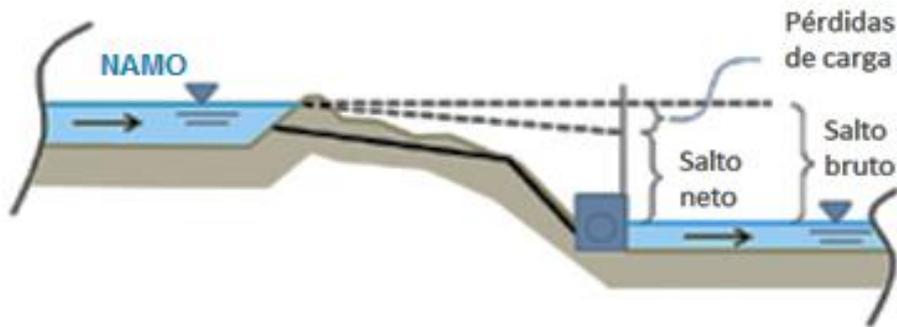


Ilustración 9.8 Esquema de salto útil para generación hidroeléctrica.
Adaptado de: R. Ortiz, 2013.

9.9.2 Dimensiones

El sistema de flujo a presión inicia en la cámara de carga, en el eje de tubería forzada; nivel 1,670.80 msnm. El salto de agua bruto está comprendido entre el NAMO y el eje de turbinas, igual a 443.9 m. En condiciones normales, la tubería se encontrará en alta presión, y afectada por pérdidas de carga propias del material y geometría del eje.

En el Cuadro 9.7 se presenta el resumen del cálculo de pérdidas totales.

| | |
|-------------------------|--------------|
| Entrada en rejilla | 0.56 |
| Cambio de sección | 0.37 |
| Cambios de dirección | 0.42 |
| Perdidas por fricción | 10.12 |
| Pérdidas Totales | 11.46 |
| % Hb | 2.6 |

Cuadro 9.7 Relación de pérdidas de carga en conducto forzado, proyecto C.H. FELFE

Por tanto, salto neto aprovechable para el proyecto C.H. FELFE es igual a 432.3 m.

9.10 CASA DE MÁQUINAS

La sala de máquinas es la edificación destinada a alojar los grupos de generación y sus respectivos equipamientos auxiliares, que incluye un área para la operación de la central; actualmente la operación está siendo llevada a cabo de manera remota, por telecomunicaciones.

A continuación, se describe las lecciones aprendidas del capítulo:

9.10.1 Criterios de Diseño

Las turbinas hidráulicas tienen como función transformar la energía potencial y cinética del agua en energía mecánica de rotación. En general, se clasifican en turbinas de acción o de reacción; las turbinas de reacción tienen mejores rendimientos.

En una turbina de acción la presión del agua se convierte en energía cinética constante para hacer girar los álabes; en una turbina de reacción, actúa como una fuerza sobre la superficie de los álabes y decrece a medida que avanza hacia la salida.

Las turbinas de acción más representativas son Pelton, Ossberger, y Turgo; todas están conformadas por un rodete, álabes de doble cuenco, e inyectores. En particular, la turbina Pelton se emplea para grandes caídas, con caudal mínimo aprovechable a partir del 10% del equipado.

De forma preliminar, el gráfico envolvente de utilización de turbinas de un fabricante alemán permite seleccionar rápidamente el tipo de turbina, en base al salto neto (H) y caudal de equipamiento (Q); ver Ilustración 9.10.

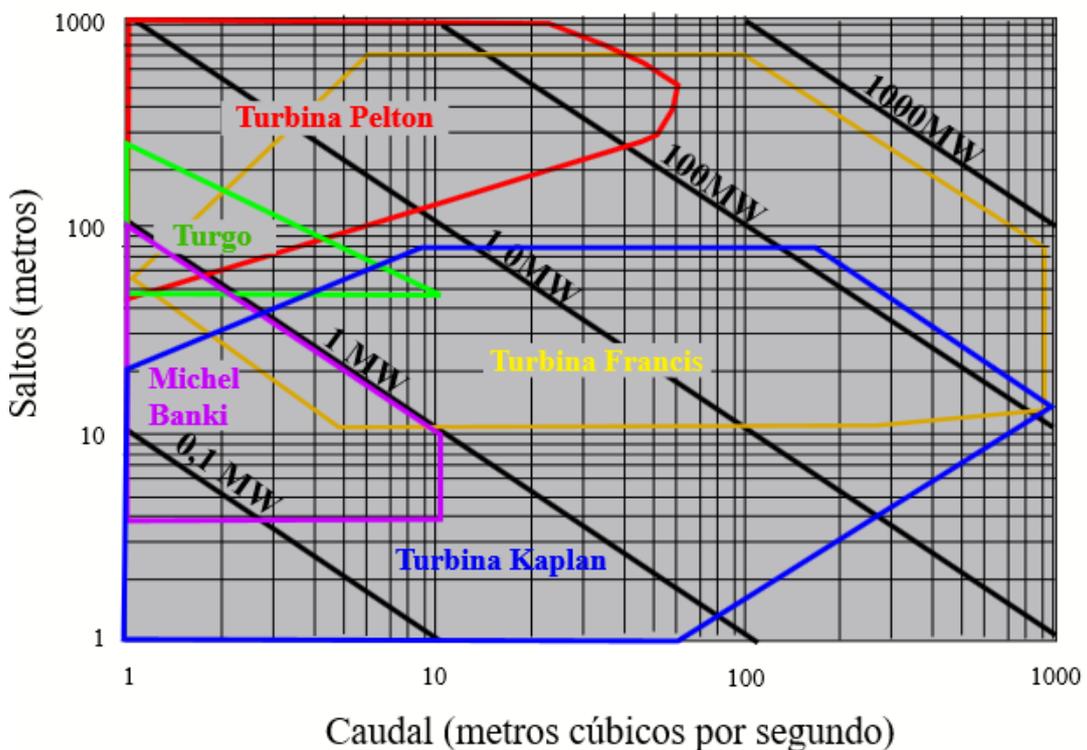


Ilustración 9.9 Esquema de saltos para hidroeléctricas.
Adaptado de: Wasserkraft, 2007.

Una vez seleccionado el tipo de turbina, es necesario estimar las dimensiones para un grupo de generación ya que su área repercute en el dimensionamiento de la casa de máquinas, en función de salto neto (H), caudal de equipamiento (Q), y la potencia de equipamiento (P):

- velocidad específica: $N_S = 85.5 / H^{0.243}$
- velocidad de turbina: $N = N_S * H^{5/4} / P^{0.5}$
- diámetro del rodete de turbina: $D_{tp} = 40.8 * \sqrt{H} / N$
- área del equipamiento global: $A_b = (6 + D_{tp}) * (3 + D_{tp})$
- área de la casa de máquinas: $A_{CM} = 2A_b(n + 1) + 14.4 * (D_{tp} + 6) + 78.75$

9.10.2 Dimensiones

La casa de máquinas estará constituida por un edificio con dimensiones en planta de 10.5 m X 17.0 m, en donde se ubicarán el grupo de generación con turbina Pelton, espacios de maniobras de montaje, oficinas, y ambientes para el servicio para el personal de operación y mantenimiento.

Por tanto, el cuarto de máquinas se ubicará a partir del nivel 1,232.90 msnm, sobre el cual se instalará un puente grúa para montaje y mantenimiento; el resto de unidades electromecánicas y líneas de transmisión no son materia de estudio de la presente Tesis.

En la Figura 9.9 se presenta una vista en planta de la casa de máquinas del Proyecto.

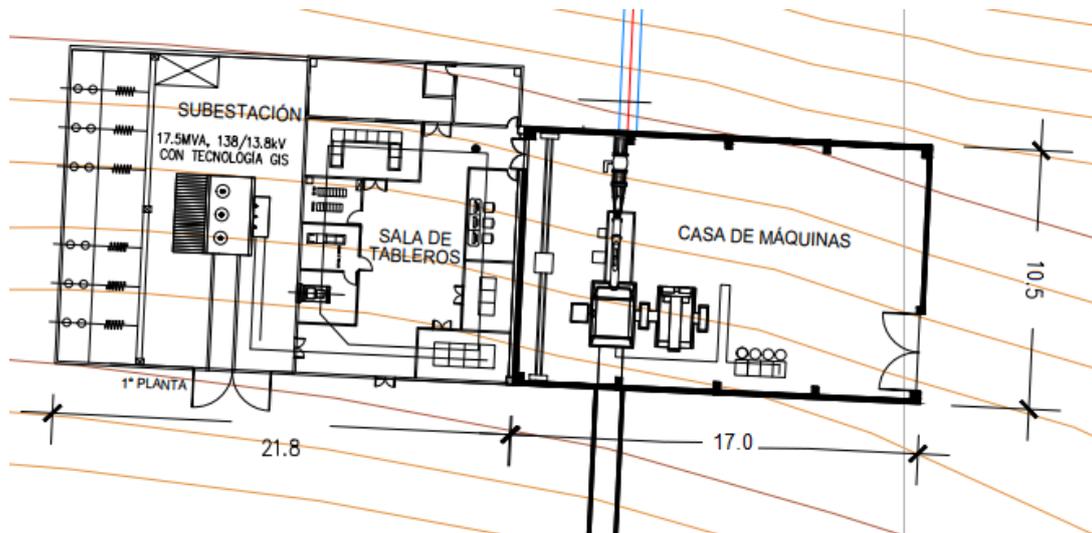


Figura 9.9 Casa de máquinas, proyecto C.H. FELFE.

El detalle de la casa de máquinas se encuentra en el plano FELFE-CM-001.

9.11 CONEXIÓN ELÉCTRICA

El Proyecto tiene previsto evacuar su energía a la barra en 22,9 kV de la SE Yaupi, la cual desarrollará una línea de conexión de 8.2 km.

En una etapa posterior a los alcances de este estudio, el Proyecto se podrá contemplar una Evaluación de Pre Operatividad (EPO), el cual se coordina con el Comité de Operaciones del Sistema Interconectado Nacional (COES).

10. EVALUACIÓN SOCIO-AMBIENTAL

En este capítulo se identifica el área de influencia y el medio físico, biológico y económico del Proyecto Central Hidroeléctrica FELFE.

Las etapas de identificación y valoración de impactos, así como el plan de manejo ambiental, corresponden a una segunda fase del estudio de impacto ambiental, que requerirán de estudios de campo.

10.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El Proyecto se ubica en el Departamento Pasco, provincia y distrito Oxapampa. Para acceder desde la capital (Lima), se toma la Carretera Central en dirección Nor-Este, hasta ingresar al Departamento de Pasco.

10.1.1 Características Técnicas

El Proyecto ha sido planificada para aprovechar las aguas de la Quebrada Raymondi por la margen izquierda, en la modalidad de central de agua fluyente.

El circuito hidráulico se desarrolla en superficie, con la siguiente distribución de sus componentes: bocatoma con toma en galería, canal de derivación, desarenador de una nave, canal de conducción, cámara de carga, tubería forzada con anclajes, y casa de máquinas en superficie.

En el Cuadro 10.1 se presenta la información principal del Proyecto.

| Descripción | Cantidad | Unidad |
|----------------------------|-------------|-------------------|
| Caudal de diseño | 2.7 | m ³ /s |
| Nivel de captación | 1681.5 | msnm |
| Desarenador | 22.0 | m |
| N.A.M.O. | 1676.7 | msnm |
| Inicio Eje tubería forzada | 1670.8 | km |
| Salto de agua neto | 432 | m |
| Potencia instalada | 10.7 | MW |
| Energía anual media | 82.0 | GW-h |

Cuadro 10.1 Ficha técnica, proyecto C.H. FELFE.

10.1.2 Obras Provisionales

Consiste en la etapa previa a la construcción del Proyecto y por lo general se basa en una descripción de obras preliminares en la zona, tales como:

- movilización y desmovilización de personal, equipos y herramientas del Contratista durante la construcción
- instalación de campamentos industriales, almacenes prefabricados, para acopio de materiales, equipos y herramientas a utilizar durante la construcción
- mantenimiento de accesos, para acondicionar el tránsito de vías existentes

10.2 ÁREA DE INFLUENCIA

Debido a que el Proyecto, tanto los recursos naturales como las obras de infraestructura, se sitúa en el límite político de los departamentos Pasco y Junín, el área de influencia comprende ambas regiones.

10.2.1 Área de Influencia Directa

El Área de Influencia Directa (AID) es el medio físico explícito, donde se manifiestan los impactos ambientales en tiempo real por efecto de las actividades de implementación del proyecto.

Por tanto, se ha considerado un área circundante de 200 m alrededor del eje de las obras de construcción y operación como el AID de la Central Hidroeléctrica FELFE, equivalente a 77.4 Ha.

En la Figura 10.1 se presenta el territorio con posibles impactos del Proyecto.

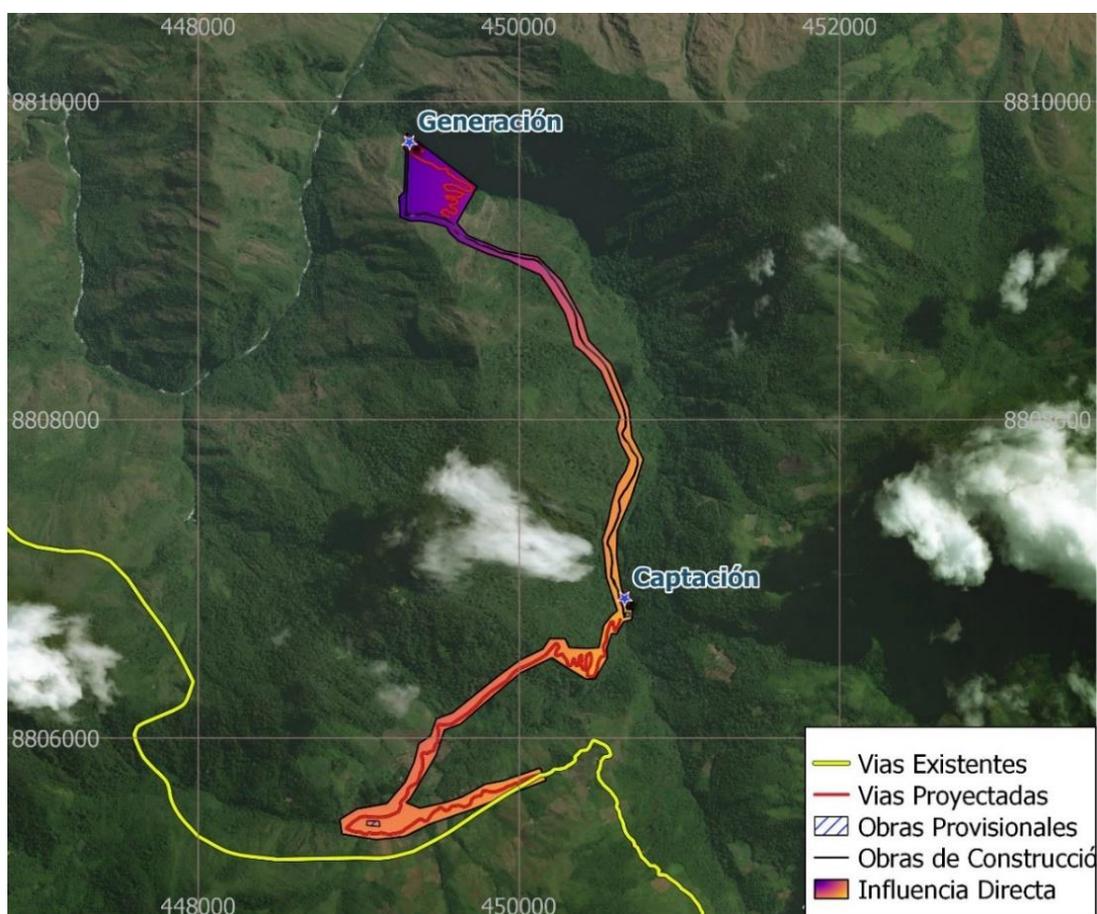


Figura 10.1 Área de influencia directa, proyecto C.H. FELFE.

10.2.2 Área de Influencia Indirecta

El Área de Influencia Indirecta (AII) es el medio físico colindante al AID, en donde se manifiestan tanto los impactos ambientales en tiempo diferido, como los de tipo socioeconómicos por efecto de las actividades de implementación del proyecto.

Por tanto, se ha considerado un área circundante de 500 m alrededor del eje de las obras de construcción como el AII de la Central Hidroeléctrica FELFE. Asimismo,

respecto a las áreas de actividades socioeconómicas, deberán ser identificadas mediante una visita de campo a los centros poblados colindantes al Proyecto.

10.3 SITUACIÓN SOCIO-AMBIENTAL

En este acápite se realiza la identificación del medio físico, biológico y económico del área de influencia del Proyecto.

10.3.1 Medio Físico

El medio físico ha sido caracterizado por los estudios básicos del Proyecto (hidrología y geología), que permiten describir los recursos hídricos y morfológicos del terreno.

i. Hidrología

La hidrología del Proyecto, desarrollada en el Capítulo 6, define la oferta hídrica de la Quebrada Raymondi, las demandas de agua par conservación ambiental (caudal ecológico), y el uso no consuntivo del Proyecto.

En el Cuadro 10.1 se resume los aprovechamientos hídricos para el Proyecto.

| Usos | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|--------------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Q. Raymondi | 7.4 | 10.8 | 11.4 | 8.6 | 5.6 | 4.2 | 3.1 | 2.5 | 2.4 | 3.0 | 3.5 | 5.2 |
| Q. Ecológico | 2.2 | 3.2 | 1.1 | 0.8 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 1.0 | 1.5 |
| C.H. FELFE | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.7 | 2.3 | 2.2 | 2.7 | 2.5 | 2.7 |

Cuadro 10.2 Usos de agua, proyecto C.H. FELFE.

ii. Geología

La geología del Proyecto, desarrollada en el Capítulo 5, define la litología y peligros geológicos del terreno donde se emplaza el Proyecto.

Para las obras de captación y conducción se distinguen laderas de valle subandina, mientras que para las obras de generación el terreno se presente como un valle fluvial. Además, la zona está afectada por fallas inversas y normales, y abundantes movimientos en masa, inundaciones, y erosión fluvial.

10.3.2 Medio Biológico

Este acápite ha sido elaborado en base a la revisión del documento Zonificación Ecológica y Económica de Junín (ZEE Junín, 2015).

i. Zonas de Vida

La ecología del Proyecto ha sido caracterizada por el método de Zonas de Vida de Holdridge (1967), que sugiere que los ecosistemas partieron de la interacción en el tiempo entre elementos químicos básicos existentes en la atmósfera, de la capa del suelo derivada de la descomposición de la roca, del agua como medio para la disolución, el calor y la luz como fuente de energía para la generación de vida.

Según esta teoría, las zonas de vida del Proyecto comprenden la micro cuenca Raymondi, en donde se presentan las siguientes unidades ecológicas: bosque muy húmedo Premontano Tropical (bmh-PT), bosque muy húmedo Montano Tropical (bmh-MT) y bosque pluvial Montano Tropical (bp-MT).

En el Cuadro 10.2 se lista las áreas ecológicas de la micro cuenca Raymondi, en km².

| Zona de Vida | Área |
|--------------|-------|
| bmh-PT | 4.1 |
| bmh-MT | 121.2 |
| bp-MT | 7.1 |

Cuadro 10.3 Zonas de vida de la micro cuenca Raymondi, proyecto C.H. FELFE.

ii. Flora

El área de estudio se caracteriza por una predominante vegetación, siempre verde con lianas, arbustos y árboles, ya que comparten la flora de selva baja con el bosque montano tropical.

Entre las especies arbóreas se tiene los tipos Clusia, Brunellia, Raoabea, Eugenia, Ocotea, Myrcia, Laplacea, Solanum, Podocarpus, Weinmannia; algunos helechos arbóreos de los géneros Cyathea, Alsophilla y Dicksonia; y varias especies de la familia Melastomacea, y carricillo o suro [ZEE Junín, 2015].

iii. Fauna

Debido a que el agua transportada es transparente, no hay presencia de organismos microscópicos como fitoplancton y zooplancton; sin embargo, habitan ciertas especies de peces como el bagre y aves locales como el tucaneta, cérvidos como el venado enano [ZEE Junín, 2015].



Figura 10.2 Vista de flora y fauna del medio biológico.
Fuente: ZEE Junín, 2015.

10.3.3 Medio Socio-económico

i. Demografía

En forma general, los centros poblados Santa Rosa, Raymondi, La Florida, Santa Clara 2, Santa Fe, Purrayo y Unión Andahuaylas se distribuyen en la zona aguas arriba del proyecto hidroeléctrico FELFE.

Sin embargo, la zona del Proyecto comprende los centros poblados Santa Fe y Raymondi.

En la Figura 10.4 se ubica los centros poblados cercanos al Proyecto.

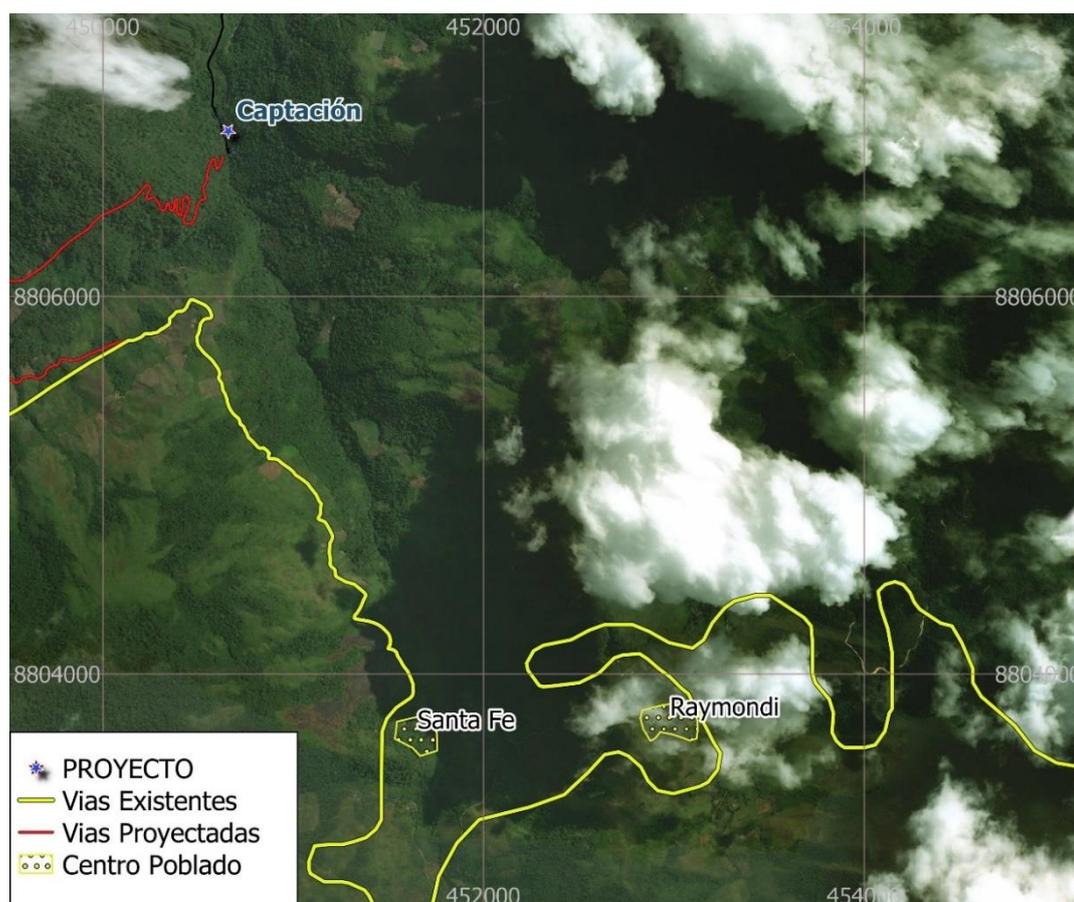


Figura 10.3 Centros poblados del medio social cercano al Proyecto.
Fuente: INEI, 2017.

En el Cuadro 10.3 se presenta la población cercana al Proyecto.

| Centro Poblado | Población | |
|----------------|-----------|-------|
| | Hombre | Mujer |
| Raymondi | 124 | 116 |
| Santa Fe | 29 | 11 |

Cuadro 10.4 Demografía del medio social, proyecto C.H. FELFE.
Fuente: INEI, 2017.

ii. Producción

La producción en la zona del Proyecto comprende la pesca para autoconsumo y crianza incipiente como truchas o bagres, agricultura para el cultivo de maíz, papa, yuca, zapallo y entre las frutas el plátano y palta, que son comercializados en los mercados locales.

iii. Patrimonio Arqueológico

En la revisión efectuada de los archivos del Ministerio de Cultura (MinTur), se encontró información de sitios arqueológicos registrados por el Ministerio. En la

zona aledaña al Proyecto sólo existiría las ruinas de Auquimarka, aguas arriba de la confluencia de los Ríos Paucartambo y Quiparacra.

En el Cuadro 10.4 se presenta la ubicación de restos arqueológicos.

| Resto Arqueológico | Coordenadas UTM – WGS84 | |
|--------------------|-------------------------|-----------|
| | Norte | Este |
| Auquimarka | 423 332 | 8 811 800 |

Cuadro 10.5 Demografía del medio social, proyecto C.H. FELFE.
Fuente: INEI, 2017.

A través de una visita de campo podrá confirmarse este dato, o de existir evidencias arqueológicas en el área de influencia directa del Proyecto, deberá procederse a realizar un rescate arqueológico coordinando con el MinTur.

10.4 CLASIFICACIÓN AMBIENTAL

En proyectos de inversión, antes de proceder a la ejecución es necesario pasar por una evaluación de impactos ambientales ante el ente gubernamental correspondiente, a fin de identificar y elaborar un plan de remediación de los posibles impactos directos e indirectos producidos por la construcción, operación y abandono del proyecto. La evaluación ambiental comprende de estudios de campo y gabinete.

Entre las medidas de mitigación ambiental se tienen algunas disposiciones:

- Medidas para mitigar afectaciones a la calidad del aire
- Medidas para la protección de la vegetación, fauna, lecho fluvial, etc
- Elaboración de un plan de relaciones comunitarias

En ese sentido, para que el proyecto Central Hidroeléctrica FELFE obtenga la certificación ambiental debe elaborarse una memoria denominada Evaluación Ambiental Preliminar (EVAP) dirigido a la jurisdicción local del Ministerio de Energía y Minas, la cual es la Dirección Regional de Energía y Minas de Pasco (DREM-Pasco). A su vez, la DREM-Pasco solicitará al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) que emita una Opinión Técnica Vinculante.

Finalmente, la DREM-Pasco agregará observaciones o aprobará el EVAP, con la emisión de una resolución directoral de aprobación con alguna de las siguientes clasificaciones definidas por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA):

| Categoría | Descripción | Clasificación |
|-----------|--|---|
| I | Declaración de Impacto Ambiental (DIA) | incluye aquellos proyectos cuya ejecución no origina impactos ambientales negativos de carácter significativo |

| | | |
|-----|---|--|
| II | Estudio de Impacto Ambiental Semidetallado (EIA-sd) | incluye los proyectos cuya ejecución puede originar impactos ambientales moderados y cuyos efectos negativos pueden ser eliminados o minimizados mediante la adopción de medidas fácilmente aplicables |
| III | Estudio de Impacto Ambiental Detallado (EIA-d) | incluye aquellos proyectos cuyas características, envergadura y/o localización pueden producir impactos ambientales negativos significativos cuantitativa o cualitativamente |

Tabla 10.1 Estudios ambientales para proyectos de inversión.

Fuente: SEIA, 2013.

Por tanto, dada la capacidad de la central (10.7 MW) y aprovechar los recursos hídricos de forma no consuntiva y a tiempo real (central *run-of-river*), se expedirá la certificación para la categoría I.



11. PRESUPUESTO

Este capítulo describe la metodología adoptada para la estimación de los costos de inversión (capex) para la concesión definitiva y puesta en marcha del proyecto Central Hidroeléctrica FELFE.

11.1 COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos de inversión comprenden el costo directo de la construcción del Proyecto, gastos generales, utilidades, contingencias, y las tasas de concesión.

Las consideraciones tomadas en cuenta para el desarrollo del Proyecto fueron las siguientes:

- en lo que respecta a obras civiles, los precios unitarios de los costos de los componentes del Proyecto corresponden al mercado peruano junio del 2108
- en relación a los costos de equipamiento electromecánico e hidromecánico, han sido estimados en base a experiencias de proyectos similares
- el porcentaje de obras civiles correspondiente a Costos Indirectos asciende a 15%
- el porcentaje de obras civiles correspondiente a Contingencias asciende a 10%
- el porcentaje de las obras civiles correspondiente a Utilidades asciende a 8%

Los costos de equipamiento electromecánico e hidromecánico incluyen todo lo referente a fabricación, transporte, montaje y pruebas de puesta en operación, además de sus gastos generales y utilidades propios.

La moneda usada es el dólar americano, equivalencia 1 US\$ = 3.27 Soles a Agosto del 2018.

11.2 COSTOS DE CONCESIÓN

Los costos asociados a la obtención de la concesión definitiva son los siguientes:

- Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y de Inexistencia de Restos Arqueológicos (CIRA) igual al 0.12% del subtotal de obras civiles, electromecánicas y de transmisión
- Mitigación Ambiental igual al 0.10% del subtotal de obras civiles, electromecánicas y de transmisión
- Estudio de Factibilidad e Ingeniería Definitiva igual al 1.50% del subtotal de obras civiles, electromecánicas y de transmisión
- Supervisión igual al 4.00% del subtotal de obras civiles, electromecánicas y de transmisión
- Responsabilidad Social igual al 0.15% de subtotal de obras civiles, electromecánicas y de transmisión

11.3 COSTO DE INVERSIÓN

El costo de inversión del Proyecto comprende los costos de ejecución y de concesión definitiva. Los costos ejecución comprenden las obras civiles; los costos de equipamiento electromecánico e hidromecánico no se consideran directos ya que son adquiridos como un monto global.

En el Cuadro 11.1 se presenta el resumen del costo de inversión del Proyecto.

| ITEM | DESCRIPCIÓN | TOTAL |
|----------|---|----------------------|
| A | Obras Preliminares | 705,219.05 |
| 1 | Trabajos preliminares y obras provisionales | 177,374.09 |
| 2 | Accesos temporales y permanentes | 527,844.96 |
| B | Obras Civiles | 8,525,998.54 |
| 1 | Bocatoma | 332,900.37 |
| 2 | Canal de derivación | 112,669.01 |
| 3 | Desarenador | 65,809.70 |
| 4 | Canal de conducción | 4,701,224.32 |
| 5 | Cámara de carga | 143,879.57 |
| 6 | Tubería forzada | 1,732,729.29 |
| 7 | Canal de demasías | 174,430.68 |
| 8 | Casa de máquinas | 1,262,355.60 |
| C | Equipamiento Electromecánico | 4,280,000.00 |
| D | Línea de Transmisión | 400,000.00 |
| E | Concesión Definitiva | 500,476.11 |
| 1 | EIA y CIRA | 10,231.20 |
| 2 | Mitigación Ambiental | 8,526.00 |
| 3 | Estudio de Factibilidad e Ingeniería Definitiva | 127,889.98 |
| 4 | Supervisión del Propietario | 341,039.94 |
| 5 | Responsabilidad Social | 12,789.00 |
| | Costo directo | 13,911,217.59 |
| | Costos indirectos | 1,278,899.78 |
| | Contingencias | 852,599.85 |
| | Utilidad | 682,079.88 |
| F | Total | 17,225,273.23 |

Cuadro 11.1 Presupuesto de inversión, proyecto C.H. FELFE.

Según los estimados en los acápite anteriores, el costo de obra para la puesta en servicio de la Central Hidroeléctrica FELFE asciende a 17.2 millones US\$. Por tanto, el Proyecto alcanza un ratio de construcción de 1.6 US\$/MW, valor del orden que se maneja en proyectos similares.

12. ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

Este capítulo describe la evaluación de la rentabilidad de invertir en el proyecto Central Hidroeléctrica FELFE.

12.1 COSTES DEL PROYECTO

Para determinar la rentabilidad del Proyecto, en primer lugar es necesario cuantificar todos los costos del Proyecto para su operación comercial.

A continuación, se describe los costes del Proyecto:

12.1.1 Costos de Capital

El costo de capital del Proyecto asciende a 20.3 millones US\$, incluido IGV; esto equivale a decir una inversión de 1.9 US\$ por MW instalado.

En el Cuadro 12.1 se muestra un resumen de los costos del Proyecto:

| Item | Descripción | Total |
|------|-----------------------------|-------------------|
| 1 | Costo Directo | 13.911.218 |
| 2 | Costos Indirectos | 1.384.683 |
| 3 | Utilidades | 738.497 |
| 4 | Contingencias | 923.122 |
| 5 | Concesión Definitiva | 778.256 |
| | Subtotal | 17,735,775 |
| | Inversión (inc. IGV) | 20,928,215 |

Cuadro 12.1 Costos de capital en dólares, proyecto C.H. FELFE.

12.1.2 Costos O&M

Las siglas O&M hacen referencia a los costos de Operación y Mantenimiento, que surgen a partir de la puesta en marcha de la central. Así, en el Proyecto se ha contemplado el 2% de los ingresos anuales por venta de energía para la administración de la operación de la planta, equivalente a 74,620 US\$/año.

Asimismo, se está considerando el 3% de los ingresos anuales por venta de energía para el mantenimiento mayor de equipos, cada cinco años durante la vida útil del Proyecto, equivalente a 111,930 US\$/cinco años.

12.1.3 Licencias de Uso

En un contexto de control de los bienes que el Estado administra, las centrales hidroeléctricas están sujetas al pago del Canon Hidroeléctrico y al aporte de los organismos reguladores del sector, que también se califican como costos para la licencia de usos del Proyecto; éstos son el Comité de Operaciones del Sistema Interconectado Nacional (COES), el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), y la Dirección General de Electricidad (DGE).

Para el canon hidroeléctrico y aporte a los organismos reguladores (COES, OSINERGMIN y DGE) se consideró, de manera conservadora, el 2.5% de los ingresos anuales por venta de energía.

12.2 INGRESOS DEL PROYECTO

Los Ingresos del Proyecto fueron contabilizados por la producción anual promedio de energía, equivalente a 82.0 GW-h, multiplicada por una tarifa de venta, igual a 45.5 US\$/MW-h. Por tanto, los ingresos anuales ascendieron a 3,731,000 US\$.

12.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para la formulación de la evaluación económica del Proyecto se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- concesión del Proyecto : 20.0 años
- tasa de inversionistas : 15.0 %
- costos de capital : 17.7 M US\$. sin I.G.V.
- cronograma de ejecución : años 0 y 1
- compra de tierras : 4.00 S/./m²
- valor residual del Proyecto : en el último año
- compra de energía : garantizada 100% durante concesión

Adicionalmente, se ha considerado un pequeño ingreso por concepto de “valor residual”, tal que al final de la concesión el Proyecto pasará a ser vendido, considerando una depreciación del 40% del costo original.

12.3.1 Flujo de Caja Económico

Entonces, agrupando los resultados de los costos e ingresos del Proyecto, descritos líneas arriba, se realizó el flujo de caja económico.

En el Cuadro 12.2 se presenta el resultado del flujo de caja económico.

De los flujos de costos y beneficios, se obtuvo el valor actual neto (VAN) del Proyecto, ascendente a 3,520,886 US\$, lo cual indicaría que el Proyecto sería rentable con capitales propios del inversionista.

Asimismo, la tasa interna de retorno (TIR) encontrada, igual a 18.3%, indicaría que el Proyecto sería bastante favorable, tomando en cuenta que se trata de un Proyecto enfocado sin endeudamiento, sino con recursos propios.

| Años de Producción | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Flujo de Caja del Proyecto | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 |
| Venta de Energía | | | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 |
| Ingresos Totales | - | - | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 |
| Construcción del Proyecto | 7,094,310 | 10,641,465 | | | | | | | | |
| Administración de la Operación | | | 74,620.00 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 |
| Uso de Agua (ANA) | | | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 |
| MEM, Osinergmin, COES | | | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 |
| Mantenimiento Mayor | | | | | | | 111,930 | | | |
| Egresos Totales | 7,094,310 | 10,641,465 | 167,895 | 167,895 | 167,895 | 167,895 | 279,825 | 167,895 | 167,895 | 167,895 |
| Beneficio Bruta | - 7,094,310 | - 10,641,465 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,451,175 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 |
| Valor Residual | | | | | | | | | | |
| Beneficio Neto | - 7,094,310 | - 10,641,465 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,451,175 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 |

| 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 |
| 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 |
| 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 | 3,731,000 |
| 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 | 74,620 |
| 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 | 37,310.00 |
| 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 | 55,965 |
| | 111,930 | | | | | 111,930 | | | | | 111,930 |
| 167,895 | 279,825 | 167,895 | 167,895 | 167,895 | 167,895 | 279,825 | 167,895 | 167,895 | 167,895 | 167,895 | 279,825 |
| 3,563,105 | 3,451,175 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,451,175 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,451,175 |
| | | | | | | | | | | | 10,641,465 |
| 3,563,105 | 3,451,175 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,451,175 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 14,092,640 |

Cuadro 12.2 Flujo de caja económico en US\$, proyecto C.H. FELFE.

12.3.2 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad consiste en evaluar cómo respondería la evaluación económica del Proyecto ante la variación de los componentes de costos y de beneficios, entre otros como la tasa de descuento; es decir, verificar si el Proyecto sigue siendo o no rentable ante dichas variaciones.

Por tanto, el análisis de sensibilidad del Proyecto consideró la variación de los costos de capital y tarifa de venta de energía, que irán entre 80% y 120%; la finalidad es conocer el nivel de ingresos que podrá generar el Proyecto.

En los Cuadros 12.3 y 12.4 se presenta los resultados del análisis de sensibilidad.

| Costo de Inversión | VAN | TIR |
|--------------------|-----------|-----|
| 80% | 6,677,360 | 23% |
| Actual | 3,520,886 | 18% |
| 120% | 364,412 | 15% |

Cuadro 12.3 Sensibilidad al costo de inversión, proyecto C.H. FELFE.

En los supuestos planteados se encontró que el Proyecto sería mucho más rentable si es que se le lograra reducir los costos de inversión en un 20% del valor actual, ya que la TIR se incrementaría en 28%.

| Tarifa de Generación | VAN | TIR |
|----------------------|-----------|-----|
| 95% | 2,55,723 | 17% |
| Actual | 3,520,886 | 18% |
| 105% | 4,486,049 | 19% |

Cuadro 12.4 Sensibilidad a la tarifa de venta de energía, proyecto C.H. FELFE.

En los supuestos planteados se encontró que el Proyecto sería mucho más rentable si es que se le lograra incrementar la tarifa de generación en 5% del valor actual, ya que la TIR aumentaría al 19%.

No obstante, cabe señalar que la variación hidrológica de los caudales turbinables también podría ser analizado en un escenario de cambio climático.

12.4 EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación de financiamiento del Proyecto utilizó mecanismos tradicionales de apalancamiento a largo plazo, con una relación deuda/ capital típica (30/70).

La deuda será del tipo bancaria, con las siguientes características:

- ratio de apalancamiento : 70 %
- periodo de pago deuda : 12 años
- tasa de interés deuda : 7 %

Por otra parte, para la formulación de la evaluación financiera del Proyecto se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- capital del inversionista : 30 %
- horizonte de evaluación : 20 años
- tasa de descuento : 15 %
- valor residual del Proyecto : en último año
- impuesto a la Renta : 30 %

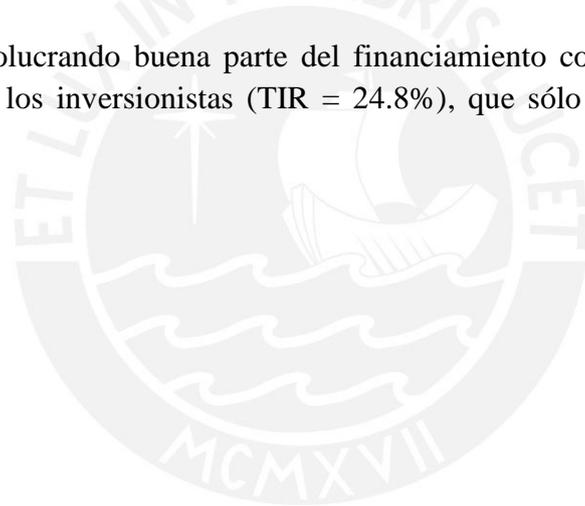
Entonces, agrupando los resultados de los costos e ingresos del Proyecto, descritos líneas arriba, se realizó el flujo de caja financiero.

En el Cuadro 12.5 se presenta el resultado del flujo de caja financiero.

De los flujos de costos y beneficios, se obtuvo el valor actual neto del Proyecto, ascendente a 8,823,439 US\$, lo cual indicaría que el Proyecto sería rentable con endeudamiento.

Asimismo, la tasa interna de retorno encontrada, igual a 24.8%. indicaría que el Proyecto sería bastante favorable; apalancar el Proyecto mejoraría la rentabilidad de los beneficios a los inversionistas.

Por lo tanto, involucrando buena parte del financiamiento con deuda, se logró un mejor retorno de los inversionistas (TIR = 24.8%), que sólo con recursos propios (TIR = 18.3%) .



| Años de Producción | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Flujo de Caja del Proyecto | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 |
| Ingresos Financieros | 4,966,017 | 7,449,026 | | | | | | | |
| Gastos financieros Bancos | | | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 |
| Cuota Bancos | | | 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 |
| Intereses | | | 869,053 | 820,471 | 768,489 | 712,867 | 653,353 | 589,672 | 521,533 |
| Amortización | | | 694,026 | 742,607 | 794,590 | 850,211 | 909,726 | 973,407 | 1,041,545 |
| Saldo de Capital | | | 12,415,043 | 11,721,017 | 10,978,410 | 10,183,820 | 9,333,609 | 8,423,883 | 7,450,476 |
| Gastos Financieros Totales | 4,966,017 | 7,449,026 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 |
| Utilidad Neta antes de Impuestos | - 2,128,293 | - 3,192,440 | 2,000,026 | 2,000,026 | 2,000,026 | 2,000,026 | 1,888,096 | 2,000,026 | 2,000,026 |
| Gasto por Impuesto a las Ganancias | - | - | 600,008 | 600,008 | 600,008 | 600,008 | 566,429 | 600,008 | 600,008 |
| Utilidad Neta con de Impuesto a la Renta | - 2,128,293 | - 3,192,440 | 1,400,018 | 1,400,018 | 1,400,018 | 1,400,018 | 1,321,667 | 1,400,018 | 1,400,018 |

| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | 2038 | 2039 | 2040 | 2041 |
| - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - | - | - | - | - | - | - |
| 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 | 1,563,079 | | | | | | | |
| 448,625 | 370,613 | 287,141 | 197,825 | 102,257 | | | | | | | | |
| 1,114,453 | 1,192,465 | 1,275,938 | 1,365,253 | 1,460,821 | | | | | | | | |
| 6,408,931 | 5,294,477 | 4,102,012 | 2,826,074 | 1,460,821 | | | | | | | | |
| - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - 1,563,079 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2,000,026 | 2,000,026 | 1,888,096 | 2,000,026 | 2,000,026 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,451,175 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 3,563,105 | 10,641,465 |
| 600,008 | 600,008 | 566,429 | 600,008 | 600,008 | 1,068,932 | 1,068,932 | 1,035,353 | 1,068,932 | 1,068,932 | 1,068,932 | 1,068,932 | 3,192,440 |
| 1,400,018 | 1,400,018 | 1,321,667 | 1,400,018 | 1,400,018 | 2,494,174 | 2,494,174 | 2,415,823 | 2,494,174 | 2,494,174 | 2,494,174 | 2,494,174 | 7,449,026 |

Cuadro 12.5 Evaluación financiera, proyecto C.H. FELFE.

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo reúne las conclusiones de la Tesis, así como las recomendaciones para el desarrollo de futuros estudios del proyecto Central Hidroeléctrica FELFE.

13.1 CONCLUSIONES

A continuación, se presenta las conclusiones de la Tesis:

- Se logró el objetivo general de la Tesis, que consistió en el desarrollo de estudios técnicos a nivel de prefactibilidad de un proyecto de generación hidroeléctrica.
- Se definió el caudal de diseño técnicamente económico, el arreglo hidráulico óptimo, la ingeniería básica del Proyecto plasmada en planos, el costo directo y total de inversión, y los índices de rentabilidad del Proyecto.
- A partir de la metodología seguida en este estudio es posible replicar las lecciones aprendidas en otros puntos con potencial hidroeléctrico para proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas (menores a 20 MW).
- El desarrollo de investigaciones de campo de los estudios básicos (sean del tipo hidrológicas, geotécnicas o ambientales), así como la tramitación de los procedimientos administrativos respectivos, permitirían otorgar el carácter de Estudio de Factibilidad al Proyecto.

13.2 RECOMENDACIONES

A manera profundizar en la Tesis se tiene las siguientes recomendaciones:

- Parte de los estudios técnicos pueden emplearse para la tramitación de solicitudes administrativas hídricas, ambientales, arqueológicas y de operación comercial. Por ejemplo, el estudio de evaluación de hidrología puede formar parte de una solicitud ante la Autoridad Administrativa de Agua IX Ucayali para obtener la Acreditación de Disponibilidad Hídrica del Proyecto ante la Autoridad Nacional del Agua.
- Asimismo, el estudio de evaluación socio-ambiental puede emplearse en la formulación de la Evaluación Ambiental Preliminar ante la Dirección Regional de Energía y Minas de Pasco, y obtener la Categoría I; ante el Ministerio de Cultura, para la certificación de inexistencia de restos arqueológicos; entre otros.
- Se recomienda verificar la factibilidad de conexión eléctrica, a través del desarrollo de un estudio de pre operatividad eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- Estadísticas Anuales. COES. Disponible 7 de marzo de 2018 <http://www.coes.org.pe/Portal/Publicaciones/Estadisticas/>
- Mapa de centrales eléctricas que utilizan recursos energéticos renovables convencionales 2016. Ministerio de Energía y Minas del Perú. Disponible 10 de abril de 2018 http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Anexo%203_1%20Centrales%20%20RER%20Convencionales%202016.pdf
- Centrales de generación eléctrica con recursos energéticos renovables. OSINERGMIN. Disponible 15 de abril de 2018 http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/PROYECTOS%20GFE/Generaci%C3%B3n/17-RER-TOTAL.pdf
- Boletín N° 78. Serie A. Geología de los cuadrángulos Chuchurras, Ulcumayo, Oxapampa y La Merced. INGEMMET, 1996.
- Zonas críticas por peligros geológicos en la Región Pasco. Primer Reporte, INGEMMET, 2013.
- “Norma E.030. Diseño Sismo Resistente”. SENCICO, 2016.
- Peligro Sísmico En El Perú. J. Castillo. y J. Alva. CISMID, 2009.
- Evaluación Preliminar del Potencial Hidroeléctrico del Perú – HIDROGIS. Dirección General de Electrificación Rural del Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2011.
- Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Capítulo 5, Editorial Cambridge University Press, 2011.
- Plan Energético Nacional 2014 – 2015. Disponible 19 de julio de 2018 <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/institucional/publicaciones/InformePlanEnerg%C3%ADa2025-%20281114.pdf>
- Metodología de Caudales Ecológicos. Lima. 2016. Publicada por la Autoridad Nacional del Agua. Disponible 22 de julio de 2018 <http://www.ana.gob.pe/normatividad/rj-no-154-2016-ana>
- Reglamento de Procedimientos Administrativos para el Otorgamiento de Derechos de Uso del Agua y de Autorización de Ejecución de Obras en Fuentes Naturales. Publicada por la Autoridad Nacional del Agua. Disponible 7 de junio de 2018 <http://www.ana.gob.pe/normatividad/rj-no-007-2015-ana>
- Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca Ene – Perené. Autoridad Nacional del Agua. Lima, 2015.
- Estudio de aprovechamiento Hídrico del Rio Paucartambo. Central Hidroeléctrica Cerro Campana. Disponible 29 de julio de 2018 <http://45.79.10.52/dgci/node/77>
- Estudio de aprovechamiento del Rio Tarma. Central Hidroeléctrica Hídrico La Virgen. Disponible 8 de mayo de 2018 <http://45.79.10.52/dgci/node/85>
- Determinación de regímenes de caudales ecológicos mínimos. Disponible 13 de mayo de 2018 ftp://ceres.udc.es/Master_en_Ingenieria_del_Agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Primer_Curso/Regulacion_del_Recurso_Y_Gestion_de_Situaciones_Extremas/tesis_martin_mayo.pdf

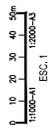
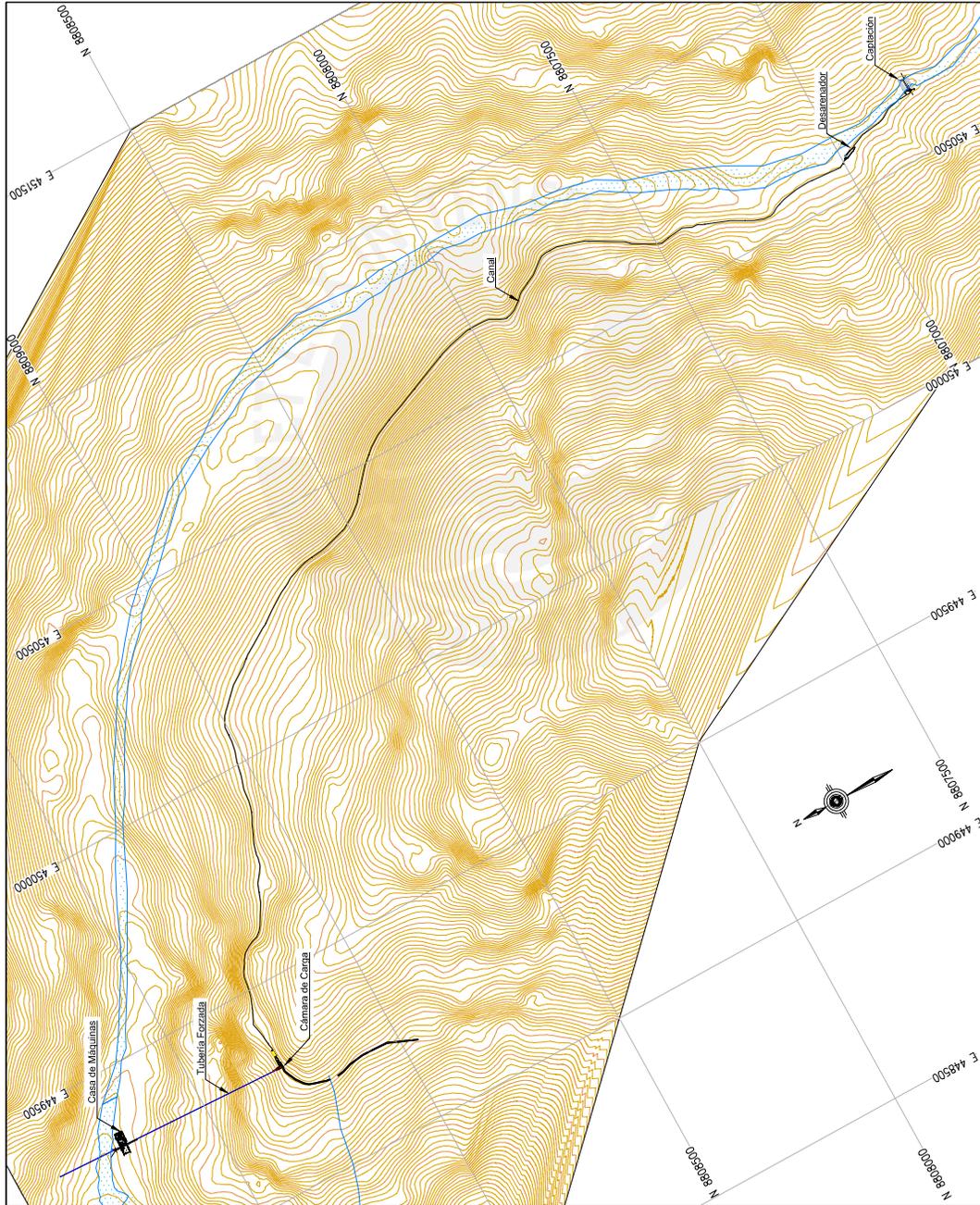
- European Small Hydro Association (ESHA). Layman's Guidebook on How to Develop a Small Hydro. 2nd edition, 1998.
Disponible 12 de junio de 2018
http://www.seai.ie/Renewables/Hydro_Energy/EU_layman's_guide_to_small_hydro.pdf
- Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Ramiro Ortiz Flores, 2013. Ediciones de U.
- Diseño Hidráulico. Sviatoslav Krochin, 1986. Editorial de la Escuela Politécnica Nacional.
- Diseño de Estructuras Hidráulicas Pequeñas y Obras de Paso. Wendor Chereque. Fondo Editorial PUCP. Disponible 30 de agosto de 2018
<http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/41245>



ANEXO

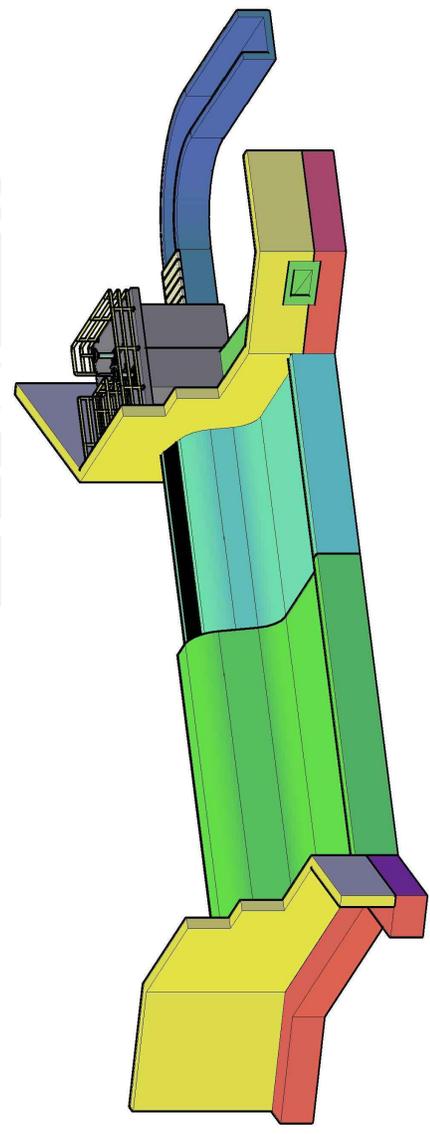
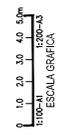
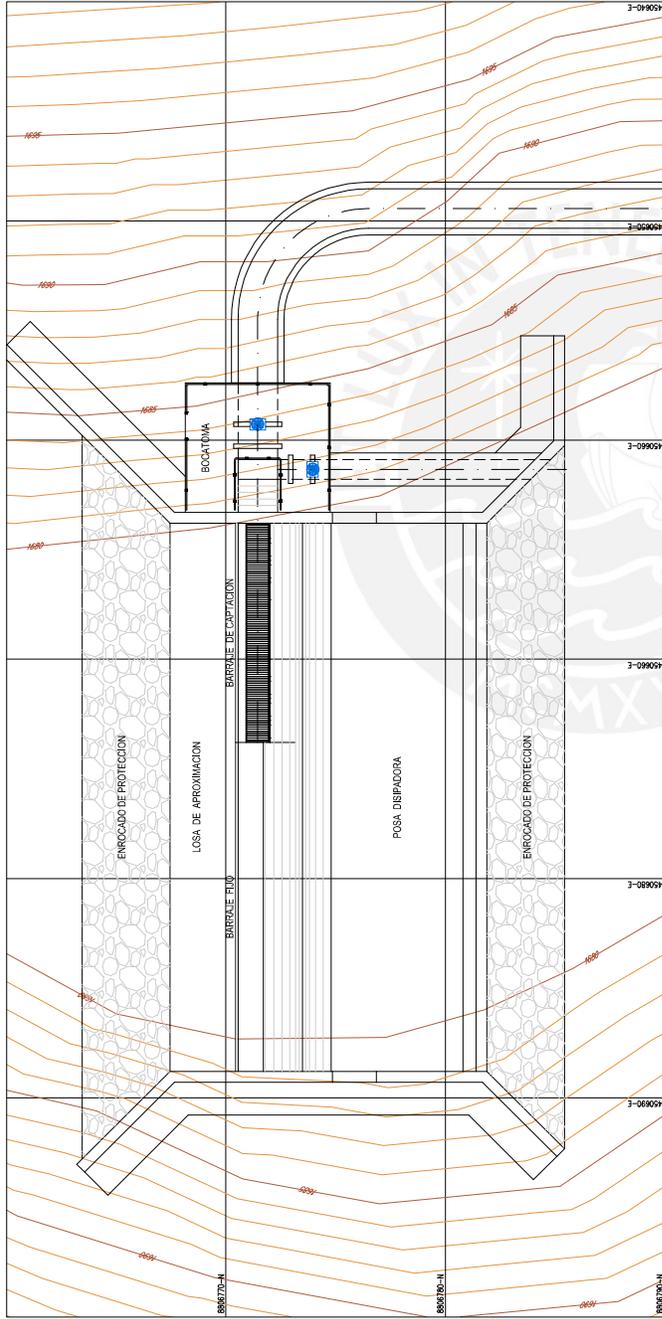
Planos del Proyecto



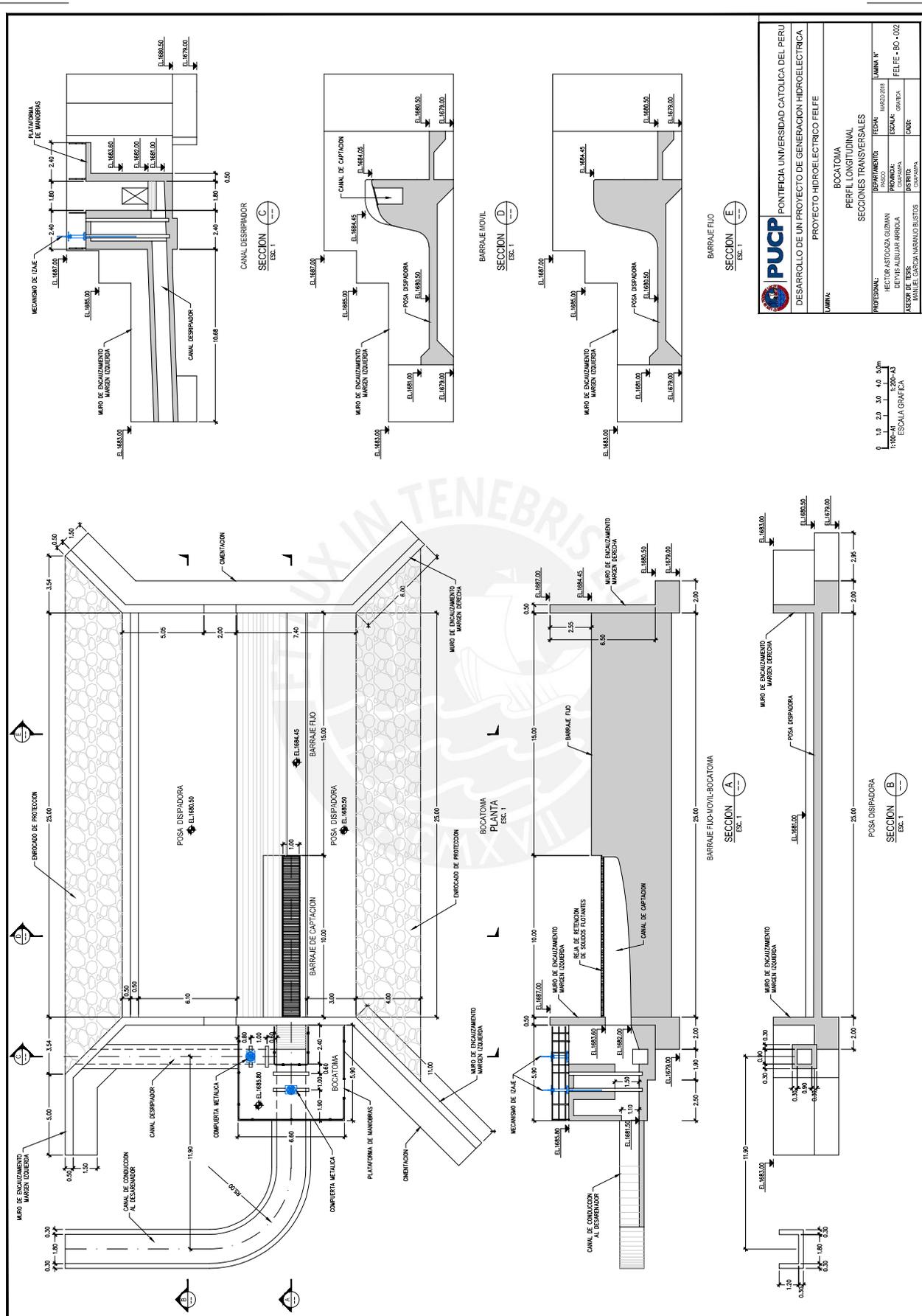


| | | |
|---|--|-----------------|
|  PUCP PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU | DESARROLLO DE UN PROYECTO DE GENERACION HIDROELECTRICA | |
| | PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE | |
| LAVINA: PLANTA GENERAL | | |
| PLANTA GENERAL | | |
| PROFESIONAL: | REGISTRADO EN: | LAVINA N°: |
| HECTOR ASTOZA GUZMAN | PERU | 18830-2118 |
| DE VIVS ALBUAR ARCELA | ESCALA: | GRABADA |
| ASesor DE TESIS: | DISEÑADO: | FELE - PG - 001 |
| JUAN E. GARCIA MEDALDO SUZCOS | COMPROBADO: | |
| <small>Este documento es propiedad de la Pontificia Universidad Católica del Perú. No se permite su reproducción, distribución o uso sin el consentimiento escrito de la Oficina de Asesoría Jurídica de la PUCP.</small> | | |

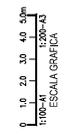
PLANTA GENERAL
ESC. 1



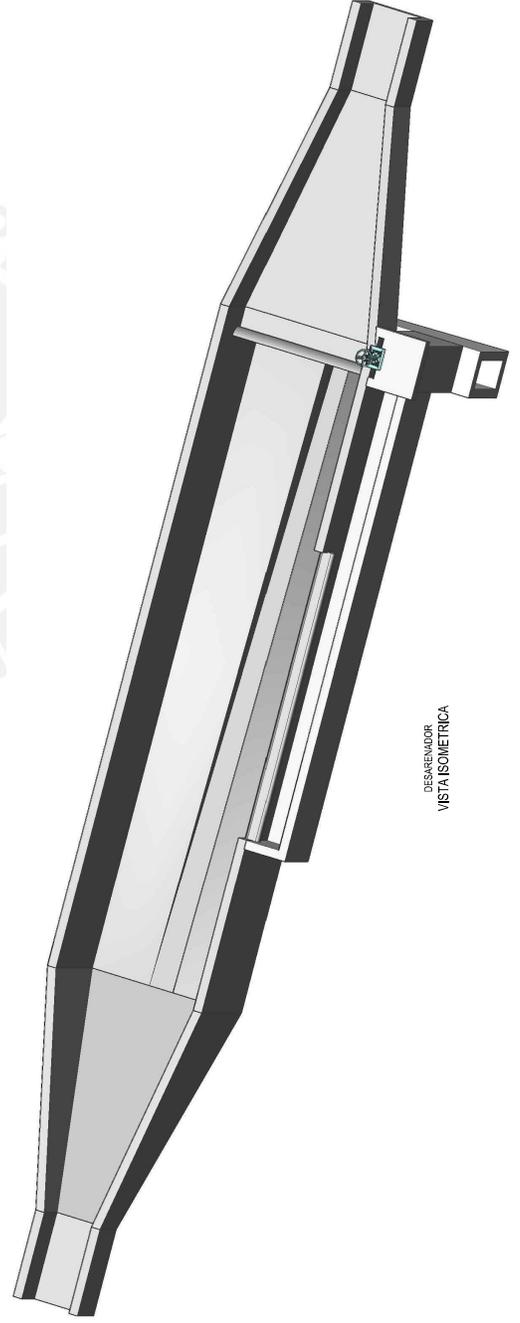
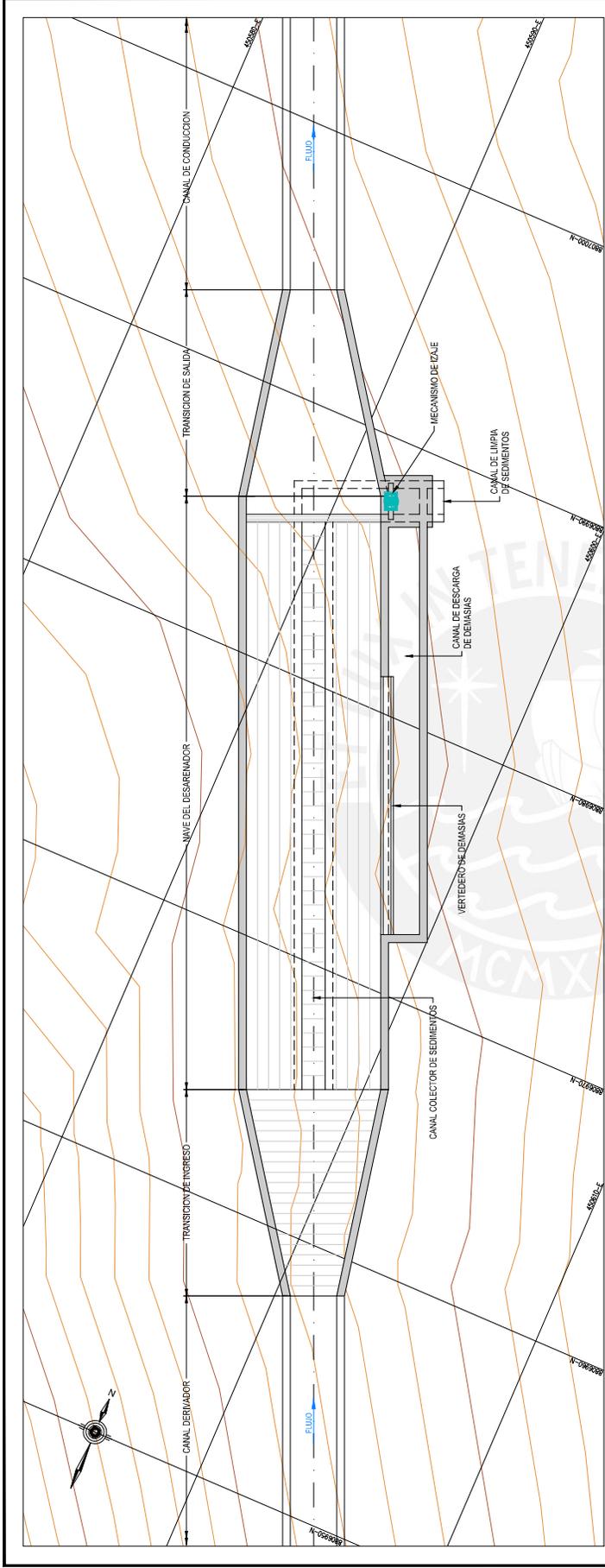
| | | | | |
|--|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------|
| PUCP PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU DESARROLLO DE UN PROYECTO DE GENERACION HIDROELECTRICA PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE | BOCATOMA | | | |
| | PLANTA - VISTA ISOMETRICA | | | |
| PROFESIONAL: HECTOR ASTOZA SUZMAN DEIVIS ALBUJAR ARBOLLA ASESOR DE RES: MANUE GARCIA MORAÑO BUSTOS | DEPARTAMENTO: INGENIERIA | TITULO: INGENIERIA | LAMINA N°: FELFE - BO - 001 | FECHA: 2023 |



| | | | |
|---|----------------------------|--|------------|
| PUCP | | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU DESARROLLO DE UN PROYECTO DE GENERACION HIDROELECTRICA PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE | |
| LÍNEA: BOCATOMA PERFIL LONGITUDINAL SECCIONES TRANSVERSALES | | | |
| PROFESIONAL: | HECTOR ASTOZA GUZMAN | FECHA: | 18/02/2018 |
| PROYECTISTA: | DEIVIS ALBUJAR ARREOLA | ESCALA: | GRÁFICA |
| ASESOR DE TESIS: | MANUE GARCIA MORAÑO BUSTOS | DISTRITO: | CAJAMA |
| COMPANIA: | | CADRE: | |



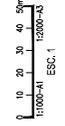
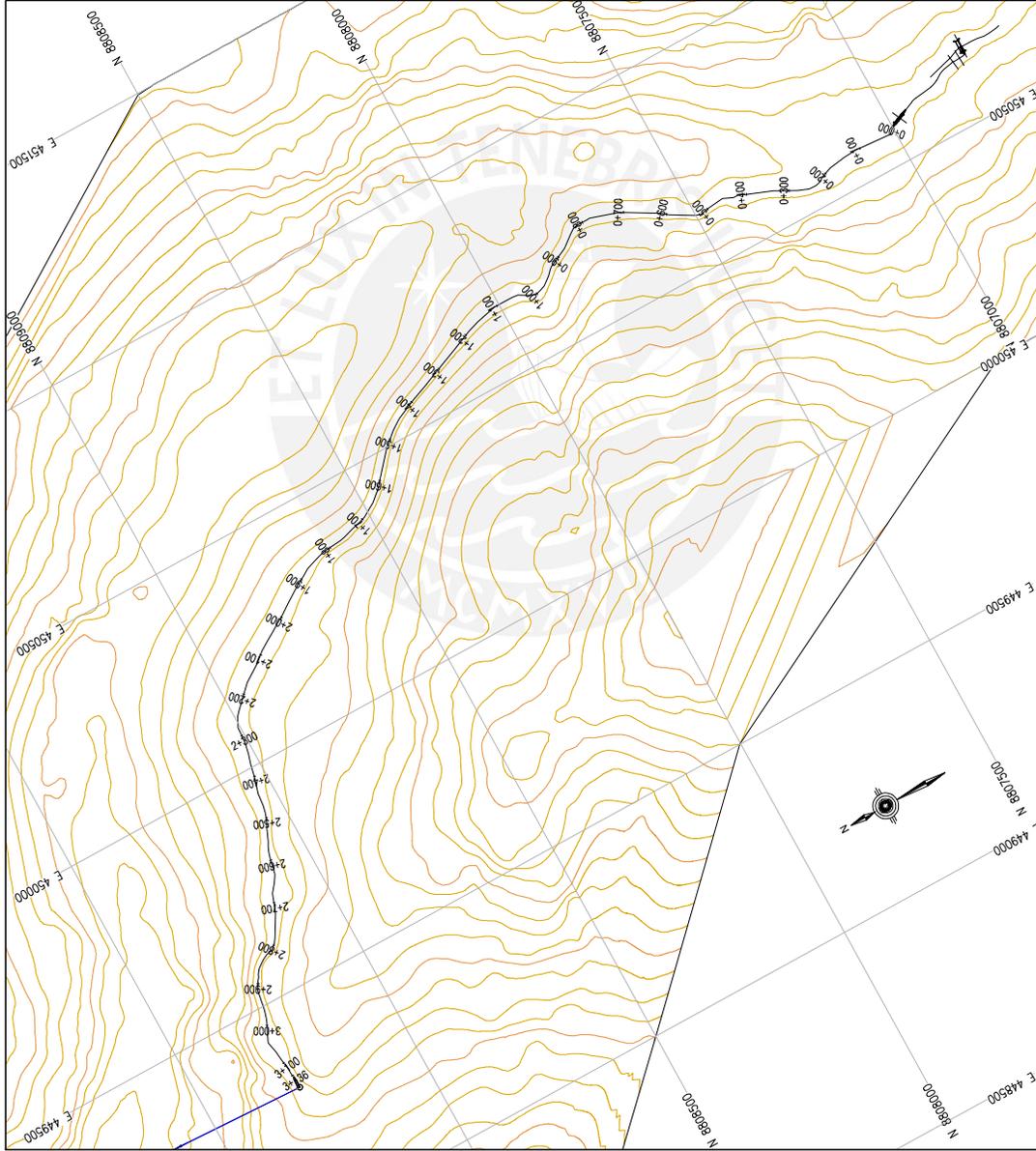
| | |
|----------------------------|--|
| SECCION A ESC. 1 | |
| SECCION B ESC. 1 | |
| SECCION C ESC. 1 | |



DESARENADOR
VISTA ISOMETRICA

0 0.75 1.50 2.25 3.00 3.75m
1:75 = A1
ESCALA GRAFICA

| | | | | |
|-------------------------------|---|------------|------------------|--|
| | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU | | | |
| | DESARROLLO DE UN PROYECTO GENERACION HIDROELECTRICA | | | |
| PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE | | | | |
| LAMA | | | | |
| DESARENADOR | | | | |
| PLANTA - VISTA ISOMETRICA | | | | |
| PROFESIONAL | DEPARTAMENTO | FECHA | LAMA N° | |
| INGENIERO ASESOR TECNICO | INGENIERIA | MARZO 2018 | | |
| INGENIERO ASESOR TECNICO | PROYECTO | ESCALA | FELFE - DE - 001 | |
| INGENIERO ASESOR TECNICO | PROYECTO | ESCALA | ESCALA | |
| INGENIERO ASESOR TECNICO | PROYECTO | ESCALA | ESCALA | |
| INGENIERO ASESOR TECNICO | PROYECTO | ESCALA | ESCALA | |

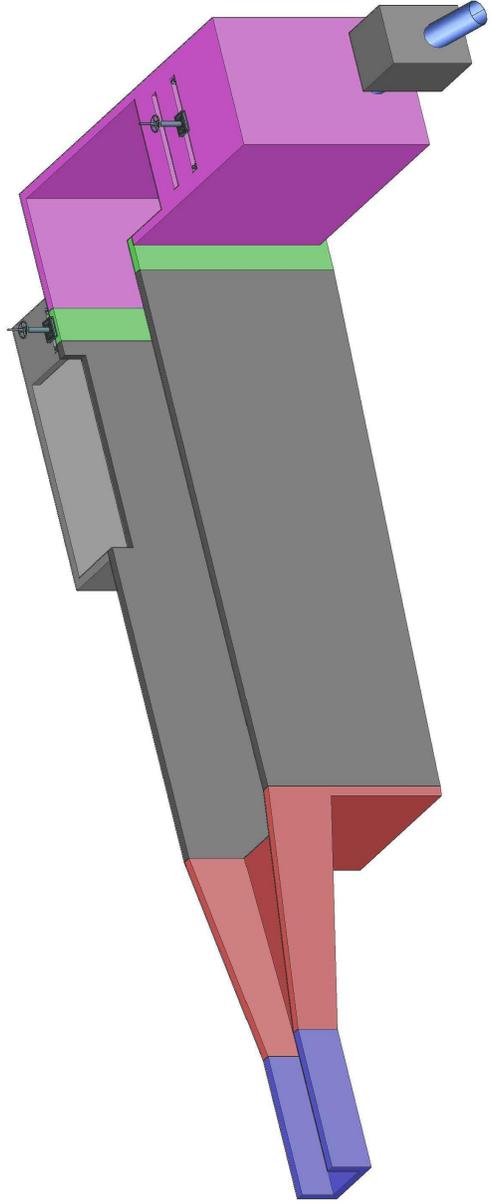
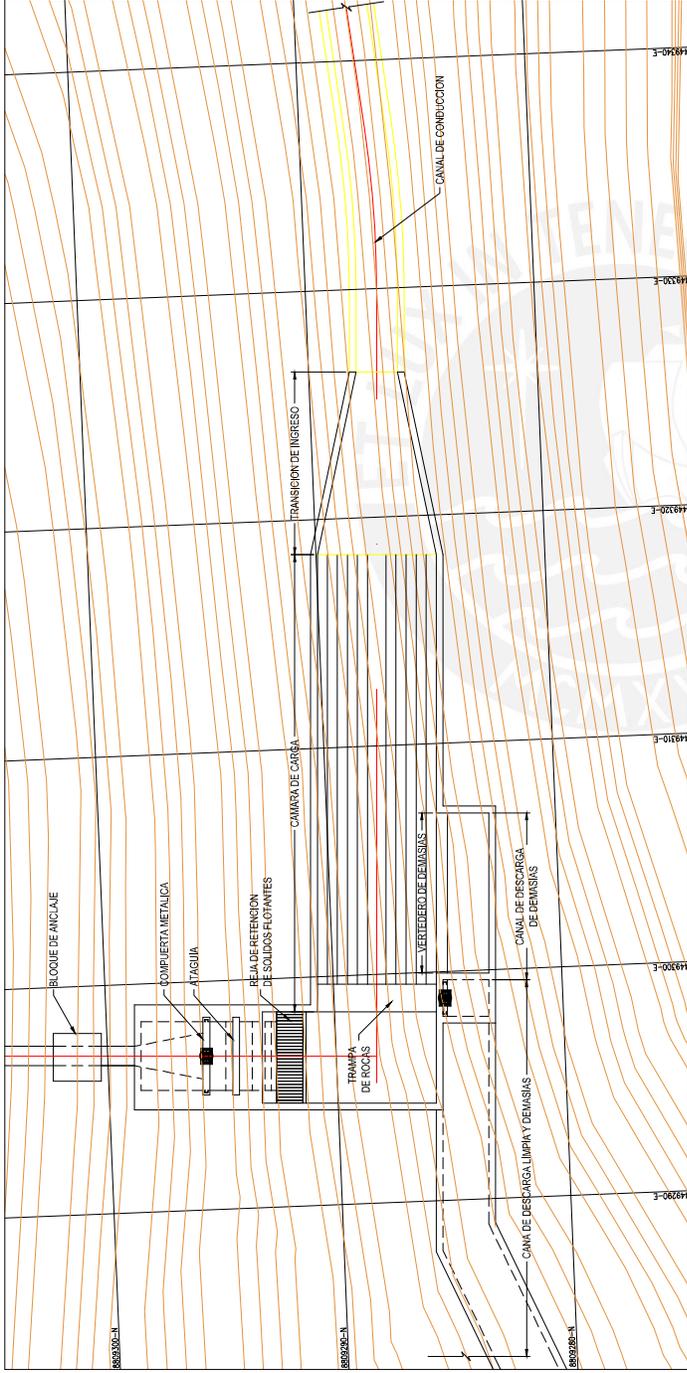


PUCP PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 DESARROLLO DE UN PROYECTO DE GENERACION HIDROELECTRICA

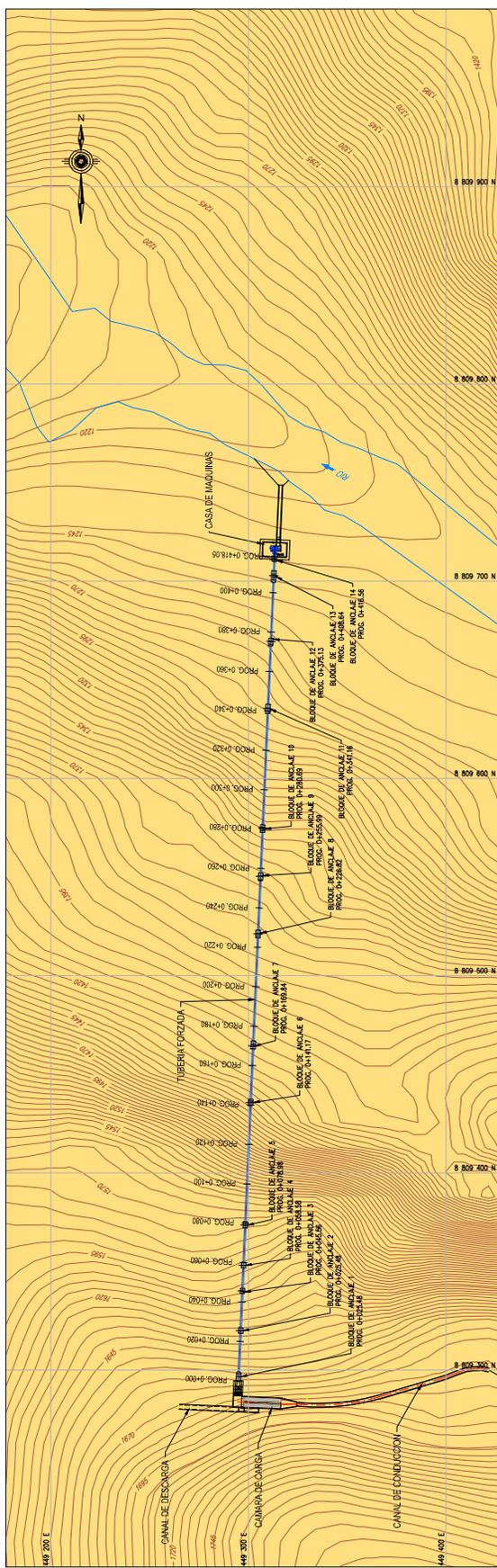
PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE
 CANAL DE ADUCCION
 PLANTA

| | | |
|--------------------------|------------|------------------|
| PROFESIONAL: | FECHA: | LAMINA N°: |
| HECTOR ASTOCAZA QUIJAN | 04/02/2018 | 00000000 |
| DE VIBALBA MIRARRIOLA | ESCALA: | FELFE - CA - 001 |
| ASISTENTE DE TESIS | DISTRITO: | 00000000 |
| MANUEL GONZALEZ VILLALBA | COORDENA: | 00000000 |

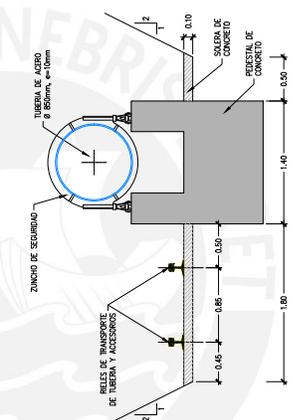
PERFIL LONGITUDINAL
 ESC. 1



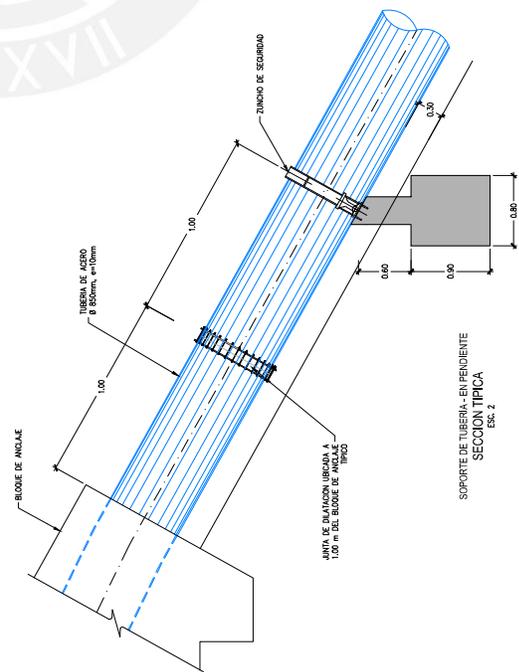
| | | | | |
|---|--|--|---|--------------------------------|
|  PUCP PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU DESARROLLO DE UN PROYECTO DE GENERACION HIDROELECTRICA | DEPARTAMENTO: TEGUCIGALPA PROYECTO: CAMARA DE CARGA | | TECNICO: MARCO 2018 ESCALA: 1:50 | LAMINA N°: FELFE - CC - 001 |
| | PROFESIONAL: HECTOR ASTOZA GUZMAN DEYVI ALBUJAR ARREOLA RAFAEL GARCIA MURANO BUSTOS | | PROVINCIA: COMAYAGUA CANTON: COMAYAGUA MUNICIPIO: COMAYAGUA | FECHA: 08/04/2018 |
| LAMINA: PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE CAMARA DE CARGA PLANTA - VISTA ISOMETRICA | | | | |



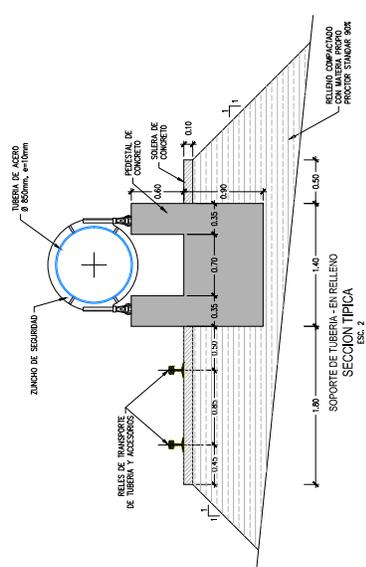
PLANTA
Esc. 1



SOPORTE DE TUBERIA-EN CORTE
SECCION TIPICA
Esc. 2

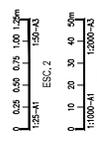


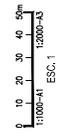
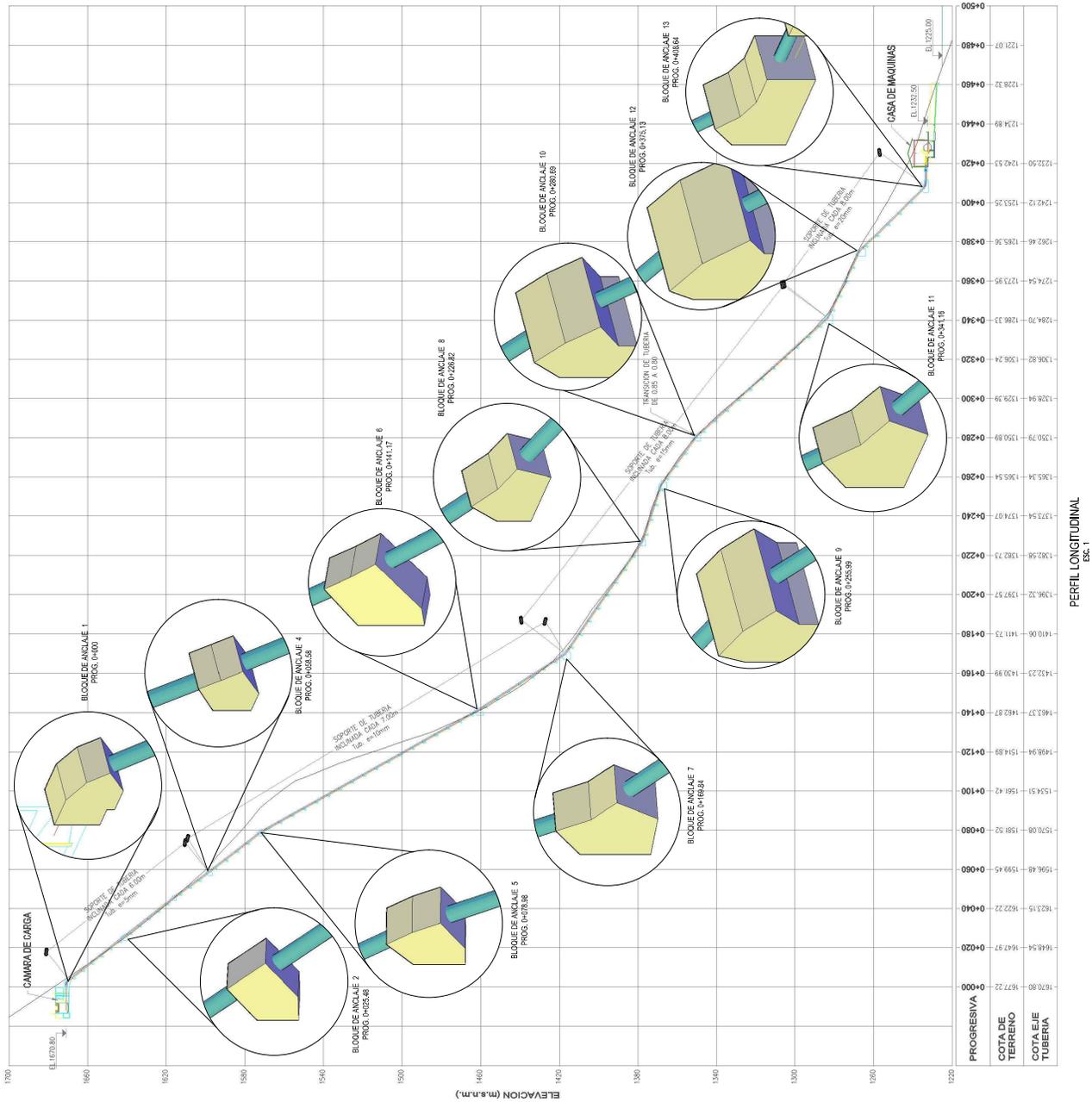
SOPORTE DE TUBERIA-EN PENDIENTE
SECCION TIPICA
Esc. 2



SOPORTE DE TUBERIA-EN RELLENO
SECCION TIPICA
Esc. 2

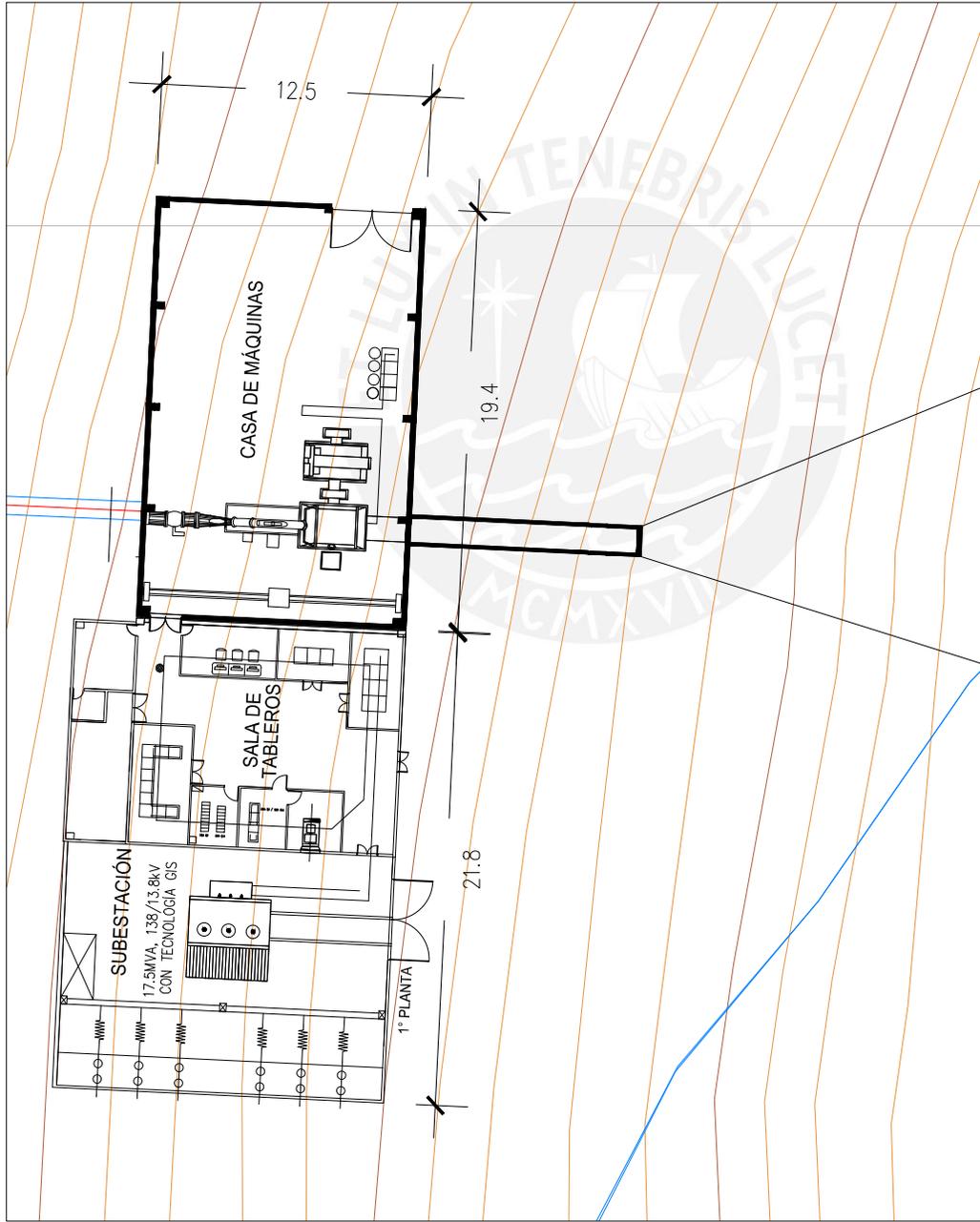
| | | | | |
|-------------------------------|--|---------------|---------------------|--|
| | PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU | | | |
| | DESARROLLO DE UN PROYECTO DE GENERACION HIDROELECTRICA | | | |
| PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE | | | | |
| LAMA: TUBERIA FORZADA | | | | |
| ESTRUCTURA DE CAPTACION | | | | |
| PLANTA | | | | |
| PROFESIONAL: | HECTOR ASTOZA SUZMAN | FECHA: | LAMA N° | |
| ASISTENTE DE: | DEIVIS ALBUJAR ARRIOLA | ESCALA: | IMAGEN 2011 | |
| ASISTENTE DE: | MANUE GARCIA MORAÑO SUZMAN | PROYECTA: | GRABICA | |
| | | DISTRIBUCION: | CAD: FELFE - OC-001 | |
| | | COMPANIA: | | |





| | |
|--|----------------------------------|
|  PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU DESARROLLO DE UN PROYECTO DE GENERACION HIDROELECTRICA | |
| LAMINA PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE | |
| TUBERIA FORZADA PERFIL LONGITUDINAL BLOQUES DE ANCLAJE | |
| PROFESIONAL HECTOR ASTOQUEA GUZMAN DEYVIS ALBUJAR ARRIOLA | FECHA MARZO 2015 |
| ASISTENTE MANUEL GARCIA MARGANO BUJOS | ESCALA 1:500 |
| DEPARTAMENTO TUBERIA | LAMINA N° FELFE-CC-002 |
| PROYECTO TUBERIA | COMPANIA GARCIA |
| DISEÑO GARCIA | CAD AUTOCAD |

PERFIL LONGITUDINAL
Esc. 1



0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0m
1:200-A1 ESC. 1

| | |
|--|---|
|  PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU DESARROLLO DE UN PROYECTO DE GENERACION HIDROELECTRICA | |
| LAMINA: PROYECTO HIDROELECTRICO FELFE | |
| CASA DE MAQUINAS PLANTA | |
| PROFESIONAL: HECTOR ASTOLZA GAZDARIAN DPTO. INGENIERIA INGENIERO EN ELECTRICIDAD | DEPARTAMENTO: ICA FECHA: MARZO 2015 |
| ASISTENTE: MANUEL ESCOBAR BUSTOS | ESCALA: GRABICA LAMINA N°: FELFE - CIN - 001 |
| <small> © 2015 PUCP. Reservados todos los derechos. No se permite la explotación económica ni la transformación de esta obra. Queda permitida la impresión en su totalidad. </small> | |

PLANTA
ESC. 1