

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



### ESTUDIO Y DISEÑO PRELIMINAR PARA LA MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA DE CARAMPOMA UBICADA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO RÍMAC

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

**Lourdes Gretel Pando Casabona**

**Omar César Zárate Rivera**

**ASESOR: MSc. Richard Paul Pehovaz Álvarez**

**Lima, agosto de 2016**

## RESUMEN

En la presente tesis se desarrolla el *Estudio y Diseño preliminar para la Minicentral Hidroeléctrica de Carampoma Ubicada en la Cuenca Alta del Río Rímac*, la cual se localiza en el distrito del mismo nombre, provincia de Huarochirí, departamento de Lima. Asimismo, la minicentral se ubica en la subcuenca del río Shuncha, dentro de la subcuenca del río Santa Eulalia, parte alta de la cuenca del río Rímac.

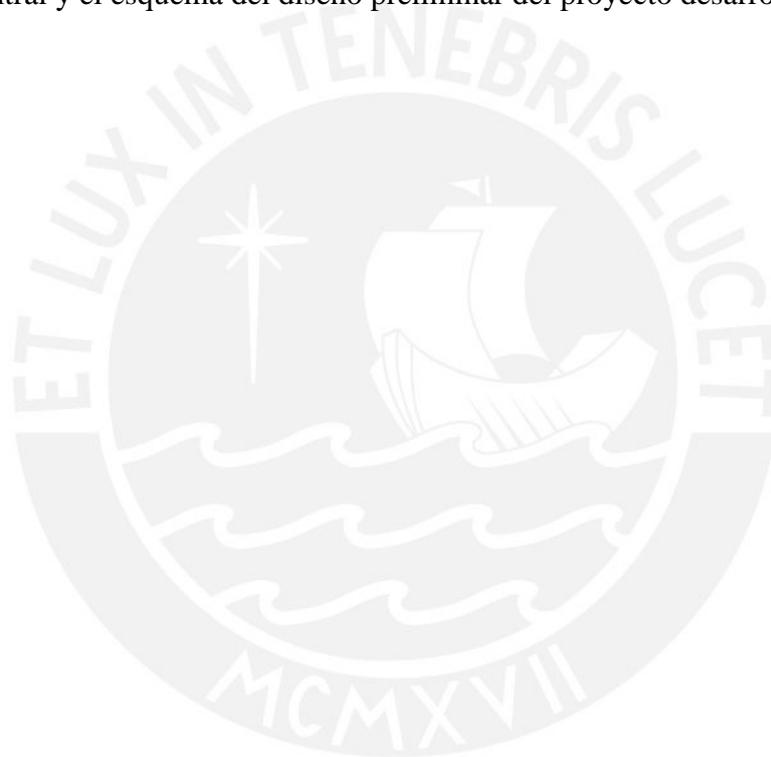
Inicialmente, se realizó un estudio del mercado energético con fuentes obtenidas del Organismo Supervisor de la Inversión de la Energía y Minería (OSINERGMIN), para analizar la tendencia de la demanda energética futura en el Perú. Luego, se realizó el estudio de disponibilidad hídrica en la subcuenca del río Shuncha. Sin embargo, dado que no se encontró ninguna estación hidrométrica o pluviométrica dentro de la subcuenca del río Shuncha, se empleó el método de la transmisión hidrológica con el fin de obtener un registro de caudales medios mensuales del río Shuncha, a partir de los caudales medidos por la estación hidrométrica Sheque.

Adicionalmente, se consideró el aporte de las lagunas Huamparcocha, Huachuguacocha, Rondan y Mancacoto (información proporcionada por Edegel), pues los caudales obtenidos de la estación Sheque eran naturalizados. También se consideró el criterio del caudal ecológico propuesto por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). A partir de los criterios anteriormente indicados, fue posible elaborar la curva de duración de caudales para la determinación de posibles caudales de diseño, de acuerdo a la tendencia gráfica y de valores teóricos de persistencia.

Por otro lado, se determinó el emplazamiento de las obras típicas para la minicentral, de acuerdo con las características geológicas y topográficas de la zona del proyecto. Asimismo, se realizó una evaluación económica con la finalidad de determinar la rentabilidad y evaluar la viabilidad del proyecto. Para tal efecto, se calculó el costo total de la minicentral a partir de distintos caudales tentativos de diseño. Para determinar el costo de las obras civiles, suministros y obras electromecánicas, se emplearon curvas paramétricas. Además, con la finalidad de adjudicar energía al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), la minicentral se analizó según los lineamientos del OSINERGMIN para la subasta de suministro de electricidad con Recursos Energéticos Renovables (RER). Como resultado de la evaluación

económica, se obtuvo la mayor rentabilidad para el caudal de diseño de  $1.38\text{m}^3/\text{s}$ , con lo cual se genera una potencia de 5.74 MW.

Las características principales de la minicentral contemplan la toma de agua en el río Shuncha, además del sistema de conducción de agua desde la captación Carhuac hasta las turbinas en la casa de máquinas (canal de conducción y tubería forzada de acero en superficie). Asimismo, la casa de máquinas en superficie, la subestación elevadora a 22.9 kV, la línea de transmisión de 22.9 kV hasta el punto de conexión al SEIN en la subestación San Mateo de Luz del Sur y las rutas de acceso permanentes al proyecto. Por último, se realizó el predimensionamiento de las obras típicas para la minicentral y el esquema del diseño preliminar del proyecto desarrollado.



FACULTAD DE  
 CIENCIAS E  
 INGENIERÍA

**PUCP**

## TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título	:	Estudio y Diseño Preliminar para la Minicentral Hidroeléctrica de Carampoma ubicada en la Cuenca Alta del Río Rímac
Área	:	Medio Ambiente y Recursos Hídricos
Asesor	:	Pehovaz Álvarez, Richard Paul
Alumno	:	OMAR CÉSAR ZÁRATE RIVERA
Código	:	2009.2387.412
Alumno	:	LOURDES GRETEL PANDO CASABONA
Código	:	2008.4882.412
Tema N°	:	# 75
Fecha	:	Lima, 11 de julio de 2016



## ANTECEDENTE

Entre los años 1928 a 1930, el Ingeniero Pablo Boner realizó un estudio hidrológico de la cuenca alta de los ríos Rímac y Santa Eulalia, con la finalidad de efectuar el aprovechamiento hídrico de sus aguas de una forma escalonada para la generación eléctrica.

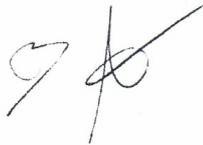
En el año 2010, el Consorcio Energético Huancavelica S.A. (CONEHUA), subsidiaria de la Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., realizó un estudio del potencial hidroenergético de la subcuenca del río Shuncha para evaluar la posibilidad de construir una Central hidroeléctrica. El estudio concluyó que dicha cuenca, permite el aprovechamiento hidroenergético para el desarrollo de una Minicentral Hidroeléctrica de alta caída y con una energía firme media anual. Ello es posible debido a sus características topográficas, geomorfológicas, pendiente longitudinal del cauce y características geológicas.

## OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo principal es determinar el caudal que genere mayor rentabilidad y realizar el predimensionamiento de las estructuras típicas para la Minicentral Hidroeléctrica de Carampoma.

Se aplicará la metodología de la transmisión hidrológica debido a la carencia de datos hidrométricos en la subcuenca del río Shuncha, la cual es comúnmente aplicada para casos en donde no se dispongan datos reales de caudales.

Se presentará el esquema del aprovechamiento hídrico junto con el predimensionamiento de las obras civiles, considerando las condiciones geomorfológicas de la zona. Finalmente




FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA

PUCP

se realizará una evaluación económica que garantice que la ejecución de la Minicentral Hidroeléctrica de Carampoma es altamente rentable.

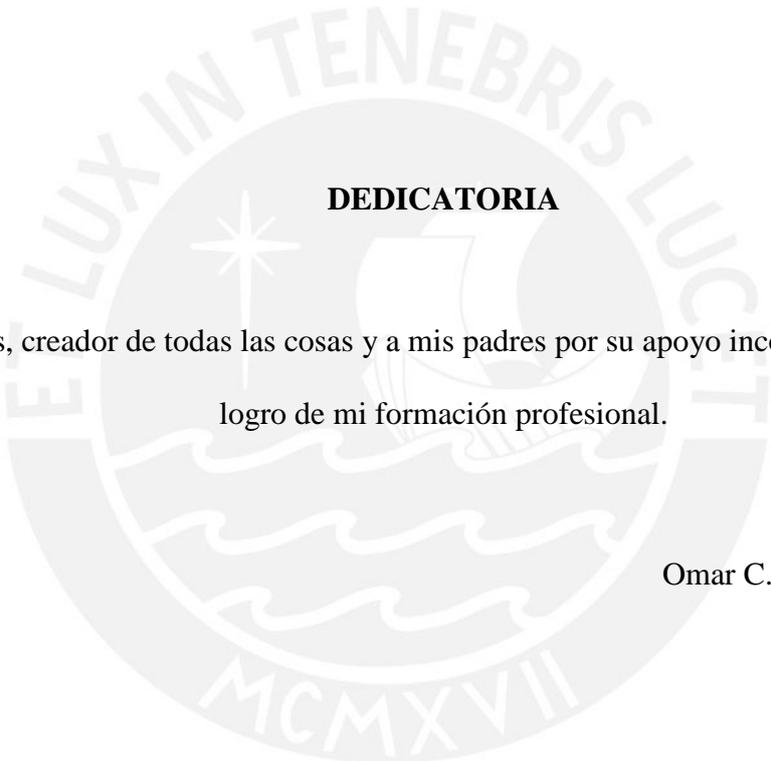
#### METODOLOGÍA Y RESULTADOS ESPERADOS

1. Se realizará un trabajo de campo que comprende un reconocimiento de la parte media y baja del área de estudio de la cuenca del río Shuncha, para evaluar el potencial hídrico, la toma de datos y luego definir el emplazamiento de las obras típicas de la futura central hidroeléctrica. El trabajo de campo comprenderá la verificación de la disponibilidad hídrica de los glaciales de la cordillera de Venturosa y de las lagunas que drenan al río Shuncha.
2. Se procesará y analizará la información obtenida en los trabajos de gabinete. Por otro lado, se obtendrán datos meteorológicos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y datos hidrométricos obtenidos a través de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) para su posterior evaluación. Asimismo, a partir del análisis realizado, se procederá a aplicar la metodología de la transmisión hidrológica.
3. Para los trabajos de cartografía, donde las zonas de interés serán delimitadas por medio del programa ArcGIS, se utilizará la carta de Matucana (24-K) del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Para los trabajos de geología se utilizará la información obtenida del INGEMET de los cuadrángulos de Matucana y Huarochirí.
4. Se realizará una evaluación económica que permitirá establecer la alternativa más rentable económicamente para la Minicentral Hidroeléctrica de Carampoma.
5. Para el predimensionamiento de las obras civiles, se usarán las curvas paramétricas obtenidas del "Cost base for small-scale hydropower plants" (NVE, 2012) y del "Planeamiento para el Diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en el Perú, aplicación a la Pequeña Central de Cutervo" (Mellado, 1982).
6. Finalmente, se elaborará una memoria descriptiva sobre el tema de la tesis con sus conclusiones y recomendaciones.

#### NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.





**DEDICATORIA**

A Dios, creador de todas las cosas y a mis padres por su apoyo incondicional en el logro de mi formación profesional.

Omar C. Zárate Rivera

## DEDICATORIA

*A mis padres y hermano, por el constante apoyo y motivación para seguir logrando mis objetivos, pero sobre todo, por su amor.*

*A toda mi familia, por creer siempre en mí.*

*A mis amigos cercanos, por su amistad incondicional.*

*A todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.*

*¡Gracias a todos ustedes!*

*Lourdes.*

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer de manera especial a la Gerencia de Hidráulica e Irrigaciones de CESEL, por compartir su experiencia, aportes y sugerencias durante el desarrollo de la presente tesis.

Nuestro agradecimiento a la Gerencia General del (Consortio Energético de Huancavelica S.A. (CONEHUA) por su valiosa orientación e información sobre el potencial energético de la cuenca del río Santa Eulalia y el río Shuncha.

Asimismo, a nuestro asesor, Ingeniero Richard Pehovaz Álvarez por su tiempo dedicado a la revisión, orientación y valiosas sugerencias para la elaboración de la presente tesis.

Al pueblo de Carampoma que nos cobijó y con quienes estamos comprometidos en su desarrollo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES</b> .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	1
1.3 Justificación y viabilidad.....	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 Objetivo general.....	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	3
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	4
2.1 Cuenca hidrográfica.....	4
2.1.1 Parámetros geomorfológicos.....	5
2.1.2 Análisis de la cuenca hidrográfica mediante ArcGIS.....	10
2.2 Hidrología.....	10
2.2.1 Pluviometría.....	11
2.2.1.1 Precipitación media en la cuenca.....	12
2.2.2 Hidrometría.....	13
2.2.2.1 Curva de duración de caudales .....	13
2.2.2.2 Caudales característicos.....	14
2.2.3 Transferencia hidrológica.....	15
2.3 Minicentrales hidroeléctricas.....	16
2.3.1 Esquema de una minicentral hidroeléctrica.....	17
2.3.2 Componentes de la minicentral hidroeléctrica.....	17
2.3.3 Esquema de diseño de la minicentral hidroeléctrica.....	32
2.3.4 Potencia instalada y energía.....	33
2.3.5 Factor de planta .....	34
2.3.6 Costo unitario energético.....	34
2.4 Análisis económico de la minicentral hidroeléctrica.....	35
2.4.1 Fórmulas matemáticas financieras para la evaluación del proyecto.....	35
2.4.2 Parámetros para la evaluación económica de una minicentral.....	36
2.4.3 Método de análisis beneficio/costo.....	36
2.4.3.1 Flujo de caja.....	37
2.4.3.2 Indicadores del análisis beneficio/costo.....	38
2.4.3.3 Costo unitario de energía.....	39
2.4.3.4 Análisis de sensibilidad.....	39
<b>CAPÍTULO III: ESTUDIO DE CASO</b> .....	40
3.1 Estudio del mercado eléctrico en el Perú .....	40
3.2 Descripción general de la subcuenca y del entorno .....	45
3.2.1 Ubicación y demarcación de la subcuenca del río Shuncha .....	45
3.2.2 Accesibilidad y vías de comunicación .....	46
3.2.3 Aspectos socio-económicos de las comunidades del entorno .....	47
3.2.3.1 Indicadores demográficos .....	47
3.2.3.2 Centro poblado de Carampoma .....	47
3.2.4 Geomorfología .....	48
3.2.5 Aspectos Ecológicos de la subcuenca .....	49
3.2.6 Estudios de geología .....	49
3.2.7 Recursos hídricos superficiales .....	50
3.3 Climatología de la cuenca y del área de estudio .....	52
3.3.1 Parámetros climatológicos .....	53
3.3.2 Clasificación climatológica .....	55

3.4 Pluviometría .....	56
3.4.1 Estaciones pluviométricas .....	56
3.4.2 Análisis de estaciones pluviométricas .....	56
3.4.3 Análisis de consistencia de información .....	57
3.5 Hidrometría .....	59
<b>CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS</b> .....	60
4.1 Delimitación y Caracterización de la cuenca .....	60
4.1.1 Delimitación de la cuenca .....	60
4.1.2 Caracterización de la cuenca .....	61
4.2 Esquema de aprovechamiento hídrico .....	65
4.3 Elección del caudal de diseño .....	67
4.3.1 Método de transferencia hidrológica .....	67
4.3.1.1 Delimitación del área de influencia de la estación Sheque .....	68
4.3.1.2 Polígonos de Thiessen y cálculo del factor de transferencia hidrológica.....	70
4.3.1.3 Análisis de registro de la estación Sheque .....	73
4.3.1.4 Extensión de caudales de la estación Sheque .....	73
4.3.2 Elección de caudales .....	75
4.3.2.1 Curva de duración .....	75
4.3.3 Evaluación del caudal de diseño .....	77
4.3.3.1 Cálculo del factor de planta y costo de la unidad energética.....	77
4.3.3.2 Determinación de los costos de inversión .....	79
4.3.3.3 Evaluación económica .....	82
4.3.3.4 Análisis de beneficio/costo .....	82
4.4 Predimensionamiento de obras civiles .....	84
4.4.1 Bocatoma .....	84
4.4.2 Canal de aducción y descarga .....	86
4.4.3 Desarenador .....	86
4.4.4 Cámara de carga .....	87
4.4.5 Casa de máquinas .....	89
4.5 Resumen de las características de la minicentral de Carampoma .....	90
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	91
5.1 Conclusiones.....	91
5.2 Recomendaciones.....	92

## Lista de Figuras

Figura 1. Delineamiento del contorno de la cuenca (McCuen, 1989).....	4
Figura 2. Cuenca hidrográfica (Aparicio, 1992).....	5
Figura 3. Delimitación de una cuenca (ITDG-PERÚ, 1995).....	6
Figura 4. Cartas cartográficas (MINEDU).....	7
Figura 5. Longitud y perímetro de una cuenca (Ibáñez <i>et al.</i> 2011).....	7
Figura 6. Cuenca de orden 4 (Aparicio, 1992).....	10
Figura 7. Método de los Polígonos de Thiessen (Chávez, 1994).....	13
Figura 8. Depósitos de materiales en desarenador (Harvey, 1993).....	21
Figura 9. Rejillas de la cámara de carga (Harvey, 1993).....	23
Figura 10. Tubería forzada del salto de Las Conchas (Zoppetti, 1979).....	24
Figura 11. Componentes de una turbina Pelton de eje horizontal, con dos equipos de inyección (Grupo Formación de Empresas Eléctricas 1994) .....	28
Figura 12. Primera y segunda planta del edificio de la central del Salto de Las Conchas (Zoppetti, 1979).....	29
Figura 13. Esquema de regulador desarrollado por SKAT (ITDG-PERÚ, 1995).....	31
Figura 14. Ruta 1 de acceso a la P.C.H Carampoma (Elaboración Propia) .....	46
Figura 15. Ruta 2 de acceso a la P.C.H Carampoma (Elaboración Propia) .....	47
Figura 16. Delimitación de la cuenca (Elaboración Propia) .....	60
Figura 17. Orden de la red hídrica de la zona en estudio (Elaboración Propia) .....	62
Figura 18. Subdivisión de la cuenca para el cálculo de la longitud del río principal (Elaboración Propia) .....	63
Figura 19. Ubicación de la bocatoma (Elaboración Propia) .....	65
Figura 20. Ubicación del canal de aducción y de la cámara de carga (Elaboración Propia).....	66
Figura 21. Ubicación de la tubería forzada y de la casa de máquinas (Elaboración Propia).....	66
Figura 22. Esquema de aprovechamiento hídrico de la minicentral hidroeléctrica Carampoma (Elaboración Propia).....	67
Figura 23. Ubicación de la estación Sheque y Bocatoma (Elaboración Propia).....	68
Figura 24. Delimitación del área efectiva de la estación de Sheque (Elaboración Propia).....	69

Figura 25. Polígonos de Thiessen de la cuenca generada a partir de la estación Sheque (Elaboración Propia).....	71
Figura 26. Polígonos de Thiessen de la cuenca generada a partir de la bocatoma de la Minicentral Hidroeléctrica Carampoma (Elaboración Propia).....	71
Figura 27. Esquema de bocatoma estándar con barraje fijo (Adaptado de Mellado, 1982).....	85
Figura 28. Plano estándar de un desarenador (Adaptado de Mellado,1982) .....	87
Figura 29. Plano estándar de la cámara de carga (Adaptado de Mellado, 1982).....	88
Figura 30. Esquema de casa de máquinas para una pequeña central hidroeléctrica (Adaptado de Mellado 1982) .....	89

### Lista de Gráficos

Gráfico 1. Método para definir la pendiente media del cauce (Linsley <i>et al.</i> 1975) ...	8
Gráfico 2. Curva hipsométrica para una cuenca madura (Ortiz, 2011) .....	9
Gráfico 3. Serie histórica de precipitación total mensual (MINAG, 2010) .....	11
Gráfico 4. Curva de duración (Asawa, 2005) .....	14
Gráfico 5. Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas (IDAE, 2006)...	28
Gráfico 6. Producción nacional de electricidad 1993-2013 (MINEM, 2014) .....	40
Gráfico 7. Variación de la potencia efectiva durante el periodo 1995-2011 (MINEM, 2012) .....	41
Gráfico 8. Evolución de la potencia instalada hidráulica para el mercado eléctrico (Elaboración Propia) .....	43
Gráfico 9. Evolución de la potencia efectiva hidráulica para el mercado eléctrico (Elaboración Propia) .....	43
Gráfico 10. Comparación de la potencia instalada para el mercado eléctrico y la potencia instalada hidráulica (Elaboración Propia) .....	44
Gráfico 11. Comparación de la potencia efectiva para el mercado eléctrico y la potencia efectiva hidráulica (Elaboración Propia) .....	45
Gráfico 12. Comparación de magnitud de precipitaciones medias mensuales las estaciones consideradas (Elaboración Propia) .....	57
Gráfico 13. Diagrama doble masa de las precipitaciones anuales (Elaboración Propia) .....	58
Gráfico 14. Curva hipsométrica de la cuenca (Elaboración Propia) .....	61
Gráfico 15. Caudal mensual promedio anual (Elaboración Propia) .....	73

Gráfico 16. Comparación entre Caudales históricos y caudales extendidos (Elaboración Propia) .....	74
Gráfico 17. Curva de duración de caudales medios mensuales (Elaboración Propia) .....	76
Gráfico 18. Comparación del caudal vs la tasa interna de retorno TIR (Elaboración Propia).....	82

### Lista de Tablas

Tabla 1. Desarrollo de los Recursos Energéticos Renovables (MINEM, 2014) .....	41
Tabla 2. Potencia instalada y potencia efectiva para el mercado eléctrico nacional (Elaboración Propia) .....	42
Tabla 3. Potencia instalada y potencia efectiva hidráulica para el mercado eléctrico (Elaboración Propia) .....	42
Tabla 4. Características de las lagunas de la subcuenca río Shuncha - Santa Eulalia (Elaboración Propia) .....	52
Tabla 5. Temperatura media anual (MINAG, 2010) .....	54
Tabla 6. Humedad relativa media anual (MINAG, 2010) .....	55
Tabla 7. Clasificación climática según Thornthwaite (MINAG, 2010) .....	55
Tabla 8. Estaciones pluviométricas de los distritos de Carampoma y Huanza (Elaboración Propia) .....	56
Tabla 9. Precipitación anual media (Elaboración Propia) .....	57
Tabla 10. Estaciones pluviométricas y análisis doble masa (Elaboración Propia) ....	58
Tabla 11. Ponderado de pendientes para el cálculo de la pendiente media de la cuenca (Elaboración Propia) .....	62
Tabla 12. Longitud de la red hídrica (Elaboración Propia) .....	63
Tabla 13. Promedio ponderado de pendientes (Elaboración Propia) .....	64
Tabla 14. Parámetros de superficie de la cuenca (Elaboración Propia) .....	64
Tabla 15. Parámetros de la red hídrica de la cuenca (Elaboración Propia) .....	64
Tabla 16. Parámetros de superficie de Sheque en comparación con Shuncha (Elaboración Propia) .....	69
Tabla 17. Parámetros de la red hídrica en Sheque en comparación con Shuncha (Elaboración Propia) .....	70
Tabla 18. Aporte de cada estación pluviométrica en cada delimitación (Elaboración Propia) .....	72

Tabla 19. Factor de correlación para las áreas en estudio (Elaboración Propia) .....	72
Tabla 20. Factor de la transferencia hidrológica de caudales (Elaboración Propia) .....	72
Tabla 21. Lagunas reguladas por Edegel (Elaboración Propia) .....	74
Tabla 22. Caudales promedios mensuales (Elaboración Propia) .....	75
Tabla 23. Caudales ordenados y porcentaje de persistencia (Elaboración Propia) .....	76
Tabla 24. Caudales considerados para la evaluación económica (Elaboración Propia) .....	77
Tabla 25. Factor de planta para cada caudal analizado (Elaboración Propia) .....	78
Tabla 26. Costo unitario de la energía (\$/MWh) (Elaboración Propia) .....	78
Tabla 27. Resumen de los costos de las obras civiles y, suministros y obras electromecánicas (Elaboración Propia) .....	81
Tabla 28. Indicadores económicos para los distintos caudales analizados (Elaboración Propia) .....	83
Tabla 29. Comparación para la elección del caudal óptimo (Elaboración Propia) ....	83
Tabla 30. Dimensiones para el esquema de captación de la bocatoma, en metros (Elaboración Propia) .....	84
Tabla 31. Dimensiones estándar para desarenador, en metros (Elaboración Propia) .....	86
Tabla 32. Dimensiones estándar para la cámara de carga, en metros (Elaboración Propia) .....	88
Tabla 33. Características de la Minicentral Carampoma (Elaboración Propia) .....	90

## CAPÍTULO I: ASPECTOS GENERALES

### 1.1 Introducción

En agosto de 2013 se realizaron inspecciones de campo en la zona de Carampoma, provincia de Huarochirí, departamento de Lima, para tomar conocimiento de la culminación de las obras civiles y electromecánicas de la Central Hidroeléctrica Huanza, antes de su puesta en marcha. En dichas inspecciones, se constató que las aguas del río Shuncha no son utilizadas para la generación eléctrica de la central hidroeléctrica en mención, por lo que se estimó que se podría aprovechar sus aguas para la generación de electricidad. Además, se verificó la accesibilidad de las vías hacia la zona de estudio, y se constató la regulación de las lagunas en la parte alta de la subcuenca del río Shuncha.

Adicionalmente, se revisaron las cartas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el informe del Ministerio de Energía y Minas sobre las exploraciones de la empresa minera Los Quenuales en la zona de estudio. Asimismo, se recopiló información proporcionada por el Consorcio Energético Huancavelica (CONEHUA) sobre futuros proyectos energéticos en dicha zona.

En base a todo lo anterior, se decidió realizar el estudio y diseño preliminar de una minicentral hidroeléctrica, que se denominará Carampoma, cuya energía eléctrica generada será aportada al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). El referido estudio es el resultado de la investigación y la realización de trabajos de gabinete.

### 1.2 Antecedentes

En el año 1922, el ingeniero Juan Carosio asume la dirección de las Empresas Eléctricas Asociadas (EEAA) y en 1933 acoge el proyecto del ingeniero Pablo Boner que consistía en el aprovechamiento hídrico de las aguas de la cuenca del río Rímac - Santa Eulalia en forma escalonada para la generación eléctrica.

Entre los años 1928 y 1930, el ingeniero Pablo Boner realizó un minucioso estudio hidrológico de la cuenca alta de los ríos Rímac y Santa Eulalia, inclusive de la cuenca alta del río Mantaro (Marcapomacocha). En este estudio se elaboró un inventario de las lagunas ubicadas en los distritos de Carampoma, Chicla y Huanza

para su posterior aprovechamiento en la generación energética de la Central Hidroeléctrica de Huinco, que entró en operación en el año 1965.

Las Empresas Eléctricas Asociadas (EEAA), en el año 1926, ejecutaron el represamiento de la laguna de Huamparcocha. Recién en los años 1975 y 1976, Electrolima S.A. construye las represas en las lagunas de Huachuguacocha, Pirhua (Rondan) y Mancacoto, pertenecientes a la subcuenca del río Shuncha. Esta información se encuentra en el Anexo I.

En el año 2010, el Consorcio Energético Huancavelica S.A. (CONEHUA), subsidiaria de Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., realizó una evaluación del potencial hidroenergético de la subcuenca del río Shuncha para evaluar la posibilidad de construir una Central hidroeléctrica. A la fecha, se desconoce la existencia de otros estudios con fines de aprovechamiento hídrico del río Shuncha, importante tributario del río Santa Eulalia de la Cuenca del río Rímac.

### 1.3 Justificación y viabilidad

El Perú cuenta con grandes ríos que forman importantes cuencas como consecuencia de las masivas precipitaciones pluviales que se dan en los andes peruanos. Este recurso hídrico debe ser aprovechado de manera razonable y eficiente. Además, éste es un recurso renovable que reemplaza al combustible, sea petróleo o gas, que es más caro y daña el medio ambiente.

Por otro lado, los costos de explotación de una central hidroeléctrica son más bajos en relación a las centrales térmicas que utilizan combustible. Según el proyecto de investigación, Simulación del sistema hidráulico e hidrológico de la cuenca del río Rímac-Santa Eulalia, del departamento de ingeniería mecánica de fluidos de la UNMSM, “Actualmente existe incertidumbre en el abastecimiento del Gas Natural de Camisea a corto y mediano plazo para el cubrimiento de la demanda de energía del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), al cual pertenece la cuenca del río Rímac - Santa Eulalia. Por lo tanto, cualquier nuevo proyecto de generación hidráulica propuesto dentro de esta cuenca puede ser altamente rentable” (Sarago *et al.* 2014).

Por lo expuesto anteriormente, la subcuenca del río Shuncha permite el aprovechamiento hidroenergético para el desarrollo de una minicentral hidroeléctrica

de alta caída y con una energía firme media anual. Ello es posible debido a sus características topográficas, geomorfológicas, pendiente longitudinal del cauce y características geológicas. Estas condiciones naturales permiten asimismo establecer la implementación de la minicentral hidroeléctrica como resultado de sus indicadores económicos. Esta minicentral hidroeléctrica permitirá satisfacer parte de la demanda de energía del SEIN debido a que el proyecto estará interconectado.

Finalmente, se puede afirmar que el almacenamiento del agua en las represas de las lagunas y la disponibilidad de las aguas turbinadas puede utilizarse en otras actividades económicas como la agricultura, la implementación de nuevas piscigranjas y el impulso del turismo de aventura en las comunidades del entorno al proyecto.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Determinar el caudal de diseño que genere la mayor rentabilidad y realizar el predimensionamiento de las estructuras típicas para la Minicentral Hidroeléctrica de Carampoma.

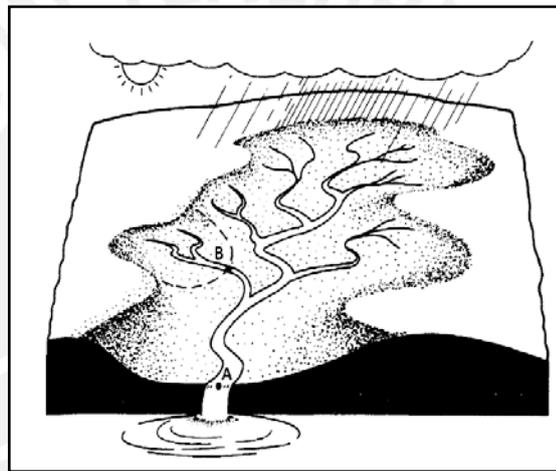
### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Definir el emplazamiento de las obras de generación hidroenergético.
2. Emplear la metodología de transmisión hidrológica, frente a la escasez de datos hidrométricos en la subcuenca del río Shuncha.
3. Desarrollar el análisis económico para los caudales probables considerados y determinar la opción de mayor rentabilidad.
4. Realizar el predimensionamiento de las estructuras que conforman la minicentral hidroeléctrica para el caudal más rentable.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Cuenca hidrográfica

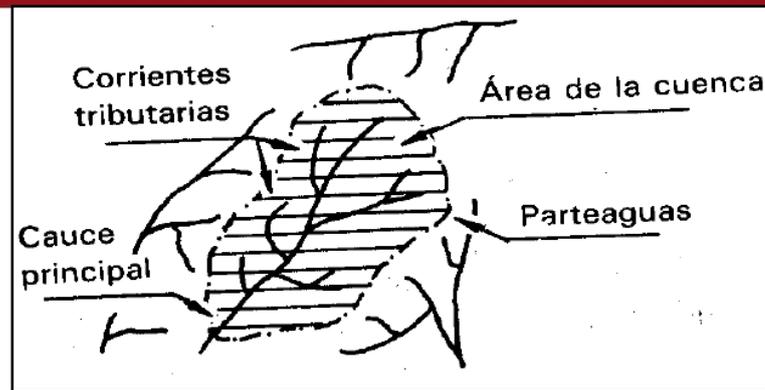
Para todo diseño hidrológico, el conocimiento de la cuenca hidrográfica es indispensable. Debido a que las grandes cuencas están conformadas por varias cuencas de menor extensión o subcuencas, es necesario definir una cuenca en función a un punto de salida que es donde en su mayoría se desarrolla el diseño para el aprovechamiento hídrico. Por lo tanto, la cuenca consiste en la unión de todos los puntos que encierran un área territorial donde luego de una tormenta el agua es conducida hacia el punto de salida (McCuen, 1989).



**Figura 1. Delineamiento del contorno de la cuenca (McCuen, 1989).**

En la figura 1, se observa que luego de una tormenta de precipitación, las aguas son conducidas hacia el punto A ubicado en el río principal y pasan por varios puntos intermedios como lo es el punto B que se encuentra en un río tributario.

El contorno de la cuenca se conoce como las líneas del *Divortium Aquarum* o parteaguas, la cual encierra un área territorial de drenaje natural, donde la totalidad de precipitaciones en la zona se unen para formar el curso principal de agua. El parteaguas es la línea imaginaria que separa a dos cuencas adyacentes, tiene su inicio y final en la cota más baja de la cuenca y el trazo une los puntos más elevados de la zona (Aparicio, 1992).



**Figura 2. Cuenca hidrográfica (Aparicio, 1992).**

En la cuenca hidrográfica se ubica el río principal y sus afluentes, que pueden ser primarios, secundarios, terciarios y hasta de cuarto orden como se ilustra en la figura 2, además de fuentes de almacenamiento hídrico, como lagunas reguladas y sin regulación.

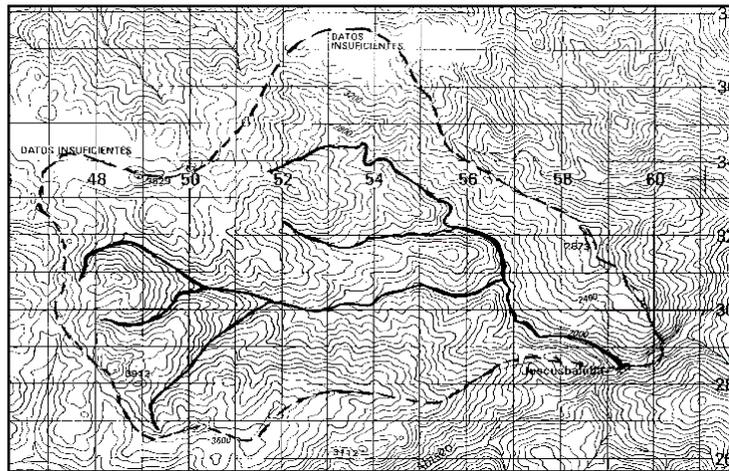
### **2.1.1 Parámetros geomorfológicos**

Los parámetros geomorfológicos de la cuenca sirven para poder describir el relieve de la tierra que es resultado de procesos milenarios constructivos y destructivos, lo cual se conoce como el ciclo geomorfológico. La determinación de los parámetros geomorfológicos en la hidrología es útil, ya que definen las características físicas e hidrológicas de una cuenca (Linsley *et al.* 1975). Sin embargo, el análisis queda limitado a la disponibilidad de mapas que usualmente se encuentran en distintas escalas, lo cual generan variación en los parámetros obtenidos con cada mapa.

A continuación, se conceptualizan los parámetros geomorfológicos más relevantes en una cuenca.

#### **a) Área de una cuenca hidrográfica**

El área es una de las características más importantes de una cuenca, debido a que se asocia al volumen de agua que se genera en el lugar y es un parámetro de entrada para modelos hidrológicos, basados en cálculos complejos mediante el uso de softwares hidrológicos. Para el propósito de diseño hidrológico, la precipitación se asume de manera homogénea en toda la extensión delimitada, por lo que se puede estimar el potencial hidrológico. La delimitación del área se puede realizar de manera manual o mediante el uso de un software, en ambos casos es necesario contar con información geográfica del lugar que generalmente consiste en un plano topográfico (McCuen, 1989).



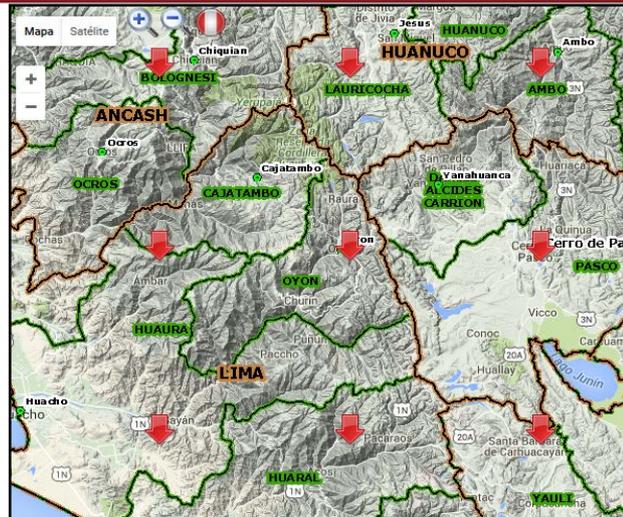
**Figura 3. Delimitación de una cuenca (ITDG-PERÚ, 1995).**

En la figura 3, se observa que la curva de la delimitación corta en forma perpendicular a las curvas de nivel de acuerdo con los criterios cartográficos.

Con el tiempo, el uso del planímetro o el uso de plantillas de papel milimetrado para la delimitación fueron quedando en el pasado. Es así que, para lograr delimitar una zona de drenaje natural, de preferencia se suele usar herramientas informáticas, las cuales determinan el contorno con tan solo indicar la ubicación geográfica del punto de interés. El procesamiento de la información geográfica se basa en la aplicación de trigonometría básica, la cual tiene en consideración las pendientes del terreno (McCuen, 1989).

Para la delimitación mediante el uso del ArcGIS, es necesario disponer de una base cartográfica digital. Ésta se puede realizar a partir de un plano cartográfico que comúnmente se encuentra en escalas de 1/25000 y 1/50000, pero que para fines de diseño o de estudio se consideran escalas de 1/10000 o 1/5000 (Gestión integral de Cuencas Hidrográficas, 2006).

El Ministerio de Educación del Perú (MINEDU) proporciona la información cartográfica referenciada desde el 2010 en su geoportal web, como se muestra en la figura 4. Estos datos se encuentran en formato Shape y distribuidos por zonas para todo el territorio nacional.

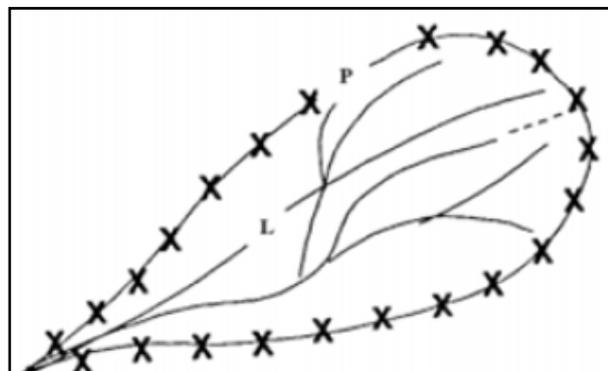


**Figura 4. Planos cartográficos (MINEDU).**  
Disponibile en: <http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/>

#### b) Longitud del cauce principal y perímetro

La longitud del cauce principal es una característica importante, ya que este parámetro está directamente relacionado con el área de drenaje. Por ello, es un dato necesario para importantes cálculos hidrológicos como el tiempo de concentración. Queda definida en la dirección del curso del río principal desde el punto de interés hacia la brecha de la cuenca (McCuen, 1989).

El perímetro de la cuenca nos da una idea de su forma, por cuanto perímetros de mayor valor corresponden a cuencas alargadas y las de menor valor a cuencas redondeadas, como se ilustra en la figura 5. Asimismo, el ancho de la cuenca queda definido como la división entre el área de la cuenca y la longitud de la cuenca (Ibáñez *et al.* 2011).



**Figura 5. Longitud y perímetro de una cuenca (Ibáñez *et al.* 2011).**

### c) Pendiente media del cauce

La pendiente media del cauce tiene un impacto importante en la forma del hidrograma debido a que la pendiente influye sobre la velocidad del flujo. Dado que el cálculo de este valor es muy complejo debido a que el perfil común de los ríos es cóncavo hacia arriba, se puede utilizar un método alternativo para calcularla (Linsley *et al.* 1975). Este método consiste en trazar una línea recta desde el punto de interés (punto B), hacia un punto extremo (punto A), de modo que las áreas bajo las curvas (A1 y A2) sean de igual magnitud, como se muestra en el gráfico 1.

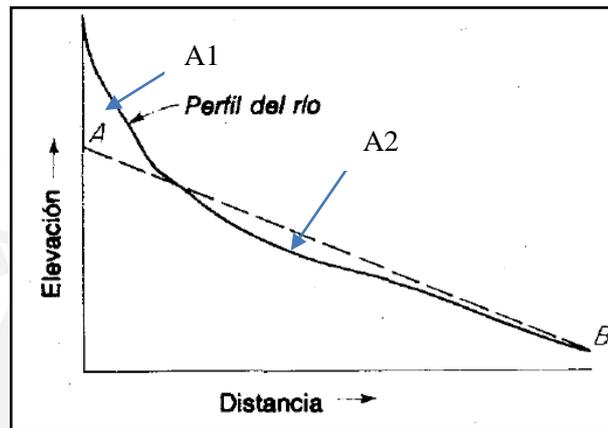


Gráfico 1. Método para definir la pendiente media del cauce (Linsley *et al.* 1975).

### d) Pendiente de la cuenca

La pendiente media de la cuenca refleja la variación de la elevación a lo largo del curso del río principal. Es usual que la magnitud de la pendiente quede determinada mediante la división entre la diferencia de elevación entre los puntos extremos del río principal y su longitud como se indica en la ecuación 2-01 (McCuen, 1989).

$$S = \frac{\Delta E}{L} \quad (2-01)$$

Donde:

S: Pendiente de la cuenca, en m/m

$\Delta E$ : Variación de altura en los puntos extremos del río principal, en m

L: Longitud del río principal, en km

### e) Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es una gráfica que representa el área acumulada de una zona por encima o por debajo de una cierta altitud y sirve para obtener la elevación media de la cuenca, como se muestra en el gráfico 2. Esta curva puede ser construida mediante el uso del planímetro, luego de medir el área entre los contornos de un mapa topográfico (Linsley *et al.* 1975).

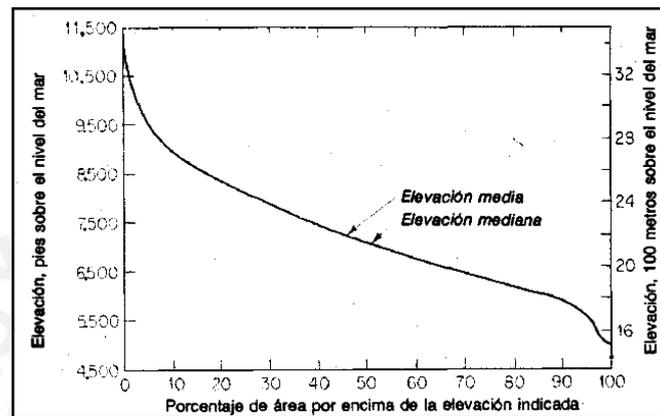
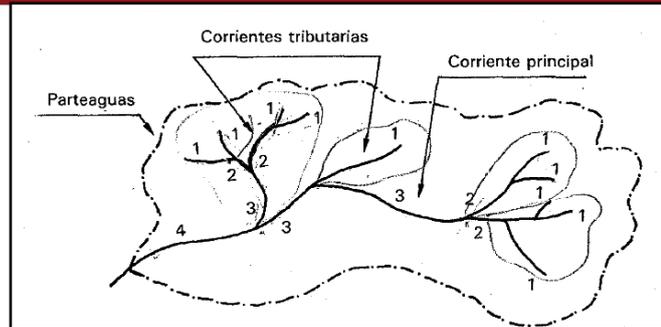


Gráfico 2. Curva hipsométrica para una cuenca madura (Ortiz, 2011).

### f) Orden de la red hídrica

El orden de una cuenca dependerá de la cantidad de corrientes tributarias ubicadas dentro de su delimitación. Las corrientes de orden 1 son aquellas que no tienen ninguna ramificación, las de orden 2 están conformadas por dos de orden 1 y así sucesivamente. De este modo, el orden de la cuenca queda definido por el número de orden del río principal donde se ubica el punto de salida, como se observa en la figura 6. Un orden alto indica que la cuenca responde de manera rápida ante una tormenta, el tipo de suelo asociado es relativamente impermeable. Por otro lado, las cuencas de menor orden pueden caracterizar la existencia de suelos resistentes a la erosión o permeables (Aparicio, 1992).



**Figura 6. Cuenca de orden 4 (Aparicio, 1992).**

### 2.1.2 Análisis de la cuenca hidrográfica mediante el ArcGIS

Para el estudio de una cuenca hidrográfica se requiere de herramientas informáticas para lograr obtener los parámetros geomorfológicos de la misma. Estos parámetros son obtenidos mediante el procesamiento de la información geográfica contenidos en documentos digitales.

El programa ArcGIS es un software especializado en el manejo de información geográfica que permite realizar análisis tradicionales y avanzados mediante su plataforma de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en conjunto con el ArcMap. Para el análisis y obtención de parámetros geomorfológicos de una cuenca, el programa requiere la elaboración de un Modelo de Elevación Digital (MED), para luego realizar la creación del Triangular Irregular Network (TIN), el cual es usado como dato de entrada para la generación del mapa de dirección de flujo. Posteriormente, se genera el archivo de flujo acumulado que es necesario para la generación de mapas para la red hidrológica en formato Raster, con el cual se obtiene la delimitación de la zona en estudio.

Para procesar la información geológica e hidrológica de la zona en formato MED, el programa ArcGIS dispone de un menú de herramientas para un correcto análisis de la cuenca hidrográfica.

## 2.2 Hidrología

La hidrología considerada como una ciencia natural, se encarga de realizar el estudio del agua en todas sus fases sobre la tierra, en cuanto a su distribución y circulación por la superficie terrestre. También tiene presente las características físicas y químicas en cuanto a su interacción con el medio ambiente. Por otro lado, el resultado del estudio hidrológico es empleado para resolver problemas prácticos, ya sea de diseño, planeación, operación, generación hidroeléctrica, abastecimiento de

agua y para el manejo apropiado de los recursos hídricos mediante estimaciones, luego de aplicar métodos estadísticos para el tratamiento de los datos recopilados (Ven Te Chow, 1994).

### 2.2.1 Pluviometría

La ingeniería hidrológica cuenta como punto de partida a la precipitación, porque es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, por lo tanto, sus mediciones y proceso de análisis de la información son fundamentales para la realización de estudios y proyectos que conciernen con el uso del agua. Esta medición se realiza mediante un pluviómetro, un instrumento cuya función es la de medir la cantidad de lluvia. En general estos instrumentos son tubos de boca ancha y base angosta que están graduados mediante una escala numérica lo cual permite medir la cantidad de precipitación (Villanueva, 2010).

La cantidad y variación de la precipitación, puede producir efectos positivos o negativos en una región dependiendo de la cantidad de descarga en cada temporada, sea de estiaje o de avenidas. Por otro lado, está directamente relacionada con la cantidad de agua que fluye en los ríos, por lo que, para fines de diseño o análisis, es necesario conocer el comportamiento de la precipitación en función del tiempo (McCuen, 1989). La corroboración y análisis de los datos recopilados se realizaron a partir de la elaboración de una serie histórica de precipitaciones, con la información pluviométrica histórica disponible, como se muestra en el gráfico 3.

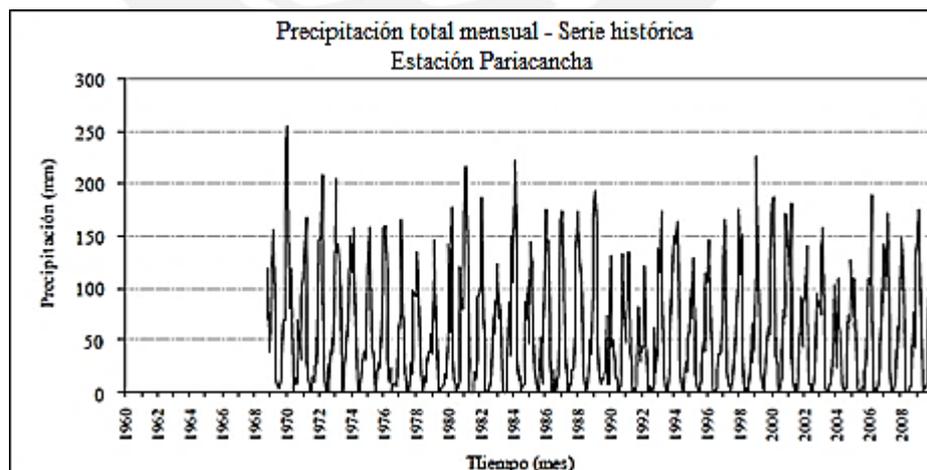


Gráfico 3. Serie histórica de precipitación total mensual (MINAG, 2010).

### 2.2.1.1 Precipitación media en la cuenca

Como parte del estudio hidrológico, es fundamental tener conocimiento de la precipitación media en la cuenca en estudio. Se dispone de tres métodos para obtener la precipitación media: el método por promedio de registro de las estaciones, el método de los polígonos de Thiessen y el método de las isoyetas. El método por promedios asume una distribución homogénea de la precipitación, por lo que solo se requiere aplicar un simple promedio del registro de las estaciones. El método de los Polígonos de Thiessen contempla el área de influencia asociada a cada pluviómetro, con lo cual se procede a calcular un promedio ponderado. Por último, el método de las isoyetas tiene en consideración el efecto orográfico y la morfología del lugar (McCuen, 1989).

Para el presente estudio, se aplicó el método de los Polígonos de Thiessen, que consiste en dividir la cuenca en polígonos cuyas áreas corresponderían a la extensión donde se supone que la lluvia es igual que la de estación incluida en el polígono. No obstante, existe cierta inexactitud por suponer uniformidad de precipitación, las lluvias de los puntos intermedios entre estaciones compensarán y uniformizarán la lámina de agua, acercándola de manera promedio a la de la estación (Chávez, 1994).

#### a) Polígonos de Thiessen

Para trazar los polígonos, sobre un plano se ubican las estaciones y se unen dos a dos, mediante rectas que formarán triángulos auxiliares. Después se trazan las mediatrices de los lados de los triángulos, obteniéndose de este modo los polígonos, ver figura 7.

A partir de los datos de precipitación de cada estación, se multiplican por el área del polígono correspondiente, determinándose los volúmenes de agua, cuya suma corresponderá al de la cuenca (Chávez, 1994). La precipitación en la cuenca se determina mediante la ecuación 2-02.

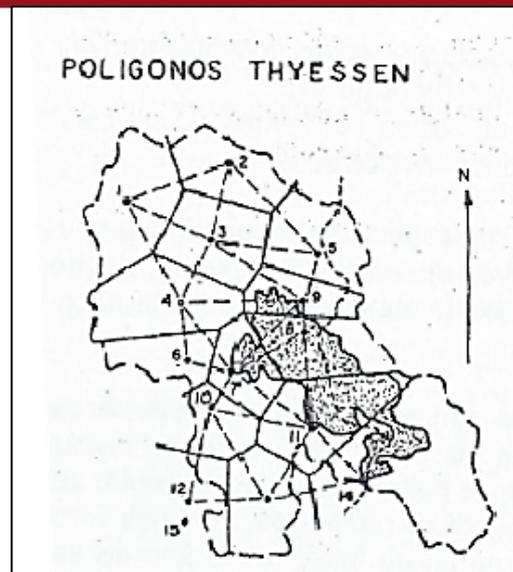
$$P = \frac{\sum P_j * A_i}{A_t} \quad (2-02)$$

Donde:

A<sub>i</sub>: es el área del polígono de la estación, en km<sup>2</sup>

A<sub>t</sub>: es el área total de la cuenca, en km<sup>2</sup>

P<sub>j</sub>: precipitación de la estación, en mm



**Figura 7. Método de los Polígonos de Thiessen (Chávez, 1994).**

Para el cálculo de la precipitación media de la cuenca se cuenta con el software hidrológico Hydraccess. Este software permite administrar base de datos hidrológicos, así como realizar fácilmente el procesamiento de los datos. Para ello, cuenta con funciones avanzadas que permiten el cálculo de la lluvia promedio sobre una cuenca, pues dispone de la metodología de los polígonos de Thiessen, la cual se puede aplicar a series temporales, incluso si éstas carecen de datos.

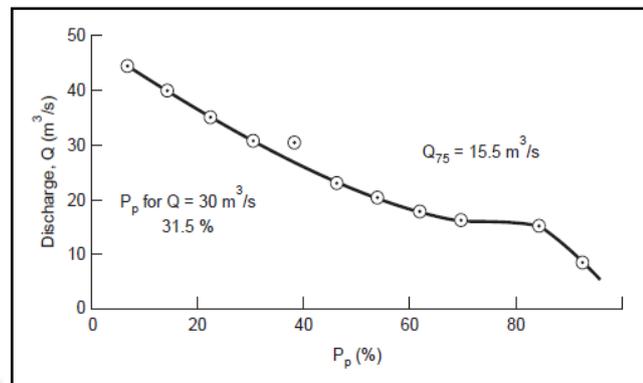
### 2.2.2 Hidrometría

La hidrometría se encarga de medir, registrar, calcular y analizar la cantidad de volumen de agua que circula por un río, canal o tubería por unidad de tiempo. Para este propósito, se establece un sistema de estaciones hidrométricas ubicadas de preferencia en la parte inferior de la cuenca húmeda. La mayor parte de estas estaciones hidrométricas las administra el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

#### 2.2.2.1 Curva de duración de caudales

En la curva de duración de caudales, queda representada la probabilidad de ocurrencia de cada caudal registrado durante un periodo de tiempo determinado. Se tiene sobre el eje X la probabilidad de que un caudal sea igualado o excedido en un determinado valor. Por otro lado, en el eje Y se cuenta con la información de los caudales medios registrados. Esta curva resulta útil para realizar una planificación y manejo de caudales en proyectos de generación hidroeléctrica (Asawa, 2005).

La curva de duración posee una tendencia característica, ya que para el caudal máximo registrado se tiene una probabilidad de ocurrencia muy baja y para el mínimo caudal registrado se tiene una probabilidad de ocurrencia máxima. Es por ello que la curva desciende de un valor máximo a un valor mínimo, como se muestra en el gráfico 4.



**Gráfico 4. Curva de duración (Asawa, 2005).**

Por otro lado, la curva de duración es una herramienta para lograr seleccionar un caudal adecuado para el diseño de una minicentral hidroeléctrica, ya sea aislada o interconectada (Ortiz, 2011).

#### 2.2.2.2 Caudales característicos

##### a) Caudal de diseño

El caudal de diseño es aquel con el que se proyecta el diseño de la minicentral hidroeléctrica. Para ello es necesario tomar en cuenta el tipo de minicentral hidroeléctrica, ya sea aislada o interconectada. Al ser aislada se deberá garantizar la energía demandada la mayor parte del año. Por el contrario, si es interconectada, se prioriza la cantidad de energía que se pueda entregar al sistema interconectado.

La selección del caudal de diseño deberá tener en cuenta una generación de energía constante y así permitir la recuperación de la inversión en un tiempo razonable. Es así que este caudal se determina en base a la curva de duración y que generalmente se opta por aquel caudal que tenga una persistencia del 90% para evaluar la potencia disponible. Para generar una potencia adicional con sistemas de regulación u obras de almacenamiento adicional se puede emplear el caudal al 50% (Ortiz, 2011).

### **b) Caudal ecológico**

El caudal ecológico es aquel que se deberá garantizar a lo largo del río para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural (Chiock, 2009).

Por otro lado, la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos (DCPRH) definió el siguiente criterio técnico: “Para cursos con caudales medios anuales menores o iguales a 20m<sup>3</sup>/s, el caudal ecológico será como mínimo el 10% del caudal medio mensual para la época de avenidas, y para la época de estiaje será de un 15% del caudal medio mensual” (ANA, 2012).

### **c) Caudal naturalizado**

Es aquel caudal que forma parte de un registro generado en base a datos reales del punto de medición. Los caudales naturalizados son generados debido a que los registros no se encuentran completos o que fueron alterados por fuentes de almacenamiento. Por lo tanto, se puede decir que es el caudal que representa la historia hidrológica del curso del agua sin la intervención del hombre (MINAG, 2010).

### **2.2.3 Transferencia hidrológica**

La transferencia hidrológica es una metodología antigua, usada en diversos estudios para la estimación de caudales en una cuenca que carece de datos hidrológicos, mediante el uso de estaciones hidrométricas conocidas (Wiche *et al.* 1989; Guenther *et al.* 1990; Emerson y Dressle, 2002; Archfield y Vogel, 2010).

El método no requiere mucha información ni desarrollo, es sencillo y muchas veces el único disponible. Por otro lado, se debe tener en cuenta las características topográficas y meteorológicas, pues éstas afectan el caudal de la cuenca en estudio (Emerson *et al.* 2005).

La metodología se desarrolla empleando parámetros adimensionales que contengan las variables a transferir como el área, caudal y la precipitación de una cuenca (MINAG, 2010). Por lo tanto, se procede a establecer una relación de parámetros adimensionales referidos a la cuenca con información conocida y a la que carece de información, lo cual se consolida en una ecuación de relación entre las dos cuencas, conforme se muestra en la ecuación 2-03.

$$\frac{Q_c}{A_c * P_c} = \frac{Q_s}{A_s * P_s} \quad (2-03)$$

Donde:

Qs: caudal sin información, en m<sup>3</sup>/s

As: área sin información, km<sup>2</sup>

Ps: precipitación media anual sin información, en mm

Qc: caudal con información, en m<sup>3</sup>/s

Ac: área con información, km<sup>2</sup>

Pc: precipitación media anual con información, en mm

Los resultados obtenidos deberán de ser tomados en consideración de acuerdo a la complejidad requerida. Por lo tanto, dichos resultados podrán ser utilizados para estimaciones de caudales en una evaluación hidrológica, mas no para estudios hidrológicos definitivos, en los cuales se deberá de realizar un ajuste con un registro real de caudales en la zona de estudio. La metodología tiene una mayor precisión cuando las corrientes de los ríos tienen características de flujo similares (Hirsch, 1979).

En el Perú, esta metodología es comúnmente usada en diversos estudios y proyectos de prefactibilidad para el aprovechamiento hídrico. Por ejemplo, en el año 2010, el MINAG realizó la Evaluación de los Recursos Hídricos en la cuenca del río Rímac, donde se generó datos de caudales medios mensuales en la subcuenca del Alto Río Rímac y la subcuenca Quebrada Párac mediante la generación de la ecuación de relación con la cuenca del río Rímac.

### 2.3 Minicentrales hidroeléctricas

Una minicentral hidroeléctrica es una infraestructura hidráulica compuesta por obras civiles, mecánicas y eléctricas para el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos para generar energía eléctrica (Grupo formación de empresas eléctricas, 1994).

Las minicentrales hidroeléctricas son más rentables en comparación a otros tipos de centrales de generación de energía eléctrica con recursos energéticos renovables, pues a pesar que el costo inicial de construcción es elevado, una vez puesta en funcionamiento, los gastos de explotación y mantenimiento son relativamente bajos.

El lugar de emplazamiento debe ser acorde a las características y configuración del terreno por el que discurre la corriente de agua. En primer lugar, el agua es retenida y

posteriormente encauzada y controlada. Debido a la energía cinética desarrollada en su descenso, acciona directamente las máquinas motrices (Viejo y Palacios, 1977).

### **2.3.1 Esquema de una minicentral hidroeléctrica**

Toda minicentral hidroeléctrica cuenta con una infraestructura para el manejo y aprovechamiento del agua, desde su captación hasta la disposición final de las aguas turbinadas. El esquema se puede dividir en dos grandes conjuntos (Grupo formación de empresas eléctricas, 1994). El primer conjunto incluye todo tipo de obras, equipos, etc., cuyo objetivo es el almacenamiento y encauzamiento del agua para conseguir una acción mecánica. Este conjunto está conformado por el embalse, la presa y aliviaderos, las tomas y depósito de carga, canales, túneles y galerías, tuberías forzadas y chimeneas de equilibrio. El segundo conjunto incluye los edificios, equipos, sistema, etc., mediante los cuales y después de las sucesivas transformaciones de la energía, se obtiene la energía eléctrica. Este conjunto está conformado por las turbinas hidráulicas, alternadores, transformadores, sistemas eléctricos de baja, media, alta y muy alta tensión, sistema eléctrico de corriente continua, medios auxiliares y cuadros de control.

Cabe precisar que no necesariamente todas las minicentrales están conformadas por todos los componentes antes mencionados. Ello depende básicamente de las características de emplazamiento, las potencias y los rendimientos que se pretende lograr.

### **2.3.2 Componentes de una minicentral hidroeléctrica**

Una minicentral hidroeléctrica debe disponer de la masa de agua de un río aguas arriba y un salto o desnivel en relación al cauce original del río. Para lograr este objetivo, se tendrán que realizar obras civiles para captar, almacenar y distribuir el agua (Grupo formación de empresas eléctricas, 1994). Las principales obras civiles en una minicentral hidroeléctrica son las siguientes:

#### **a. Bocatoma**

La bocatoma es una estructura encargada de captar y regular cierto caudal de agua con el fin de lograr obtener la potencia deseada en el proyecto. Las bocatomas convencionales tienen una pequeña presa, que no almacena agua, y no posee

regulación. Parte del caudal fluye a través de la bocatoma y el excedente se vierte por el aliviadero de la presa.

Las funciones de la bocatoma son garantizar la captación de una cantidad constante de agua, impedir el ingreso de materiales sólidos y proteger al sistema del ingreso de avenidas que pudiesen producirse en épocas lluviosas (ITDG-PERÚ, 1995).

Para el dimensionamiento de los elementos de la bocatoma, se ha considerado las recomendaciones propuestas en la tesis desarrollada por Mellado (1982), las mismas que se describen a continuación.

A partir de las características del canal de conducción, el tirante ( $a$ ) y el ancho superficial del mismo ( $B_o$ ), se calcula el ancho del inicio de la transición ( $B$ ) mediante la ecuación 2-04.

$$B = 2B_o \quad (2-04)$$

Luego, se escoge el ancho de la ventana de captación ( $B_1$ ), el cual deberá ser del mismo ancho superficial del agua en el canal de conducción, como se indica en la ecuación 2-05.

$$B_1 = B_o \quad (2-05)$$

A partir del ancho de la ventana de captación ( $B_1$ ) y el caudal de diseño de la minicentral ( $Q$ ), se calcula la altura de la ventana de captación ( $H$ ), mediante la fórmula de Francis para vertederos (ecuación 2-06).

$$Q = 1.84B_1'H^{\frac{3}{2}} \quad (2-06)$$

Donde:

$$B_1' = 0.75B_1$$

Con el tirante ( $a$ ) en el canal de conducción, se calcula la altura del canal en la compuerta de admisión ( $H_o$ ), a partir de la ecuación 2-07.

$$H_o = 1.3a \quad (2-07)$$

La altura del marco de la compuerta de admisión ( $A$ ) se estima como la mitad de la altura de la ventana de captación ( $H$ ), de acuerdo a lo indicado en la ecuación 2-08.

$$A = \frac{H}{2} \quad (2-08)$$

El ancho del marco de la compuerta de admisión (C) se considera igual a mitad de la longitud de transición (L), tal como se indica en la ecuación 2-09.

$$C = \frac{L}{2} \quad (2-09)$$

La longitud de la rejilla de entrada (l), se calcula a partir de la altura del canal en el marco de la compuerta ( $H_o$ ), y la altura del marco de la compuerta de admisión (A), empleando la ecuación 2-10. El esquema con las características presentadas anteriormente se muestra en el anexo VI.

$$l = (H_o + A) \operatorname{Cosec} 60^\circ \quad (2-10)$$

### b. Canal de conducción

La función principal del canal de conducción es guiar el agua desde una represa o desde el punto de captación del agua hasta la cámara de carga. El canal puede estar revestido con concreto ciclópeo o con mampostería de roca o simplemente con material cuaternario compactado. En el caso de los túneles puede construirse con tuneladora o en forma convencional (Ven Te Chow, 1986).

En el canal de conducción, el caudal tiene un flujo uniforme, es decir tiene un calado y velocidad constante en todo el tramo, que evita las pérdidas de carga. Esta situación implica que el gradiente hidráulico y el gradiente geométrico sean constantes. Asimismo, la rugosidad se mantiene invariable.

Para el dimensionamiento del canal, primero se realiza el trazo del canal y se selecciona el tipo de material del mismo. Por otro lado, el escurrimiento del canal queda representado mediante la ecuación de continuidad. En dicha ecuación el caudal en una sección de un canal se expresa según lo indicado en la ecuación 2-11 (Ven Te Chow, 1986).

$$Q = v * A \quad (2-11)$$

Donde:

- Q: caudal, en  $\text{m}^3/\text{s}$
- v: velocidad media, en  $\text{m}/\text{s}$
- A: área mojada, en  $\text{m}^2$

La velocidad media del agua en el canal queda definida mediante la fórmula de Manning (ecuación 2-12). Ésta es aceptable para valores intermedios de rugosidad relativa (Rouse, 1951).

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2-12)$$

Donde:

- n: coeficiente de rugosidad, adimensional
- v: velocidad media, en m/s
- R: radio hidráulico, en m
- S: pendiente de la línea de energía, en m/m

Combinando la fórmula de Manning y la ecuación de continuidad se obtiene la ecuación 2-13, la cual permite calcular el caudal.

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2-13)$$

Donde:

- Q: caudal, en m<sup>3</sup>/s
- A: área mojada, en m<sup>2</sup>
- R: radio hidráulico, en m
- S: pendiente de la línea de energía, en m/m

Además, para el diseño del canal de carga es necesario considerar la pérdida que se produce en el mismo. La pérdida en el canal se obtiene mediante la ecuación 2-14.

$$h_c = S_o * L_o \quad (2-14)$$

Donde:

- h<sub>c</sub>: Pérdida en el canal, en m
- S<sub>o</sub>: Pendiente del canal, en m/m
- L<sub>o</sub>: Longitud del canal, en km

### c. Desarenador

La función principal del desarenador es sedimentar partículas, evitando el ingreso de las mismas, que vienen suspendidas en el agua. De este modo se evita el desgaste de válvulas y turbinas (Harvey, 1993). Para poder decantar dichas partículas, se disminuye la velocidad del agua, por ello el desarenador cuenta con un área mayor, como se ilustra en la figura 8. Es así que se debe cumplir con la ecuación 2-15.

$$Q = A_c * V_c = A_d * V_d \quad (2-15)$$

Donde:

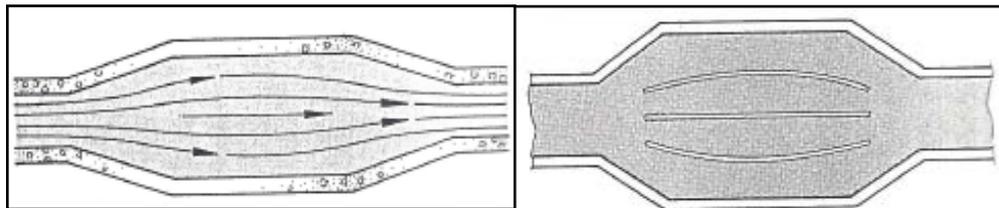
Q: caudal constante, en m<sup>3</sup>/s

$A_c$ : área de la sección transversal del canal, en m<sup>2</sup>

$V_c$ : velocidad del agua en el canal, en m/s

$A_d$ : área de la sección transversal del desarenador, en m<sup>2</sup>

$V_d$ : velocidad del agua en el desarenador, en m/s



**Figura 8. Depósitos de materiales en desarenador (Harvey, 1993).**

Para el dimensionamiento del desarenador se considera las recomendaciones propuestas en la tesis desarrollada por Mellado (1982), las mismas que se describen a continuación.

-La determinación del diámetro de las partículas a eliminar depende del tipo de la granulometría de los materiales sólidos que lleva el agua, la turbina que se emplee y la altura del salto.

-La velocidad media del agua en el desarenador ( $V_d$ ) se puede considerar menor a 0.3 m/s.

-La capacidad del desarenador será de 1.5 a 2 veces más de la capacidad nominal del mismo.

-La velocidad de sedimentación de las partículas ( $v$ ), para los diferentes diámetros de granos, se obtiene de la ecuación 2-16.

$$v = M - w \quad (2-16)$$

Donde:

$v$ : velocidad de sedimentación real, en m/s

$M$ : velocidad de sedimentación de granos de arena en aguas tranquilas, en m/s.

$w$ : velocidad de sedimentación debido a turbulencia, en m/s

Para el dimensionamiento del alto (H) y ancho (B) del desarenador se utilizan las ecuaciones 2-17, 2-18 y 2-19.

$$B = TH \quad (2-17)$$

Donde:

- T: 2, adimensional
- H: profundidad de la poza de sedimentación, en m
- B: ancho de la poza de sedimentación, en m

Luego

$$B = 2H \quad (2-18)$$

Además

$$BH = \frac{Q}{0.3} \quad (2-19)$$

Donde:

- B: ancho de la poza de sedimentación, en m
- H: profundidad de la poza de sedimentación, en m
- Q: caudal de diseño, en m<sup>3</sup>/s
- 0.3: velocidad máxima del agua en la poza de sedimentación, en m/s

La longitud de transición del canal al desarenador (L1) se obtiene a partir de la ecuación 2-20.

$$L1 = 2(B1 - Bo) \quad (2-20)$$

Donde:

- L1: longitud de transición, en m
- B1; ancho del desarenador, en m
- Bo: ancho superficial del canal de conducción en m

El cálculo de la longitud del desarenador (L) se obtiene mediante la expresión 2-21.

$$L = VH \frac{1}{(M - w)} C \quad (2-21)$$

Donde:

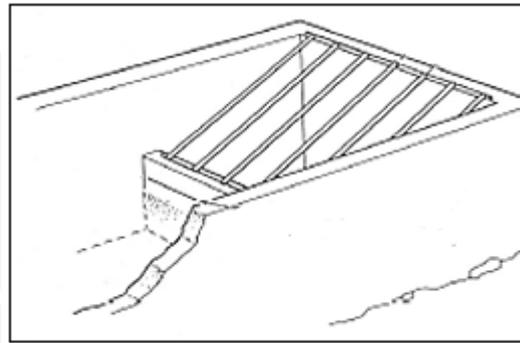
- L: longitud del desarenador, en m
- V: velocidad media del agua en el desarenador, en m/s
- M: velocidad de sedimentación de granos de arena en aguas tranquilas, en m/s.
- w: velocidad media de sedimentación debido a turbulencia, en m/s
- C: coeficiente de almacenamiento con valor de 2.0, adimensional

El esquema del desarenador con las características presentadas anteriormente se muestra en el anexo VI.

#### d. Cámara de carga

Tiene como principal objetivo proveer volumen de agua suficiente a la tubería forzada, con el fin de evitar el fenómeno del golpe de ariete. También se usa como reservorio de regulación diaria y puede servir como un desarenador, debido a que en el recorrido del canal de conducción se producen aportes sólidos por erosión de los taludes en el terreno (ITDG-PERÚ, 1995).

Asimismo, es posible diseñar algunos dispositivos de limpieza semiautomáticos a fin de evitar un trabajo manual excesivo y evitar cortes de energía, como el que se ilustra en la figura 9.



**Figura 9. Rejillas de la cámara de carga (Harvey, 1993).**

Para el diseño de la cámara de carga se consideran las recomendaciones propuestas en la tesis desarrollada por Mellado (1982), las mismas que se describen a continuación:

-El diseño de la poza de decantación será determinado por las condiciones topográficas de la zona.

-El diseño del aliviadero de descarga se diseñará empleando la ecuación de Francis para vertederos de cresta ancha (ecuación 2-22).

$$Q = 1.84Lt^{\frac{3}{2}} \quad (2-22)$$

Donde:

Q: caudal de diseño del proyecto, en m<sup>3</sup>/s

L: ancho del aliviadero, en m

t: espesor de la lámina de agua sobre el aliviadero, en mm

-El diseño del canal de descarga del aliviadero considera una sección rectangular y aplica la teoría de diseño de canales, mediante el uso de la ecuación de Manning.

-El dimensionamiento de la cámara de presión queda condicionado por la altura mínima de agua sobre la tubería de presión a la entrada de ésta. La altura deberá ser mayor de 0.80 m.

-El ancho de la rejilla de la cámara de presión se estima como el doble de la tubería que sale de ella.

#### e. Tubería forzada

La tubería forzada conduce el agua desde un nivel superior hasta uno inferior, para transformar la energía potencial en energía mecánica. Es metálica, cilíndrica y de acero, la cual puede soportar grandes presiones y fricción del agua, desde el salto hasta las turbinas. En la figura 10 se ilustra un ejemplo de la misma.

En el interior de la tubería forzada se da el cambio de energía del agua a medida que desciende, transformándose la energía potencial en energía cinética y de presión, para poder mover las turbinas y generar energía eléctrica (Grupo Formación de Empresas Eléctricas, 1994).



**Figura 10. Tubería forzada del Salto de Las Conchas, España (Zoppetti, 1979).**

Para el diseño la tubería forzada, se consideran los aspectos recomendados por Ortiz (2011), las mismas que se describen a continuación:

-El número de anclajes queda determinado por el trazo realizado.

-El espesor de la tubería forzada se determina a partir de los efectos generados por el golpe de ariete. Dicho efecto, queda definido por la fórmula 2-23.

$$h_s = 0.3 * H_B \quad (2-23)$$

Donde:

$H_B$ : salto bruto, en m

$h_s$ : sobrepresión por golpe de ariete, en m

-El diámetro de la tubería forzada (D) se obtiene mediante la fórmula de Bondschú (ecuación 2-24).

$$D = 1.27 \frac{Q^{0.4268}}{(H_B + h_s)^{0.1423}} \quad (2-24)$$

Donde:

Q: caudal de diseño, en m<sup>3</sup>/s

$H_B$ : salto bruto del proyecto, en m

$h_s$ : sobrepresión por golpe de ariete, en m

-Las pérdidas de energía en la tubería forzada se generan por la fricción de elementos que componen la tubería de presión. Dentro de las pérdidas de energía que se consideran normalmente, se tienen las pérdidas de energía en la rejilla, en la entrada de la tubería, codos, bifurcación en el tubo, válvulas, bifurcaciones y estrechamiento del tubo. La pérdida de la tubería forzada queda definida por la ecuación 2-25.

$$\text{Pérdida en tubería forzada} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * 9.81} \quad (2-25)$$

Donde:

f: coeficiente de Darcy, adimensional

D: diámetro de la tubería, en m

L: longitud de la tubería forzada, en km

v: velocidad en la tubería forzada, en m/s

-La velocidad en la tubería forzada viene dada por el cociente entre el caudal (m<sup>3</sup>/s) y el área del conducto (m<sup>2</sup>).

-El coeficiente de Darcy se calcula mediante la expresión 2-26.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{k}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (2-26)$$

Donde:

f: coeficiente de Darcy, adimensional

D: diámetro de la tubería, en m

Re: número de Reynolds, adimensional

k: rugosidad absoluta en la tubería, en m

-El número de Reynolds ( $Re$ ) se determina empleando la ecuación 2-27.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2-27)$$

Donde:

V: velocidad del flujo del agua en la tubería forzada, en m/s  
D: diámetro de la tubería, en m  
 $\nu$ : viscosidad cinemática, en  $m^2/s$

-Las pérdidas en la rejilla ( $hr$ ) quedan definidas mediante la expresión 2-28.

$$hr = \epsilon_r * \frac{v^2}{2 * 9.81} \quad (2-28)$$

Donde:

v: velocidad del flujo del agua en la tubería, en m/s  
 $\epsilon_r$ : pérdidas en la rejilla por fricción, adimensional

-Las pérdidas en la entrada ( $he$ ) están determinadas por la expresión 2-29.

$$he = \epsilon_e * \frac{v^2}{2 * 9.81} \quad (2-29)$$

Donde:

v: velocidad del flujo del agua en la tubería, en m/s  
 $\epsilon_e$ : pérdidas en la entrada de la tubería, adimensional

-Las pérdidas en los codos ( $hk$ ) se definen conforme la ecuación 2-30.

$$hk = \epsilon_1 * \frac{v^2}{2 * 9.81} + \epsilon_2 * \frac{v^2}{2 * 9.81} + \epsilon_3 * \frac{v^2}{2 * 9.81} \quad (2-30)$$

Donde:

v: velocidad del flujo del agua en la tubería, en m/s  
 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ : coeficientes de pérdidas en los codos, adimensionales

-Las pérdidas por fricción ( $hr$ ) quedan determinadas por la expresión 2-31.

$$hr = 0.01 * \left(\frac{K}{D}\right)^{0.134} * L * \frac{v^2}{2 * 9.81 * D} \quad (2-31)$$

Donde:

v: velocidad en la tubería, en m/s  
D: diámetro de la tubería, en m  
L: Longitud de la tubería forzada, en m  
K : constante, 1.15m para el acero

-Las pérdidas por bifurcación ( $h_{ram\ total}$ ) vienen dadas por la fórmula 2-32.

$$h_{ram\ total} = \epsilon_{ram} * \frac{v^2}{2 * 9.81} \quad (2-32)$$

Donde:

$v$ : velocidad del flujo del agua en la tubería, en m/s

$\epsilon_{ram}$ : coeficiente de pérdida por bifurcación en tubería, adimensional

-Las pérdidas totales ( $P_{total}$ ) en la tubería quedan definidas por la expresión 2-33.

$$P_{total} = P_{rejilla} + P_{tipo\ entrada} + P_{codos} + P_{fricción} + P_{bifurcación} \quad (2-33)$$

-El espesor de la tubería forzada ( $e$ ) se determina mediante la expresión 2-34.

$$e = \left( \frac{1.3 * H_B * D}{2 * dt * K_f} + es \right) * 1000 \quad (2-34)$$

Donde:

$H_B$ : salto bruto del proyecto, en m.

$D$ : diámetro de la tubería, en m.

$e$ : espesor de la tubería forzada, en m.

$dt$ : tensión de tracción del acero 1200 kg/cm<sup>2</sup>.

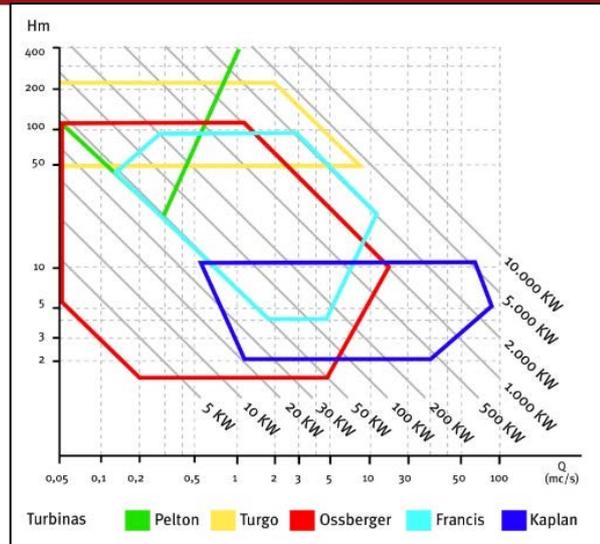
$K_f$ : es la eficiencia de las uniones.

$es$ : espesor adicional de 3mm.

#### f. Turbinas hidráulicas

La turbina es el elemento que transforma la energía cinética y potencial del agua, en movimiento de rotación, el cual es transferido mediante un eje al generador eléctrico, produciéndose la energía eléctrica. Para la elección de la turbina se debe tener en cuenta el rendimiento de la misma, el cual es influenciado por el caudal de funcionamiento y el salto de la minicentral. Según el caudal de diseño de la minicentral, la turbina Kaplan sería propicia en saltos pequeños y caudales variables, en cuanto a la turbina Francis es conveniente para saltos más elevados y variación de caudales moderadas, finalmente la turbina Pelton es empleada para grandes saltos independiente de la variación del caudal (IDAE, 2006).

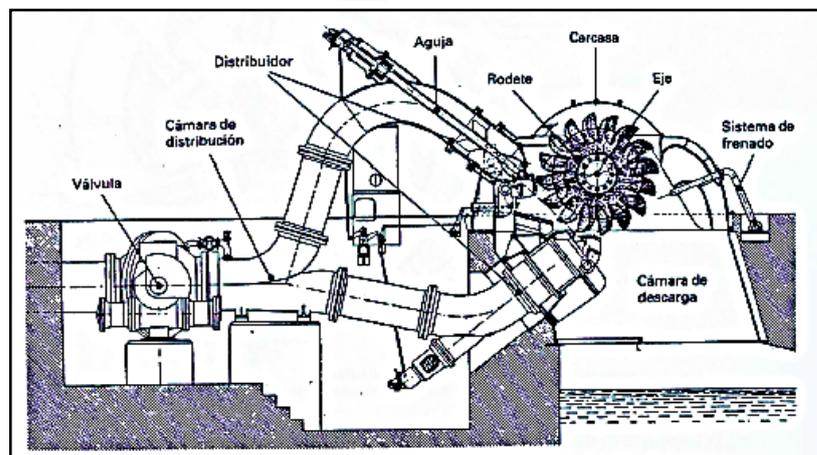
Para la variación del rendimiento de las turbinas en función al salto, se puede emplear el gráfico 5, el cual permite elegir el tipo de turbina según el salto de la minicentral.



**Gráfico 5. Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas (IDAE, 2006).**

En base a lo expuesto anteriormente, en este estudio se consideró conveniente el uso de la turbina Pelton, pues éste se utiliza en saltos de gran altura con caudales pequeños. La turbina Pelton es una turbina de acción, de flujo tangencial y de admisión parcial y está constituida por uno o varios inyectores. El inyector consta de una tobera de sección circular compuesta por una aguja de regulación que se mueve axialmente, logrando así la variación del flujo.

El rodete empleado es de admisión parcial y depende del número de inyectores y está compuesto por un disco con una serie de álabes montados en su periferia, sobre las que incide el chorro de agua. El chorro incide en la arista central de los álabes y se divide en dos partes que salen despedidas lateralmente, para caer por el canal de fuga (ITDG-PERÚ, 1995). La figura 11, muestra una turbina Pelton con los componentes mecánicos que la conforman.

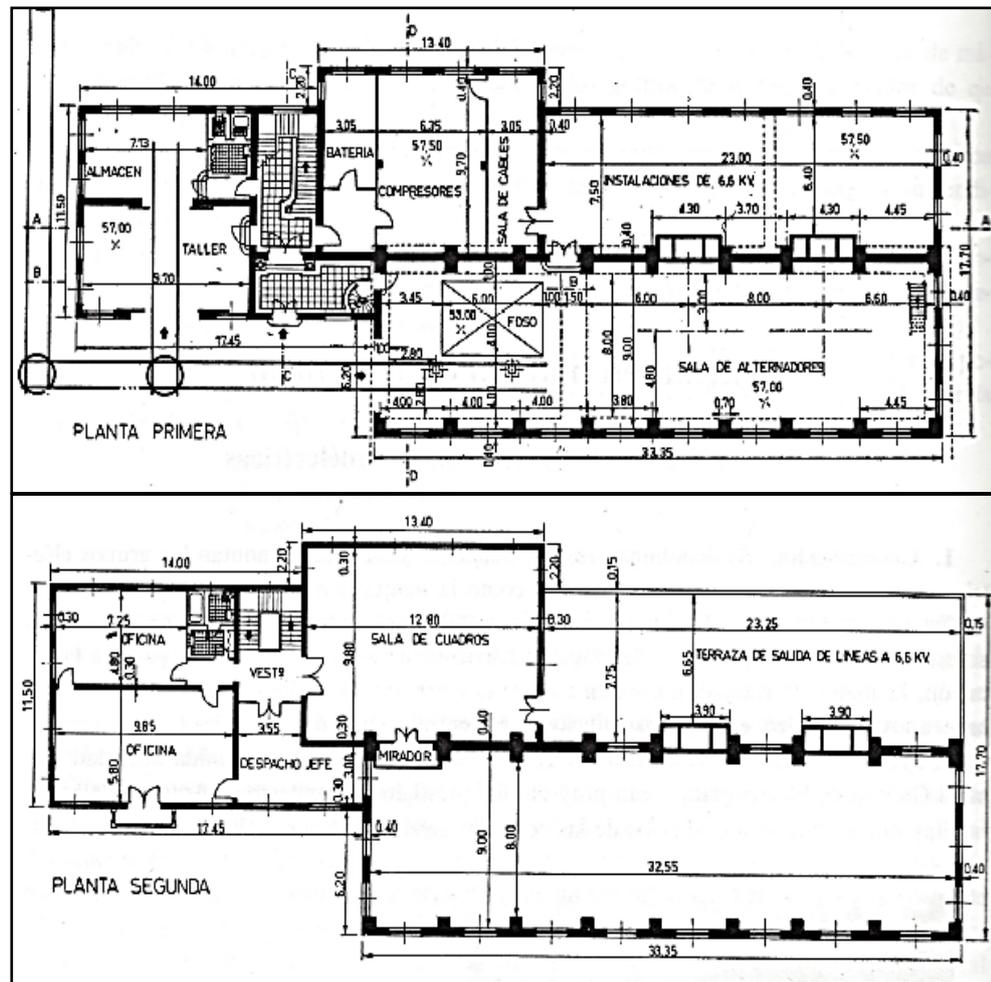


**Figura 11. Componentes de una turbina Pelton de eje horizontal, con dos equipos de inyección (Grupo Formación de Empresas Eléctricas, 1994).**

**g. Casa de máquinas**

La casa de máquinas es el lugar de generación eléctrica de una central. Aloja las tuberías, la turbina, el generador, tableros, reguladores automáticos, sistemas de control, puente grúa y la salida de los cables de energía eléctrica al patio de llaves.

La ubicación de la casa de máquinas debe ser analizada muy cuidadosamente y estará basada en estudios topográficos, geológicos y geotécnicos (IDEA, 2006). En la figura 12 se ilustra un ejemplo de la distribución de una casa de máquinas.



**Figura 12. Primera y segunda planta del edificio de la central del Salto de Las Conchas, España (Zoppetti, 1979).**

#### **h. Canal de descarga**

Es una infraestructura civil para la descarga de las aguas turbinadas hacia su cauce, después de haberse utilizado en la generación eléctrica. Estas aguas pueden causar erosión en la casa de máquinas, por lo que el diseño de la misma debe contemplar obras de concreto armado, como escudos para amortiguar la velocidad de salidas de las aguas (Zoppetti, 1979).

#### **i. Suministros y obras electromecánicas**

Los suministros y obras electromecánicas están conformados por los siguientes componentes: el generador y la subestación elevadora.

El generador es una máquina que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Éste consta de un inductor, el cual crea un campo magnético, además cuenta con un conductor que es el inducido por el campo magnético, el cual es atravesado por las líneas de fuerza y por consiguiente se genera la corriente alterna. El generador está acoplado al eje de la turbina y genera corriente alterna de media y baja tensión (IDAE, 2006). El generador está conectado a la malla de tierra de la central hidroeléctrica.

Por otro lado, la subestación elevadora está compuesta por transformadores que deben corresponder a las características funcionales del generador síncrono y de la red alimentada. Los generadores se conectan a los transformadores (acoplamiento en bloque). La potencia activa del transformador, para el acoplamiento en bloque, es igual a la del generador, la cual depende del factor de potencia de la red. (Zoppetti, 1979).

Además, se debe contar con un equipo de maniobra y protección y una malla de tierra de la central. El equipo de maniobra y protección está conformado por interruptores, seccionadores, pararrayos, transformadores de medida y relés de protección. Tiene por función la conexión o desconexión de la central, ya sea por fallas o por mantenimiento preventivo. Los transformadores y el equipo de maniobra y protección están conectados a la malla de tierra de la central. Su principal función es dar seguridad a las personas y equipos eléctricos instalados en la central hidroeléctrica.

### j. Línea de transmisión

Es una línea aérea trifásica compuesta principalmente por postes, conductores, aisladores y sistemas de puesta a tierra. Su función es transportar la potencia y energía generada en la central hasta el punto de inyección al SEIN.

### k. Conexión SEIN

Está conformada por una celda ubicada en la subestación de interconexión, y compuesta por un interruptor, seccionadores, pararrayos, transformadores de medida y relés de protección. Su función es conectar la línea de transmisión a la subestación receptora del SEIN.

### l. Instalaciones eléctricas complementarias

Están compuestas por el regulador de velocidad, el regulador de tensión, los servicios auxiliares y las instalaciones de interior.

El regulador de velocidad es un mecanismo que mantiene constante la velocidad de sincronismo de la turbina ante el aumento o disminución del número de revoluciones de la misma. Mantiene la velocidad dentro del límite permitido durante el arranque, la parada y la desconexión. La regulación es estática cuando la velocidad disminuye al aumentar la potencia, y es estática cuando la velocidad es constante para cualquier potencia (ITDG-PERÚ, 1995). La figura 13 muestra el sistema de regulación de velocidad.

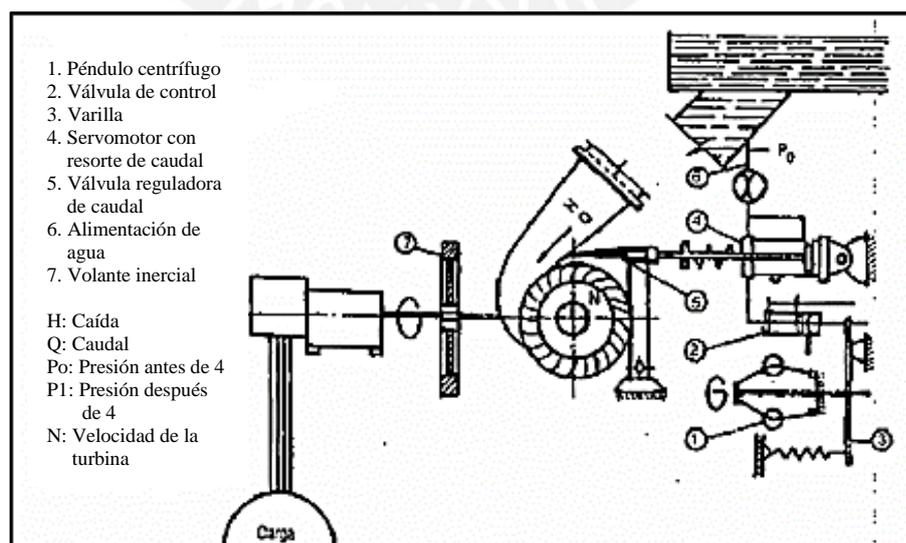


Figura 13. Esquema de regulador desarrollado por SKAT (ITDG-PERÚ, 1995).

El regulador de tensión tiene como función mantener la tensión de generación dentro de un rango adecuado de operación. Para tal efecto, tiene un sistema automático que mide la tensión del generador y lo regula a través de su corriente de excitación.

Los servicios auxiliares son los servicios mecánicos y eléctricos complementarios. Se tienen como tal, el sistema de refrigeración, sistemas de aceite lubricante, sistema de extinción de incendios, sistema de aire comprimido, grúas y equipos de izaje. Dentro de los sistemas eléctricos tenemos: los sistemas de alumbrado, calefacción o aire acondicionado, circuito de señalización y alarma, circuito de mando y protección, cargador de banco de baterías, sistemas eléctricos para alimentación de motores y compresores eléctricos.

Finalmente, las instalaciones de interior son aquellas que funcionan a la tensión de generación de los alternadores. Debido al voltaje, se ubican al interior del edificio donde también se instalan los cuadros de distribución que llevan los aparatos de medida, relés de protección y mando principales de la central (Zoppetti, 1979).

### **2.3.3 Esquema de diseño de la minicentral hidroeléctrica**

El esquema de diseño debe ser abordado en cuatro etapas: el estudio de la demanda y capacidad, el estudio hidrológico de la zona de interés, el estudio de prefactibilidad y el estudio de factibilidad final.

En primer lugar, es necesario realizar un estudio de la demanda para ver cuánta energía se requiere generar y si ésta será económicamente viable. Además, se debe tomar en cuenta el impacto que la minicentral tendrá a nivel nacional.

En segundo lugar, se debe reconocer el potencial energético de la zona mediante un estudio hidrológico, el cual deberá señalar cómo varía el caudal en el transcurso del año. Además, deberá indicar la potencia disponible y cómo varía ésta a través de los meses.

En tercer lugar, se debe elaborar un estudio de prefactibilidad, el cual consiste en realizar un cálculo de las posibles opciones de diseño. En esta etapa es posible comparar diversos diseños de minicentrales, así como comparar los resultados del estudio hidrológico. Una manera sencilla de estimar los costos de las obras civiles es utilizando ábacos de dimensionamiento, como los propuestos en la tesis de Mellado (1982).

Por último, el estudio de factibilidad final indica la mejor opción y puede procederse con los cálculos de ingeniería y costos (Harvey, 1993).

### 2.3.4 Potencia instalada y energía

La potencia disponible en una central hidroeléctrica es variable y depende del caudal de agua disponible para ser turbinado, y el salto existente.

La potencia instalada ( $P$ ) es la potencia nominal y se calcula conforme a la ecuación 2-35.

$$P = 9.81 * Q * H * e \quad (2-35)$$

Donde:

P: potencia instalada, en kW  
Q: caudal nominal, en m<sup>3</sup>/s  
H: altura neta, en m  
e: factor de eficiencia de la central, adimensional

El factor de eficiencia de la central ( $e$ ) se calcula como se indica en la ecuación 2-36.

$$e = R_t * R_g * R_s \quad (2-36)$$

Donde:

R<sub>t</sub>: rendimiento de la turbina, adimensional  
R<sub>g</sub>: rendimiento del generador, adimensional  
R<sub>s</sub>: rendimiento del transformador de salida, adimensional

Como una primera aproximación, se puede considerar el valor de 0.85 para una minicentral hidroeléctrica (IDAE, 2006).

Para el cálculo de la altura neta se emplea la ecuación 2-37, según se muestra a continuación.

$$H = N. \text{cámara de carga} - N. \text{casa de máquinas} - \text{Pérdida total} \quad (2-37)$$

Donde:

N. cámara de carga: altura de la ubicación de la cámara de carga, en m  
N. casa de máquinas: altura de la ubicación de la casa de máquinas, en m  
Pérdida total: suma de las pérdidas de altura en la tubería forzada y en el canal de conducción.

La energía, que es la producción media de la minicentral hidroeléctrica, se calcula como el producto de la potencia instalada, por las horas de funcionamiento y el coeficiente de imponderables según la fórmula 2-38.

$$E = 9.81 * Q * H * e * t * n \quad (2-38)$$

Donde:

- t: número de horas de funcionamiento.
- n: coeficiente de imponderables referido a las pérdidas por mantenimiento y reparación de la central.
- Q: caudal de diseño, en m<sup>3</sup>/s.
- H: altura neta, en m.
- e: factor de eficiencia de la central, adimensional

### 2.3.5 Factor de planta

El factor de planta indica la utilización de la capacidad de la planta en el tiempo. Es el cociente de la potencia utilizada por un determinado tiempo, entre la potencia instalada en el periodo considerado. Para el diseño de minicentrales es necesario considerar el factor de planta más alto posible (ITDG-PERÚ, 1995). El factor de planta se calcula empleando la fórmula 2-39.

$$fp = \frac{\text{Energía utilizada}}{\text{Energía disponible}} \quad (2-39)$$

La energía disponible se calcula mediante la ecuación 2-40, mostrada a continuación.

$$\text{Energía disponible} = \text{Potencia instalada} * 30 * 24 * 65 * 12 \quad (2-40)$$

Donde:

- 30: número de días en un mes
- 24: número de horas en un día
- 65: número de años analizados
- 12: cantidad de meses en un año

La energía utilizada se calcula mediante la ecuación 2-41.

$$\text{Energía utilizada} = \text{Potencia efectiva} * 30 * 24 \quad (2-41)$$

Donde:

- 30: número de días en un mes
- 24: número de horas en un día

### 2.3.6 Costo unitario energético

El costo unitario energético permite calcular de manera rápida la viabilidad financiera de una minicentral hidroeléctrica, pues permite conocer cuánto costaría la producción de energía de la misma. Se calcula mediante la ecuación 2-42.

$$\text{Costo unitario de la energía} = \frac{C. \text{anual} + (O + M)}{P. \text{instalada} * 8760 * fp} \quad (2-42)$$

Donde:

C.anual: costo de inversión anual correspondiente a la minicentral, en S/.

O+M: costo anual de operación y mantenimiento, en S/.

P. instalada: potencia instalada de la minicentral, en kW

8760: cantidad de horas en un año

fp: factor de planta

## 2.4 Análisis económico de la minicentral hidroeléctrica

La importancia de realizar un análisis económico previo a la realización y ejecución de una minicentral hidroeléctrica, radica en la orientación de la toma de decisión si es o no factible ejecutar dicho proyecto.

### 2.4.1 Fórmulas matemáticas financieras para la evaluación de proyectos

El valor futuro del dinero (F) es el valor que alcanzará cierto capital, a determinada tasa de interés compuesta anual ( $i$ ), durante un determinado período ( $n$ ). Se expresa mediante la ecuación 2-43.

$$F = P * (1 + i)^n \quad (2-43)$$

Donde:

P: valor presente, en S/.

$i$ : tasa de interés anual, en %.

$n$ : número de años.

El valor presente del dinero (P) se calcula a partir de la tasa mínima atractiva para cada alternativa. Éste permite transformar ingresos o gastos futuros, a la cantidad en soles que se debe colocar en el presente. Permite comparar de manera directa, distintas alternativas con vidas útiles iguales, seleccionándose aquella con mayor valor P (Blank y Tarquin, 2012). Se expresa mediante la ecuación 2-44.

$$P = \frac{F}{(1 + i)^n} \quad (2-44)$$

Donde:

F: valor futuro

$i$ : tasa de interés anual, en %.

$n$ : número de años

### 2.4.2 Parámetros para la evaluación económica de una minicentral

Dentro de los parámetros a considerar en la evaluación económica de una minicentral se deben contemplar los costos de inversión, los costos de operación y mantenimiento, los ingresos y los egresos.

Dentro de los costos de inversión se consideran los siguientes rubros:

- a. Activo fijo: las obras civiles, la maquinaria y equipo electromecánico.
- b. Activo intangible: los estudios, asesorías técnicas, etc.
- c. Capital de trabajo.

Por otro lado, los costos de operación y mantenimiento consideran los siguientes rubros:

- a. Costos de operación: gastos de personal, materiales de oficina, etc.
- b. Costos de mantenimiento: materiales y repuestos de generación, transformación y transmisión.

Los ingresos se producen desde la puesta en servicio de la minicentral, hasta el fin de su vida útil. Éstos se determinan por la energía que se venderá en cada año.

Por otro lado, los egresos se clasifican como directos e indirectos. Los costos directos son aquéllos que están asociados directamente al desarrollo del mismo. Los costos indirectos son aquéllos que no están asociados al proyecto pero que contribuyen en su realización, por ejemplo, los costos de personal administrativo y los impuestos (IGDT- PERÚ, 1995).

### 2.4.3 Método de análisis beneficio/costo

Este método se emplea en la evaluación de proyectos para comparar alternativas mutuamente excluyentes, donde la razón incremental B/C deberá ser mayor a 1 para justificar económicamente el costo total equivalente incremental (Blank y Tarquin, 2012). El proyecto se realizará sólo si los beneficios son mayores que los costos. Para poder hacer esta comparación es necesario actualizarlos a una misma tasa de interés y un determinado año.

### 2.4.3.1 Flujo de caja

Para la elaboración de un flujo de caja es necesario considerar los ingresos y los egresos. En una minicentral peruana los ingresos quedan determinados mediante la ecuación 2-45.

$$\text{Ingreso} = E * 56.55 * 1000 * 3.26 \quad (2-45)$$

Donde:

E: energía, en kWh.

56.55: promedio ponderado del precio monómico según tercera subasta de los RER (Osinermin), en \$/MWh

3.26: tipo de cambio del Sol al Dólar, a la fecha de evaluación.

A su vez, la energía generada está basada en función al volumen turbinado mensual, como se muestra en las ecuaciones 2-46 y 2-47.

$$\text{Volumen turbinado} = Q * n * 24 * 3600 \quad (2-46)$$

Donde:

Q: caudal captado, en m<sup>3</sup>/s

n: número de días en un mes

$$\text{Energía generada} = \frac{V * 9.81 * H * 0.85}{3600} \quad (2-47)$$

Donde:

V: volumen turbinado, en m<sup>3</sup>.

H: altura efectiva del proyecto.

0.85: factor de eficiencia de la central hidroeléctrica resultante del producto de los rendimientos de los diferentes equipos que producen energía.

Por otro lado, los egresos serán los gastos de personal fijo, repuestos y combustibles, el pago al Comité de Operación Económica del Sistema (COES), Osinermin y Dirección General de Electricidad (DGE) (1% del ingreso anual) y Canon de agua (1% del ingreso por energía anual) según lo indica la Ley de Concesiones Eléctricas (LCE).

### 2.4.3.2 Indicadores del análisis beneficio/costo

Los indicadores a comparar son tres: la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Valor Actual Neto (VAN) y el Beneficio-Costo (B/C). La TIR se define como la tasa de interés pagada a un saldo debido a un préstamo, logrando que el saldo no pagado sea igual a cero cuando se realiza el último pago (Newnan, 1990). La TIR se deduce del valor actual, reemplazando  $V_0=0$  en la ecuación 2-48.

$$V_0 = -I_0 + \sum_{t=0}^T Rt(1 + TIR)^{-t} + Lt(1 + TIR)^{-T} \quad (2-48)$$

Donde:

- Vo: saldo económico
- Rt: retorno en la fecha t
- Io: gastos de inversión iniciales
- Lt: valor de liquidación al final de la vida útil
- t,T: fecha de inicio y fin del periodo de evaluación respectivamente

El valor actual neto (VAN) queda definido como la suma total de los beneficios actualizados menos la suma total de los costos actualizados para una misma tasa de descuento. El valor actual neto se define mediante la expresión 2-49.

$$VAN = VANB - VANC \quad (2-49)$$

Donde:

- VANB: valor actual neto de los ingresos
- VANC: valor actual neto de los egresos

La relación beneficio-costo (B/C) es el cociente de la suma total de beneficios actualizados, dividido entre la suma total de costos actualizados, para una misma tasa de descuento. La relación beneficio-costo (B/C) se define mediante la expresión 2 - 50.

$$B/C = \frac{VANB}{VANC} \quad (2-50)$$

Donde:

- VANB: valor actual neto de los ingresos
- VANC: valor actual neto de los egresos

### 2.4.3.3 Costo unitario de la energía

El costo unitario de la energía es un indicador que permite conocer si la minicentral hidroeléctrica produce energía más cara o más barata que otros medios. Ésta se determina mediante la ecuación 2-51.

$$\text{Costo unitario de la energía} = \frac{C.\text{anual} + (O + M)}{P.\text{instalada} * 8760 * fp} \quad (2-51)$$

Donde:

C.anual: costo anual de la inversión correspondiente a la minicentral

O+M: costo anual de operación y mantenimiento

P. instalada: potencia instalada de la minicentral

8760: cantidad de horas en un año

fp: factor de planta

### 2.4.3.4 Análisis de sensibilidad

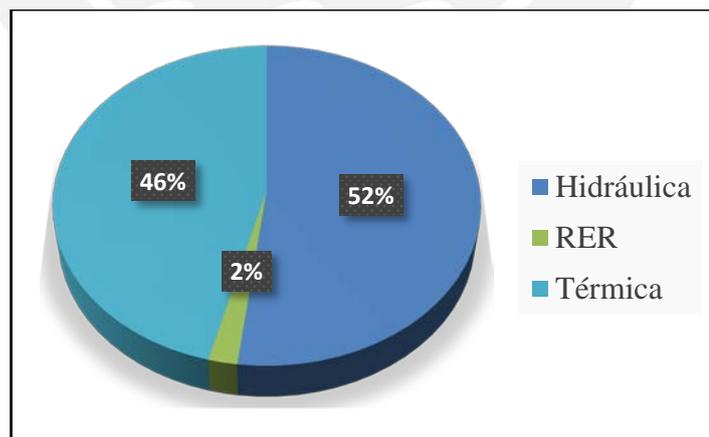
El análisis de sensibilidad tiene como finalidad investigar los efectos que tendrían, en el proyecto, si es que ocurren algunas variaciones en los costos e ingresos considerados inicialmente. Es decir, se tendría que volver a calcular las inversiones y los costos, aumentándolos o disminuyéndolos en determinados porcentajes. También pueden introducirse variaciones en el aumento del precio de venta del kWh.

## CAPÍTULO III: ESTUDIO DE CASO

### 3.1 Estudio del mercado eléctrico en el Perú

Las fuentes de energía se pueden clasificar según su disponibilidad, en renovables y no renovables. Las energías renovables son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la luna. Entre estas se tienen la energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y las marinas. Por el contrario, las energías no renovables son aquellas que existen en la naturaleza en una cantidad limitada y son aquellas que no se renuevan a corto plazo, por lo tanto, se agotan al emplearlas. La demanda mundial de energía se satisface con este tipo de fuentes energéticas: el carbón, el petróleo, el gas natural y el uranio (MINEM, 2012).

Para entender la importancia del sector energético en el Perú, es necesario realizar un análisis de cómo ha ido evolucionando la oferta y la demanda de energía, así como de los factores que afectan directamente a la generación de la misma. Según los registros del MINEM en su plan energético nacional 2014-2025, las fuentes más importantes de aporte energético son del tipo hidráulico y térmico como se muestra en el gráfico 6.



**Gráfico 6. Producción nacional de electricidad 1993-2013 (MINEM, 2014).**

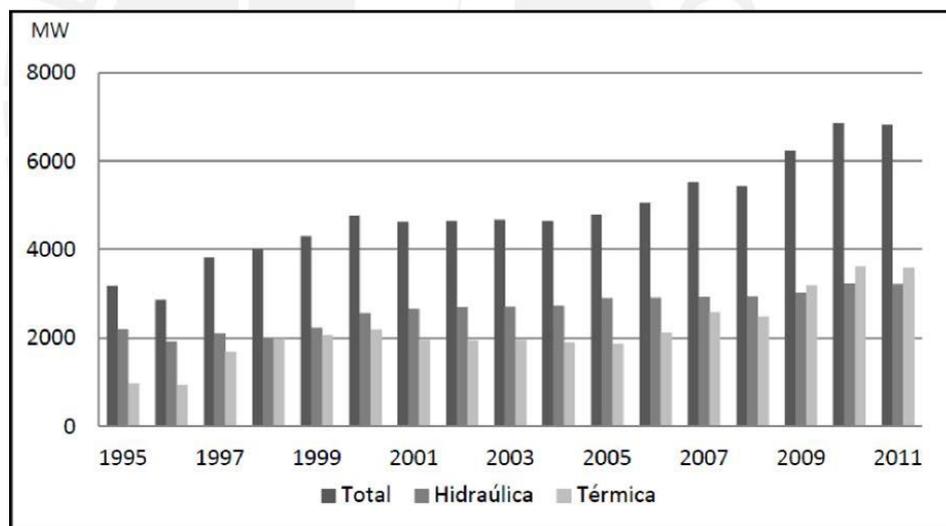
En el gráfico 6 se cuenta con un aporte del 2% de los Recursos Energéticos Renovables (RER), donde se incluye a las centrales hidroeléctricas con potencia menor a 20MW.

Tecnología	Potencia (MW)
Hidroeléctricas < 20MW	391
Eólicas	232
Solares	96
Otros	27
Total	746

**Tabla 1. Desarrollo de los Recursos Energéticos Renovables (MINEM, 2014)**

En la tabla 1 se muestra el aporte a la producción nacional de las fuentes renovables, las cuales fueron desarrolladas mediante subastas y que, dentro de todas, las centrales hidroeléctricas con una potencia menor a 20MW encabezan la lista.

Por otro lado, en cuanto a la capacidad real de entrega (Potencia Efectiva), en el año 2009 la fuente térmica igualó y superó el aporte de las fuentes hidráulicas, como se observa en el gráfico 7.



**Gráfico 7. Variación de la potencia efectiva durante el periodo de tiempo 1995-2011 (MINEM, 2012).**

En el gráfico 7 se observa un lento incremento de la potencia efectiva con fuente hidráulica en comparación de la fuente térmica, motivo por el cual se planteará aprovechar al máximo las fuentes hídricas disponibles para generar así una mayor contribución energética con una menor contaminación ambiental durante el tiempo de vida del proyecto.

De acuerdo a los datos obtenidos del Anuario Estadístico de Electricidad de los años 2007-2013, se analizó la variación de la potencia instalada y la potencia efectiva para el mercado eléctrico nacional. Los resultados se presentan en las tablas 2 y 3.

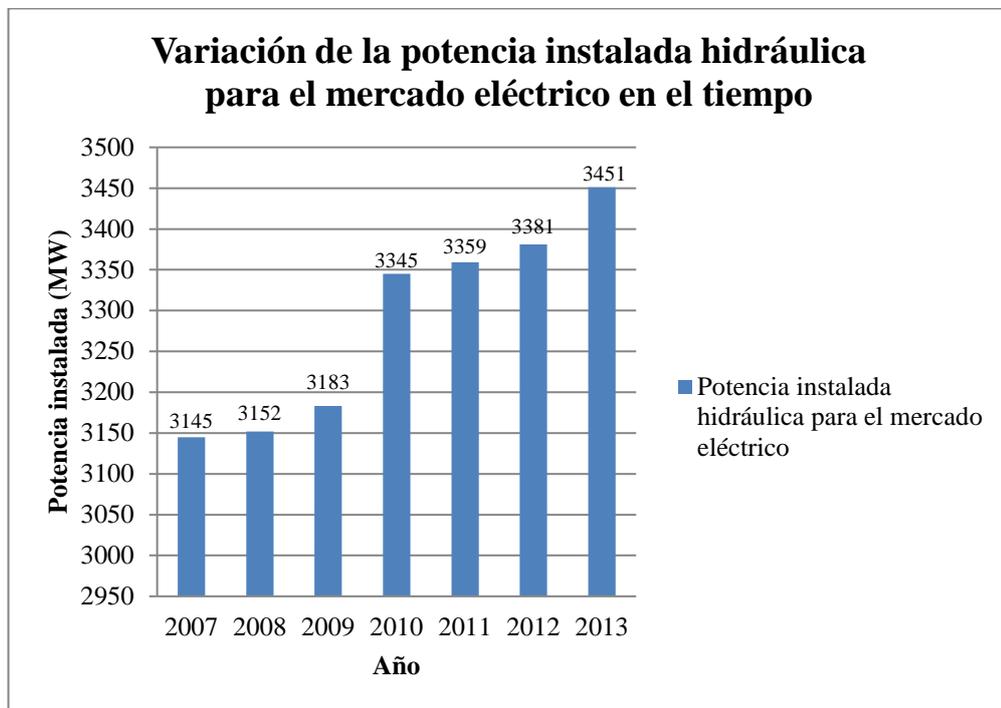
Año	Potencia Instalada (MW)	Potencia Efectiva (MW)
2007	5990	5533
2008	5997	5444
2009	6723	6246
2010	7309	6875
2011	7312	6836
2012	8267	7755
2013	9635	8680

**Tabla 2. Potencia instalada y potencia efectiva para el mercado eléctrico nacional (Elaboración Propia).**

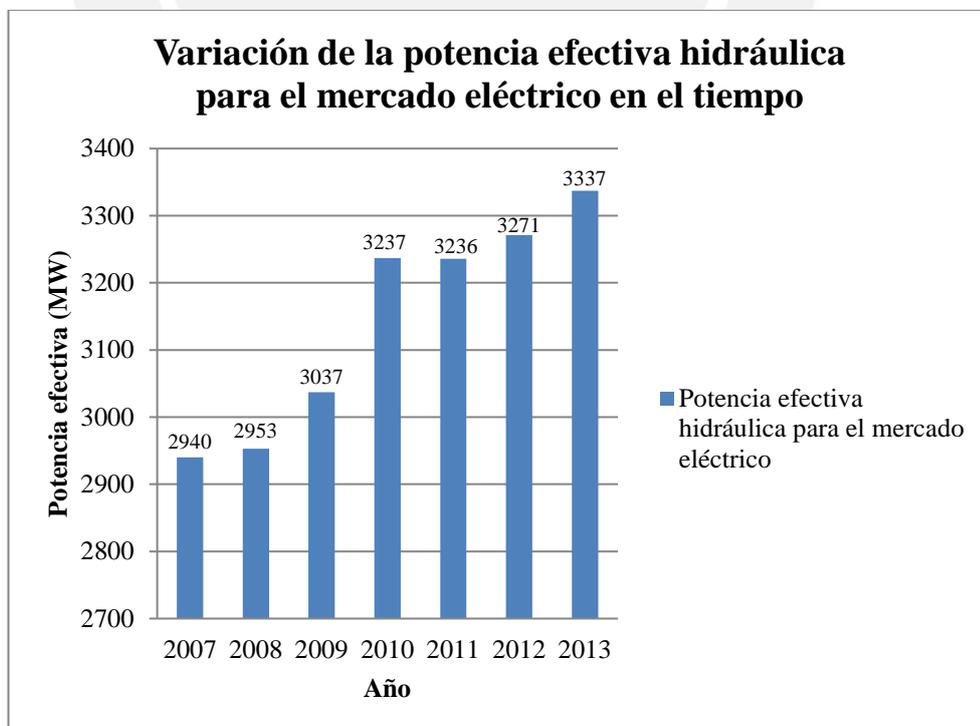
Año	Potencia Instalada Hidráulica (MW)	Potencia Efectiva Hidráulica (MW)
2007	3145	2940
2008	3152	2953
2009	3183	3037
2010	3345	3237
2011	3359	3236
2012	3381	3271
2013	3451	3337

**Tabla 3. Potencia instalada y potencia efectiva hidráulica para el mercado eléctrico (Elaboración Propia).**

Asimismo, en el gráfico 8 y 9 se presenta la variación de la potencia instalada y efectiva respectivamente para el mercado eléctrico nacional.



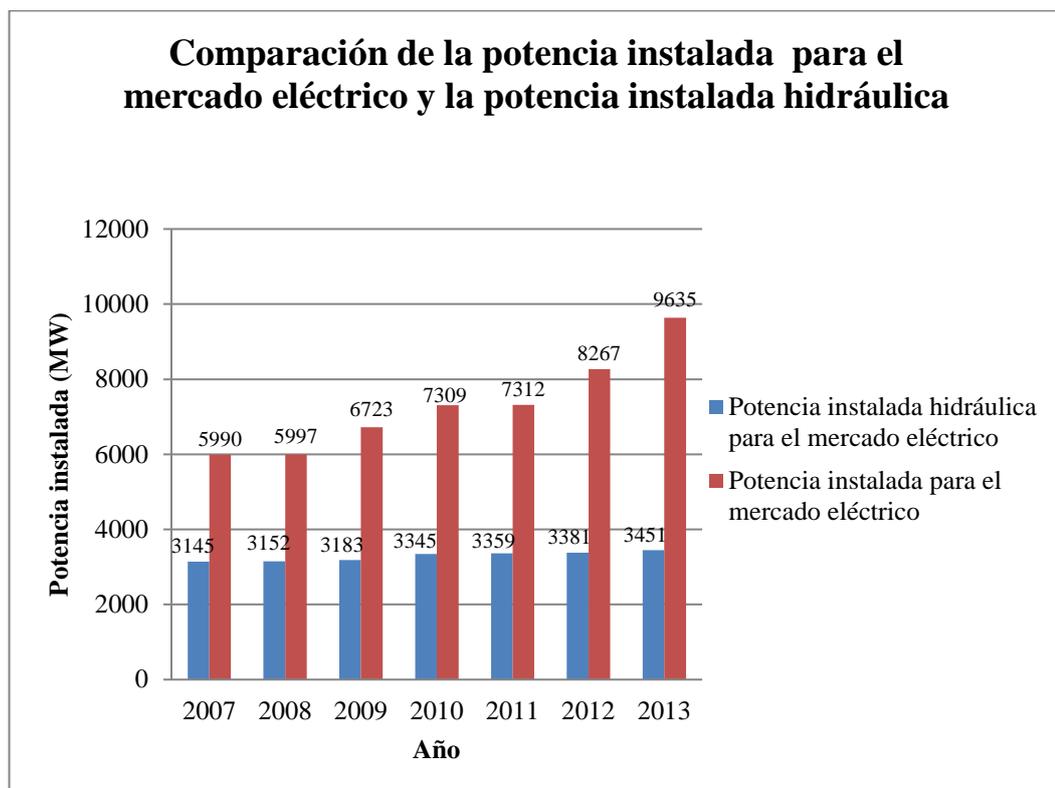
**Gráfico 8. Evolución de la potencia instalada hidráulica para el mercado eléctrico (Elaboración Propia).**



**Gráfico 9. Evolución de la potencia efectiva hidráulica para el mercado eléctrico (Elaboración Propia).**

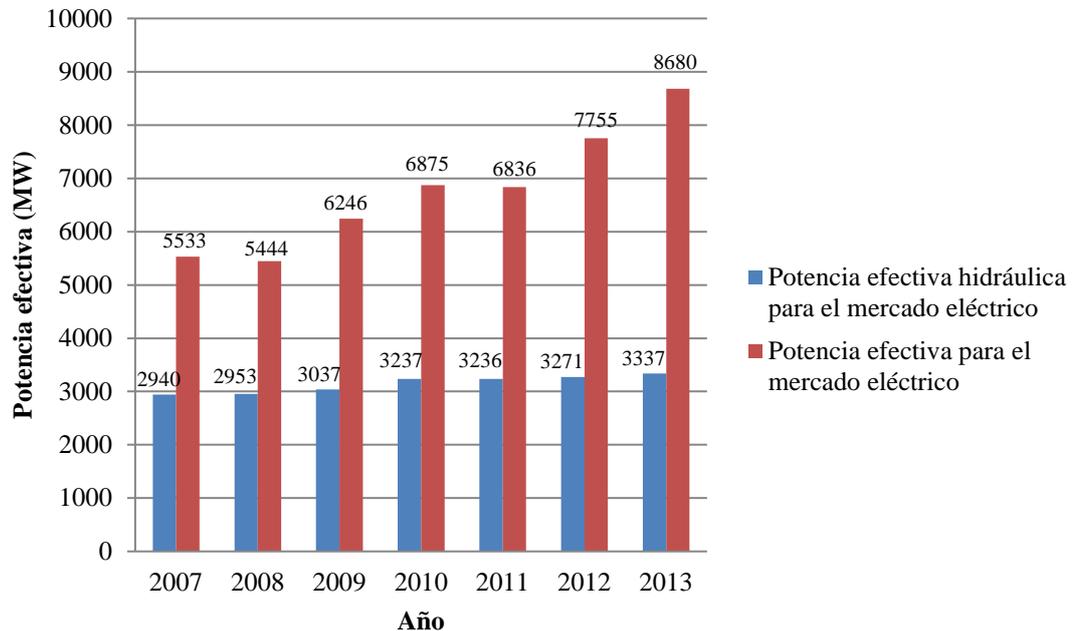
Analizando los gráficos 8 y 9, se aprecia un incremento anual, tanto para la potencia efectiva como para la potencia instalada. También se observa un incremento notable de los mismos entre los años 2009-2010.

De acuerdo a los datos obtenidos del Anuario Estadístico de Electricidad de los años 2007-2013, se realizó una comparación entre la potencia instalada y la potencia efectiva para el mercado eléctrico nacional, según se muestran en los gráficos 10 y 11.



**Gráfico 10. Comparación de la potencia instalada para el mercado eléctrico y la potencia instalada hidráulica (Elaboración Propia).**

### Comparación de la potencia efectiva para el mercado eléctrico y la potencia efectiva hidráulica



**Gráfico 11. Comparación de la potencia efectiva para el mercado eléctrico y la potencia efectiva hidráulica (Elaboración Propia).**

De los gráficos 10 y 11, se aprecia un aporte casi constante del 30% anual en promedio por parte de la potencia efectiva hidráulica a la potencia efectiva del mercado eléctrico. Sin embargo, con el transcurso de los años, el aporte hidráulico al mercado eléctrico está disminuyendo, siendo el último valor registrado menor en un 30% para el año 2013. Esta situación se debe a que la potencia térmica tiene un gran aporte a la potencia del mercado eléctrico.

## 3.2 Descripción general de la subcuenca y del entorno

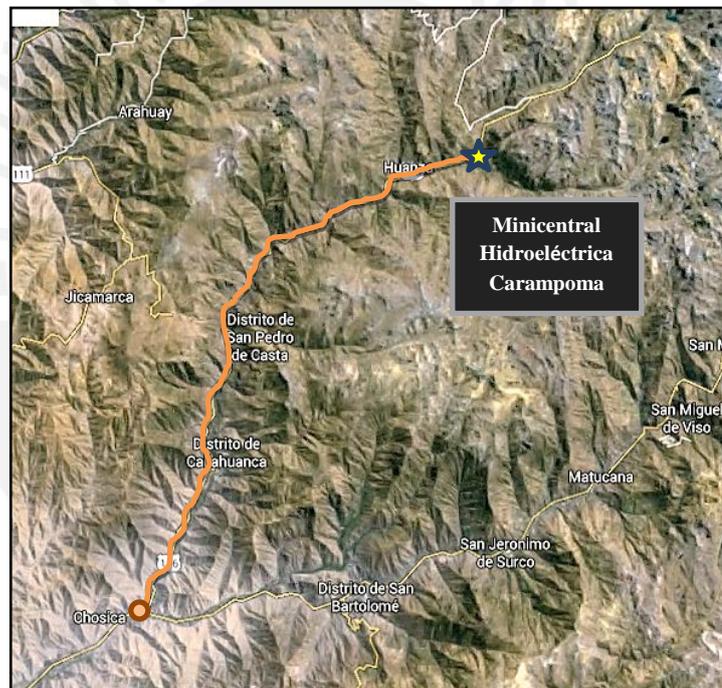
### 3.2.1 Ubicación y demarcación de la subcuenca del río Shuncha

La subcuenca del río Shuncha y el proyecto de la Minicentral Hidroeléctrica de Carampoma se encuentran ubicados en el distrito del mismo nombre, provincia de Huarochirí, departamento de Lima. El proyecto se ubica hacia la margen izquierda del río Shuncha, antes de su desembocadura al río Pallca que también se le conoce con el nombre de Macachaca. El río es un afluente importante del río Santa Eulalia, el cual transporta las aguas provenientes del túnel trasandino de la gran cuenca del

río Mantaro. El río Santa Eulalia y el río Shuncha pertenecen a la cuenca del río Rímac. En el Anexo I, se muestra la ubicación de la zona de estudio.

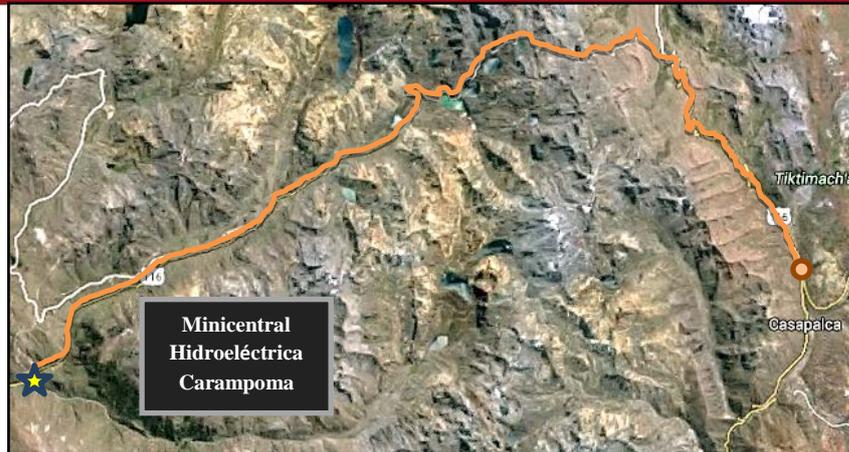
### 3.2.2 Accesibilidad y vías de comunicación

Para llegar a la zona del estudio, es decir, a la subcuenca del río Shuncha, se puede acceder por vía terrestre por la Carretera Central, donde se tienen dos accesos por la red vial LM 116, de acuerdo al manual de rutas del MTC. La primera, tomando en Chosica un desvío al distrito de Santa Eulalia, y desde este punto se accede por una carretera asfaltada de un solo carril hasta el desvío a la Central Hidroeléctrica de Callahuanca. Luego, se toma una carretera afirmada hasta el puente de Autisha, siguiendo luego hasta la presa de Sheque, para finalmente llegar hasta la zona del proyecto (ver figura 14).



**Figura 14. Ruta 1 de acceso a la Minicentral Hidroeléctrica Carampoma (Elaboración Propia).**

Una segunda ruta considera un desvío en la Carretera Central, en Chinchán, a la altura de Casapalca. Desde Chinchán se accede por una trocha carrozable, pasando por Antaccasha, mina Pumacahua, Milloc y por la presa Pallca de la CH Huanza, para luego llegar a la zona del proyecto (ver figura 15).



**Figura 15. Ruta 2 de acceso a la Minicentral Hidroeléctrica Carampoma (Elaboración Propia).**

### 3.2.3 Aspectos socio-económicos de las comunidades del entorno

El proyecto de la minicentral hidroeléctrica se encuentra en las tierras de la Comunidad Campesina de Carampoma. El acceso vial lo comparte con la vecina Comunidad Campesina de Huanza, ambas pertenecientes a la provincia de Huarochirí de la región Lima.

#### 3.2.3.1 Indicadores demográficos

La zona de estudio registra un índice de masculinidad de 1.03, es decir que por cada 103 hombres existen 100 mujeres. Asimismo, en el distrito de Carampoma el 94.8 % de la población vive en áreas urbanas y la restante en el ámbito rural (INEI, 2007).

La pirámide poblacional obtenida en el último censo del 2007, muestra el predominio de la población joven, en donde la proporción por sexo no muestra una variación significativa. Mayormente los jóvenes comienzan a migrar hacia Lima y a los centros mineros de la región de Lima para trabajar, debido a la falta de empleo en el lugar. Cabe anotar que hace muchos años se encuentran paralizadas las minas que operaban la Compañía Minera Huampar S.A. y la Compañía Minera Caridad S.A.

#### 3.2.3.2 Centro poblado de Carampoma

El distrito de Carampoma cuenta con una población de 1,161 habitantes y una densidad de 2.3 hab/km<sup>2</sup>, según el último censo del 2007.

Para una extensión territorial de 230.95 km<sup>2</sup>, el distrito de Carampoma cuenta con 414 viviendas, 324 de ellas en el área urbana de la capital del distrito. En el área rural se encuentran las 90 viviendas restantes. Éstas últimas se encuentran dispersas en las

estancias. No se cuentan las viviendas abandonadas de los campamentos mineros (INEI, 2007).

### 3.2.4 Geomorfología

El relieve de la subcuenca del río Shuncha está conformado por las montañas de la *Cordillera de Venturosa* del macizo occidental de la cadena de Los Andes centrales. Sus picos elevados aún conservan pocas capas del glacial que queda, y al pie se observan delgadas capas de nieve, donde aún se pueden ver las huellas de las morrenas del proceso de desglaciación. En esta cadena se encuentran las más altas montañas de la subcuenca del río Santa Eulalia y del río Shuncha. Sobresalen los cerros San Luis (5310 msnm), Huampar (5297 msnm), Corte (5062 msnm), Shacsha Punta, Huamaripayocc, Huachua, Carhuanra, Cayonioc (5012 msnm), LLamposh (4973 msnm), Huingo (5010 msnm), Janquipaccha, Machicanha, Piruruyoc alto, Arca, Carhuacana, Pampahuaque (4727 msnm), Yayancure, información incluida en la carta 24-k del IGN en formato Shape (MINEDU).

Los deshielos y la filtración en estas montañas originan los acuíferos de agua dulce que se encuentran acumulados en las lagunas y dan nacimiento al río Shuncha y a la formación de la cuenca del mismo nombre.

El pequeño valle del río Shuncha es una subcuenca húmeda, tiene una extensión de 107.57 km<sup>2</sup>, longitud de cauce de 18.11 km y pendiente del cauce principal 6.19 %, que baja desde los 4383 a los 3465 msnm, hasta la confluencia con el río Pallca. El curso del agua del río Shuncha es de segundo orden, según la clasificación de Robert Horton, y cuenta con una baja densidad de drenaje igual a 0.46 km/km<sup>2</sup>.

El río Shuncha se forma por la confluencia de los arroyos de Huanchurina y Yanacocha, que fluyen con dirección suroeste por las quebradas del mismo nombre, desde el vaso de las lagunas de Paucarcocha y Mancacoto hasta su unión con el río Pallca o Macachaca en un tramo de 12km. Para los fines del presente estudio, se asumió la naciente del río desde la laguna de Paucarcocha. El esquema hidráulico del estudio del proyecto utiliza los recursos de la subcuenca del río Shuncha, afluente del río Santa Eulalia y de la cuenca del río Rímac, ubicada aguas arriba de la presa de Sheque, como se muestra en el Anexo I.

### 3.2.5 Aspectos Ecológicos de la subcuenca

Para el presente trabajo se consultó el documento de trabajo de la Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Energía y Minas, titulado “Evaluación Ambiental Territorial de la cuenca del Río Rímac”, editado en julio de 1997. Asimismo, se utilizó la Escala de Holdridge aplicada a la subcuenca Santa Eulalia-Shuncha, cotejando con la clasificación de los pisos ecológicos (Vidal, 2014).

Para el área de la cuenca y la zona de ubicación del proyecto, se determinaron las siguientes características ecológicas:

- a. Entre los 3000 – 3600 msnm, la zona es Matorral Desértico Montano Tropical de 125 a 250 mm de precipitación y una biotemperatura anual de 9 a 19 °C.
- b. Entre los 3000 – 4000 msnm, la zona es Bosque Húmedo Montano Tropical de 500 a 1000 mm de precipitación y una biotemperatura anual de 4 a 12 °C.
- c. Entre los 4000 – 4600 msnm, la zona es Páramo muy Húmedo Subalpino Tropical de 500 a 1000 mm de precipitación y una biotemperatura anual de 3 a 6 °C.
- d. Entre los 4600 – 4800 msnm, la zona es Tundra Pluvial Alpino Tropical de 400 a 550 mm de precipitación y una biotemperatura anual de 1 a 3 °C.
- e. A una altitud mayor a los 4800 msnm, la zona es Nival tropical de 500 a 1000 mm de precipitación y una biotemperatura anual de -1.5 °C.

### 3.2.6 Estudios de geología

Se realizó una primera visita de campo, desde la confluencia de los ríos Pallca y Shuncha hasta el paraje Carhuac, lugar donde estará ubicado el barraje de derivación y la bocatoma. En el trayecto se hizo una evaluación geológica del área del proyecto. Para este fin, se utilizó el estudio geológico realizado por el Ing. Humberto Salazar Díaz en los años 1972 y 1973, publicado por el INGEMMET en el año 1983.

El proyecto se encuentra dentro de la geología regional de los Andes Centrales del Perú. Se tomó como base topográfica, la Carta Nacional del IGN Matucana (24-K) a escala 1: 100,000, levantada por el Instituto Geográfico Militar en el año de 1971. Asimismo, se consultó el Boletín N° 36, “Geología de los Cuadrángulos de Matucana y Huarochirí, hojas 24 - K y 25 – K”, realizado por el Ing. Humberto

Salazar Díaz. Los documentos mencionados anteriormente se encuentran en el Anexo I.

Como trabajo de gabinete se realizó la interpretación del Mapa Geológico del Cuadrángulo de Matucana (24-K) en coordenadas UTM y de los perfiles y secciones geológicas del cuadrángulo, materia del presente trabajo.

La estratigrafía del área del proyecto, mostrada en el Anexo I, corresponde al sector occidental donde se desarrolló “Una acumulación continental volcanoclástica del Cenozoico, afectada por las diversas fases del ciclo geotectónico andino” (Salazar, 1983).

El barraje de derivación y la bocatoma se ubicarán en la formación del grupo Rímac, que está conformada por rocas volcánicas y sedimentarias compuestas por andesitas, flujos de brecha tufásicas andesíticas y ocasionalmente con areniscas.

Asimismo, el canal de derivación y la casa de máquinas se ubicarán en la formación Colqui, el cual se describe como “Una gruesa secuencia de unidades volcánicas con derrames andesíticos gris porfiríticos que alternan, en menor proporción, con tufos finos redepositados, gris verdoso; tufos lapillíticos pardo blanquecinos; aglomerado volcánico y ocasionalmente con capas de caliza y arenisca tufácea gris verdosa y violácea” (Salazar, 1983).

En el área de estudio de Sheque y el río Shuncha se encuentra que el grupo Colqui tiene una unidad diferente al resto de la formación de la base al techo. Se reconoce características de formaciones volcánicas andesíticos tufaceos, gris pardo, Calizas silificadas, Limolitas pizarrosas rojizas e interrelaciones con horizontes de volcánicos andesíticos, areniscas tufáceas, gris verdosas. Asimismo, se cuenta con presencia de derrames andesíticos, areniscas tufáceas y tufos verdes claro.

Finalmente, cerca al núcleo del sindical de Carhuac se tiene presencia de derrames andesíticos y en poca cantidad tufos andesíticos pardo rojizos del sinclinal de Sheque.

### **3.2.7 Recursos hídricos superficiales**

La subcuenca del río Shuncha cuenta con las fuentes de recursos hídricos superficiales provenientes de quebradas, manantiales, lagunas naturales y represadas.

Por las quebradas de Chaccha, Huanchurina y Acococha discurren aguas dulces provenientes de los manantiales, bofedales y lagunas provenientes de las filtraciones de los nevados de la cordillera de Venturosa que luego formarán el río Shuncha.

Se tiene la disponibilidad de las aguas de las tres lagunas principales: Huamparcocha, Huachuguacocha y Paucarcocha. Además, se cuenta con otras tres pequeñas lagunas: Rondan, Paticocha y Mancacoto, las cuales se muestran en el Anexo II.

Las Lagunas de Huamparcocha, Huachuguacocha, Mancacoto y Rondan se encuentran represadas. A continuación, se describen algunas de sus características:

- La laguna de Huachuguacocha es la que almacena la mayor cantidad de agua, posee una capacidad máxima de 5.60MMC (millones de m<sup>3</sup>). La presa está construida con una albañilería de roca y concreto con una altura máxima de 13.9 m y tiene una longitud de 228 metros de coronación.
- La laguna de Huamparcocha tiene una capacidad máxima de 3.80MMC de almacenamiento. Su presa es de albañilería y está construida con roca y concreto con una altura máxima de 9.8 m y posee una longitud de 101 m de coronación.
- Mancacoto y Rondan son lagunas menores cuyas aguas discurren por la quebrada de Acococha. La laguna de Mancacoto (Manca) cuenta con una capacidad máxima de 1.73MMC de almacenamiento. La presa está construida con albañilería de roca y concreto con una altura de 14.80 m y con una longitud de 106 m de coronación.
- Finalmente, la laguna Rondan (Pirhua) esta represada con albañilería de roca y concreto, teniendo una capacidad máxima de 1.0MMC de almacenamiento, una altura de 9.0 m y una longitud de 70 metros de coronación.

En suma, se tiene una capacidad máxima de 12.13MMC de almacenamiento de agua que aportan las cuatro lagunas represadas de la subcuenca del río Shuncha (ver tabla 4).

NOMBRE	SUBCUENCA	CARACTERÍSTICAS				OBSERVACIONES
		CAPACIDAD MÁXIMA (MMC)	TIPO DE PRESA	ALTURA MÁXIMA (m)	LONGITUD DE LA CORONACIÓN (m)	
Huachuguacocha	Shuncha	5.60	Albañilería	13.9	228	REGULADO
Huamparcocha	Shuncha	3.80	Albañilería	9.8	101	REGULADO
Paucarcocha	Shuncha	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	SIN REPRESAR
Mancacoto	Shuncha	1.73	Albañilería	14.8	106	REGULADO
Rondan	Shuncha	1.00	Albañilería	9.0	70	REGULADO
Paticocha	Shuncha	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	SIN REPRESAR
Acococha	Shuncha	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	SIN ESTUDIO
TOTAL	-	12.13	-	-	-	-

**Tabla 4. Características de las lagunas de la subcuenca río Shuncha - Santa Eulalia (Elaboración Propia).**

Para la generación hidráulica de la central hidroeléctrica de Carampoma se cuenta con la disponibilidad de las aguas del río Shuncha y el aprovechamiento de las lagunas Huamparcocha, Huachuguacocha, Paucarcocha, Rondan, Paticocha y Mancacoto. Asimismo, se contemplaría el represamiento de las lagunas de Paucarcocha y Paticocha. En una futura ampliación de la central hidroeléctrica, se derivaría las aguas de la laguna Huallunca por medio de un túnel existente (de antiguo uso minero), para establecer una conexión a la quebrada Chaccha logrando así un mayor caudal e incremento de la potencia instalada de la central hidroeléctrica.

### 3.3 Climatología de la cuenca y del área de estudio

En los trabajos de campo realizados en el área de estudio se tomó nota de las variaciones del clima. Se define clima como un conjunto de los fenómenos y las condiciones atmosféricas de la región, materia de estudio. Se utilizaron para este trabajo, los registros de las estaciones meteorológicas de Carampoma y Milloc para un periodo de 45 años.

Las características de climatología de la zona del proyecto y de la subcuenca del río Shuncha es la misma que la de la subcuenca del río Pallca, ambas afluentes principales del río Santa Eulalia, subcuenca de la gran cuenca del río Rímac. Estas cualidades permiten definir el área del proyecto, utilizando las propuestas del Dr. Leslie R. Holdridge, muy utilizadas para este tipo de estudios, como es el caso de biotemperatura, evapotranspiración y la precipitación que llevará a discernir la zona térmica, el índice climático y la determinación de las zonas de vida.

El centro poblado de Carampoma se encuentra a una cota de 3,489 msnm y las cotas más altas corresponden a las lagunas de Huamparcocha (4650 msnm) y Rondan (4765 msnm). Utilizando la teoría de Leslie Holdridge y de acuerdo a los pisos altitudinales, al registro de temperaturas y a las precipitaciones se puede definir que el área del estudio se encuentra clasificada en la Estepa Montano Subtropical. El centro poblado y la casa de máquinas, se ubican en el páramo húmedo subalpino subtropical. La bocatoma, la cámara de carga y las lagunas se ubican en la tundra húmeda alpino subtropical. El ambiente de la zona del proyecto se caracteriza por presentar un clima muy húmedo, templado y frígido en las zonas altas (MINAG, 2010).

### **3.3.1 Parámetros climatológicos**

Se desarrollaron los principales parámetros climatológicos, que caracterizan la subcuenca, en base a los registros obtenidos en las estaciones meteorológicas de Carampoma y Milloc. Se tomaron en cuenta los parámetros de precipitación, temperatura y la humedad relativa, mostrando a continuación una breve descripción de los mismos.

#### **a) Precipitaciones**

La definición del fenómeno meteorológico de la precipitación corresponde al “agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra” (Real Académica Española). Es la primera variable hidrológica y el ingreso natural del agua a la superficie terrestre, dentro del balance hídrico de los agros ecosistemas y de las cuencas hidrográficas (ANA, 2012).

Se tomó la información pluviométrica del registro proveniente de las tres estaciones meteorológicas de la parte alta de la subcuenca del río Santa Eulalia y que están relacionadas altitudinalmente al ámbito de la subcuenca del río Shuncha. Las estaciones de Carampoma y Milloc se encuentran en la jurisdicción del distrito y la estación de la Mina Colqui en el vecino distrito de Huanza. En el Anexo I, se muestra el mapa de ubicación de las estaciones hidrométricas y pluviométricas consideradas en el presente trabajo.

El período de lluvias se inicia en el mes de diciembre y se prolonga hasta marzo. El registro muestra un porcentaje del 72.52% en promedio de las estaciones de las precipitaciones totales anuales. Los meses de mayo a septiembre se les conocen con

el nombre de período seco. En estos meses las precipitaciones son mínimas, llegando a un 7.15% del valor total anual. Los meses transitorios corresponden a abril, octubre y noviembre donde se inician esporádicamente las lluvias y corresponde a la época de siembra en tierras de secano. En nuestro caso, se presenta el 20.33% en promedio de las precipitaciones totales anuales (MINAG, 2010).

### b) Temperatura

Para el presente estudio se tomó la información meteorológica disponible y registrada en las tres estaciones mostradas en la tabla 5 del ámbito del distrito de Carampoma. Con dicha información se realizó un análisis de los valores de temperaturas medias en la zona de estudio. En el registro obtenido de los valores de temperaturas, se observa que existe una uniformidad y que la variación térmica no es significativa. Ello se debe a que las cotas de Milloc y de la Mina Colqui se encuentran por encima de los 4,000 msnm y la de Carampoma por debajo de la cota anterior (3489 msnm).

Para la temperatura media se utilizaron los datos históricos registrados en las tres estaciones de la tabla 5, para establecer y correlacionar la variación de la temperatura media anual. Las temperaturas más bajas se registran en el mes de julio por efecto de las heladas y las más elevadas en los meses de noviembre a marzo (ver tabla 5).

Estación Meteorológica	Altitud (msnm)	Promedio Anual (°C)
Carampoma	3489	15.3
Milloc	4398	14.1
Mina Colqui	4600	13.9

**Tabla 5. Temperatura media anual (MINAG, 2010).**

Nota: Valores estimados mediante la ecuación de correlación (MINAG, 2010).

De la tabla 5, se observa una variación mínima casi uniforme, con una variación de 1.2 puntos registrados anualmente, siendo el registro de la estación de Carampoma la de mayor temperatura (15.3 °C). Ello se debe a una menor cota altitudinal en relación con las estaciones de Milloc y de Mina Colqui que registran 14.1 °C y 13.9°C respectivamente.

### c) Humedad relativa

Siendo la cuenca del río Rímac y las subcuencas de los ríos Santa Eulalia, Pallca y Shuncha pertenecientes a la vertiente del Pacífico, hacen que las estaciones cercanas al mar registren un mayor porcentaje de humedad y, a medida que se avanza hacia la cordillera, los promedios se hacen más bajos y todos los valores sufren mayor oscilación (ver tabla 6). Es necesario anotar que, durante el día, el valor de la humedad es bajo, mientras que en la noche existe la tendencia de aumentar su valor como consecuencia de las temperaturas más bajas (MINAG, 2010).

Estación Meteorológica	Altitud (msnm)	Promedio Anual (%)
Carampoma	3489	80.0
Milloc	4398	79
Mina Colqui	4600	79

**Tabla 6. Humedad relativa media anual (MINAG, 2010)**

Nota: Valores estimados mediante la ecuación de correlación (MINAG, 2010).

### 3.3.2 Clasificación climatológica

Para fines del presente estudio, se utilizará el sistema de clasificación climática de Charles Warren Thornthwaite, por ser el más conocido y difundido con respecto a otros sistemas. Es un sistema cuantitativo porque utiliza valores numéricos para su cálculo. En este sistema, se considera como variables de clasificación a la precipitación efectiva (PE) y a la temperatura efectiva (TE) como se muestra en la tabla 7. Los resultados se obtienen a partir de una relación entre la precipitación promedio anual y la temperatura media anual.

Precipitación Efectiva (PE)		Temperatura Efectiva (TE)	
Provincia de humedad	Índice PE	Provincia de humedad	Índice TE
A Muy Húmedo	Mayor de 128	A`Tropical	Mayor de 128
B Húmedo	64 a 127	B`Mesotérmico	64 a 127
C Sub Húmedo	32 a 63	C`Microtérmico	32 a 63
D Semiárido	16 a 31	D`Taiga	16 a 31
E Árido	Menor de 16	E`Tundra	1 a 15
		F`Glacial	0

**Tabla 7. Clasificación climática según Thornthwaite (MINAG, 2010)**

De acuerdo a los resultados obtenidos de los datos registrados en la estación meteorológica de Carampoma (3,489 msnm) y Milloc (4,398 msnm), se puede

clasificar a la zona de estudio del presente trabajo como una provincia de humedad, sub húmeda y una provincia de temperatura mesotérmica, caracterizándose por tener una biotemperatura media anual entre 14 ° C y 15 ° C. En conclusión, el clima en la subcuenca es húmedo a partir de los 3000 msnm hasta la divisoria de aguas (ANA, 2012).

### 3.4 Pluviometría

#### 3.4.1 Estaciones pluviométricas

Para el análisis de las precipitaciones de la zona, se empleó información de las estaciones pluviométricas mostradas en la tabla 8. La ubicación de dichas estaciones pluviométricas se presenta en el Anexo I.

Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Departamento	Provincia	Distrito
Milloc 155514	Convencional-Meteorológica	11 34' 17.6"	76 21' 1"	Lima	Huarocharí	Carampoma
Tingo 155111	Convencional-Meteorológica	11 37' 1"	76 29' 1"	Lima	Huarocharí	Huanza
Sheque 151213	Convencional-Meteorológica	11 40" 8"	76 29' 56.03"	Lima	Huarocharí	Carampoma
Carampoma 15522	Convencional-Meteorológica	11 40" 8"	76 29' 56.03"	Lima	Huarocharí	Carampoma

**Tabla 8. Estaciones pluviométricas de los distritos de Carampoma y Huanza (Elaboración Propia).**

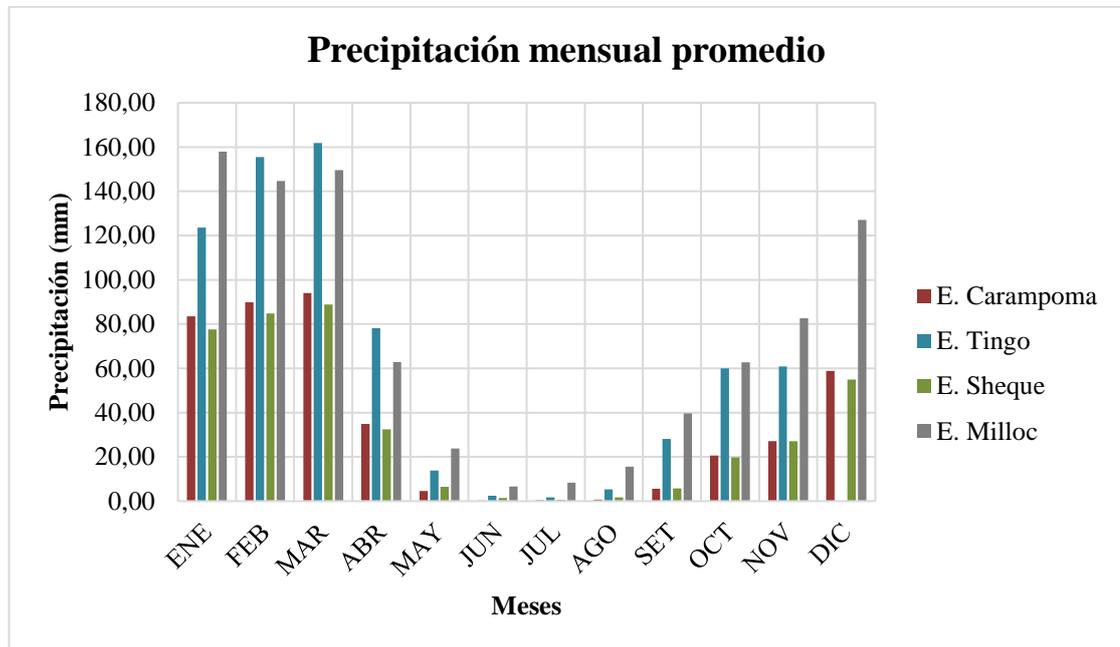
Cabe señalar que, en cuanto a la precipitación total mensual, las cuatro estaciones analizadas presentan la misma tendencia, registrándose periodos lluviosos o época de avenida entre los meses de diciembre-abril y registrándose los máximos valores entre los meses de febrero y marzo.

Por otro lado, la época de estiaje se presenta entre los meses de mayo-noviembre, donde los mismos valores mínimos registrados fueron en los meses de junio y julio. En el Anexo II, se muestran los valores de precipitaciones mensuales de las estaciones pluviométricas estudiadas en la región.

#### 3.4.2 Análisis de estaciones pluviométricas

Con la información recopilada del SENAMHI, se procesó la información de precipitaciones diarias, y así realizar un análisis mensual promedio de las estaciones

Sheque, Tingo, Carampoma y Milloc, para así conocer el comportamiento de precipitaciones en la cuenca, según se muestra en el gráfico 12.



**Gráfico 12. Comparación de magnitud de precipitaciones medias mensuales de las estaciones consideradas (Elaboración Propia).**

En la tabla 9, se muestran los valores de la precipitación media anual de las estaciones pluviométricas estudiadas en el presente trabajo.

Estación	Altitud (msnm)	Precipitación anual media (mm)
Milloc	4361	881.5
Tingo	3991	811.5
Carampoma	3426	420.7
Sheque	3630	401.3

**Tabla 9. Precipitación media anual (Elaboración Propia).**

### 3.4.3 Análisis de consistencia pluviométrica

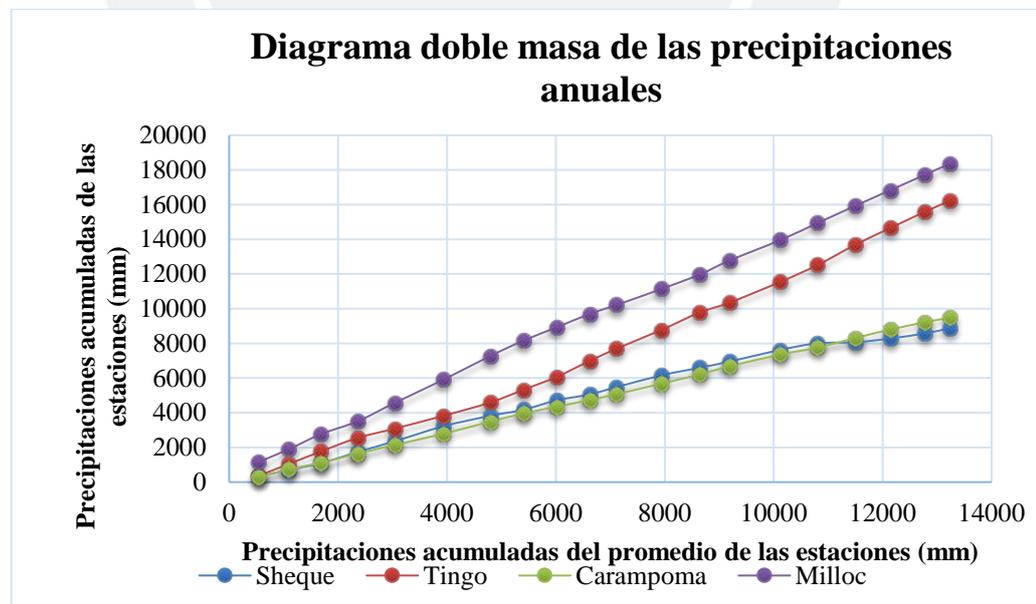
Es necesario realizar el análisis de consistencia de los datos pluviométricos con la finalidad de tener un banco de datos históricos homogéneos y válidos para el análisis. Es así que se realizó el análisis doble masa con la finalidad de comparar la tendencia de las precipitaciones de las estaciones pluviométricas y así poder establecer la estación más confiable para ser tomada como referencia en el cálculo de la precipitación anual media con el método de los polígonos de Thiessen.

En la tabla 10 se muestran las estaciones pluviométricas estudiadas para la realización del análisis doble masa, donde el año de partida del análisis quedó definido por la estación Tingo ya que su registro parte del año 1995.

m	Año	ESTACIONES								Promedio	
		Sheque		Tingo		Carampoma		Milloc			
		P (mm)	P acumulado	P (mm)	P acumulado	P (mm)	P acumulado	P (mm)	P acumulado	Prom (mm)	Prom Acum
1	1995	335,40	335,40	374,60	374,60	307,20	307,20	1169,10	1169,10	546,58	546,58
2	1996	369,00	704,40	670,20	1044,80	430,80	738,00	731,70	1900,80	550,43	1097,00
3	1997	384,60	1089,00	726,30	1771,10	379,50	1117,50	862,10	2762,90	588,13	1685,13
4	1998	647,70	1736,70	777,50	2548,60	523,30	1640,80	744,30	3507,20	673,20	2358,33
5	1999	616,70	2353,40	534,50	3083,10	505,20	2146,00	1057,70	4564,90	678,53	3036,85
6	2000	866,70	3220,10	740,50	3823,60	638,80	2784,80	1339,50	5904,40	896,38	3933,23
7	2001	604,30	3824,40	768,40	4592,00	705,00	3489,80	1369,60	7274,00	861,83	4795,05
8	2002	353,30	4177,70	739,10	5331,10	470,40	3960,20	889,70	8163,70	613,13	5408,18
9	2003	536,50	4714,20	734,30	6065,40	386,40	4346,60	760,50	8924,20	604,43	6012,60
10	2004	344,20	5058,40	921,40	6986,80	386,90	4733,50	769,30	9693,50	605,45	6618,05
11	2005	418,50	5476,90	706,80	7693,60	336,80	5070,30	522,20	10215,70	496,08	7114,13
12	2006	677,90	6154,80	1077,60	8771,20	606,30	5676,60	915,10	11130,80	819,23	7933,35
13	2007	441,90	6596,70	1011,40	9782,60	538,20	6214,80	842,50	11973,30	708,50	8641,85
14	2008	353,80	6950,50	569,40	10352,00	464,60	6679,40	805,60	12778,90	548,35	9190,20
15	2009	676,20	7626,70	1197,20	11549,20	677,40	7356,80	1180,50	13959,40	932,83	10123,03
16	2010	376,90	8003,60	972,80	12522,00	402,60	7759,40	983,10	14942,50	683,85	10806,88
17	2011	59,00	8062,60	1171,30	13693,30	553,00	8312,40	994,50	15937,00	694,45	11501,33
18	2012	217,80	8280,40	958,80	14652,10	488,10	8800,50	897,50	16834,50	640,55	12141,88
19	2013	297,40	8577,80	940,00	15592,10	415,44	9215,94	893,00	17727,50	636,46	12778,34
20	2014	294,30	8872,10	638,40	16230,50	275,90	9491,84	640,90	18368,40	462,38	13240,71

**Tabla 10. Estaciones pluviométricas y análisis doble masa (Elaboración Propia).**

Asimismo, en el gráfico 13 se muestra el diagrama doble masa obtenido del análisis de las estaciones consideradas en la tabla 10.



**Gráfico 13. Diagrama doble masa de las precipitaciones anuales (Elaboración Propia).**

Del gráfico 13 se comprueba que la estación de Milloc es la más confiable, ya que en la gráfica presenta un menor número de quiebres.

### 3.5 Hidrometría

En el Perú, generalmente las estaciones hidrométricas están ubicadas en la parte inferior de la cuenca húmeda y solo unas cuantas a nivel de subcuencas. En la cuenca del río Rímac se cuenta con las estaciones hidrométricas de Chosica (870 msnm), Sheque (3100 msnm) y Tamboraque (3200 msnm), las cuales tienen un amplio registro histórico. El SENAMHI es el encargado de administrar la mayor parte de las estaciones, mientras que EDEGEL administra las estaciones de Sheque y Tamboraque (MINAG, 2010).

En la zona de estudio, subcuenca del río Shuncha, no se dispone de ninguna estación hidrométrica, por lo tanto, es necesario considerar la Metodología de la Transmisión Hidrológica mediante una de las estaciones hidrométricas mencionadas anteriormente, en este caso la estación de Sheque. La estación hidrométrica Sheque de la cuenca del río Rímac - Santa Eulalia, se ubica en la parte media alta de la cuenca del río Rímac, específicamente en la parte media de la subcuenca del río Santa Eulalia.

La estación hidrométrica de Sheque es la más cercana al proyecto, por lo que las condiciones geomorfológicas y climatológicas son similares a las del proyecto propuesto, además su registro contempla el aporte directo del río Shuncha, río del cual se realizará el aprovechamiento hídrico. Asimismo, el registro obtenido de la estación hidrométrica de Sheque son caudales naturalizados con un periodo de 1965 al 2009, dicho registro se muestra en el Anexo II.

## CAPÍTULO IV: CÁLCULOS Y RESULTADOS

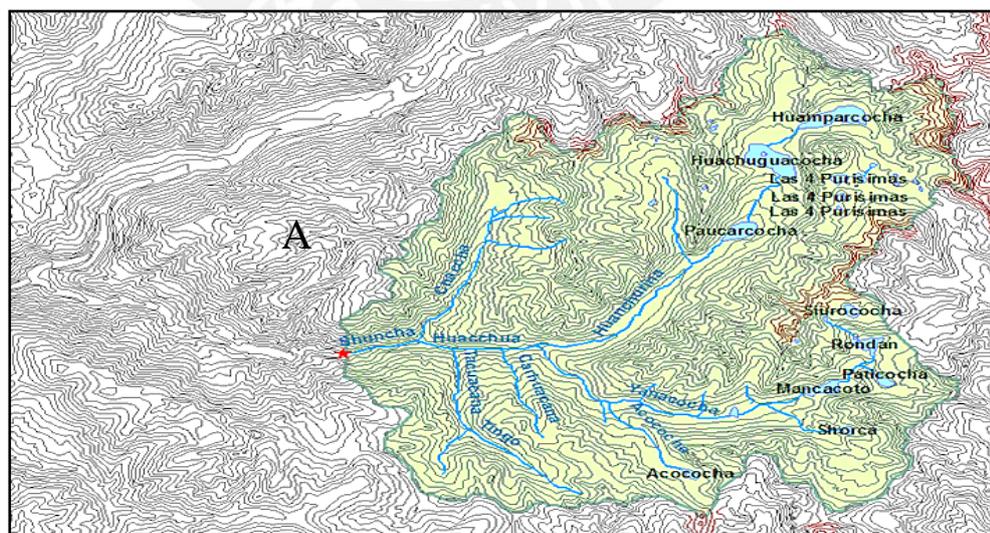
### 4.1 Delimitación y caracterización de la cuenca

#### 4.1.1 Delimitación de la cuenca

Para el estudio, evaluación y aprovechamiento hídrico de la zona en estudio, se realizó la delimitación de la subcuenca del río Shuncha mediante el programa ArcGIS. Para ello, se empleó la carta cartográfica de la zona 24k la cual contiene información hidrográfica e hipsográfica del lugar donde se localizará el proyecto. Es así que, con la información contenida en un archivo de formato Shape, se generó el Modelo Digital del Terreno (MDT), el cual se obtiene en un formato Triangular Irregular Network (TIN). A partir del MDT, se obtuvo el modelo en formato Raster, debido a que la herramienta ArcGIS solo aplica a este formato.

En un inicio se realizó la corrección general de algunos errores que se pudieron generar en el archivo Raster por medio de la herramienta Fill. Luego, con la herramienta Flow Direction, se estableció la dirección de flujo en el terreno, para generar el archivo de flujo acumulado en la cuenca. A continuación, se ubicó el punto de salida de la subcuenca sobre el archivo de flujo acumulado. Finalmente, con la herramienta Watershed, se obtuvo la delimitación aproximada, la cual fue corregida manualmente teniendo en consideración la perpendicularidad entre las curvas de nivel y la curva de la delimitación.

En la figura 16, se observa la ubicación de la bocatoma, punto A, como el inicio de la delimitación, y al sistema hidrográfico de la cuenca (quebradas y lagunas).



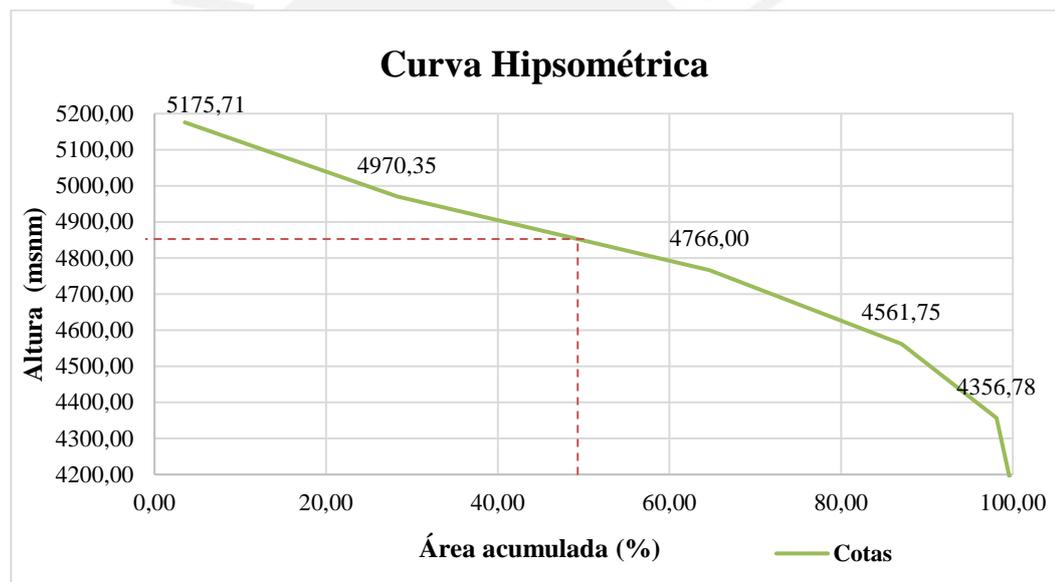
**Figura 16. Delimitación de la cuenca (Elaboración Propia).**

Con el área de interés delimitada, se lograron obtener los parámetros geomorfológicos a través de la caracterización de la cuenca, los cuales brindaron información importante que se tomó en cuenta junto al estudio geológico y de suelos para la concepción del proyecto. Asimismo, los parámetros obtenidos junto a los datos meteorológicos y pluviométricos fueron de utilidad para evaluar y aplicar el método de transmisión hidrológica.

#### 4.1.2 Caracterización de la cuenca

##### a) Curva hipsométrica

Por medio de la elaboración de la curva hipsométrica se pudo establecer la variación de la altitud en la cuenca y determinar la altitud promedio de la misma. El resultado obtenido se muestra en el gráfico 14.



**Gráfico 14. Curva hipsométrica de la cuenca (Elaboración Propia).**

El gráfico 14 muestra la configuración altimétrica de la cuenca en estudio, obteniéndose una altitud media de la cuenca de 4850 msnm.

##### b) Pendiente media de la cuenca

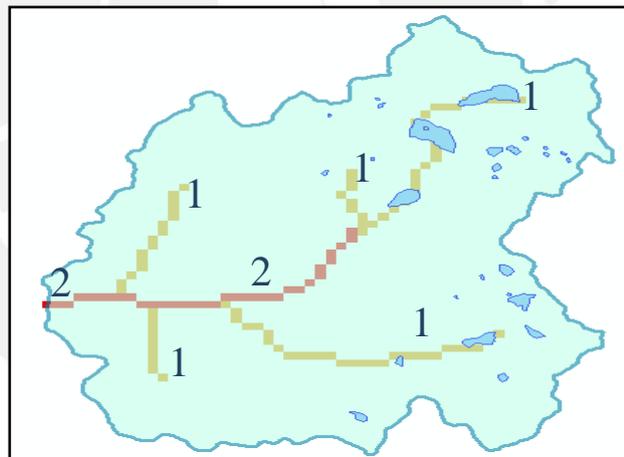
Para obtener la pendiente media de la cuenca se recurrió al programa ArcGIS, el cual realiza un promedio ponderado con el cálculo del número de ocurrencias en el rango establecido de pendientes (%), lo cual se muestra en la tabla 11.

Número	Rango Pendiente (%)			Número de ocurrencias (2)	(1)x(2)
	Inferior	Superior	Promedio(1)		
1	0	10	5	59	295
2	10	20	15	193	2895
3	20	30	25	305	7625
4	30	40	35	411	14385
5	40	50	45	421	18945
6	50	60	55	337	18535
7	60	70	65	227	14755
8	70	80	75	157	11775
9	80	90	85	45	3825
10	90	100	95	9	855
				2164	93890
Pendiente media de la cuenca					43,39%

**Tabla 11. Ponderado de pendientes para el cálculo de la pendiente media de la cuenca (Elaboración Propia).**

**c) Orden de la red hídrica**

De acuerdo a la distribución de los tributarios en la red hídrica, la cuenca en estudio es de orden 2, como se muestra en la Figura 17.

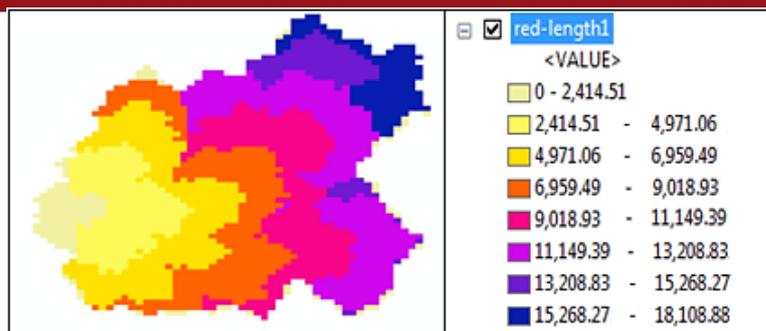


**Figura 17. Orden de la red hídrica de la zona en estudio (Elaboración Propia).**

De la figura 17, se puede decir que el aporte de caudal al río principal por parte de sus tributarios es de manera directa, con lo cual se puede lograr un mejor control de distribución y aporte para cada tributario mostrado.

**d) Longitud del río principal**

Para determinar la longitud del río principal, se consideró una división de 8 áreas en la cuenca, como se muestra en la figura 18. El número de división de áreas internas es un valor medio estándar de acuerdo al análisis mediante el programa ArcGIS.



**Figura 18. Subdivisión de la cuenca para el cálculo de la longitud del río principal (Elaboración Propia).**

En la figura 18, se puede observar los valores de las distancias recorridas en cada subregión comenzando desde la parte baja de cuenca y que como resultado de las distancias acumuladas se tiene una longitud total de 18.11 Km del río principal.

**e) Longitud de la red hídrica**

La longitud de la red hídrica es el resultado de sumar las longitudes de los afluentes en cada nivel de orden de la red hídrica, según se muestra en la tabla 12.

Orden de la red hídrica	Longitud (Km)
1	22,64
2	7,76
Total	30,4

**Tabla 12. Longitud de la red hídrica (Elaboración Propia).**

En la tabla 12, se observa que la cuenca tiene una mayor longitud referida a la red de orden 1 y que la longitud de la red principal, de orden 2, representa aproximadamente la tercera parte de la longitud total de sus afluentes.

**f) Pendiente promedio de la red hídrica**

La pendiente promedio de la red hídrica se obtuvo mediante el programa ArcGIS. Para ello, se calculó la pendiente promedio en cada orden de la red hídrica y el número total de ocurrencias para finalmente, concluir con un promedio ponderado, como se muestra en la tabla 13.

Orden de la red hídrica	Número de veces (1)	Pendiente promedio % (2)	(1) x (2)
1	120	2,84	340,8
2	38	3,32	126,16
Total	158		466,96
Pendiente promedio		2,96%	-

**Tabla 13. Promedio ponderado de pendientes (Elaboración Propia).**

En resumen, los parámetros obtenidos luego de la evaluación del lugar en estudio mediante el programa ArcGIS, están divididos en parámetros de superficie y en parámetros de la red hídrica. En las tablas 14 y 15 se muestran cada uno de estos grupos para la cuenca en estudio.

Parámetros de Superficie		
DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
Área	Km <sup>2</sup>	107,57
Perímetro de la cuenca	km	54,42
<b>Cotas</b>		
Cota máxima	msnm	5300
Cota mínima	msnm	4050
<b>Centroide (x,y,z)</b>		
X centroide	m	352009,2
Y centroide	m	8711097
Z centroide	msnm	4839
<b>Altitud</b>		
Altitud media	msnm	4850
Altitud más frecuente	msnm	4663,93
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	4789,15
<b>Pendiente</b>		
Pendiente promedio de la cuenca	%	43,39

**Tabla 14. Parámetros de superficie de la cuenca (Elaboración Propia).**

Los valores más representativos para la aplicación del método de la transmisión hidrológica en cuanto a parámetros físicos, son la altitud media y la pendiente media de la cuenca. Por otro lado, el valor del área es empleado para establecer una relación directa entre dos cuencas.

Parámetros de la Red Hídrica		
DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
Longitud del curso principal	Km	18,11
Orden de la red hídrica	UND	2
Longitud de la red hídrica	Km	30,4
Pendiente promedio de la red hídrica	%	2,96%
<b>Parámetros generados</b>		
Tiempo de concentración	horas	1,94
Pendiente del cauce principal	%	6,19%

**Tabla 15. Parámetros de la red hídrica de la cuenca (Elaboración Propia).**

En cuanto a las condiciones hidrológicas, los valores representativos en una cuenca son la pendiente promedio de la red hídrica y el tiempo de concentración de la misma.

#### 4.2 Esquema del aprovechamiento hídrico

Para el presente trabajo, se planteó un esquema de aprovechamiento hídrico de la zona, donde se tomaron en cuenta consideraciones teóricas y criterios técnicos para la mejor opción del emplazamiento de cada estructura.

##### a) Bocatoma

Se ubicó la bocatoma en un tramo recto del río Shuncha a una altitud de 4060 msnm, el cual es estrecho y de forma cóncava en la orilla, ello para disminuir la entrada de sedimentos. La bocatoma se asentará sobre suelo de formación geológica del grupo Rímac y grupo Colqui (ver figura 19).

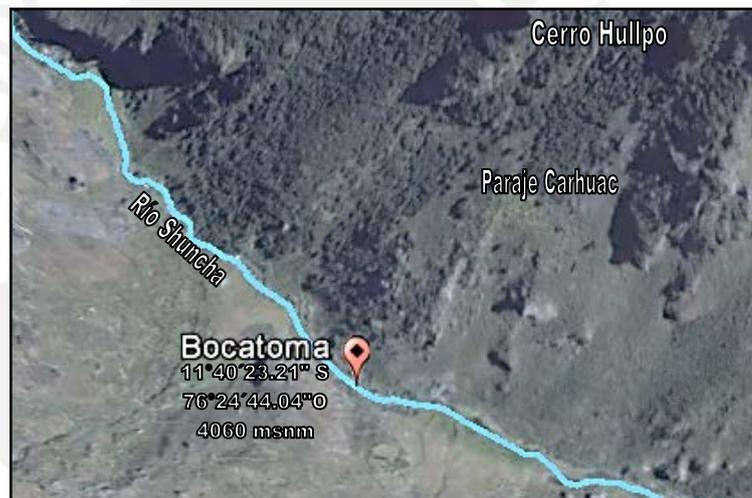


Figura 19. Ubicación de la bocatoma (Elaboración Propia).

##### b) Trayectoria del canal de conducción y cámara de carga

Considerando la trayectoria del canal de conducción con 4700 metros de longitud, se realizó con trazos continuos considerando la pendiente asumida de 1/1000, con la cual se obtuvo un diseño de máxima eficiencia hidráulica, además de contar con una mayor altura de caída. La cámara de carga se ubicó a una altitud de 4055 msnm sobre una formación geológica del grupo Colqui (ver figura 20).



**Figura 20. Ubicación del canal de aducción y de la cámara de carga (Elaboración Propia).**

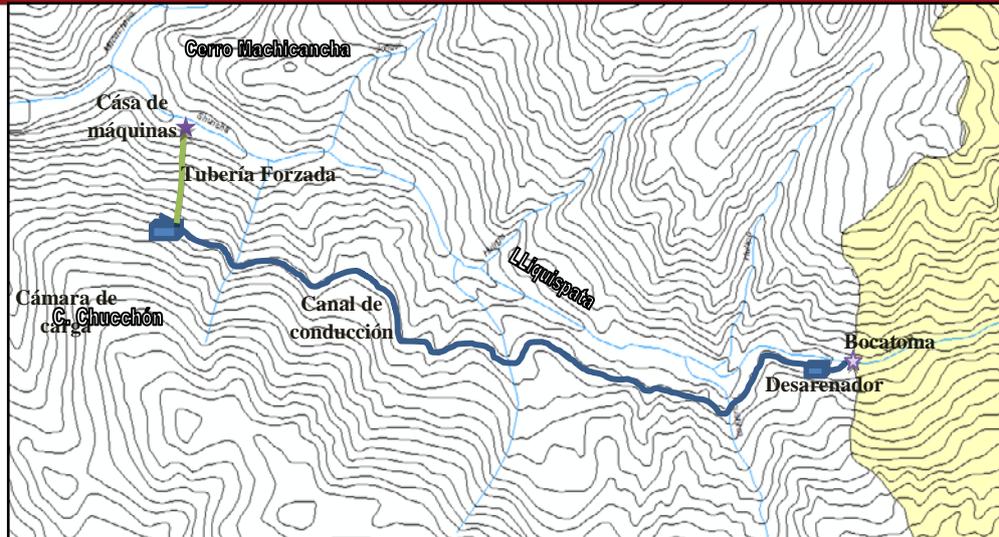
### c) Tubería forzada y casa de máquinas

De acuerdo con el esquema planteado se tiene una altura de 530m de altura aprovechable. Para ello, la tubería forzada resultó de unos 735 metros de longitud, se procuró ubicar tramos rectos en donde la estructura se ajuste al perfil topográfico del suelo. Para ese fin se cuenta con el refuerzo de estructuras de concreto que la ayudarán a sostenerse (apoyos) y a variar la pendiente (anclajes). Por otro lado, la casa de máquinas se ubicó a 3525 msnm cerca del río principal al cual se le entregará el agua turbinada de una manera directa (ver figura 21).



**Figura 21. Ubicación de la tubería forzada y de la casa de máquinas (Elaboración Propia).**

El esquema de aprovechamiento de las aguas del río Shuncha propuesto y desarrollado para la minicentral hidroeléctrica de Carampoma se muestra en la figura 22.



**Figura 22. Esquema de aprovechamiento hídrico de la minicentral hidroeléctrica Carampoma (Elaboración Propia).**

### 4.3 Elección del caudal de diseño

Para la elección del caudal con el cual se realizará los diseños y el predimensionamiento de las obras civiles, se elaboró la curva de duración de caudales. Según criterios técnicos y experiencias de proyectos pasados, basta con elegir el caudal que garantice una disponibilidad al 95% de la curva de duración. Sin embargo, este valor es muy conservador ya que, dependiendo de las características climatológicas, meteorológicas y del tipo de aprovechamiento hídrico, este valor puede variar debido a que no garantiza la viabilidad económica del proyecto.

Por otro lado, el sistema propuesto en el presente trabajo se caracteriza por ser a filo de agua, es decir no posee regulación por medio de una presa. De acuerdo con esta característica, se puede proyectar la minicentral hidroeléctrica con el caudal de 90% de persistencia de la curva de duración, y si se proyecta un sistema de aprovechamiento con regulación, se puede emplear el caudal al 50% de persistencia (Ortiz, 2011). En el presente trabajo se toman en consideración el 50%, 90%, 95% y el valor intermedio de 75% de persistencia para una evaluación económica, tomando en cuenta factores de operación y mantenimiento.

#### 4.3.1 Método de transferencia hidrológica

Dado que no se dispone de ninguna estación hidrométrica ni meteorológica dentro de la zona de estudio, se evaluarán las condiciones necesarias para aplicar el Método de Transferencia Hidrológica, el cual fue empleado en la Evaluación de los Recursos

Hídricos en la Cuenca del Río Rímac (MINAG, 2010) y para estimar el caudal del Río Rojo de la cuenca del Norte, Dakota del Norte y Minnesota (Emerson *et al.* 2005).

En primer lugar, al no disponer de un registro de caudales en el río Shuncha, fue necesario evaluar la aplicación del método de la transferencia hidrológica para poder generar un registro de caudales en el lugar del proyecto, a partir de una estación hidrométrica cercana. Dadas las condiciones, la estación hidrométrica de Sheque fue la mejor opción debido a su cercanía y similares condiciones meteorológicas, además que su registro considera el aporte del río Shuncha.

Cuando no se cuenta con información hidrológica ni pluviométrica cerca a la bocatoma, como solución se puede transferir la información requerida de una cuenca vecina o de una con condiciones similares (Ortiz, 2011). En el caso del presente estudio, se emplearon los registros de la estación de Sheque que pertenece a una cuenca vecina.

La figura 23 muestra la cercanía que tiene la estación de Sheque respecto a la ubicación de la bocatoma, siendo la distancia entre ellas de aproximadamente 9.23 km, por lo cual es de esperarse que las condiciones meteorológicas y geomorfológicas sean de características similares.

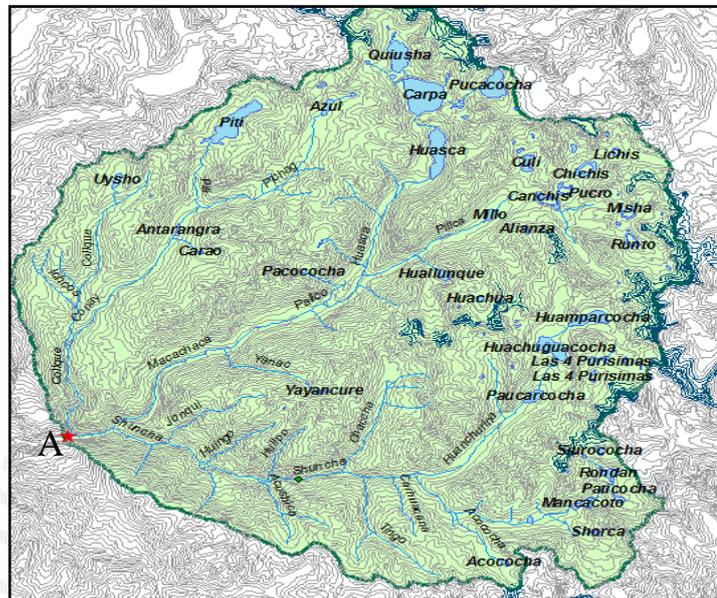


**Figura 23. Ubicación de la estación Sheque y la Bocatoma (Elaboración Propia).**

#### 4.3.1.1 Delimitación del área de influencia de la estación Sheque

La delimitación del área de influencia de la estación de Sheque, correspondiente a la subcuenca del mismo nombre, fue importante para confirmar las características de

similitud con la subcuenca del río Shuncha y dar el sustento a la aplicación del método de la transferencia hidrológica. La delimitación, como se muestra en la figura 24, fue realizada con el programa ArcGIS a partir de los datos obtenidos de la carta 24k que está a disposición en el MINEDU.



**Figura 24. Delimitación del área efectiva de la estación de Sheque (Elaboración Propia).**

Con respecto al área de influencia de la estación de Sheque (punto A de la figura 24) se obtuvieron los parámetros geomorfológicos del mismo, para así compararlos con los parámetros de la cuenca del río Shuncha y sustentar el uso del método de la transmisión hidrológica, según se muestra en la tabla 16.

Parámetros de Superficie		Subcuenca Sheque	Subcuenca Shuncha
Descripción	UND	VALOR	VALOR
Área	Km <sup>2</sup>	357.69	107.57
Perímetro de la cuenca	km	89.16	54.42
<b>Cotas</b>			
Cota máxima	msnm	5300	5300
Cota mínima	msnm	3350	4050
<b>Centroide (x,y,z)</b>			
X centroide	m	347882.6	352009.15
Y centroide	m	8716252.48	8711096.61
Z centroide	msnm	4616.31	4839
<b>Altitud</b>			
Altitud media	msnm	4690.00	4890
Altitud más frecuente	msnm	4824.1	4663.93
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	4673.22	4789.15
<b>Pendiente</b>			
Pendiente promedio de la cuenca	%	35.32	43.39

**Tabla 16. Parámetros de superficie de Sheque en comparación con Shuncha (Elaboración Propia).**

De los parámetros mostrados en la tabla 16, se observa una similitud entre la variación de las cotas, la pendiente promedio del área delimitada y la altitud media correspondientes a la subcuenca Sheque y a la subcuenca de Shuncha.

Asimismo, en la tabla 17, se observan que los principales parámetros de la red hídrica como lo es la pendiente promedio de la red hídrica y la pendiente del cauce principal no varían mucho respecto a la delimitación del área de Shuncha.

Parámetros de la red hídrica	Subcuenca Sheque	Subcuenca Shuncha
<b>Descripción</b>		
Longitud del curso principal (km)	27.21	18.11
Orden de la red hídrica (u)	3.00	2.00
Longitud de la red hídrica (km)	103.08	30.40
Pendiente promedio de la red hídrica (%)	2.76%	2.96%
<b>Parámetros generados</b>		
Tiempo de concentración (horas)	3.11	1.94
Pendiente del cauce principal (%)	4.12%	6.19%

**Tabla 17. Parámetros de la red hídrica en Sheque en comparación con Shuncha (Elaboración Propia).**

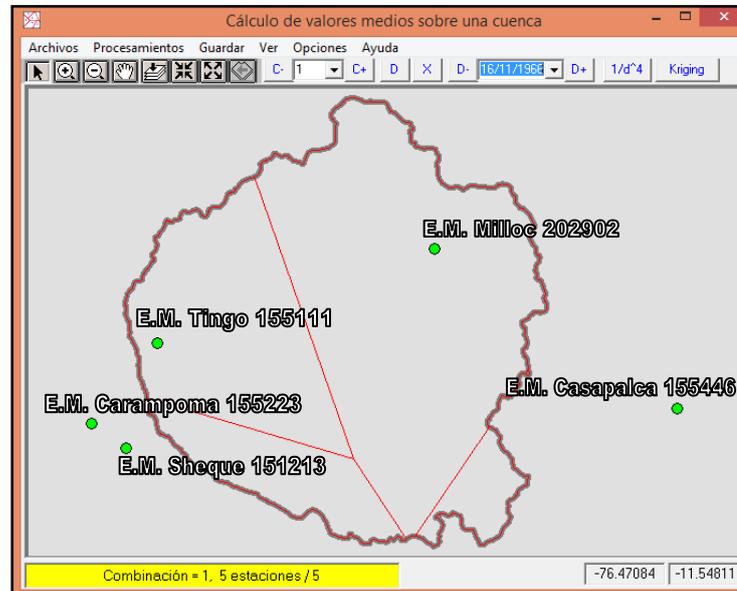
Los factores considerados para respaldar la igualdad de condiciones geomorfológicas entre ambas delimitaciones (Sheque y Shuncha) fueron las siguientes:

- Distancia y ubicación de la estación Sheque respecto de la Bocatoma, incluida en la subcuenca Shuncha.
- Condiciones de pendiente y altitud media.
- La pendiente promedio de la red hídrica de ambas cuencas.
- Similitudes en las características pluviométricas según el análisis de isoyetas.
- Los valores registrados por la estación hidrométrica de Sheque, considera el aporte directo de las aguas de río Shuncha.

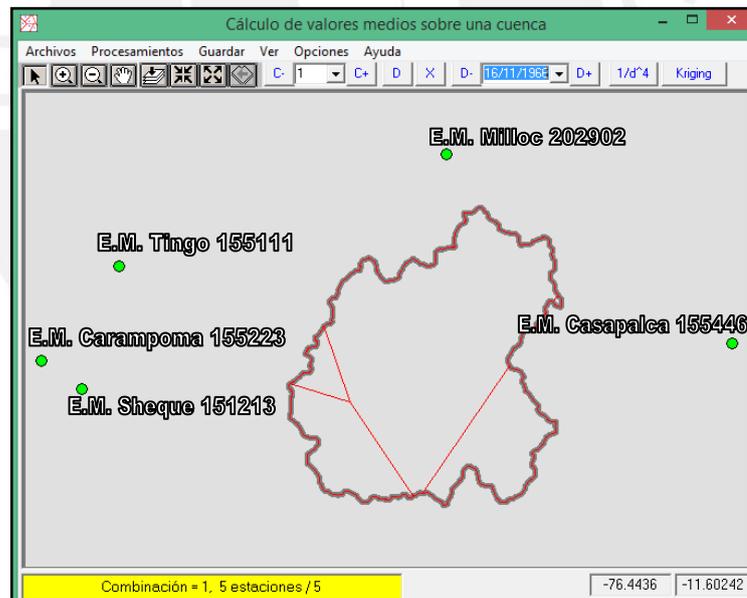
#### **4.3.1.2 Polígonos de Thiessen y cálculo del factor de transferencia hidrológica**

Con el amplio registro histórico de las estaciones pluviométricas de Casapalca, Sheque, Tingo, Carampoma y Milloc, proporcionadas por el SENAMHI, se verificó la igualdad de condiciones pluviométricas en ambas delimitaciones (Sheque y Shuncha). Para ello, se recurrió al software Hydraccess, con el cual se aplicó el método de los polígonos de Thiessen a cada delimitación, según se muestra en las figuras 25 y 26. Se usaron en todos los casos, la escala temporal 1995-2014 debido a

que en todos los casos se cuenta con información completa en dicho intervalo de tiempo.



**Figura 25. Polígonos de Thiessen de la cuenca generada a partir de la estación de Sheque (Elaboración Propia).**



**Figura 26. Polígonos de Thiessen de la cuenca generada a partir de la bocatoma de la Minicentral Hidroeléctrica Carampoma (Elaboración Propia).**

El software Hydraccess reconoce los valores anuales de cada estación y genera, a partir de su ubicación espacial, los polígonos de Thiessen, como se observa en las figuras 25 y 26. Luego, calcula las áreas de aporte dentro de la cuenca, tal como se muestra en la tabla 18.

Estaciones pluviométricas	Área subcuenca Shuncha (%)	Área subcuenca Sheque (%)
Sheque	0.14	0.11
Carampoma	0.00	0.00
Casapalca	0.16	0.05
Milloc	0.67	0.56
Tingo	0.03	0.28
Suma	1.00	1.00

**Tabla 18. Aporte para cada estación pluviométrica en cada delimitación (Elaboración Propia).**

Finalmente, se obtuvo una correlación de 0.986 en base a la precipitación total en cada delimitación, lo cual respalda la similitud de condiciones de precipitación de las cuencas analizadas (ver tabla 19).

Área delimitada	Total precipitaciones Thiessen (mm)
Subcuenca Shuncha	16296
Subcuenca Sheque	16528.4
Relación	0.986

**Tabla 19. Factor de correlación para las áreas en estudio (Elaboración Propia).**

Asimismo, la tabla 20 muestra las áreas de cada subcuenca, y considerando que en ambas cuencas, las precipitaciones medias anuales tienen la misma magnitud (debido a la similitud de las características geomorfológicas, según se detalló en las tablas 16 y 17), se calculó el factor de transferencia hidrológica igual a 0.3007. Con dicho factor, se obtuvieron los registros de caudales medios mensuales para la zona en estudio, por medio de la metodología de transmisión hidrológica. Los resultados se muestran en el Anexo II.

Método de transmisión hidrológica	Subcuenca Sheque	Subcuenca Shuncha
Área (km <sup>2</sup> )	357.69	107.57
Precipitación anual media (mm)	1	1
Factor		0.3007

**Tabla 20. Factor de la transferencia hidrológica de caudales (Elaboración Propia).**

#### 4.3.1.3 Análisis de registro de la estación Sheque

Los valores de caudales registrados en la estación hidrométrica de Sheque, son caudales naturalizados, y son los caudales que registra la estación menos los caudales del Túnel Trasandino, teniendo para estos caudales registros desde el año 1965 al 2009. Los caudales naturalizados no contemplan los efectos de evaporación, regulación de embalses e infiltración. La información se muestra en el Anexo II.

Se realizó un análisis visual del registro completo de caudales para detectar alguna inconsistencia de la información proporcionada e indicar los periodos de los datos dudosos.

En el gráfico 15 se muestra el registro del caudal mensual promedio anual. En éste, se observa que en los 1968 y 1992 se registró un caudal promedio mensual menor a  $4\text{m}^3/\text{s}$  y que a partir del año 1993 los registros están por encima de  $5\text{ m}^3/\text{s}$  en promedio mensual.

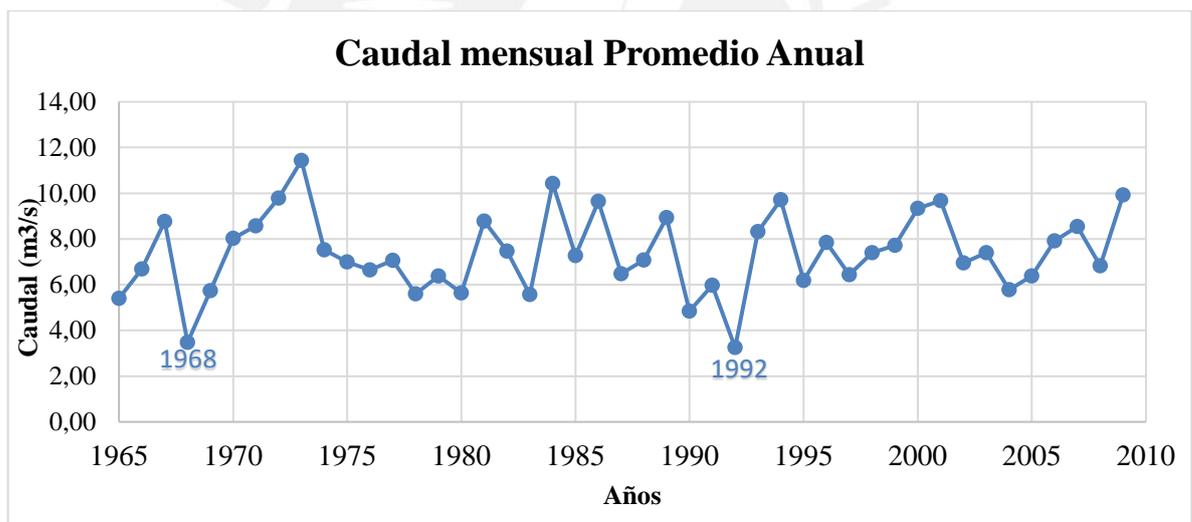


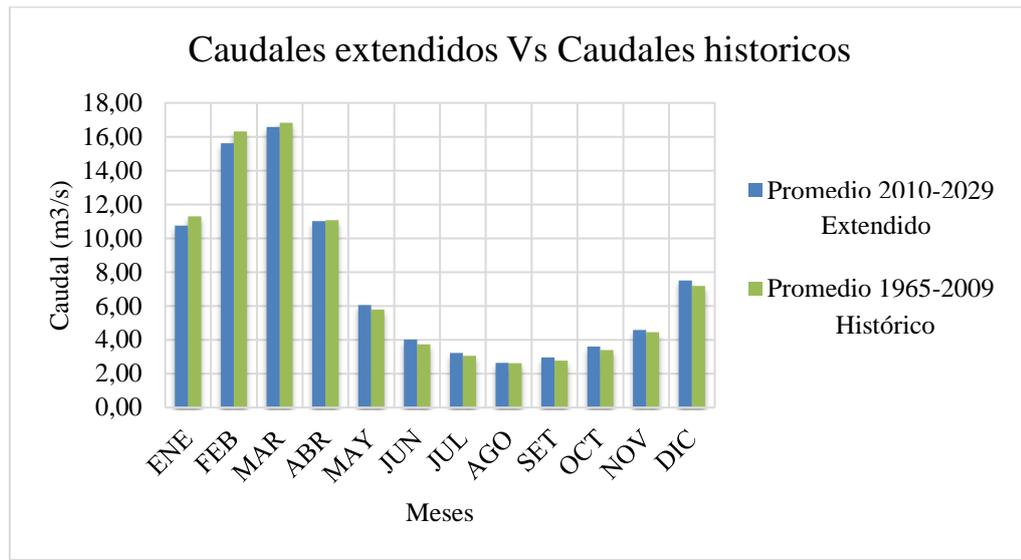
Gráfico 15. Caudal mensual promedio anual (Elaboración Propia).

#### 4.3.1.4 Extensión de caudales de la estación Sheque

Antes de aplicar el método de la transmisión hidrológica, se extendió el registro de caudales medios de la estación Sheque, por 20 años, de acuerdo a la evaluación económica para la realización de proyectos hidroeléctricos, el cual contempla los años de operación y evaluación del proyecto. La extensión de caudales se realizó con la ayuda del software HEC-4 *Monthly Streamflow Simulation*, que fue desarrollado

por el *Hydrologic Engineering Center* de los Estados Unidos de América. La serie de caudales extendida del periodo 1965 – 2009, se muestra en el Anexo II.

En el gráfico 16, se observa que la variación de los caudales históricos y extendidos son muy similares, debido a la precisión obtenida de aplicar el software HEC-4, además de contar con un registro extenso de datos, en este caso de 45 años.



**Gráfico 16. Comparación entre Caudales históricos y caudales extendidos (Elaboración Propia).**

Adicionalmente, se consideró el aporte de las lagunas reguladas de la cuenca hidrológica Santa Eulalia, las cuales se muestran en la tabla 21, el cual su registro completo data del año 1997 al año 2014, según se muestra en el Anexo II.

LAGUNA	SUBCUENCA	CAPACIDAD MÁXIMA (MMC)	TIPO DE PRESA	ZONA BENEFICIADA
HUAMPARCOCHA	SHUNCHA	3.8	ALBAÑILERÍA	Valle Rímac- Gran Lima
HUACHUGUACOCHA	SHUNCHA	5.6	ALBAÑILERÍA	Valle Rímac- Gran Lima
RONDÁN (PIRHUA)	SHUNCHA	1.0	ALBAÑILERÍA	Valle Rímac- Gran Lima
MANCACOTO	SHUNCHA	1.73	ALBAÑILERÍA	Valle Rímac- Gran Lima

**Tabla 21. Lagunas reguladas por Eregel (Elaboración Propia).**

Es así que, los caudales considerados en este estudio fueron el resultado de los caudales de la estación Sheque más el promedio mensual del aporte de las lagunas, que se efectuó desde el año 1965. Los registros de los caudales finales se muestran en el Anexo II.

## 4.3.2 Elección del caudal

### 4.3.2.1 Curva de duración

Para elegir el caudal de diseño de la minicentral, se elaboró la curva de duración mensual promedio del registro de caudales mostrados en el anexo II. Para ello, se tomaron en consideración los caudales estimados por el método de la transmisión hidrológica, el aporte de las lagunas reguladas y el criterio del caudal ecológico, que garantiza un caudal en avenidas y estiajes del 10% y 15% respectivamente (ANA, 2012). Los resultados se muestran en la tabla 22. Estos valores fueron empleados para la elaboración de la curva de duración mensual de caudales promedio en la bocatoma.

Mes	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Enero	3,04
Febrero	4,47
Marzo	4,82
Abril	3,17
Mayo	1,54
Junio	1,28
Julio	1,44
Agosto	1,46
Septiembre	1,71
Octubre	1,47
Noviembre	1,48
Diciembre	2,01

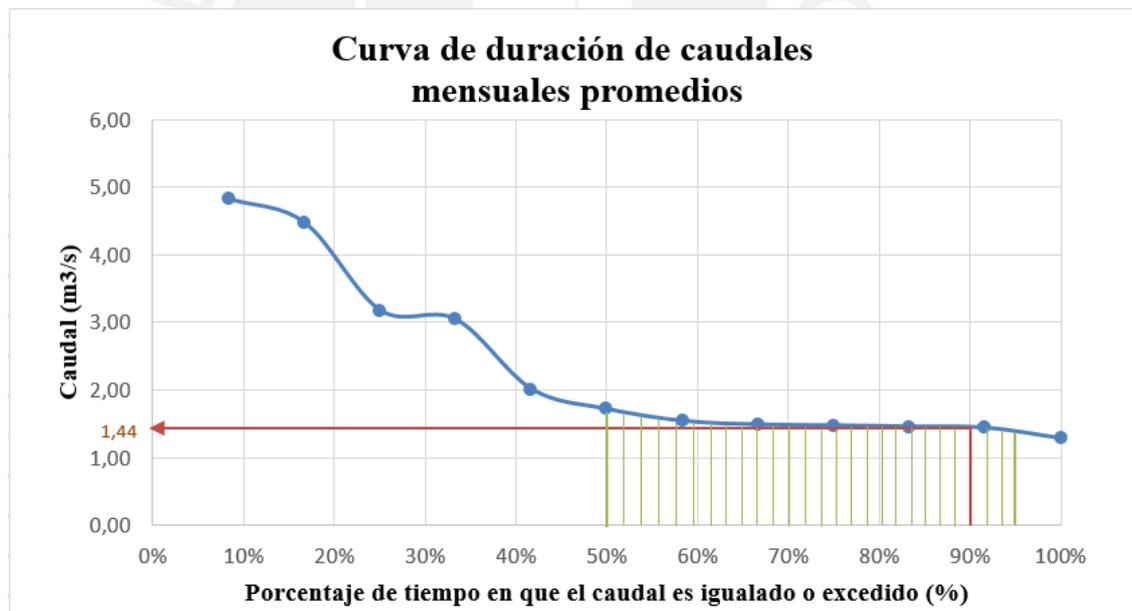
**Tabla 22. Caudales promedios mensuales (Elaboración Propia).**

Asimismo, en la tabla 23 se muestra la distribución de los caudales con su persistencia respectiva, que resultó del ordenamiento de los caudales de la tabla 22 en forma descendente y del cálculo de la persistencia para cada caudal.

Ordinal	Q (m³/s)	Persistencia %
1	4,82	8%
2	4,47	17%
3	3,17	25%
4	3,04	33%
5	2,01	42%
6	1,71	50%
7	1,54	58%
8	1,48	67%
9	1,47	75%
10	1,46	83%
11	1,44	92%
12	1,28	100%

**Tabla 23. Caudales ordenados y porcentaje de persistencia (Elaboración propia).**

En el gráfico 17 se determina el valor teórico del caudal al 90% de persistencia, que generalmente se emplea para proyectar una Pequeña Central Hidroeléctrica (Ortiz, 2011). Sin embargo, también serán evaluados los caudales de 50%, 75% y del 95% de persistencia. En el área achurada se aprecia una leve variación de la magnitud de los caudales para el rango de las persistencias consideradas.



**Gráfico 17. Curva de duración de caudales medios mensuales (Elaboración Propia).**

Finalmente, en la tabla 24, se muestran los caudales a considerar para la evaluación económica y determinar así el caudal de mayor rentabilidad, los cuales fueron obtenidos del gráfico 17.

Q (m <sup>3</sup> /s)	Persistencia
1,71	50%
1,47	75%
1,44	90%
1,38	95%

**Tabla 24. Caudales considerados para la evaluación económica (Elaboración Propia).**

### 4.3.3 Evaluación del caudal de diseño

La disposición final que presenta la minicentral hidroeléctrica dependerá finalmente, del estudio económico conforme se hizo referencia en el ítem 4.3. El desarrollo de una central hidroeléctrica tiene un alto costo, por lo que es necesario conocerlo antes de realizar el proyecto, dado que inversionista debe verificar que el retorno de su inversión es seguro. Por tal motivo, se calcularon el factor de planta y el costo de la unidad energética, como indicadores iniciales que permitieron evaluar la viabilidad del proyecto.

Los indicadores antes mencionados son fáciles y rápidos de calcular. Además de predecir la viabilidad financiera del proyecto, permiten realizar comparaciones entre los distintos caudales de diseño evaluados.

Por otro lado, también se usaron indicadores económicos comparativos como el VAN (Valor Actual Neto), TIR (Tasa Interna de Retorno), Beneficio/costo y Periodo de Recuperación de la Inversión.

A partir de los indicadores antes mencionados, se evaluaron los posibles caudales de diseño, tomando como referencia los caudales obtenidos del análisis de persistencia al 50, 75, 90 y 95%. Después de tal evaluación, se eligió el caudal óptimo de diseño, que es el que genera el proyecto más rentable y más autosostenible desde el punto de vista económico. Finalmente, se realizó el análisis de sensibilidad.

#### 4.3.3.1 Cálculo del factor de planta y costo de la unidad energética

En primer lugar, se calculó y analizó el indicador factor de planta para los caudales 1.71 m<sup>3</sup>/s (50%), 1.47 m<sup>3</sup>/s (75%), 1.44m<sup>3</sup>/s (90%) y 1.38 m<sup>3</sup>/s (95%). Adicionalmente, se consideró en el análisis caudales intermedios comprendidos entre el 50 y el 75% de persistencia, siendo los valores considerados de 1.50 m<sup>3</sup>/s, 1.55 m<sup>3</sup>/s y 1.60 m<sup>3</sup>/s. Los resultados se muestran en la tabla 25.

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Factor de planta
1,71	0,89
1,60	0,92
1,55	0,93
1,50	0,94
1,47	0,95
1,44	0,95
1,38	0,96

**Tabla 25. Factor de planta para los caudales analizados (Elaboración Propia).**

Se considera un buen proyecto cuando el factor de planta es de 0.4 durante los primeros años de vida del mismo, y un valor mayor a 0.6 en los siguientes años, pues un valor menor significaría una energía costosa. Por ello se recomienda diseñar para el mayor factor de planta posible (ITDG-PERÚ, 1995). Como se observa en la tabla 25, los factores de planta obtenidos para cada caudal, fueron todos mayores de 0.6. Los cálculos del factor de planta para cada caudal se muestran en el Anexo III.

A continuación, se calculó y analizó el indicador costo de la unidad energética (CUE) para los mismos caudales, siendo los resultados mostrados en la tabla 26.

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Potencia (MW)	Costo Anual (s/.)	Costo Anual (\$)	O+M (s/.)	O+M (\$)	CUE (\$/MWh)
1.71	7.14	S/. 5,127,077.29	\$ 1,572,723.09	S/. 966,650.38	\$296,518.52	33.57
1.6	6.67	S/. 4,879,204.56	\$ 1,496,688.52	S/. 919,916.88	\$282,183.09	33.08
1.55	6.46	S/. 4,754,555.76	\$ 1,458,452.69	S/. 896,415.81	\$274,974.17	32.95
1.5	6.27	S/. 4,702,320.18	\$ 1,442,429.50	S/. 886,567.40	\$271,953.19	33.23
1.47	6.13	S/. 4,576,500.08	\$ 1,403,834.38	S/. 862,845.50	\$264,676.53	32.71
1.44	6.01	S/. 4,501,573.43	\$ 1,380,850.74	S/. 848,718.95	\$260,343.24	32.79
1.38	5.74	S/. 4,312,843.30	\$ 1,322,958.07	S/. 813,136.10	\$249,428.25	32.58

**Tabla 26. Costo unitario de la energía (\$/MWh) (Elaboración Propia).**

En la tabla 26, el valor del costo anual fue calculado para una tasa de interés del 12%, el costo de O+M representa el 2% del Costo Directo. Asimismo, el CUE se calculó mediante la fórmula 42.

Para verificar la viabilidad económica del proyecto, se comparó el C.U.E con el precio al cual se vendería la energía producida por la minicentral. Éste último se calculó a partir de los precios monómicos adjudicados en la tercera subasta realizada para los RER (Recursos Energéticos Renovables) por OSINERGMIN. El precio de comparación se obtuvo promediando en forma ponderada los referidos precios monómicos adjudicados, obteniendo un precio de venta ponderado de

56.55 (U\$\$/MWh). Como se aprecia en la última columna de la tabla 26, los C.U.E obtenidos para todos los caudales analizados, son menores que el precio de venta ponderado, lo cual verifica la viabilidad económica del proyecto para todos los casos considerados.

#### 4.3.3.2 Determinación de los costos de inversión

Para evaluar económicamente el proyecto, se calculó el costo de inversión para todos los caudales analizados, considerando los dos siguientes rubros: Obras civiles, suministros y obras electromecánicas.

Para las obras civiles se calcularon los costos de la bocatoma, el canal de conducción, el desarenador, la cámara de carga, la tubería forzada y el canal de descarga. Para tal efecto, se emplearon las denominadas “curvas paramétricas”, que relacionan el caudal de diseño con dimensiones, volúmenes y metrados de las obras civiles. Las curvas paramétricas empleadas fueron obtenidas de la tesis “Planeamiento para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas en el Perú, aplicación a la pequeña central de Cutervo” de Mellado publicada en 1982. Esta tesis desarrolló curvas paramétricas para la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas, permitiendo así realizar un estudio rápido, pues contempla un método basado en diseños paramétricos, es decir ábacos de predimensiones y ábacos de metrados unitarios. Este documento es muy importante para los proyectistas de pequeñas centrales hidroeléctricas, pues brinda una visión integral del proyecto y permite estimar el costo total de la minicentral (Mellado, 1982).

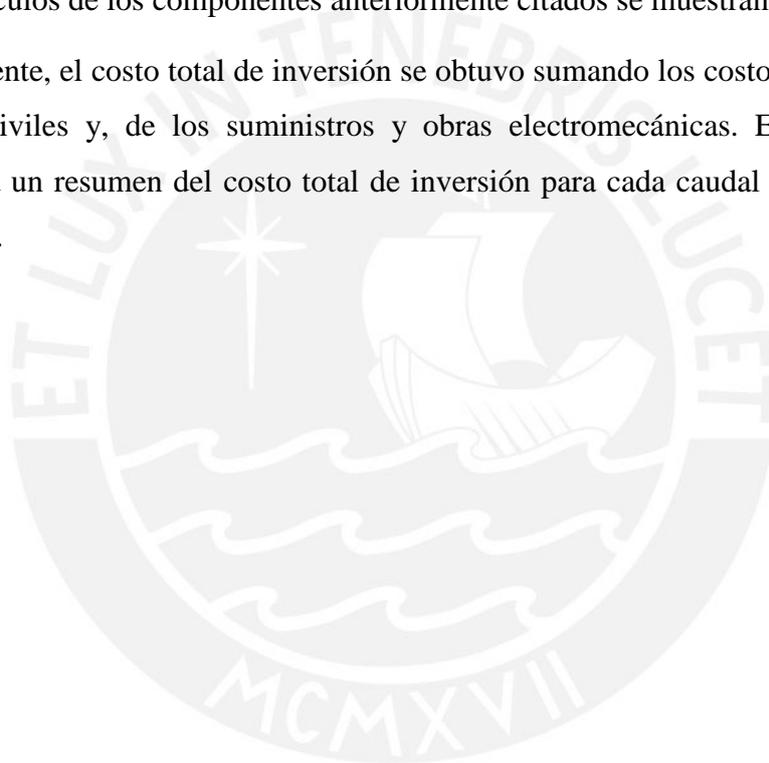
Los cálculos de los componentes correspondientes a las obras civiles se muestran en el Anexo IV. En cuando a los suministros y obras electromecánicas se consideraron los siguientes rubros: turbina, generador, subestación elevadora, línea de transmisión y celda de conexión al SEIN (Sistema Eléctrico Interconectado Nacional). Para el cálculo de la turbina se emplearon las curvas paramétricas de “*Cost base for small-scale hydropower plants (10 000kW)*”, las cuales están basadas en instalaciones construidas entre los años 2005-2010. Además, los componentes de las turbinas son producidos en distintos países, por lo que son influenciados por tendencias de precios internacionales. Dado que las curvas paramétricas antes mencionadas están expresadas en moneda noruega (nok), el tipo de cambio que se consideró fue de

$I_{nok}=0.41$ soles. Para el salto y rango de caudales considerados, se seleccionó el tipo de turbina Pelton, según lo indicado en el ítem 2.3.2.

Dada la distancia entre la ubicación de la casa de máquinas y el punto de conexión al SEIN (21.4 km), se compararon tres tensiones normalizadas para la línea de transmisión: 10, 22.9 y 60 kV, resultando la tensión de 22.9 kV como la opción técnica y económica más conveniente de acuerdo a la potencia generada en el proyecto. El proyecto además requiere de una celda de conexión de 22.9 kV, a construirse en la subestación de interconexión al SEIN (Subestación San Mateo de Luz del Sur).

Los cálculos de los componentes anteriormente citados se muestran en el Anexo IV.

Finalmente, el costo total de inversión se obtuvo sumando los costos obtenidos de las obras civiles y, de los suministros y obras electromecánicas. En la tabla 27 se muestra un resumen del costo total de inversión para cada caudal considerado en el análisis.



Q (m³/s)	Bocatoma	Canal Aducción	Desarenador	Cámara de C.	Tub. Forzada	Cása Máq	E. Electromecánico	Canal Descarga	Distribución Eléctrica	TOTAL
1.71	S/. 551,943.81	S/. 5,957,852.91	S/. 60,917.44	S/. 63,699.19	S/. 24,634,307.75	S/. 448,822.31	S/. 9,076,870.16	S/. 8,618.17	S/. 862,932.95	S/. 41,665,964.70
	1.32%	14.30%	0.15%	0.15%	59.12%	1.08%	21.78%	0.02%	2.07%	
1.6	S/. 541,934.10	S/. 5,785,499.95	S/. 55,484.58	S/. 61,211.74	S/. 23,278,673.91	S/. 440,682.74	S/. 8,616,887.42	S/. 8,282.32	S/. 862,932.95	S/. 39,651,589.71
	1.37%	14.59%	0.14%	0.15%	58.71%	1.11%	21.73%	0.02%	2.18%	
1.55	S/. 532,922.68	S/. 5,584,304.31	S/. 53,710.39	S/. 59,874.75	S/. 22,658,373.44	S/. 433,354.96	S/. 8,445,111.50	S/. 8,027.52	S/. 862,932.95	S/. 38,638,612.49
	1.38%	14.45%	0.14%	0.15%	58.64%	1.12%	21.86%	0.02%	2.23%	
1.5	S/. 567,609.44	S/. 5,812,077.72	S/. 55,744.13	S/. 62,115.05	S/. 22,034,792.71	S/. 461,561.07	S/. 8,349,443.54	S/. 7,835.59	S/. 862,932.95	S/. 38,214,112.20
	1.49%	15.21%	0.15%	0.16%	57.66%	1.21%	21.85%	0.02%	2.26%	
1.47	S/. 521,435.58	S/. 5,317,959.94	S/. 50,069.87	S/. 56,108.31	S/. 21,658,914.93	S/. 424,014.03	S/. 8,292,536.98	S/. 7,643.66	S/. 862,932.95	S/. 37,191,616.25
	1.40%	14.30%	0.13%	0.15%	58.24%	1.14%	22.30%	0.02%	2.32%	
1.44	S/. 504,473.63	S/. 5,226,842.82	S/. 48,295.68	S/. 54,267.39	S/. 21,281,907.56	S/. 410,221.14	S/. 8,186,257.72	S/. 7,514.60	S/. 862,932.95	S/. 36,582,713.49
	1.38%	14.29%	0.13%	0.15%	58.17%	1.12%	22.38%	0.02%	2.36%	
1.38	S/. 484,455.48	S/. 4,658,022.55	S/. 44,793.36	S/. 52,426.46	S/. 20,545,001.52	S/. 393,943.05	S/. 8,000,163.88	S/. 7,230.45	S/. 862,932.95	S/. 35,048,969.71
	1.38%	13.29%	0.13%	0.15%	58.62%	1.12%	22.83%	0.02%	2.46%	

**Tabla 27. Resumen de los costos de las obras civiles y, suministros y obras electromecánicas (Elaboración Propia).**

#### 4.3.3.3 Evaluación económica

Para efectuar la evaluación económica se consideró un periodo de estudio de 32 años, ello de acuerdo al ratio de tiempo estimado a partir de proyectos de minicentrales hidroeléctricas con similares características, de los cuales los dos primeros corresponden a la ejecución de las inversiones. Para los 30 años restantes se identificaron los beneficios y costos del proyecto: en el rubro de beneficios se consideró los ingresos por ventas de energía y en el rubro de costos se consideró gastos de personal fijo, repuestos y combustibles, pago al COES, Osinergmin y DGE (1% del ingreso anual) y Canon de agua (1% del ingreso por energía anual) según lo indica la Ley de Concesiones Eléctricas (LCE). Los valores de personal fijo, repuestos y combustibles fueron obtenidos también mediante ratios a partir de proyectos de similares características.

#### 4.3.3.4 Análisis de beneficio/costo

Mediante este método, se compararon los beneficios de todas las alternativas contempladas, en base a los costos que se presentarían a lo largo de la vida útil del proyecto. El método utilizado indica que el proyecto debe realizarse si los beneficios son mayores que los costos. Como los costos y beneficios ocurren en años distintos, es necesario actualizarlos a una misma tasa de descuento y a un año que normalmente es el inicio del primer año del proyecto. Una vez actualizados los beneficios y los costos, la evaluación se realizó utilizando los siguientes indicadores económicos: valor actual neto (VAN), relación beneficio costo (B/C) y tasa interna de retorno (TIR). Para los caudales 1.71, 1.47, 1.44, 1.38, 1.50, 1.55 y 1.60 m<sup>3</sup>/s, los resultados se muestran en la tabla resumen 28, los mismos que corresponden a una tasa de descuento del 12%, que es el valor considerado en la Ley de Concesiones Eléctricas (LCE). Los cálculos detallados para cada caudal se muestran en el Anexo V.

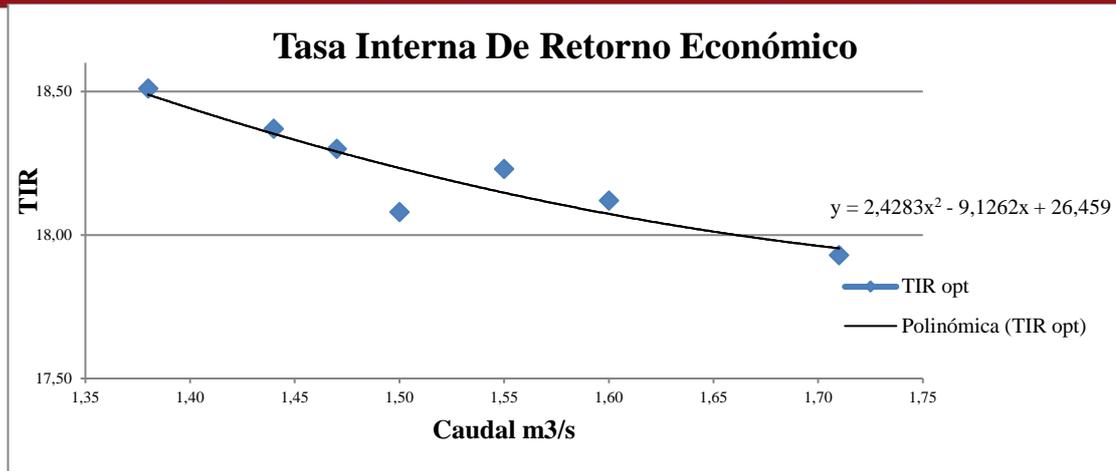
CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	INVERSIÓN TOTAL SIN IGV	TIR (%) ECONÓMICO	VAN(s/.)	B/C
1.71	S/. 48,332,519.05	17.93	S/. 19,152,050.98	1.42
1.6	S/. 45,995,844.06	18.12	S/. 18,829,064.05	1.43
1.55	S/. 44,820,790.49	18.23	S/. 18,688,875.92	1.44
1.5	S/. 44,328,370.15	18.08	S/. 18,008,815.10	1.43
1.47	S/. 43,142,274.85	18.3	S/. 18,187,930.66	1.44
1.44	S/. 42,435,947.65	18.37	S/. 18,105,561.13	1.45
1.38	S/. 40,656,804.86	18.51	S/. 17,753,306.16	1.46

**Tabla 28. Indicadores económicos para los distintos caudales analizados (Elaboración Propia).**

Finalmente, se evaluaron los indicadores: factor de planta, costo unitario energético y la TIR, y en base a éstos se eligió el caudal óptimo de diseño, resultando dicho valor igual a 1.38m<sup>3</sup>/s. Dicho caudal se eligió porque genera un factor de planta de 0.96 (valor mayor a 0.6, como se indicó en el ítem 4.3.3.1), un costo de unidad energética menor que el precio monómico (56.55 U\$\$/MWh), y una TIR de 18.51% (mayor valor de retorno en comparación a las otras alternativas planteadas). En la tabla 29 se presentan los indicadores antes señalados, así como el respectivo costo de inversión y en el gráfico 18 se muestra la variación de la TIR con el caudal.

CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)	INVERSIÓN TOTAL SIN IGV	TIR (%) ECONÓMICO	FACTOR PLANTA
1.71	S/. 48,332,519.05	17.93	0.89
1.6	S/. 45,995,844.06	18.12	0.92
1.55	S/. 44,820,790.49	18.23	0.93
1.5	S/. 44,328,370.15	18.08	0.94
1.47	S/. 43,142,274.85	18.3	0.95
1.44	S/. 42,435,947.65	18.37	0.95
1.38	S/. 40,656,804.86	18.51	0.96

**Tabla 29. Comparación para la elección del caudal óptimo (Elaboración Propia).**



**Gráfico 18. Comparación del caudal vs la tasa interna de retorno (TIR)  
(Elaboración Propia).**

Los resultados señalados anteriormente aseguran que el caudal de diseño de 1.38m³/s generaría el proyecto más rentable y más autosostenible económicamente.

#### 4.4 Predimensionamiento de obras civiles

Las predimensiones de las componentes de la minicentral hidroeléctrica se realizaron utilizando las curvas paramétricas de la tesis, Planeamiento para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas en el Perú, aplicación a la pequeña central de Cutervo (1982) mencionados en el ítem 4.3.3.2 y colocadas en el Anexo VI. A continuación, se muestran los resultados finales de dicho predimensionamiento, para el caudal de diseño escogido.

##### 4.4.1 Bocatoma

La bocatoma fue dimensionada para el caudal de captación de 1.38 m³/s, donde se obtuvieron las dimensiones mostradas en la tabla 30. Asimismo, los parámetros señalados en la tabla 30 se ilustran en la figura 27. Por otro lado, en el Anexo I se muestra el plano de la estructura con las dimensiones reales de diseño obtenidos para una bocatoma tipo estándar con barraje fijo y con las vistas de cortes indicados.

Q (m³/s)	A(m)	Bo(m)	B(m)	L(m)	Ho(m)	H(m)	A(m)	C(m)	L(m)	B1(m)
1.38	0.77	1.34	2.68	2.68	0.99	0.84	0.44	1.34	2.49	1.34

**Tabla 30. Dimensiones para el esquema de captación de la bocatoma, en metros  
(Elaboración Propia).**

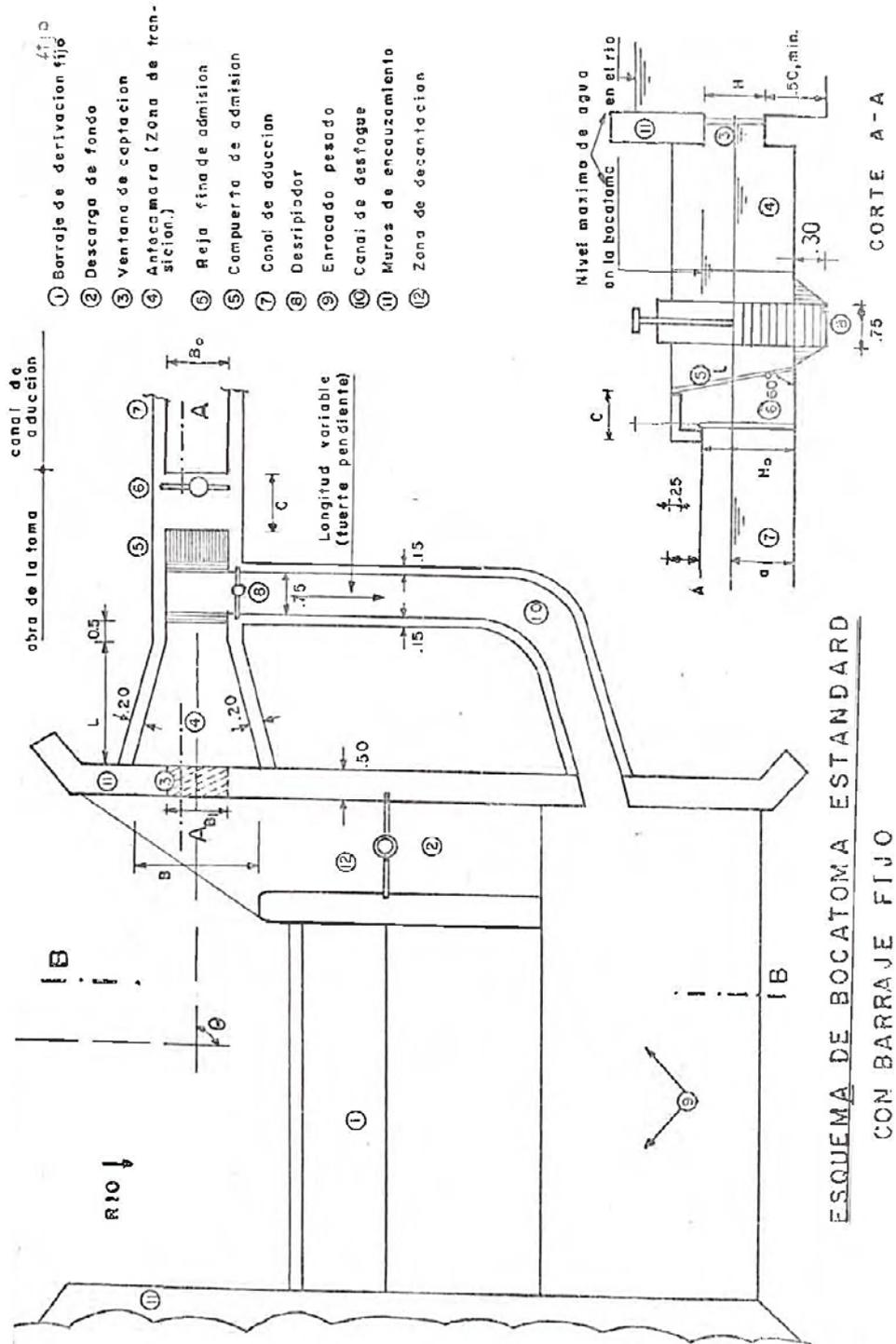


Figura 27. Esquema de bocatoma estándar con barraje fijo (Mellado, 1982)

#### 4.4.2 Canal de aducción y descarga

Para el dimensionamiento del canal de conducción y descarga se consideró una sección trapezoidal, con una pendiente longitudinal de 1/1000 la cual permite una velocidad que no produce sedimentación ni deteriore la superficie del canal. Por otro lado, se consideró un talud de 1/4 :1, según lo propuesto en la tesis de Mellado (1982). Para las paredes del canal cuentan con un espesor constante de 20cm y el tirante de agua resultó de 0.85m y el ancho de fondo de 1.03m.

En el Anexo I se muestra el plano del canal de conducción donde se señala las especificaciones técnicas consideradas.

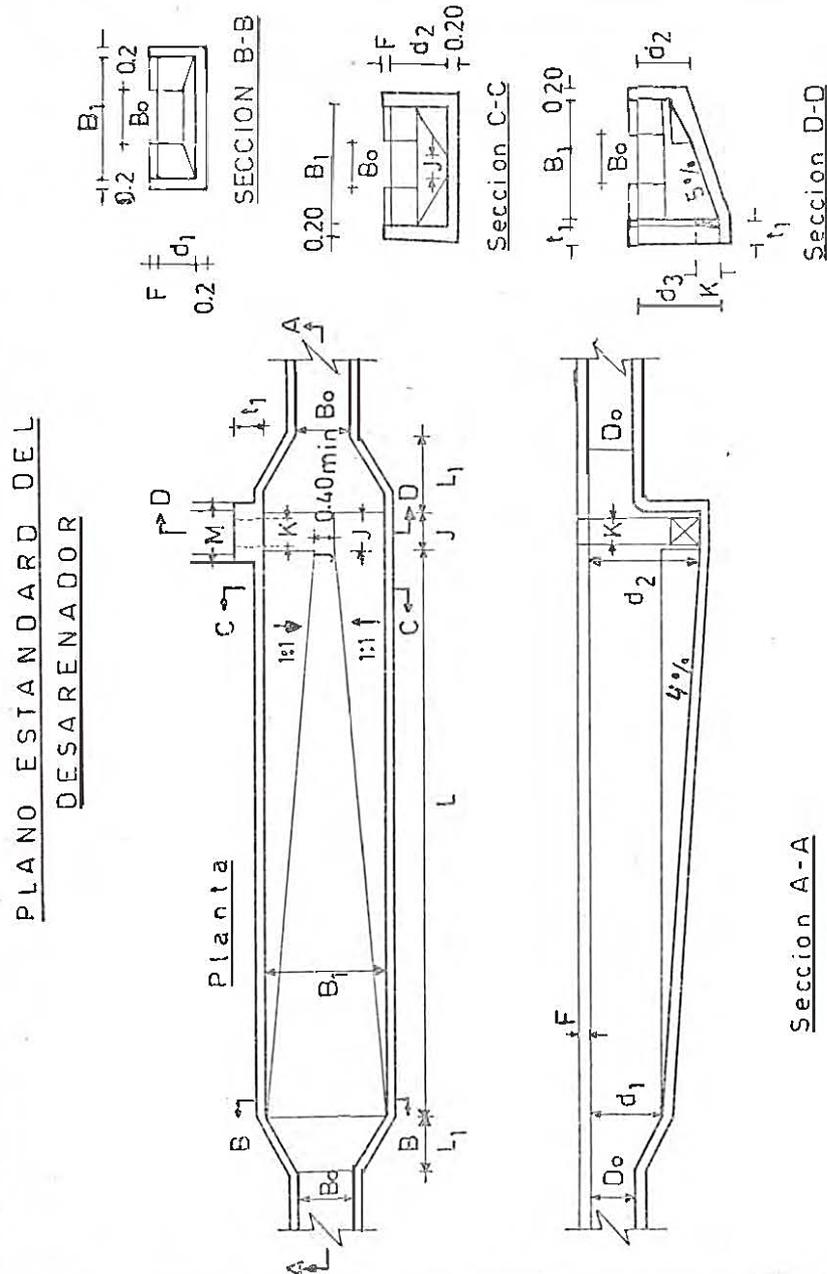
#### 4.4.3 Desarenador

El desarenador fue dimensionado con el caudal de captación de 1.38 m<sup>3</sup>/s, para evitar que partículas mayores o iguales a 0.5mm lleguen a las turbinas, reduciendo así el desgaste continuo a los álabes de las turbinas Pelton. Se obtuvo las dimensiones mostradas en la tabla 31. Asimismo, estos valores se ilustran en la figura 28 donde se muestra el esquema típico de un desarenador. los cuales fueron adaptados de la fuente principal que se encuentra en el Anexo VI.

El plano del desarenador con las dimensiones obtenidas se muestra en el Anexo I.

Q (m <sup>3</sup> /s)	Do(m)	Bo(m)	d1(m)	B1(m)	L(m)	L1(m)	d2(m)	F(m)	d3(m)	J(m)	M(m)	K(m)	t1(m)
1.38	0.77	1.31	1.54	3.08	12.73	3.53	2.07	0.29	2.14	0.98	1.35	0.68	0.74

**Tabla 31. Dimensiones estándar para desarenador, en metros (Elaboración Propia).**



**Figura 28. Plano estándar de un desarenador (Mellado, 1982)**

#### 4.4.4 Cámara de carga

La cámara de carga fue dimensionada con el caudal de captación de  $1.38 \text{ m}^3/\text{s}$ , donde se consideraron los parámetros indicados en la tabla 32. Asimismo, estos parámetros se ilustran en la figura 29. Asimismo, en el Anexo I se muestra el plano de la estructura con las dimensiones reales de diseño obtenidas para una cámara de carga estándar.

Q (m³/s)	Do(m)	Bo(m)	d1(m)	B1(m)	L(m)	L1(m)	d2(m)	K(m)	d3(m)	B2(m)	F(m)	n(m)	h(m)	V(m)	D(m)	M(m)	B(m)
1.38	0.77	1.31	1.54	3.08	12.72	3.53	2.06	0.67	0.80	1.12	0.48	2.32	0.87	1.56	0.77	1.65	1.55

Tabla 32. Dimensiones estándar para la cámara de carga, en metros.

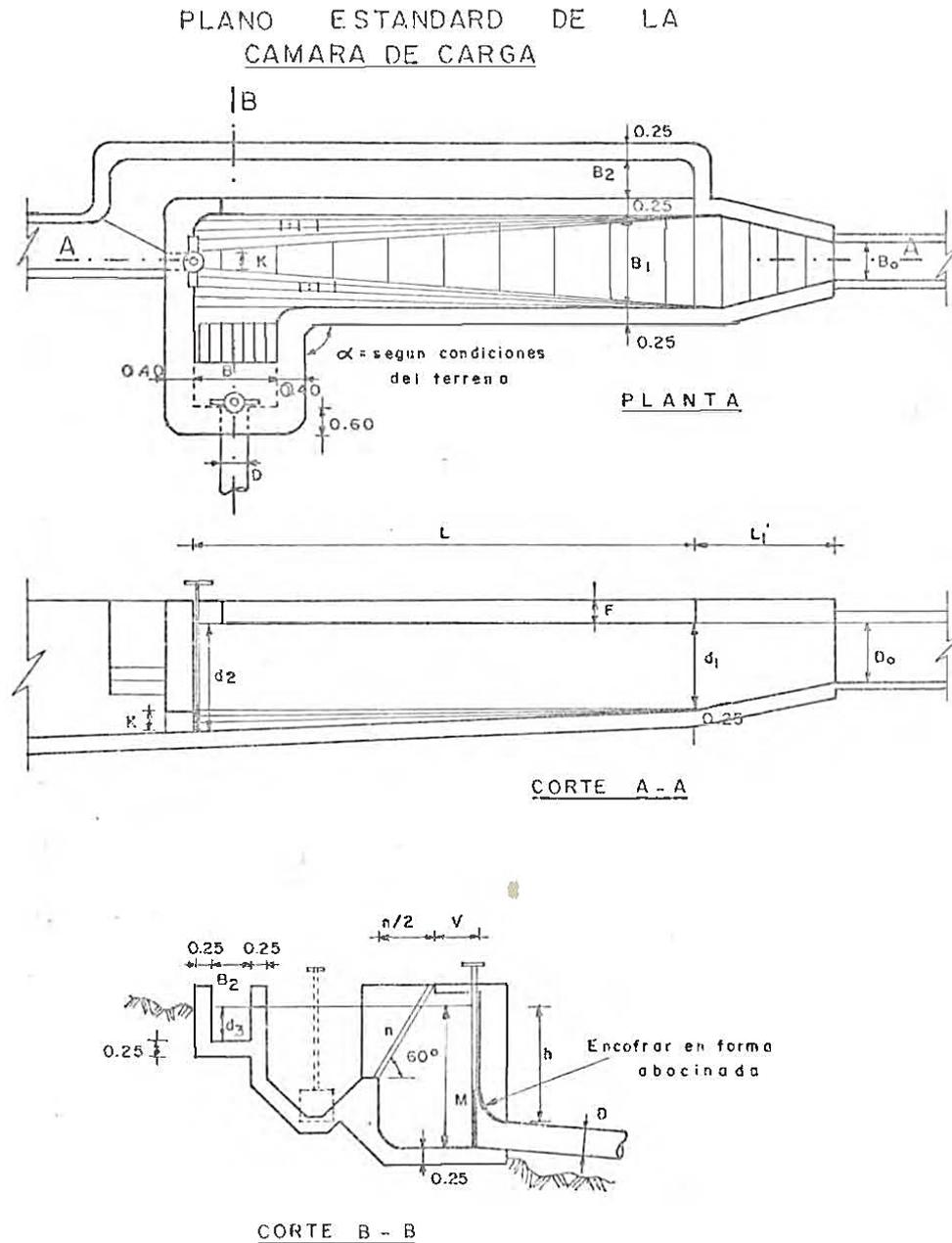
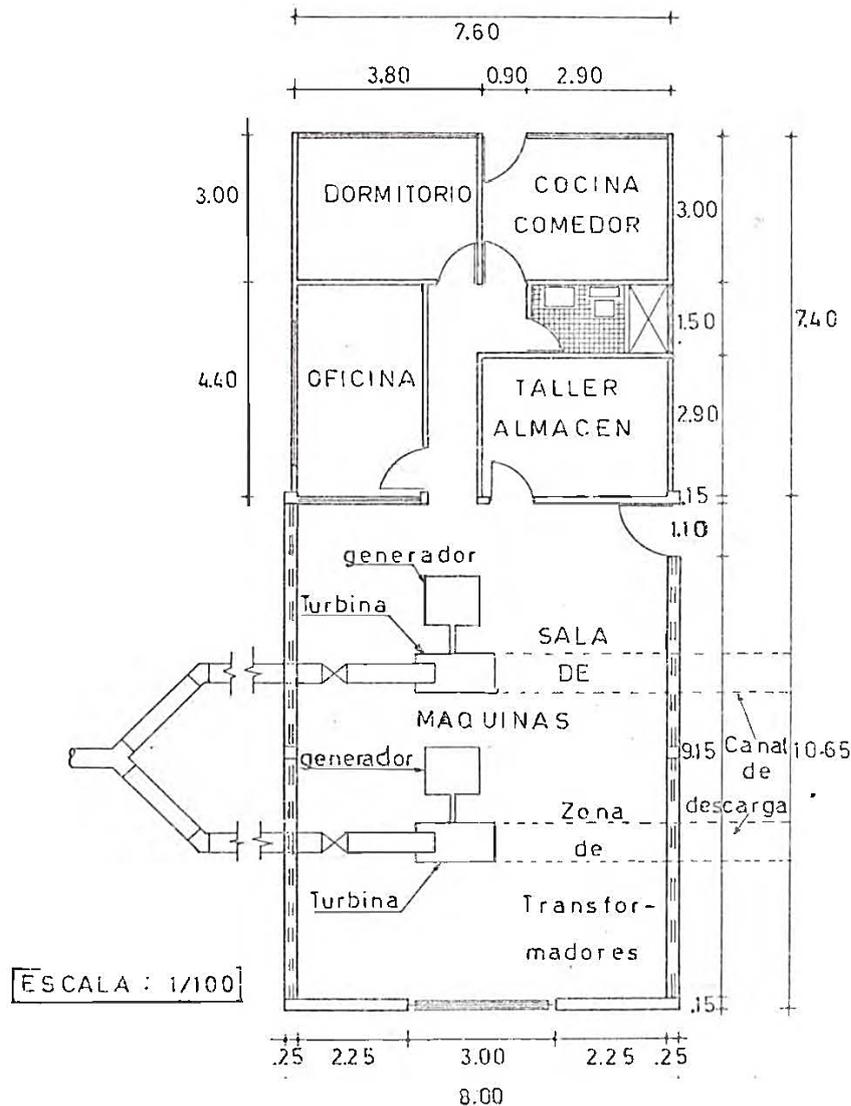


Figura 29. Plano estándar de la cámara de carga (Mellado, 1982)

#### 4.4.5 Casa de máquinas

Para estimar el área de la casa máquinas se empleó la lámina N° 5.36 que se encuentra en el Anexo VI, la cual fue adaptada a la altura de caída de este estudio (530m), obteniéndose un área aproximada de 150 m<sup>2</sup> para una potencia de al menos 2MW, que es el caso de este estudio (5.74 MW).



**Figura 30. Esquema de casa de máquinas para una pequeña central hidroeléctrica (Mellado, 1982)**

La figura 30 resultó útil para tener en consideración la distribución de los ambientes necesarios en la casa de máquinas de acuerdo con la potencia generada en una pequeña central y así estimar un área de 150 m<sup>2</sup> para el presente proyecto.

#### 4.5 Resumen de las características de la minicentral de Carampoma

A continuación, en la tabla 33 se muestra el resumen de las principales características de la Minicentral Carampoma, los cuales fueron presentados en el ítem 4.2 y en los Anexos III y IV.

Características	Unidades	Minicentral hidroeléctrica Carampoma
Caudal de diseño	m <sup>3</sup> /s	1.38
Cota de bocatoma	msnm	4054
Longitud de conducción	m	7400
Cota de cámara de carga	msnm	4055
Longitud de la tubería forzada	m	735
Diámetro de tubería	m	0.57
Espesor estimado	mm	209.32
Carga bruta	m	530
Pérdida de carga	m	31.23
Carga neta	m	498.77
Cota casa de máquinas	msnm	3525
Número de turbinas	----	2 de 2.87 MW c/u
Tipo de turbinas	----	Pelton
Potencia instalada	MW	5.74
Energía generada anual	GWh	49.59
Factor de planta	----	0.96
Costo total	s/.	47,975,030
Costo específico	\$/kW	2061

**Tabla 33. Características de la Minicentral Carampoma (Elaboración Propia).**

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones:

1. El estudio del proyecto de la Minicentral Hidroeléctrica de Carampoma contempla el aprovechamiento de las aguas reguladas de las lagunas que forman el río Shuncha del sistema energético de la cuenca del río Rímac - Santa Eulalia hasta un caudal máximo de 4.82 m<sup>3</sup>/s.
2. Se verificó que la metodología de la transferencia hidrológica es aplicable al proyecto debido a la semejanza de las características climatológicas, geomorfológicas y de ubicación. Asimismo, el parámetro de la precipitación media anual empleada en la metodología quedó sin efecto como consecuencia de los resultados de las precipitaciones medias anuales mediante los polígonos de Thiessen en las subcuencas de Sheque y Shuncha.
3. Dado el salto obtenido de 530 m, se han evaluado algunas alternativas de diseño correspondientes a distintos caudales obtenidos de la curva de persistencia, habiéndose establecido que el caudal óptimo es 1.38 m<sup>3</sup>/s, al cual le corresponde una potencia de diseño de 5.74MW.
4. A fin de evitar paralizaciones totales por mantenimiento y a fin de que la central pueda operar con caudales menores, es conveniente que la minicentral hidroeléctrica conste de dos turbinas tipo Pelton de 2.87MW c/u conectados a igual número de generadores eléctricos y transformadores elevadores de potencia.
5. La central hidroeléctrica se conectará al SEIN en la subestación San Mateo de Luz del Sur por ser el punto más cercano. Para tal efecto, se deberá construir una línea de transmisión aérea de 22.9kV y 21.4 km.
6. Los indicadores económicos obtenidos para el proyecto son: una TIR de 18.51%, y una relación beneficio/costo de 1.46, lo cual permite concluir que éste es económicamente rentable.

## 5.2 Recomendaciones:

1. Se recomienda reinstalar la estación hidrométrica debajo del puente Macachaca y que cuente con características adecuadas para obtener un registro continuo y automático del río Shuncha, para así obtener mediciones confiables.
2. Se sugiere a futuro, derivar las aguas de la laguna Yayancure a la subcuenca del Río Shuncha con el objeto de ampliar el caudal hídrico para la generación eléctrica y así incrementar la capacidad de generación de la minicentral hidroeléctrica Carampoma.
3. En los proyectos futuros de ampliación y mejoramiento de las centrales hidroeléctricas existentes y futuras centrales hidroeléctricas, tendrá que tomarse en cuenta el proyecto del trasvase de las aguas de la Cuenca alta del Río Mantaro a la cuenca del Río Santa Eulalia, disponiendo un caudal de 21.3 m<sup>3</sup>/s.
4. Para la ampliación de la Minicentral hidroeléctrica de Carampoma se recomienda en el futuro derivar de las aguas del túnel y del proyecto del canal Trasandino de Marcapomacocha mediante un túnel de Milloc hasta Carhuac.
5. En el proyecto se observa que la tubería forzada tiene un 58.62% de incidencia en el costo total del proyecto. Sin embargo, se podría optimizar su costo mediante el cálculo del diámetro óptimo.
6. Para una mayor confiabilidad en el registro resultante de la Metodología de la Transmisión hidrológica se deberá realizar un ajuste con un registro de aforo de caudales de por lo menos 1 año. Sin embargo, los valores considerados son válidos para el estudio preliminar.
7. El proyecto es apto para postular a la siguiente licitación de generación RER que realice Osinergmin.

## BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO, F. J. (1992) Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa
2. CASTRO Adriana, 2006. Minicentrales hidroeléctricas. (Manual de Energía Renovables N° 6) Ed. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), Madrid.
3. CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill.
4. LINSLEY, R. K., & Franzini, J. B. (1970) Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. Compañía Editorial Continental (NN).
5. McCuen, R. H. (1998) Hydrologic Analysis and Design. Prentice-Hall.
6. MINISTERIO DE AGRICULTURA, Autoridad Nacional del Agua / Administración Local de Agua Chillón Rímac Lurín, 2010. “Evaluación de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac” (Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones en la Cuenca del Río Rímac) Volumen I, Informe Final. Lima.
7. Ministerio de Energía y Minas, Lima.
8. ORTIZ FLÓREZ, Ramiro, 2011. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Ed. De la U. Bogotá, Colombia.
9. SALAZAR DÍAZ, Humberto, 1983. Geología de los Cuadrángulos de: Matucana y Huarochirí, hojas 24 - K y 25 – K, Boletín N° 36, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima. Ed. INGEMMET. Pp. 68.
10. SARAGO, D.D., GÁSTELO, J., VELÁZQUEZ, T.O., ALATA, C.A. y MONTALVO, C.A., 2014. “Simulación del sistema hidráulico de la cuenca del río Rímac - Santa Eulalia”. Revista de Investigación de Física 17, 141702601 (2014), Universidad Mayor de San Marcos, Lima. Pp. 11.
11. VILLANUEVA URE, Reynaldo, 2010. Centrales hidroeléctricas. Ed. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Pp. 206.
12. CHOW, V. T. 1986. “*Hidráulica de los Canales Abiertos*”. Ed. Diana, S.A. México, D.F., México.
13. CHÁVEZ, R. 1994. “*Hidrología para Ingenieros*”. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
14. ZOPPETTI, G. 1979. “*Centrales Hidroeléctricas*”. Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, España.
15. NEWNAN, D. 1990. “*Análisis Económico en Ingeniería*”. McGraw-Hill. México, D.F., México.

16. BLANK, L., TARQUIN, A. 2012. *“Ingeniería Económica”*. McGraw-Hill. México, D.F., México.
17. HARVEY, A. 1993. *“Micro-hydro Design Manual: A guide to small-scale water power schemes”*. London,UK.
18. ROUSE, H. (1951). *“Hidráulica”*. Ed. Dossat, S.A. Buenos Aires, Argentina.
19. VIEJO, P., PALACIOS, P.1977. *“Energía Hidroeléctrica:Turbinas y Plantas Generadoras”*. Ed. Limusa. México, D.F., México.
20. Grupo Formación de Empresas Eléctricas (GFEE). 1994. *“Centrales Hidroeléctrica I: Conceptos y Componentes Hidráulicos”*. Ed. Paraninfo, S.A. Madrid, España.
21. Intermediate Technology Development Group (ITDG-PERÚ). 1995. *“Manual de Minicentrales Hidráulicas: Una guía para el desarrollo de proyectos”*. Intermediate Technology Development Group. Lima, Perú.
22. Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE). 2012. *“Cost Base for Small-scale Hydropower Plants: With a generating capacity of up to 10 000kW”*. Norwegian Water Resources and Energy Directorate. Oslo, Noruega.
23. MELLADO, J. 1982. *“Planeamiento para el prediseño de pequeñas centrales hidroeléctricas en el Perú, aplicación a la pequeña central de Cutervo”*. Tesis para optar por el Título Profesional de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
24. CHIOCK, F. 2009. *“Caudal Ecológico”*. Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú.
25. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Mina (OSINERGMIN). *“Anuario Estadístico de Electricidad 2007 al 2013”*. Consulta: Marzo 2015.  
<http://www.osinergmin.gob.pe/>