**UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS
APLICADAS**

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL DISEÑO DE
UNA TOMA TIPO TIROLESA CON EL DE UNA
TOMA CONVENCIONAL**

Caso de estudio: Sub-Cuenca del Río Tulumayo

TESIS

Para optar por el título profesional de: Ingeniero Civil

AUTORES:

FRANCIS GUSTAVO CABELLO OSORIO (0000-0003-3860-6289)

OSCAR JOSE VALLEJOS SÁNCHEZ (0000-0002-8935-5064)

ASESOR DE TESIS:

Dr. EDILBERTO GUEVARA PEREZ(0000-0003-2813-2147)

Lima, 02 de Julio de 2018

Tabla de Contenido

Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	6
AGRADECIMIENTOS	9
INTRODUCCIÓN	12
CAPITULO 1. GENERALIDADES	14
1.1. ANTECEDENTES	14
1.2. ALCANCE Y DEFINICIÓN DE PROBLEMAS	14
1.2.1. Alcance	14
1.2.2. Problemática general.....	15
1.2.3. Problemas específicos.....	15
1.3. HIPÓTESIS	16
1.3.1. Hipótesis general.....	16
1.3.2. Hipótesis específicas.....	16
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.4.1. Objetivo general.....	16
1.4.2. Objetivos específicos	16
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.6. INDICADORES DE LOGRO	18
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 DEFINICIONES.....	19
2.1.1 Proyecto hidráulico	19
2.1.2 Obra hidráulica.....	20
2.1.3 Obra de toma	20
2.2 DESCRIPCIÓN DE OBRAS DE TOMA	21
2.2.1 Tipos de tomas	21
2.2.2 Condiciones para emplazamiento.....	22
2.2.3 Parámetros preliminares de diseño.....	22
2.3 DISEÑO DE LA TOMA CONVENCIONAL	27
2.3.1 Dimensionamiento de la ventana de captación	27
2.3.2 Dimensionamiento de la reja.....	30
2.3.3 Dimensionamiento del canal de purga	32
2.3.4 Dimensionamiento del azud o barraje fijo	34
2.3.5 Dimensionamiento del colchón dissipador	37
2.3.6 Dimensionamiento del desripador.....	40

2.3.7	Dimensionamiento de la transición	41
2.3.8	Dimensionamiento de compuertas de regulación y/o barraje móvil	42
2.3.9	Diseño de los muros de encauce	43
2.4	DISEÑO DE LA TOMA TIPO TIROLESA	45
2.4.1	Dimensionamiento de la reja.....	46
2.4.2	Dimensionamiento del canal colector	50
2.4.3	Dimensionamiento del azud	51
2.4.4	Diseño de estructuras complementarias	53
2.5	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	54
2.5.1	Funcionalidad de toma tipo tirolesa en Bolivia.....	55
2.5.2	Funcionalidad de toma tipo tirolesa en Perú	56
2.6	PARÁMETROS DE IMPACTO AMBIENTAL.....	57
2.6.1	Caudal ecológico	57
2.6.2	Identificación de impactos ambientales	57
2.6.3	Metodología para la valoración de impactos ambientales.....	58
CAPITULO 3. INGENIERÍA DE DISEÑO		64
3.1	PARÁMETROS PRELIMINARES DE DISEÑO PARA EL CASO DE ESTUDIO	64
3.1.1	Ubicación	64
3.1.2	Información Hidrológica	65
3.1.3	Caudal de captación	68
3.1.4	Pendiente del tramo de río.....	68
3.1.5	Cálculo de la anchura de encauzamiento	69
3.1.6	Cálculo del tirante extraordinario.....	70
3.2	DISEÑO DE TOMA CONVENCIONAL PARA EL CASO DE ESTUDIO .	70
3.2.1	Dimensionamiento de la ventana de captación	70
3.2.2	Dimensionamiento de la reja.....	73
3.2.3	Dimensionamiento del canal de purga al lado de azud	74
3.2.4	Dimensionamiento de azud	75
3.2.5	Dimensionamiento del colchón disipador	77
3.2.6	Dimensionamiento del desripador.....	79
3.2.7	Dimensionamiento de la transición	81
3.2.8	Dimensionamiento de las compuertas de regulación	82
3.3	DISEÑO DE TOMA TIPO TIROLESA PARA EL CASO DE ESTUDIO	84
3.3.1	Dimensionamiento de la reja.....	84

3.3.2	Dimensionamiento del canal colector	86
3.3.3	Dimensionamiento de azud	87
3.3.4	Dimensionamiento de la purga.....	89
3.3.5	Dimensionamiento de la compuerta de regulación	90
3.4	IMPACTOS AMBIENTALES PARA EL CASO DE ESTUDIO	92
3.4.1	Toma convencional:	92
3.4.2	Toma tipo tirolesa:	94
3.5	COSTOS DE PARTIDAS SIGNIFICATIVAS PARA EL CASO DE ESTUDIO	
	97	
3.5.1	Partidas para el caso de estudio.....	97
3.5.2	Partidas para diversos caudales	98
CAPITULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		100
4.1	ANÁLISIS COMPARATIVO.....	100
4.1.1	Parámetros preliminares de diseño.....	100
4.1.2	Componente de la estructura	101
4.1.3	Valoración de los impactos ambientales	104
4.1.4	Costo de partidas significativa en el caso de estudio	106
4.1.5	Costo de partidas significativa para diversos caudales.	107
4.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	108
CONCLUSIONES		110
RECOMENDACIONES.....		113
BIBLIOGRAFÍA		114

Índice de Figuras

Figura 1. Anchura B_r y tirante Y_r en la zona de encauzamiento.	26
Figura 2. Toma convencional y sus componentes..	27
Figura 3. Dimensiones en la entrada de agua por la ventana de captación.	28
Figura 4. Coeficientes β en función a la forma de la varilla.	32
Figura 5. Vista de perfil transversal del azud.....	34
Figura 6. Coeficiente de descarga en cimacios.	35
Figura 7. Vista en perfil de la cresta del barraje fijo.....	36
Figura 8. Resalto hidráulico y tirantes conjugados a pie del barraje.....	37
Figura 9. Sección transversal del río, desripador y transición.	40
Figura 10. Transición formada por arcos circulares.....	41
Figura 11. Diferencia en el nivel del agua en el diseño de la compuerta.....	43
Figura 12. La toma tipo tirolesa.	45
Figura 13. Esquema de flujo sobre la rejilla para nivel de energía constante.	47
Figura 14. Detalle de rejilla en una toma tipo tirolesa.	48
Figura 15. Vista en planta de una toma tipo tirolesa.	51
Figura 16. Sección transversal de una toma tipo tirolesa.....	53
Figura 17. Alternativa para mantenimiento de toma.....	54
Figura 18. Ubicación de las tomas de captación.....	64
Figura 19. Ubicación de la subcuenca de estudio.	65
Figura 20. Caudales mensuales de la cuenca Huaruchaca	66
Figura 21. Material grueso de fondo y material cohesivo en orilla.	69
Figura 22. Dimensiones en la entrada de agua por la ventana de captación.	71
Figura 23. Perfil del azud para la toma convencional.....	77
Figura 24. Perfil del azud para la toma tipo tirolesa.	89
Figura 25. Montaje de la toma tirolesa para una inclinación α	102

Índice de Tablas

Tabla 1. Funcionamiento de la toma tirolesa según la pendiente de río.	24
Tabla 2. Zona y condición para parámetro que caracteriza el cauce.....	26
Tabla 3. Coordenadas del perfil Creager para $H_d=1$ m.	37
Tabla 4. Borde libre.	44
Tabla 5. Impactos ambientales para una obra de central hidroeléctrica en la componente de captación para la etapa de construcción.	57
Tabla 6. Impactos ambientales para una obra de central hidroeléctrica en la componente de captación para la etapa de operación y mantenimiento.	58
Tabla 7. Escalas para las variables dentro la matriz de importancia.	59
Tabla 8. Escala de intensidad para los impactos ambientales en la etapa de construcción.	60
Tabla 9. Escala de intensidad para los impactos ambientales en la etapa de operación y mantenimiento.....	63
Tabla 10. Periodo de retorno en función de la zona a proteger.....	67
Tabla 11. Cálculo de coeficiente de descarga de azud C_a	76
Tabla 12. Coordenadas del perfil de Creager para el azud.	77
Tabla 13. Cálculo del ancho variable para la transición.	82
Tabla 14. Iteración de dimensiones de rejilla.	85
Tabla 15. Cálculo de la línea de energía en el canal colector.	87
Tabla 16. Altura total de la línea de energía.	87
Tabla 17. Coordenadas del perfil de Creager para el azud.	88
Tabla 18. Comparación de dimensiones entre toma convencional y toma tipo tirolesa. ..	91
Tabla 19. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma convencional y obtención de la Magnitud.....	92
Tabla 20. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma convencional y obtención del VIA.	93
Tabla 21. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma convencional y obtención de la Magnitud.	93
Tabla 22. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma convencional y obtención del VIA.	94

Tabla 23. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma tipo tirolesa y obtención de la Magnitud.	94
Tabla 24. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma tipo tirolesa y obtención del VIA.	95
Tabla 25. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma tipo tirolesa y obtención de la Magnitud.	96
Tabla 26. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma tipo tirolesa y obtención del VIA.....	97
Tabla 27. Precios unitarios de las partidas a ser analizadas.	98
Tabla 28. Precios unitarios de las partidas a ser analizadas.	99
Tabla 29. Caudales de captación para generar curva Caudal vs Inversión.	99
Tabla 30. Comparación de valoración ambiental en la etapa de construcción.	104
Tabla 31. Comparación de valoración ambiental en la etapa de operación y mantenimiento.	105
Tabla 32. Presupuesto para la toma convencional.	106
Tabla 33. Presupuesto para la toma tipo tirolesa.	106
Tabla 34. Presupuesto y curvas Caudal Vs Inversión.	107

DEDICATORIA

A nuestros padres, familiares y amigos que
nos brindaron el apoyo moral y académico
a lo largo de los años de estudio de la carrera.

AGRADECIMIENTOS

A nuestro asesor que nos ha guiado y
acompañado con dedicación durante
el desarrollo de la presente tesis.

A nuestros profesores que nos orientaron
y exigieron en el transcurso de nuestro
progreso académico, lo que nos ha permitido
desarrollarnos de manera integral.

RESUMEN

La ingeniería para el uso de los recursos hídricos en el Perú debe adaptarse a los diferentes retos de la hidrología, geografía y clima. El objetivo general de esta investigación es realizar un análisis comparativo de las ventajas hidráulicas, ambientales y de costos del componente de captación en un proyecto hidráulico al utilizar la toma tipo tirolesa y la toma convencional en la subcuenca de Huaruchaca perteneciente al distrito de Comas, provincia de Concepción, región Junín. En cuanto al diseño, en la toma tipo tirolesa la captación se realiza en el fondo del cauce con una canal transversal protegida por una rejilla a nivel del río dejando pasar el caudal excedente; mientras que en la toma convencional el agua se capta lateralmente elevando el nivel del río mediante barrajes. Por ello, las ventajas se encuentran en las dimensiones finales de las estructuras, las cuales, para un mismo caudal, son menores en la toma tipo tirolesa. La ventaja también se refleja en la disminución de los costos de inversión al implementar la toma tipo tirolesa. En tanto, para los impactos ambientales en la etapa de construcción y operación, la valoración obtenida es menor para la toma tipo tirolesa; asimismo, se cumple cuando el caudal de captación es menor de $3.40 \text{ m}^3/\text{s}$ para los parámetros planteados en la tesis. Finalmente, se concluye que la toma tipo tirolesa se adapta mejor a las condiciones de alta montaña respecto a la toma convencional; sin embargo, la ventaja ocurre con caudales pequeños.

Palabras clave: obra de captación, toma tirolesa, toma convencional

ABSTRACT

Engineering in the use of water resources in Peru must adapt to the different challenges of geography, climate, etc. The overall objective of this investigation is to evaluate the hydraulic, environmental and cost advantages of the catchment component in a hydraulic project comparing the Tyrolean intake and conventional intake in a subbasin of Huaruchaca in the district of Comas, province of Concepción, in the Junín region. For this contrast, the elements of design, cost and assessment of environmental impact are taken into account. As for the design, in the Tyrolean type the catchment is made at the bottom of the channel with a transverse channel protected by a grid at the level of the river leaving the excess flow; while in the conventional intake the water is captured laterally raising the level of the river by means of fixed or mobile barrages. For this reason, the advantages are found in the final dimensions of the structures, which, for the same flow, are smaller in the Tyrolean intake. The advantage is also reflected in the decrease in investment costs when implementing the Tyrolean intake this advantage is fulfilled when the catchment flow is less than $3.4\text{m}^3/\text{s}$ for the parameters proposed in the thesis. Finally, it is concluded that the Tyrolean intake is better adapted to the conditions of High Mountain compared to the conventional shot; however, it must be taken into account that the advantage occurs with small flows.

Keywords: intake structure, tyrolean intake, conventional intake

INTRODUCCIÓN

El agua representa el elemento más importante para la vida humana; por ello, desde el inicio de la civilización, el hombre ha buscado obtener provecho de este recurso para su desarrollo. La necesidad de disponer del agua lo ha llevado desde ubicarse cercano a un río hasta construir estructuras que le permitan conducir y aprovechar el agua de los afluentes para utilizarla en diversos fines, tales como: agrícolas, abastecimientos poblacionales, de regulación y más adelante energéticos o proyectos con objetivos múltiples.

Los proyectos hidráulicos o proyectos de aprovechamiento hídrico, normalmente constan de tres componentes principales: 1) obras de almacenamiento y derivación; 2) obras de conducción; y 3) obras de distribución. Como un elemento del primer componente están las estructuras hidráulicas diseñadas para captar el agua regulada e introducirla en el sistema de conducción aguas abajo del embalse; estas obras se denominan tomas. Asimismo, cuando la demanda es agrícola, el inicio de las obras del sistema de distribución también se realiza mediante tomas que capta el agua desde el sistema de conducción a los diferentes subsistemas de distribución. El diseño de las estructuras de toma se ha desarrollado en el último siglo por medio de las experiencias globales en el campo de la hidráulica.

Se puede resumir diciendo que las obras de toma permiten captar el agua de la fuente hídrica de modo controlado y eficiente; esta premisa se logra a través de un correcto diseño, operación y mantenimiento.

Por otro lado, se sabe que la construcción de cualquier tipo de obra de ingeniería hidráulica ocasiona impactos ambientales significativos, por lo que en los últimos años, el medio ambiente ha ganado un papel importante dentro de los proyectos hidráulicos, y ahora este factor también se debe considerar en el diseño de las tomas. Los andes peruanos poseen condiciones geográficas apropiadas para realizar proyectos hidráulicos de derivación; es decir, tomar pequeños caudales de los ríos para dar inicio a sistemas más complejos como centrales hidroeléctricas en cascada.

En la actualidad, en esta zona del país, las obras de toma están conformadas principalmente por tomas convencionales, que representan costos significativos en los proyectos hidráulicos; sin embargo, existe un tipo de toma no muy difundido en el Perú que podría adaptarse a las características propias del medio y con menores costos, es la toma tipo tirolesa.

La toma tirolesa, también conocida como toma de fondo, por captar el agua en la base de la escorrentía, constituye un diseño innovador y económico con respecto a otros tipos de captación.

La presente investigación trata de la comparación del diseño de la toma tipo tirolesa y de la toma convencional en los andes peruanos, tomando como caso de estudio el proyecto hidráulico de la sub-cuenca Huaruchaca del río Tulumayo del distrito de Comas de la provincia de Concepción, región Junín. En el análisis comparativo se incluye el impacto ambiental ocasionado por ambos tipos de estructuras hidráulicas.

CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

La práctica hidráulica en los Alpes con la toma tipo tirolesa demuestra ser una obra adecuada para las condiciones de terreno en altura, que se adapta a la topografía abrupta o de gran pendiente.

Esta obra de captación también ha sido utilizada en países vecinos, de topografía e hidrología similares a las del Perú, como Bolivia, que se ha tomado como experiencia en base a los errores ocurridos por no considerar criterios de operación y mantenimiento en el diseño.

Actualmente, en el Perú existen pocas tomas tipo tirolesas, en el desarrollo de esta tesis se han encontrado dos de ellas usadas para fines agrícolas. La primera está ubicada a 8 km de la Plaza de Armas de Huanta, en la región Ayacucho y la segunda, a 10 km de la Plaza de Armas de Crucero, región Puno. Ambas estructuras representan importantes aportes para la experiencia en el Perú, ya que en la mayoría de casos las obras de captación son del tipo convencional; sin embargo, la toma tipo tirolesa es una mejor alternativa que incurre en menores costos, en comparación con las tomas convencionales, gracias al menor uso de elementos para su funcionamiento.

1.2. ALCANCE Y DEFINICIÓN DE PROBLEMAS

1.2.1. Alcance

El alcance de esta tesis se centra en el diseño en los proyectos hidráulicos, específicamente en la etapa de captación en la sub-cuenca Huaruchaca del río Tulumayo del distrito de Comas de la provincia de Concepción, región Junín. En esta parte del trabajo se planea diseñar la toma tipo tirolesa y compararla con la toma convencional en conjunto respecto a la forma de diseño, comportamiento y dimensiones obtenidas.

También, se involucrará el factor ambiental, al efectuar una valoración ambiental de los impactos generados por el uso de la toma tirolesa y la toma convencional.

Asimismo, se evalúa los costos de las partidas más significativas y sensibles que diferencian a ambos tipos de toma.

Se ha tomado como base la información hidrología y demanda hídrica planteada en Chanchaya & Chero (2014), validando el uso de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en la subcuenca del río Tulumayo. El análisis del impacto ambiental, sólo se limita al aspecto de la valoración del impacto ambiental generado por cada toma al ser construida y su posterior operación.

Asimismo, se realizará una curva Caudal vs. Inversión de partidas significativas con el fin de evaluar hasta qué punto las tomas tipo tirolesa son más económicas que las tomas convencionales.

1.2.2. Problemática general

La problemática se presenta debido a que los recursos son escasos, y existe la necesidad constante de buscar alternativas que optimicen el uso de los recursos y generen los mismos o mayores beneficios. En el caso de las obras hidráulicas de captación, los costos del uso de la toma convencional son altos al limitar la implementación de los proyectos por su magnitud y la relativa elevada inversión requerida para ejecutarlos.

En este sentido, se debe evaluar la alternativa de utilizar obras de toma más pequeñas que satisfagan las mismas necesidades. La toma tipo tirolesa presenta cualidades que han sido aprovechadas en otros países, con características similares a la zona andina del territorio peruano, porque representan menores costos.

En consecuencia, el problema se plantea en los siguientes términos:

¿Cómo se reducirán los costos del componente de captación de un proyecto hidráulico; asimismo, los aspectos hidrológicos y ambientales serían más ventajosos o desventajosos usando la toma tipo tirolesa en vez de la toma convencional en la subcuenca Huaruchaca del río Tulumayo distrito de Comas, provincia de Concepción, región Junín?

1.2.3. Problemas específicos

Para comprender mejor el problema general es necesario responder primero a las siguientes interrogantes:

1. ¿Cómo inciden en el diseño de la toma convencional y la toma tipo tirolesa los criterios hidráulicos?
2. ¿Cómo varían los impactos ambientales según se capte el agua mediante una toma tipo tirolesa y la toma convencional?
3. ¿Cómo inciden los costos de inversión en el componente de captación en la selección de la toma?

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general

En comparación con la toma convencional, los costos de la componente de captación en un proyecto hidráulico son menores así como las características hidráulicas y ambientales ventajosas, mediante la implementación de la toma tipo tirolesa en la subcuenca Huaruchaca del río Tulumayo perteneciente al distrito de Comas, provincia de Concepción, región Junín.

1.3.2. Hipótesis específicas

- La toma tirolesa se adapta mejor que la toma convencional a las condiciones hidráulicas.
- Los impactos ambientales en la toma tirolesa son de menor magnitud que los de la toma convencional.
- En el componente de captación, los costos de inversión en la toma tipo tirolesa son menores que los de la toma convencional.

1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Objetivo general

Realizar el análisis comparativo de las ventajas hidráulicas, ambientales y de costos del componente de captación de un proyecto hidráulico, de la toma tipo tirolesa y la toma convencional en la subcuenca Huaruchaca del río Tulumayo perteneciente al distrito de Comas, provincia de Concepción, región Junín.

1.4.2. Objetivos específicos

- Comparar los criterios hidráulicos usados para el diseño de la toma convencional y la toma tipo tirolesa.

- Valorar y comparar los impactos ambientales de la toma tirolesa con los de la toma tipo convencional.
- Comparar la diferencia de costos en las partidas de mayor incidencia entre la toma tipo tirolesa y la toma convencional.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los proyectos hidráulicos vienen a ser un conjunto de obras que se diseñan y construyen para aprovechar los recursos hídricos; con el fin de cubrir una demanda. Las demandas pueden ser del tipo agrícola, poblacional, energética o multipropósito.

Los proyectos hidráulicos constan de tres componentes, de mayor o menor importancia de acuerdo con el objetivo del proyecto. En general, el primer componente se refiere a las obras de almacenamiento, derivación y captación; el segundo a las obras de conducción; y el tercero a las obras de distribución.

Como primer componente se utilizan las obras de almacenamiento cuando hay necesidad de regular la fuente de agua, como es el caso de la costa del Perú. En fuentes de agua que cubren la demanda, se usan las obras de derivación; siendo una obra de derivación, la estructura hidráulica de toma de agua, que permite captar el agua desde la fuente hasta el sistema de conducción. Las obras de almacenamiento también incluyen diferentes tipos de toma que permiten tomar el agua regulada en el embalse y entregarla en el sistema de conducción. En algunas obras de distribución se usan estructuras hidráulicas de toma, como es el caso del uso agrícola. De esta manera, las obras de toma, en las diferentes versiones, constituyen un componente indispensable en los proyectos hidráulicos.

En el país, se utilizan varios tipos de Tomas de acuerdo con las condiciones del caudal requerido para cubrir la demanda y la calidad de agua a usar. En ese sentido, los problemas a los que se enfrenta la ingeniería radican en dar soluciones eficientes a problemas cambiantes y específicos de cada proyecto; es por ello que el diseño de la solución implica conocer las alternativas disponibles; así como sus ventajas y desventajas al emplear cada tipo de solución. En el caso específico de las obras hidráulicas de captación, las tomas convencionales son las de mayor uso en los diferentes pisos altitudinales de Perú. Sin embargo, en busca de una nueva

alternativa que optimice los recursos para la zona específica de los andes de Perú, la toma tipo tirolesa es una solución tentativa sin gran difusión en el país que estaría adaptada al tipo de relieve y condiciones de la zona alto andina, como se ha visto en otros países; por ejemplo, Suiza y Austria en Europa y Bolivia en Latinoamérica. Además, se desconoce qué tan ventajosa resultaría su empleo en nuestro país; por ello, se justifica realizar el análisis comparativo entre la toma convencional y la toma tipo tirolesa para definir cuándo sería más ventajoso utilizar esta última con el fin de incrementar nuestro abanico de alternativas que solucionen una necesidad con menor uso de recursos.

1.6. INDICADORES DE LOGRO

Los indicadores de logro propuestos para esta investigación son:

1. Cuadro comparativo que cuantifica las ventajas hidráulicas de la toma tipo tirolesa sobre la toma convencional.
2. Cuadro comparativo que cuantifica las ventajas en costos de la toma tipo tirolesa sobre la toma convencional, a través de partidas significativas que tendría un presupuesto global de la componente de captación.
3. Cuadro comparativo que cuantifica y valora los impactos ambientales generadas por la toma tipo tirolesa y la toma convencional, utilizando la metodología de la matriz de importancia.
4. La investigación valida o refuta las hipótesis planteadas.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIONES

2.1.1 Proyecto hidráulico

De acuerdo con la definición introducida por el Tribunal Nacional de Resolución de Controversias Hídricas en su Resolución N° 68-2014-ANA (TNRCH, 2014-a), el proyecto hidráulico se define como el conjunto de obras hidráulicas que buscan utilizar los recursos hídricos de una cuenca específica o para la protección de dichos recursos frente a efectos antropogénicos o fenómenos naturales. Las necesidades a satisfacer pueden ser de almacenamiento, regulación, distribución o mitigación de las acciones del hombre.

En la definición propuesta por Guevara (2014), el proyecto hidráulico es el conjunto de estudios y los datos básicos utilizados para definir un aprovechamiento para el uso, control o conservación de los recursos hidráulicos y naturales vinculados a una cuenca, y de estimar las ventajas y desventajas para una nación por la asignación de recursos económicos en el inicio o mejora de bienes y servicios.

En cuanto a la clasificación, el proyecto hidráulico es de propósito único cuando se construye para satisfacer un solo tipo de demanda; mientras que cuando el objetivo es cubrir más de una demanda, el proyecto se denomina de usos múltiples. Los usos productivos de agua pueden ser dentro del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (RLRH, 2010) agrario, acuícola, pesquero, energético, industrial, medicinal, minero, recreativo, turístico, de transporte y otros.

Actualmente, los proyectos hidráulicos se planifican hacia usos múltiples e integrados para satisfacer las necesidades de todos los usuarios utilizando todas las fuentes de agua y los otros recursos naturales, y busca la integración de la región en sí misma y de su integración con las otras regiones.

Según Guevara (2014) los proyectos hidráulicos constan de tres componentes:

1. Obras de derivación, cuando la oferta hídrica es mayor que la demanda hídrica y/o obra de almacenamiento, cuando la demanda hídrica es mayor que la oferta hídrica.
2. Obras de conducción, para llevar el agua desde el sitio de derivación hasta el lugar donde se va a utilizar.
3. Obras de distribución, que sirven para entregar el agua a los usuarios contemplados en el proyecto.

2.1.2 Obra hidráulica

De acuerdo con la definición introducida por el Tribunal Nacional de Resolución de Controversias Hídricas en su Resolución N° 68-2014-ANA (TNRCH, 2014-b), las obras hidráulicas son construcciones destinadas para la utilización del agua; su diseño es competencia de las áreas de ingeniería civil y agrícola. Asimismo, The Sustainable Irrigation Association, denominada en lo sucesivo SIA (Asociación para el Riego Sostenible), define la obra hidráulica como un bien de naturaleza inmueble destinado a usar el agua (SIA, 2015).

Por la función que desempeñan, las obras hidráulicas se clasifican en obras de almacenamiento, captación, conducción, protección, regulación y control (regular el régimen). Entre las obras de almacenamiento, se encuentran las presas y el vaso de almacenamiento. Entre las obras de captación, se encuentran los diques de captación y la toma de derivación. En las obras de conducción están los canales y tuberías, y como obras asociadas, los túneles y viaductos. Entre las obras de protección se encuentran los desarenadores, aliviaderos, desfogues, disipadores de energía, tanque de presión, muros de contención, defensas riverañas y canales interceptores. Por último, entre las obras de regulación y control están departidores, medidores, compuertas, sifones, mangas y vertederos (Krochin, 1982; Guevara, 2014; SIA, 2015).

2.1.3 Obra de toma

La principal función de la obra de toma es captar el agua. Rocha (2003) define las obras de toma como estructuras hidráulicas construidas sobre un río o canal, con el objetivo de extraer, una parte o el total del caudal de la corriente principal. El gasto que se obtiene del cauce se denomina caudal de captación y es definido como el máximo caudal que la obra de toma puede admitir.

En tanto, el caudal captado mediante la obra de toma se utiliza para satisfacer diferentes necesidades, como el suministro de agua potable, usos agropecuarios, generación de energía hidroeléctrica, navegación, recreación, entre otras (Herrera, 2013; Guevara, 2014).

Por ende, la obra de toma es muy importante dentro de un proyecto hidráulico. La falla de esta estructura ocasiona una interrupción de la secuencia de captación y una falla del servicio al usuario, lo cual, en el peor de los casos conduciría al fracaso del proyecto hidráulico.

2.2 DESCRIPCIÓN DE OBRAS DE TOMA

2.2.1 Tipos de tomas

Se diferencian cuatro tipos de tomas de acuerdo a la forma de captación:

1. Toma directa:

Capta el agua directamente del río a un canal lateral sin la necesidad de barrajes fijos o móviles, disminuyendo así sus costos de construcción. Sin embargo, esto expone a la estructura a obstrucciones en época de avenidas, dejando pasar los sedimentos a la derivación (Mansen, 2000).

2. Toma convencional:

Capta el agua por medio de una ventana lateral que funciona como orificio o vertedero cuyo caudal de captación está en función del tirante. Para tal fin, se cierra parcial o totalmente el río mediante un barraje móvil y/o fijo. Se denomina barraje fijo cuando la estructura es rígida, como el caso del concreto, y barraje móvil cuando la estructura que utilice sean compuertas (Mansen, 2000).

3. Toma móvil:

Capta el agua por medio de un barraje móvil que genera carga hidráulica. Es decir, el barraje regula el nivel del agua, que depende de la época para poder captar el agua constantemente. Destaca por dejar pasar el material de arrastre (Mansen, 2000).

4. Toma tirolesa o caucasiona:

Capta el agua en el fondo del río mediante un canal transversal cubierto por una rejilla que impida el ingreso del material grueso de arrastre (PROAGRO, 2010).

2.2.2 Condiciones para emplazamiento

Las obras de toma deben ser ubicadas de tal manera que el diseño cumpla ciertas condiciones. La primera de ellas se refiere al caudal de captación, este debe ser prácticamente constante durante los periodos de estiaje y avenidas. En segundo lugar, la obra debe restringir la entrada de residuos sólidos y permitir que siga su flujo por el río. Finalmente, la estructura debe garantizar las condiciones de seguridad durante su vida útil (Krochin, 1978).

Además, es importante considerar la topografía del valle donde se ubicará la obra de toma; de acuerdo a este criterio, se diferencian dos casos, los ríos de montaña y los ríos de llanuras. Los ríos de montaña poseen caudales relativamente pequeños, gradientes relativamente grandes, recorren valles no muy amplios y en tiempo de crecidas llevan cantidades considerables de material sólido. Por el contrario, los ríos de llanura poseen un cauce poco profundo y una pendiente pequeña. El propósito del estudio topográfico del valle es mostrar las características que poseen cada uno de los ríos en relación al lugar en que se encuentran ubicadas la toma (Krochin, 1978).

Para cuencas ubicadas en zonas de montaña, debido a las condiciones topográficas, la posibilidad de realizar un embalse es limitada, debido a las grandes pendientes y escasez de espacios propicios para represar el agua. Por ello, es común emplazar obras de derivación directa de acuerdo a lo requerido y conducir el agua mediante canales, galerías y/o tuberías. Además, Mattos (1999) señala que se debe satisfacer la demanda de proyecto, pero a su vez tomar medidas respecto a las alteraciones en el régimen de caudales generadas aguas abajo de la captación.

2.2.3 Parámetros preliminares de diseño

El diseño de una obra de captación requiere, previamente, considerar algunos parámetros preliminares que permitan realizar este procedimiento con el fin de obtener estructuras con un óptimo funcionamiento. Estos parámetros se detallan a continuación:

Ubicación

Mansen (2000) considera que el sitio en donde la toma será emplazada debe cumplir con estas tres condiciones:

- La dirección del flujo de agua debe ser lo más estable y definida posible.
- La captación de agua debe poder realizarse aun en periodos de estiaje.
- La entrada de sedimentos a la estructura debe ser la menor posible.

Según Krochin (1978) se debe tener en cuenta la obstrucción que genera la obra de toma en el río, pues altera las condiciones de flujo, y con ello las condiciones del transporte de sedimentos, además del régimen de caudales.

En lo que respecta al proceso constructivo, Novillo (1985) menciona que, si bien se realizan los trabajos en época de estiaje, el caudal mínimo resulta un estorbo en este transcurso, por lo que se deben contar con ataguías o diques provisionales, que desvíen el flujo del río a un lado mientras se construye en el otro.

En el caso de que la obra de captación pertenezca a una central hidroeléctrica, el lugar apropiado para una toma de agua debe poseer la caída necesaria para producir energía eléctrica (Krochin, 1978).

Caudal, Q

Es el parámetro que determina el tamaño de la obra de toma; sin embargo, no es único, pues se opta por el caudal apropiado dependiendo de la estructura que se requiere diseñar o la dimensión hidráulica que se pretende calcular. Por ejemplo, en el caso de la anchura del canal de distribución se elige el caudal de captación de diseño, pero, para la altura de la carga de agua sobre el azud, se utiliza el caudal de avenida para un determinado periodo de retorno.

Se comprende que, una cuenca ubicada a elevada altura posee un caudal pequeño, debido a que tiene una menor área de captación de precipitación; para la toma tipo tirolesa en particular, esta condición favorece su funcionamiento cuando el río no presenta gran transporte de material sólido o el transporte es de material grueso o de fondo (PROAGRO, 2010).

Por ello, es preferible situar este tipo de toma en zonas altas (superiores a los 3000 m.s.n.m.); donde, por lo general, la obra opera de manera óptima con caudales no mayores a 5 m³/s, de acuerdo a las experiencias en los Alpes y en algunos casos con caudales menores a 8 m³/s, como señala Rocha (2003).

Pendiente del tramo el río, S

Se define como la inclinación que posee el cauce de un río de una determinada zona, donde se implantará el proyecto. La pendiente varía en función del caudal y las características fisiográficas; por consecuencia, a lo largo de su recorrido, este valor disminuye y se genera un aumento en el caudal del río (Gracia & Maza, 2000).

El GTZ (1989) recomienda utilizar la toma tipo tirolesa en tramos con pendientes entre 1% a 10%, o mayores a 10%, para obtener un óptimo funcionamiento según se muestra en la Tabla 1. Esta situación se presenta porque se favorece el transporte de los sedimentos que atraviesan la obra de toma, a diferencia de una zona con menor pendiente. También es importante considerar el perfil longitudinal del lugar donde se emplaza la toma tipo tirolesa, tanto 100 m aguas arriba y 100 m aguas abajo, para poder diseñar las obras de protección (PROAGRO, 2010).

Tabla 1. Funcionamiento de la toma tirolesa según la pendiente de río.

Pendiente de río	Funcionamiento de la toma tipo tirolesa
Pendiente muy grande ($S > 10\%$) a grande ($10\% > S > 1\%$)	Muy favorable. Funcionamiento adecuado con muy poco mantenimiento.
Pendiente media ($1\% > S > 0.01\%$)	Desfavorable. La carga fina de arrastre cae en el canal colector y puede causar grandes depósitos aluviales y funcionamiento dificultoso de las instalaciones de limpieza.
Pendiente baja ($0.01\% > S > 0.001\%$)	Desfavorable para toda circunstancia.

Nota: Se debe tener en cuenta la pendiente donde se ubica la toma para favorecer el funcionamiento de la toma. Adaptado de "Tomas Tirolesas: Criterios de Diseño y Construcción de Obras de Captación para Riego", GTZ, 1989 como se cita en PROAGRO, 2010.

Anchura de encauzamiento, B_r

La anchura de encauzamiento permite crear las condiciones favorables para el correcto funcionamiento de una estructura o de un proyecto hidráulico (Rocha, 2010). Los principales factores que influyen en este parámetro son el régimen hidrológico y la geomorfología (ANA, 2011).

La variación del caudal a lo largo del año es uno de los principales inconvenientes cuando se requiere determinar la anchura de encauzamiento, si existe un estrechamiento excesivo el río se socavaría y se profundizaría el lecho; de manera contraria, el río divagaría dentro de él (Rocha, 2010). El material del cauce también posee un papel importante, su influencia se presenta en los procesos de erosión y sedimentación.

El parámetro B_r se estimará mediante el promedio de la Ecuación 2-1 de Blench, para cauces con material cohesivo formados por arena fina; la 2-2 de Altunin, para cauces con material grueso (Bustamante, 2012) y la 2-3 de Petit. Las fórmulas se presentan a continuación (Canchaya & Chero, 2014):

$$B_r = 1.81 \left(\frac{Q F_f}{F_o} \right)^{1/2} \quad [2-1]$$

$$B_r = \frac{a Q^{1/2}}{S^{1/5}} \quad [2-2]$$

$$B_r = 2.45 Q^{1/2} \quad [2-3]$$

Donde:

B_r = Anchura de encauzamiento del río (m)

Q = Caudal extraordinario para un periodo de retorno T_r (m^3/s)

F_f = Factor de fondo: 0.8 cuando el material es fino ($d < 50$ mm) y 1.2 cuando el material grueso ($d > 50$ mm)

F_o = Factor de orilla que describe la resistencia a la erosión de las orillas:
0.1 en materiales sueltos, 0.2 en materiales ligeramente cohesivos y
0.3 cuando el material es cohesivo

a = Parámetro que caracteriza el cauce. Ver Tabla 2

S = Pendiente del río

Tabla 2. Zona y condición para parámetro que caracteriza el cauce.

Zona del río y condición del cauce	Número de Froude	Parámetro a	
		Orillas de difícil erosión (material muy cohesivo, rocas o canto rodado)	Orillas erosionables (material sin cohesión, aluvial)
Zona alta de montaña. Cauce rocoso cubierto de piedras	1	0.50	0.75
Zona de montaña. Cauce formado con cantos rodados, boleos y guijarros. Rápidas y pendiente cercana a la crítica.	1.0 - 0.5	0.75	0.90
Zona en las faldas de montaña. Llegada del río al valle. Cauce formado por guijarros, grava y arena. Corriente tranquila.	0.5 - 0.2	0.90	1.00
Zona intermedia. Cauce formado por arena gruesa, media y fina. Corriente tranquila.	0.2 - 0.04	1.00	1.10
a) Río caudaloso	0.2 - 0.02	1.10	1.30
b) Río poco caudaloso	0.3 - 0.2	1.30	1.70

Nota: Los valores serán usados para el cálculo en la fórmula presentada por Altunin en reemplazo del parámetro “a”. Adaptado de “Automatización de las Herramientas de Cálculo para el Análisis y Diseño de Encauzamiento de Ríos – Implementación en el Laboratorio Virtual de Hidrología (HIDROVLAB)”, Ordoñez ,2010.

Tirante en la zona de encauzamiento, Y_r

El tirante se define como la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de éste. Se utiliza la ecuación de Manning dada por Ven Te Chow (1994), como sigue:

$$Q = \frac{(B_r Y_r) \left(\frac{B_r Y_r}{B_r + 2 Y_r} \right)^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad [2-4]$$

Donde:

Q = Caudal del río en la sección de encauzamiento (m^3/s)

Y_r = Tirante del río en la zona de encauzamiento (m)

n = Coeficiente de Manning

Se asume que el corte transversal del río es de sección rectangular para facilidad de cálculo. En la Figura 1 se muestran las dimensiones del río en el encauzamiento.

Figura 1. Anchura B_r y tirante Y_r en la zona de encauzamiento. Adaptado de “Diseño de Estructuras Hidráulicas”, Castro, 2010.

2.3 DISEÑO DE LA TOMA CONVENCIONAL

Una toma convencional es aquella que interrumpe el paso del río mediante un vertedero fijo y/o móvil, que facilita el desvío del agua hacia la estructura de captación. La toma convencional consta de los siguientes componentes: vertedero fijo, vertedero móvil, canal de purga, ventana de captación, desripiador, canal de transición y compuertas reguladoras. En la Figura 2 se muestra la ubicación de dichos componentes en la toma convencional.

Figura 2. Toma convencional y sus componentes. Adaptado de “Criterios de Diseños de Obras Hidráulicas para la Formulación de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales y Afianzamiento Hídrico”, ANA, 2010.

A continuación, se detalla el dimensionamiento de las estructuras que conforman la toma convencional:

2.3.1 Dimensionamiento de la ventana de captación

Constituye la entrada que permite captar el agua del río, este funciona como un orificio en épocas de avenidas y como un vertedero en épocas de estiaje. Para evitar el paso de los sedimentos, está cubierta por rejillas, que generan pérdidas hidráulicas que deben ser consideradas y, posteriormente, calculadas (Rojas, 2011 & Herquinio, 2013).

La ventana de captación se diseña como un vertedero de pared delgada; por lo que, el caudal de diseño se ajusta a la siguiente expresión:

$$Q = M L H^{3/2}$$

[2-5]

Donde:

Q = Caudal que pasa sobre el vertedero (m^3/s)

M = Coeficiente de vertedero libre de pared delgada

L = Longitud de ventana de captación (m)

H = Altura de la carga de agua sobre la cresta de la ventana de captación (m). Ver Figura 3

Figura 3. Dimensiones en la entrada de agua por la ventana de captación. Adaptado de “Diseño Hidráulico”, Krochin, 1978.

A continuación, se muestran las fórmulas para la obtención del coeficiente de la Ecuación 2-5:

Coeficiente de vertedero libre de pared delgada, M_o

El coeficiente M_o puede ser calculado con la fórmula de Kononov:

$$M_o = \left[0.407 + \frac{0.045 H}{H + y_1} \right] \left[1 + 0.285 \left(\frac{H}{H + y_1} \right)^2 \right] \sqrt{2g}$$

[2-6]

O a través de la ecuación de Bazin:

$$M_o = \left[1.794 + \frac{0.0133}{H} \right] \left[1 + 0.55 \left(\frac{H}{H + y_1} \right)^2 \right]$$

[2-7]

Donde:

H = Definido en la Ecuación 2-5

y_1 = Altura de vertedero respecto al fondo del río (m). Ver Figura 3

g = Aceleración de la gravedad (m^2/s)

El subíndice “o” se coloca debido a que la fórmula incluye la velocidad de aproximación (Krochin, 1978).

Vertedero sumergido

Para que un vertedero se considere sumergido, se deben cumplir las siguientes condiciones:

1. $y_1 + h > y_2$
2. $h_z/y_2 < 0.7$

En caso de que el vertedero se encuentre en esta situación, como se aprecia en la Figura 3, la Ecuación 2-5 se transforma en:

$$Q = s M L H^{3/2}$$

[2-8]

Donde s es un coeficiente de corrección por sumersión y se puede estimar mediante la fórmula de Bazin:

$$s = 1.05 \left[1 - 0.2 \frac{h}{y_2} \right]^3 \sqrt{\frac{h_z}{H}}$$

[2-9]

O a través de la ecuación de Villemonte:

$$s = \left[1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{3/2} \right]^{0.385}$$

[2-10]

Donde:

h_z = Pérdida de carga por efecto de la rejilla (m)

y_2 = Altura de vertedero respecto al fondo del desripiador (m). Ver Figura 3.

La Ecuación 2-5 o 2-8 se multiplica por un coeficiente adicional de pérdida igual a 0.85, debido a la contracción lateral producida por los barrotes.

Altura del vertedero de la ventana de captación, y_1

La altura del vertedero puede tomar un valor hasta $2/3$ de la altura del agua, aguas abajo y_2 ; entonces, la altura de la lámina de agua sobre el vertedero tiene hasta $1/3$ de y_2 .

La ANA (2010) recomienda ubicar la ventana de captación a una altura no menor de 0.60 m desde el fondo del río, igualmente, que la reja debe estar al ras o sobresalir un poco del muro para facilitar la limpieza del material flotante que la obstruye. Además, las rejas deben ser lo suficientemente fuertes para soportar el impacto de troncos u otro material de arrastre flotante grueso.

2.3.2 Dimensionamiento de la reja

El objetivo de colocar rejillas en la ventana de captación es impedir que el material sólido del río ingrese al canal de derivación, para así evitar colmataciones. Sin embargo, su intervención causa pérdidas, las cuales deben ser consideradas durante el dimensionamiento de la altura del vertedero y en el cálculo del tirante en el canal de derivación (Mansen, 2000). La ANA (2010) recomienda que la separación de las varillas sea de 0.025 a 0.10 m cuando el material sea fino y 0.10 a 0.20 m cuando el material sea grueso.

La longitud de la ventana de captación no contempla la colocación de rejillas en la entrada, por lo que se requiere calcular una longitud totalizada, de mayor dimensión que la inicial. Para ello, se calcula el número de espacios con la Ecuación 2-11.

$$N^{\circ} \text{ de espacios} = \frac{L}{b}$$

[2-11]

Donde:

L = Longitud de la ventana de captación (m)

b = Distancia entre las caras de las varillas de la reja (m)

Luego, se estima el número de rejillas con la Ecuación 2-12.

$$N^{\circ} \text{ de rejillas} = N^{\circ} \text{ de espacios} - 1$$

[2-12]

La longitud totalizada se obtiene mediante la Ecuación 2-13.

$$L_{total} = (N^{\circ} \text{ de espacios} \times b) + (N^{\circ} \text{ de varillas} \times s)$$

[2-13]

Donde:

b = Distancia entre las caras de las varillas de la reja (m). Ver Figura 4

s = Anchura de la varilla de la reja (m). Ver Figura 4

Pérdida de carga por rejillas

Asimismo, se deberá estimar la pérdida de energía producida por la reja con la siguiente expresión:

$$h_z = k \frac{V^2}{2g}$$

[2-14]

Donde:

h_z = Pérdida de carga por efecto de la rejilla (m)

V = Velocidad media de aproximación al ingresar por la reja (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

k = Coeficiente de pérdida de carga por rejillas

El valor de k es determinado por la fórmula de Kirshmer, cuando las rejillas están parcialmente sumergidas y sobresalen del nivel de la superficie del agua (Sotelo, 1997).

$$k = \beta \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \text{sen } \theta$$

[2-15]

Donde:

β = Coeficiente en función de forma de varilla. Ver Figura 4.

s = Anchura de la varilla de la reja (m).

b = Distancia entre las caras de las varillas de la reja (m).

θ = Ángulo de la reja en relación con la horizontal (°).

Si las rejillas se encuentran completamente sumergidas, el valor de k se obtiene, con aceptable aproximación, mediante la fórmula de Creager.

$$k = 1.45 - 0.45 \left(\frac{A_n}{A_b} \right) - \left(\frac{A_n}{A_b} \right)^2$$

[2-16]

Donde:

A_n = Área neta de paso entre rejillas (m^2)

A_b = Área bruta de la estructura de la reja (m^2)

En la Figura 4 se muestran los valores de los coeficientes β aplicables a la fórmula de Kirshmer para las diferentes formas de varillas, así como las dimensiones b y s especificados en párrafos anteriores.

Figura 4. Coeficientes β en función a la forma de la varilla. Adaptado de “Hidráulica General”, Sotelo, 1997.

2.3.3 Dimensionamiento del canal de purga

Es un canal de pendiente pronunciada encargada de evacuar los sedimentos que se acumulan en el ingreso de la ventana de captación para mitigar los problemas de colmatación. Esta estructura permite conservar las estructuras aguas abajo y es parte importante para realizar labores de mantenimiento; por lo general, se ubica entre la ventana de captación y el barraje fijo en tomas convencionales o después de la cámara colectora en las tomas tipo tirolesa. Asimismo, en la entrada del canal se encuentra una compuerta reguladora para facilitar y controlar las labores de mantenimiento (Rojas, 2011). Los parámetros para su dimensionamiento se estiman como sigue:

Velocidad de arrastre, V_a

La velocidad del flujo en el canal es la velocidad del agua necesaria para que una partícula de determinado diámetro sea arrastrada por el flujo de la corriente. Se estima matemáticamente mediante la Ecuación 2-17.

$$V_a = 1.5 c d^{1/2}$$

[2-17]

Donde:

V_a = Velocidad de arrastre (m/s)

c = Coeficiente de arrastre en función del tipo de material. Para arena o grava redondeada usar 3.2, en caso de que se trate de secciones angulares usar 3.9; para una mezcla de arena y grava utilizar un valor de 3.5 a 4.5.

d = Diámetro del grano mayor (m)

Caudal unitario, q

El caudal unitario q es el caudal por unidad de anchura; depende directamente de la velocidad de arrastre de las partículas y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$q = \frac{V_a^3}{g}$$

[2-18]

Donde:

q = Caudal unitario ($m^3/s/m$)

V_a = Velocidad de arrastre (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

Luego, con el caudal de unitario se calcula la anchura necesaria del canal de purga:

$$b_p = \frac{Q_p}{q}$$

[2-19]

Donde:

b_p = Anchura del canal de purga (m)

Q_p = Caudal en el canal de purga para eliminar el material de arrastre (m^3/s)

q = Caudal unitario ($m^3/s/m$)

La pendiente del canal de purga se calcula con la siguiente expresión:

$$I_p = \frac{n^2 g^{10/9}}{q^{2/9}}$$

[2-20]

Donde:

I_p = Pendiente necesaria para la purga

n = Coeficiente de Manning del río

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

q = Caudal unitario ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

2.3.4 Dimensionamiento del azud o barraje fijo

Es la estructura encargada de elevar y mantener el nivel de agua, con el cierre parcial o total del cauce del río, para derivar el caudal hacia la ventana de captación. Además, en época avenida, funciona como un vertedero de regulación y garantiza la seguridad de las obras hidráulicas aguas arriba y aguas abajo (Mansen, 2000).

Altura del barraje, P

El cálculo de la altura se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$P = h_o + h_v$$

[2-21]

Donde:

P = Altura del barraje (m)

h_o = Altura necesaria para evitar el ingreso de material de arrastre (m).

Mayor a 0.60 m por recomendación de la ANA. Ver Figura 5

h_v = Altura de la ventana de captación (m). Ver Figura 5

Figura 5. Vista de perfil transversal del azud. Adaptado de “Diseño de Bocatoma”, Mansen, 2000.

Carga sobre el barraje, H_d

El valor de H_d se estima mediante la siguiente expresión:

$$H_d = \left(\frac{Q}{C_a L_{bf}} \right)^{2/3}$$

[2-22]

Donde:

H_d = Carga sobre barraje (m)

Q = Caudal máximo de diseño (m^3/s)

C_a = Coeficiente de descarga del azud. En barraje tipo lavadero o descarga directa usar 1.45 y en cimacio usar 2.0

L_{bf} = Longitud del barraje (m)

Coeficiente de descarga del azud, C_a

Una mayor aproximación a este parámetro, para barrajes tipo cimacio, se realiza mediante iteración utilizando la Figura 6, desarrollada de manera experimental por el U.S Bureau of Reclamation (Sotelo, 1994).

Figura 6. Coeficiente de descarga en cimacios. Adaptado de “Diseño Hidráulico de Estructuras. Capítulo VIII”, Sotelo, 1994.

La primera carga de diseño para realizar la iteración se puede estimar con un coeficiente de descarga del azud igual a 2.

Forma de la cresta del barraje

El barraje debe tener un perfil que evite su erosión por el río, de acuerdo a lo establecido por la USCE (United States Corps of Engineers), en primer lugar, se determina la anchura del barraje fijo, esta dimensión se observa en la Figura 7.

Figura 7. Vista en perfil de la cresta del barraje fijo. Adaptado de “Diseño de Bocatoma”, Mansen, 2000.

Esta dimensión del azud se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$A_{bf} = 0.27 H_d + [2 P (H_d)^{0.85}]^{1/1.85}$$

[2-23]

Donde:

A_{bf} = Anchura horizontal del azud (m)

H_d = Carga de agua sobre el barraje (m)

P = Altura del barraje (m)

El perfil de Creager ha sido calculado de manera teórica y experimentalmente por varios investigadores (Krochin, 1978), este se utilizará como perfil para el azud.

La ecuación de la parte inferior de la lámina libre de agua está determinada por:

$$y(x) = 0.5 \frac{x^{1.85}}{H_d^{0.85}}$$

[2-24]

Donde:

$y(x)$ = Función que grafica el perfil del barraje (m)

x = Distancia desde la cara aguas arriba del azud, su máximo valor es b_a (m)

H_d = Carga sobre el barraje, calculada con la Ecuación 2-22 (m)

La Tabla 3 se ha calculado con H_d igual a 1 m. Para un H_d diferente, las abscisas y ordenadas deben ser multiplicadas por H_d (Krochin, 1978).

Tabla 3. Coordenadas del perfil Creager para $H_d=1$ m.

x	Ordenada del azud	x	Ordenada del azud	x	Ordenada del azud	x	Ordenada del azud
0.0	0.126	1.0	0.256	2.0	1.235	3.0	2.824
0.1	0.036	1.1	0.322	2.1	1.369	3.1	3.013
0.2	0.007	1.2	0.393	2.2	1.508	3.2	3.207
0.3	0.000	1.3	0.477	2.3	1.654	3.3	3.405
0.4	0.006	1.4	0.565	2.4	1.804	3.4	3.609
0.5	0.025	1.5	0.662	2.5	1.960	3.5	3.818
0.6	0.060	1.6	0.764	2.6	2.122	3.6	4.031
0.7	0.098	1.7	0.873	2.7	2.289	3.7	4.249
0.8	0.147	1.8	0.987	2.8	2.463	3.8	4.471
0.9	0.198	1.9	1.108	2.9	2.640	3.9	4.699

Nota: Se utiliza un perfil proporcionado por Creager al que se le asigna valores de acuerdo a la altura del barraje utilizado. Adaptado de "Diseño Hidráulico", Krochin, 1978.

2.3.5 Dimensionamiento del colchón disipador

Es la estructura encargada de disipar la energía cinética después del barraje, producto del paso del agua por este, pues la caída genera un gran potencial de erosión. Aguas abajo del barraje, se genera un tirante menor al crítico o supercrítico y un resalto hidráulico seguidamente, para elevar el nivel del agua hasta el tirante normal. En la Figura 8 se aprecia el comportamiento del agua al pie del azud producido por el cambio de régimen.

Figura 8. Resalto hidráulico y tirantes conjugados a pie del barraje. Adaptado de "Diseño de Bocatoma", Mansen, 2000.

El tirante conjugado d_1 se calcula al igualar la energía total en la *sección 0* y la *sección 1* con la siguiente expresión:

$$V_1 = \left[2g \left(C_0 - C_1 + P + H_d - d_1 + \frac{V_0^2}{2g} - h_{f(0-1)} \right) \right]^{1/2}$$

[2-25]

Donde:

V_1 = Velocidad del agua a pie de talud (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

C_0 = Cota del terreno aguas arriba del barraje (m)

C_1 = Cota del colchón dissipador (m)

P = Altura del barraje, calculado con la Ecuación 2-21 (m)

H_d = Altura de la carga sobre el barraje, calculado con la Ecuación 2-22 (m)

d_1 = Tirante del río al pie del barraje (m)

V_0 = Velocidad en la cresta del barraje (m/s)

$h_{f(0-1)}$ = Pérdida de carga entre la *sección 0 y 1* (m). Ver Ecuación 2-26

Se puede considerar que la diferencia entre cotas debe estar comprendido entre 0.5 y 1.0 m; y la pérdida de carga entre estas dos secciones como:

$$h_{f(0-1)} = 0.1 \frac{V_0^2}{2g}$$

[2-26]

El tirante conjugado después del resalto es calculado usando la conservación de la fuerza específica en las secciones 1 y 2 expresada con:

$$F_n = \frac{Q_1^2}{g A_1} + Y_{cg} A_1 = \frac{Q_2^2}{g A_2} + Y_{cg} A_2$$

[2-27]

Donde:

F_1 y F_2 = Fuerza específica en la sección 1 y 2 (m³ kgf/kgf)

Q_1 y Q_2 = Caudal que transcurre en la sección 1 y 2 (m³/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

A_1 y A_2 = Área de la sección 1 y 2, donde d_1 y d_2 son los tirantes correspondientes a cada sección respectivamente (m²)

Y_{cg} = Altura al centro de gravedad de la sección “n” (m)

Longitud del colchón disipador

Se determina como el máximo valor de las fórmulas a continuación: Ecuación 2-28 de Schoklitsch, 2-29 de Safranez, 2-30 por U.S. Bureau of Reclamation, 2-31 de Baklmnetev-Martze y 2-32 de Pavloski (Canchaya & Chero, 2014):

$$L = (5 \text{ a } 6)(d_2 - d_1)$$

[2-28]

$$L = 6 d_1 F_1$$

[2-29]

$$L = 4 d_2$$

[2-30]

$$L = 5 (d_2 - d_1)$$

[2-31]

$$L = 2.5 (1.4 d_2 - d_1)$$

[2-32]

Donde:

L = Longitud del colchón disipador (m)

d₁ y d₂ = Tirantes conjugados del resalto hidráulico (m)

F₁ = Número de Froude en la sección 1

Espesor del colchón disipador

Se estima mediante la fórmula de Traimovich (Arbulú, 2015):

$$e = 0.2 q^{0.5} z^{0.25}$$

[2-33]

Donde:

e = Espesor del colchón disipador (m)

q = Caudal unitario (m³/s/m)

z = Diferencia de niveles aguas arriba y aguas abajo del azud (m)

Krochin (1978) recomienda que este espesor debe ser por lo mínimo de 0.30 m.

2.3.6 Dimensionamiento del desripiador

El desripiador se ubica después de la reja de entrada, se trata de una cámara que sirve para decantar las piedras que lograron pasar los barrotes y no deberían entrar al canal de transición (Krochin, 1978). En la Figura 9 se aprecia el comportamiento del agua al pasar al desripiador y, posteriormente, a la transición.

Figura 9. Sección transversal del río, desripiador y transición. Adaptado de “Diseño de Bocatoma”, Mansen, 2000.

Ancho del desripiador

La mayor anchura de esta estructura, que se encuentra en la sección A-A de la Figura 2, debe de ser de la longitud del resalto que se genere al ingresar el fluido a la cámara (Krochin, 1978). Esta dimensión de manera similar a la del colchón dissipador.

La menor anchura o anchura de salida del desripiador se calcula de manera similar a la anchura de canal de purga, la única variación se encuentra en el caudal que se utiliza para el diseño.

Pendiente del desripiador

La pendiente del desripiador se calcula con la Ecuación 2-20; sin embargo, Mansen (2000) recomienda que el dimensionamiento de este parámetro debe permitir que el material de arrastre sea decantado, para evitar que ingrese con el caudal de captación. Esta pendiente se logra al dar una fuerte pendiente paralela al flujo del río; es decir, mayor a 2%. Asimismo, la compuerta de limpia debe ser capaz de descargar este caudal de derivación.

2.3.7 Dimensionamiento de la transición

Es la estructura que permite que el cambio de sección se realice en forma gradual, con el objetivo de minimizar la pérdida de carga (Krochin, 1978). La zona de transición es la comprendida entre el desrapiador y el canal de conducción, el agua se vierte del desrapiador a la transición a través de un vertedero más ancho que el canal para así depositar el material grueso en el desrapiador. El cálculo de la longitud del vertedero que se ubica entre el desrapiador y la transición es similar al de la longitud de la ventana de captación; sin embargo, en este caso, no se mayor la longitud pues no se colocan rejillas sobre el vertedero.

Longitud de transición

La ANA (2010) plantea que es necesario calcular la longitud de la zona de transición mediante la siguiente expresión:

$$L = \frac{b_1 - b_2}{2 \tan(12^\circ 30')}$$

[2-34]

Donde:

L = Longitud mínima de transición (m)

b_1 = Ancho en zona del vertedero (m)

b_2 = Ancho en zona del canal de derivación (m)

La transición se realizará con la forma de dos arcos de círculos tangentes a la entrada y a la salida, como muestra la Figura 10.

Figura 10. Transición formada por arcos circulares. Adaptado de “Diseño Hidráulico”, Krochin, 1978.

Para esta disposición, el radio de curvatura está determinado por:

$$R = \frac{L}{2 \operatorname{sen}(2\alpha)}$$

[2-35]

Donde:

R = Radio de curvatura de la transición (m)

L = Longitud de transición, calculada en la Ecuación 2-34 (m)

α = Ángulo de ampliación de sección (°). Ver Figura 10.

El ancho variable b_x está dado por las siguientes expresiones:

Para la primera mitad de la transición:

$$0.5(b_x - b_2) = L \tan(\alpha) - \left(R - \sqrt{R^2 - x^2} \right)$$

[2-36]

Para la segunda mitad de la transición:

$$0.5(b_x - b_2) = R - \sqrt{R^2 - (L - x)^2}$$

[2-37]

Donde:

b_x = Ancho variable de la transición (m)

b_2 = Ancho menor de la transición (m)

x = Distancia desde el principio de la transición (m)

Además, los parámetros R, L y α han sido definidos en la Ecuación 2-35.

2.3.8 Dimensionamiento de compuertas de regulación y/o barraje móvil

Una compuerta consiste en una placa móvil, plana o curva, que permite regular el ingreso del caudal al canal de derivación (Sotelo, 1997). Se ubican en las estructuras en donde se identifique esta necesidad como la purga, el desripador y el canal de conducción. Se diseñan con la siguiente expresión:

$$Q = C_c A (2gh)^{1/2} = C_c A V$$

[2-38]

Donde:

Q = Caudal que pasa por la compuerta (m^3/s)

C_c = Coeficiente de descarga de compuerta, varía de 0.6 a 0.8

A = Área de abertura de la compuerta (m^2)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

h = Diferencia de niveles entre aguas arriba y aguas abajo de la compuerta (m). Ver Figura 11

V = Velocidad de diseño (m/s)

Mansen (2000) recomienda utilizar una velocidad de diseño entre 2.0 a 2.5 m/s, que genera un valor para h entre 0.15 a 0.30 m. Cuando se tenga luces grandes es conveniente dividir las distancias en tramos iguales para facilitar la operación de las compuertas. En la Figura 11 se muestra la regulación del caudal de agua cuando la compuerta se acciona, lo que provoca un descenso en el nivel del agua.

Figura 11. Diferencia en el nivel del agua en el diseño de la compuerta. Adaptado de “Diseño de Bocatoma”, Mansen, 2000.

2.3.9 Diseño de los muros de encauce

Los muros de encauce tienen la función de proteger los taludes laterales, así como las estructuras situadas aguas abajo de la toma. Deben ser como mínimo de hormigón ciclópeo, y estar diseñados y contruidos con una cimentación sólida. Asimismo, en caso de que la obra no esté emplazada en terreno firme, aguas abajo se requiere la construcción de muros transversales al cauce, que actúen como caídas y disipen la energía cinética del río.

En algunas obras se han presentado problemas de socavamiento basal y colapsos de las estructuras, esta situación se presenta cuando no existen estructuras de control ni corrección de torrentes (PROAGRO, 2010).

Además, se debe considerar en el diseño el borde libre que se funciona como margen de seguridad a los eventos extraordinarios, según Villón (2007) la relación de borde libre respecto a los anchos de solera debe seguir la siguiente tabla:

Tabla 4. Borde libre.

Ancho de Solera (m)	Borde Libre (m)
Hasta 0.80	0.40
De 0.80 a 1.50	0.50
De 1.50 a 3.00	0.60
De 3.00 a 20.00	1.00

Nota: El valor seleccionado se adiciona al tirante normal calculado como un factor de seguridad.

Adaptado de “Hidráulica de Canales”, Villón, 2007.

2.4 DISEÑO DE LA TOMA TIPO TIROLESA

La toma tipo tirolesa es una estructura hidráulica que capta el agua en el fondo del río. Para este propósito utiliza una cámara de captación que puede estar ubicada a nivel del fondo del cauce o dentro de la sección del barraje o dique, conocido también como azud; en ambos casos, la cámara está protegida por una rejilla que impide el ingreso de sedimentos gruesos (Mansen, 2000).

La toma tirolesa fue concebida inicialmente en el año 1918 para la región europea del Tirol (de donde proviene el nombre) en la frontera Austria y Alemania para captar el agua requerida en proyectos de riego (Herrera, 2013).

Figura 12. La toma tipo tirolesa. Adaptado de “Tiroler Werh”, por Sulmkraft.at, 2015.

Se trata de una estructura típica en las zonas altas de montaña, usado generalmente para captar caudales pequeños. Por ejemplo, en los Alpes se ha tenido muy buenos resultados con gastos comprendidos entre 0.1 y 5 m³/s, la pendiente de las rejillas variaron entre 1:10 a 1:5. Incluso se ha llegado a automatizar las compuertas para favorecer su funcionamiento (Rocha, 2003).

Las ventajas de esta toma se aprecian en la menor magnitud como obra hidráulica y la menor resistencia al flujo. Además, la ubicación no resulta ser un factor fundamental para esta estructura, como lo es en las obras de tomas directa (Mattos, 1999).

Los parámetros que condicionan el uso de este tipo de toma o que la descalifican es cuando el río presenta un alto transporte de sedimentos finos o en suspensión, debido a que podrían causar la colmatación vertiginosa de la cámara de captación; de hecho, su uso presenta mejores resultados cuando el material del torrente es grueso o de fondo. Además, en la historia de la toma tipo tirolesa han existido lugares en donde no se lograron aprovechar sus ventajas, debido a que no existían las condiciones adecuadas para su empleo (Rocha, 2003).

Entre las principales componentes que integran la toma tipo tirolesa se encuentran: la rejilla, el canal colector y el azud.

En general, el diseño de la toma tipo tirolesa implica el dimensionamiento de la rejilla y del canal colector. El cálculo de la capacidad hidráulica se puede realizar combinando el caudal de captación determinado por la curva de persistencia en función de los caudales del río, con la ecuación que permite calcular la longitud de reja requerida para dicho caudal de captación requerido.

2.4.1 Dimensionamiento de la reja

Las dimensiones de las rejillas deben ser las adecuadas tanto para resistir el peso de las rocas que pasen sobre ella, así como para evitar que el excesivo material sólido ingrese al canal colector. Existen diversas consideraciones propuestas por distintos autores, de los cuales destaca Krochin (1978), debido a que su trabajo ha sido utilizado en la mayoría de fuentes consultadas. También, es necesario mencionar que un último estudio realizado por Méjico (2014) sobre la inclinación de la rejilla para obtener el menor transporte de sedimento se obtiene con pendientes comprendidas entre 20° a 24° y un espaciamiento de barrote entre 4 a 6 cm.

En el análisis teórico se asume la hipótesis de que el flujo sobre la reja es unidimensional, espacialmente variado (tirante decrece gradualmente) y posee distribución hidrostática de presiones. Para barras longitudinales, la derivación de caudales se expresa como una función del valor de la energía de flujo local, mientras que, para barras transversales, dicha derivación se relaciona con la profundidad de flujo local. Respecto a la disipación de energía por unidad de peso de flujo y unidad de longitud, en algunos estudios se asume que es despreciable; sin embargo, en otros estudios se asume igual a la variación de la energía específica o, directamente,

igual a la pendiente de la rejilla (Castillo & Lima, 2010). En el cálculo del caudal de captación es importante tener en cuenta las líneas de energía presentes, como se puede apreciar en la Figura 13. En el caso de que las rejillas sean horizontales, las dos hipótesis anteriormente mencionadas serían iguales, pero en la práctica esta disposición en la estructura es muy poco probable.

Figura 13. Esquema de flujo sobre la rejilla para nivel de energía constante. Adaptado de “Pequeñas Obras Hidráulicas”, Mattos, 1999.

El método de diseño de la rejilla propuesto por Krochin se basa en la ecuación de Bernoulli y en la ecuación general de vertederos, aunque utiliza otros factores para la obtención de los coeficientes de la rejilla, como se indica a continuación:

$$Q = 2.5 C K B L \sqrt{H_0}$$

[2-39]

Donde:

Q = Caudal a ser captado por la toma tirolesa (m^3/s)

B = Anchura de la rejilla de la toma tipo tirolesa (m)

L = Longitud de la rejilla de la toma tipo tirolesa (m). Ver Figura 14

Los parámetros C, K y H_0 se definen como sigue:

Coeficiente de contracción, C

El coeficiente de contracción considera la distribución y espesor de las varillas de la rejilla, y la inclinación β de la rejilla respecto a la horizontal; determinada por la siguiente expresión:

$$C = C_0 - 0.325 i$$

[2-40]

Donde:

$C =$ Coeficiente de contracción

$C_0 = 0.6$ para $e/s \geq 4$

$C_0 = 0.5$ para $e/s < 4$

En la Figura 14 se aprecia la sección transversal de la toma tipo tirolesa, así como, la nomenclatura para las dimensiones de la rejilla.

Figura 14. Detalle de rejilla en una toma tipo tirolesa. Adaptado de “Diseño Hidráulico”, Krochin, 1978.

Donde:

$e =$ Altura de los barrotes (mm). Ver Figura 14

$s =$ Espaciamiento entre barrotes, varía entre 2 y 6 cm (mm). Ver Figura 14

$i = \tan \beta$, pendiente de la rejilla (m/m)

$\beta =$ Ángulo de inclinación de la rejilla con respecto a la horizontal ($^{\circ}$)

Coeficiente de obstrucción, K

El coeficiente de obstrucción es aquel que reduce el área total de entrada y la transforma en área efectiva de captación, está dado por:

$$K = (1 - f) \frac{s}{s + t}$$

[2-41]

Donde:

K = Coeficiente de obstrucción

f = Porcentaje de la superficie limpia que es ocupada por las arenas y grava que se incrustan entre las rejillas durante la operación. Krochin (1978) recomienda utilizar valores entre 15% y 30% de la superficie limpia.

s = Espaciamiento entre barrotes (mm). Ver Figura 14

t = Anchura, diámetro o espesor de los barrotes (mm). Ver Figura 14

Longitud y anchura de la rejilla, L y B

La anchura de la rejilla es adoptada por el diseñador en base a su experiencia sobre el funcionamiento de obras similares. A partir de la anchura asumida, se calcula la longitud de la rejilla con la siguiente fórmula:

$$L = \frac{0.313 Q}{(C K)^{3/2} B^{3/2}}$$

[2-42]

Donde todos los parámetros son definidos en la Ecuación 2-39. Krochin (1978) recomienda que la longitud de la proyección horizontal de la rejilla no sea mayor que 1,25 metros.

Número de varillas

La distancia L' se supone igual a la longitud la rejilla, con esta se determinará el número de varillas mediante la Ecuación 2-43.

$$L' = (N^{\circ} \text{ de espacios} \times s) + (N^{\circ} \text{ de varillas} \times t)$$

[2-43]

Donde:

N° de varillas = N° de espacios – 1

L' = Distancia igual a la longitud de la rejilla para aproximación (m)

Además, s y t son definidos en la Ecuación 2-41.

Altura de agua sobre la rejilla, H₀

La altura de agua sobre la rejilla, o carga de entrada de agua H₀, se obtiene de la Ecuación 2-39. La cresta del azud debe estar 0.2 m más alta a los lados de la rejilla.

2.4.2 Dimensionamiento del canal colector

El diseño se realiza siguiendo el criterio de Krochin con el método de Zamarin. El flujo de agua en el canal colector tiene un caudal variable. La longitud total L del canal colector se divide en partes iguales y el caudal en cada parte se determina por la fórmula:

$$Q_x = \frac{Q_d}{L} x$$

[2-44]

Donde:

x = Distancia desde el comienzo del canal colector (m)

Con el objeto de que el material de arrastre que pasa por la rejilla pueda ser evacuado, la velocidad promedio en el canal colector debe ser como mínimo:

$$V_{prom} \geq 3(\sqrt{g s})$$

[2-45]

Donde s es el tamaño del grano que puede pasar a través de las rejillas, o sea, igual a la separación entre rejillas.

Para que esta condición se cumpla se toma, Krochin (1978) recomienda que como velocidad al inicio del canal, V_0 igual a 1.0 m/s y al final V_f de 2.0 a 3.0 m/s.

La velocidad en cada sección se determina con la fórmula:

$$V_x = \frac{V_f - V_0}{L} x + V_0$$

[2-46]

De acuerdo con la ecuación de continuidad, la relación entre el caudal y la velocidad determina el área, con la cual se determina el tirante necesario para cada punto del canal colector.

Krochin (1978) asume que la energía del agua que cae a través de la rejilla se disipa en la mezcla turbulenta que se encuentra en el canal colector; es por ello que, el coeficiente de Manning resulta mayor, un valor comprendido entre 0.025 y 0.045, teniendo en cuenta las pérdidas adicionales que se producen por el flujo espiral y altamente turbulento en el canal colector. Con la ecuación de Bernoulli se determina las cotas de agua en el canal colector.

$$\frac{V_1^2}{2g} + d_1 = \frac{V_2^2}{2g} + d_2 + S (\Delta x)$$

[2-47]

Por condiciones del diseño, Krochin (1978) recomienda que la profundidad desde la parte superior de la rejilla hasta el punto más elevado del canal colector, se calcula en un 15% de la diferencia entre las cotas a los extremos de dicho canal.

2.4.3 Dimensionamiento del azud

Longitud de rejilla menor a la anchura de encauzamiento

En esta situación, la estructura del azud se emplaza en el espacio libre del lecho, como se aprecia en la Figura 15, debido a que, en época de estiaje, permite captar el caudal mínimo del cauce, derivando el flujo de agua hacia la rejilla.

Figura 15. Vista en planta de una toma tipo tirolesa. Adaptado de “Tomas Tirolesas: Criterios de Diseño y Construcción de Obras de Captación para Riego”, PROAGRO, 2010.

En avenidas, el agua del río que no es captada por la toma tirolesa se vierte por encima del azud construido en el lecho del río. Por ello, PROAGRO (2010) señala que, con la finalidad de aumentar su coeficiente de descarga, el azud debe tener, en lo posible, un perfil hidrodinámico; usualmente, este se diseña con coordenadas de perfil Creager o una caída inclinada. Además, la altura máxima del azud sobre la cota superior de la rejilla, como se muestra en la Figura 16, debe ser pequeña, generalmente entre 0.20 m a 0.50 m.

Carga sobre el barraje, H_d

Para el cálculo de la altura del barraje se utilizará la siguiente expresión:

$$Q = \left(c_{bf} L_{bf} H_d^{\frac{3}{2}} \right) + \left(c_v L (H_d + P)^{\frac{3}{2}} \right) \quad [2-48]$$

Donde:

H_d = Carga sobre barraje (m)

Q = Caudal máximo de diseño (m^3/s)

C_{bf} = Coeficiente de descarga del azud. Ver Ecuación 2-49

L_{bf} = Longitud del barraje (m)

C_v = Coeficiente de descarga en rejilla. Ver Ecuación 2-50

L = Longitud de rejilla (m)

P = Altura de vertedero

El coeficiente de descarga del azud en la zona de barraje fijo será resulta por la siguiente ecuación:

$$C_{bf} = \left(0.407 + \frac{0.045 \times H_d}{H_d + C_0 + P} \right) \left[1 + 0.285 \left(\frac{H_d}{H_d + C_0 + P} \right)^2 \right] \sqrt{2g} \quad [2-49]$$

En tanto, en la zona de ventana se considerará para el coeficiente de descarga de rejilla la ecuación que se muestra a continuación:

$$C_v = \left(0.407 + \frac{0.045 \times (H_d + P)}{H_d + C_0 + P} \right) \left[1 + 0.285 \left(\frac{H_d + P}{H_d + C_0 + P} \right)^2 \right] \sqrt{2g} \quad [2-50]$$

Longitud de rejilla igual a la anchura de encauzamiento

En el caso de que las rejas se ubiquen dentro del barraje fijo, porque este ocupa todo el ancho de encauzamiento del río, es importante considerar que la estructura del azud debe conformar un solo cuerpo con la rejilla; además, su altura debe estar a poca elevación respecto al lecho del río, para que las rocas pasen fácilmente por encima del azud, evitándose, de este modo, la construcción de una compuerta de limpieza de sedimentos como en el caso de una toma convencional.

Figura 16. Sección transversal de una toma tipo tirolesa. Adaptado de “Tomas Tirolesas: Criterios de Diseño y Construcción de Obras de Captación para Riego”, PROAGRO, 2010.

2.4.4 Diseño de estructuras complementarias

Las estructuras en común con la toma convencional se diseñarán siguiendo los mismos procedimientos anteriormente descritos, pero con criterios aplicados a la toma tipo tirolesa.

2.5 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Romero (1985) menciona que durante la operación de las centrales hidroeléctrica deben realizarse observaciones continuas del estado de las obras de captación, analizar su comportamiento durante los periodos de avenidas, y tomar las medidas correctivas oportunamente durante los periodos de estiaje, de manera de evitar en lo posible paradas de la central.

El agua que ingresa a la estructura lo hace a través de la ventana de captación, por lo que es necesario tener presente que la toma debe ser manejada de tal modo que en época de estiaje capte el caudal mínimo mientras que en época de avenidas se evalúe el posible cierre de la captación y dejar el paso del agua por tener concentraciones más elevadas de sedimento que dañen la central aguas abajo y colmaten la toma, en este caso, será imprescindible abrir las compuertas de purga a su máxima capacidad. La complejidad de la maniobra dependerá de la cantidad de compuertas que se tenga.

Si el proyecto busca mantener un caudal de captación constante, se puede construir la estructura de toma dividida en dos sectores, como se aprecia en la Figura 17, con la finalidad de realizar el mantenimiento a una de ellas mientras la otra sigue funcionando con normalidad.

Figura 17. Alternativa para mantenimiento de toma. Adaptado de “Diseño y Modelamiento de Obras de Captación”, CIDHMA Ingenieros, 2016.

2.5.1 Funcionalidad de toma tipo tirolesa en Bolivia

El Programa Nacional de Riego (PRONAR) realizó un estudio de las tomas tipo tirolesa construidas en Cochabamba, de las cuales se seleccionaron seis por su importancia. Las consideraciones para su mantenimiento se describen como sigue:

Toralapa Alta

Ubicada a 3100 msnm a 75 km de la ciudad de Cochabamaba, en esta toma se destaca que los ríos poseen un periodo cíclico de socavación y sedimentación a que se ve afectado por la ubicación de la toma (tramo recto o curvo); por ello, se recomienda tener control del perfil longitudinal del río por lo menos 100 metros aguas arriba y 100 metros aguas abajo de la toma y la toma debe ser ubicada en un tramo recto.

Kora Tiquipaya

Ubicada a 2800 msnm a 13 km de la ciudad de Cochabamaba, la toma construida en esta zona alta posee buena captación de recursos hídricos; sin embargo, en época de crecidas, presenta problemas de estabilidad con las estructuras por la falta de tratamiento del perfil agua arriba y abajo; por ello, la toma requiere de mantenimiento permanente.

Apote

Ubicada en una zona de fácil acceso a 2840 msnm a 14 km de la ciudad de Cochabamaba, La cantidad de sedimento que transporta genera riesgos de erosión debido al deterioro ambiental, por lo que las estructuras son atascadas por el sedimento grueso que transporta el río. Asimismo, existe un azud a la margen derecha aguas debajo de la rejilla, que no embalsa el caudal hacia la rejilla como debe porque el comportamiento del flujo va hacia la margen izquierda principalmente.

Millu Mayu

Ubicada a 3200 msnm a 65 km de la ciudad de Cochabamaba, debido a la cantidad de sedimento de transporte en el cauce se tuvo que reforzar la estructura de

disipación aguas debajo de la toma; así como, encausar el río aguas arriba de la toma por ser inestable y cambiante.

Laimiña

Ubicada a 2750 msnm a 120 km de la ciudad de Cochabamaba, la obra fue implementada en una sección de río rocosa y estable; además, la cobertura vegetal predominante que protege a la toma de la erosión hídrica.

Titiri

Ubicada a 3860 msnm a 35 km de la ciudad de Cochabamaba, de manera similar a la toma en Laimiña posee abundante cobertura vegetal, del tipo paja brava, que protege a la estructura de toma frente a la erosión.

2.5.2 Funcionalidad de toma tipo tirolesa en Perú

La investigación sobre la existencia de toma tipo tirolesas en el Perú ha resultado con la ubicación de dos obras de captación dentro del territorio del país.

Huanta

Ubicada a 2780 msnm en la región Ayacucho, es una toma que capta agua con fines agrícolas. Las deficiencias presentes en la estructura son el uso de rejillas circulares de barras de construcción empotradas, las cuales dificultan el mantenimiento del canal colector, así como la inclinación de la rejilla de solo 5°, que según el estudio de Méjico (2014) debe ser mayor a 20° para minimizar el ingreso de sedimentos. Por otro lado, se rescata que antes del ingreso al canal de distribución también existen rejillas espaciadas a 15cm que evitan el ingreso de hojas o ramas al canal.

Crucero

Esta toma se ubica a 4511 msnm en la región Puno, se encuentra en construcción y servirá para abastecer a los cultivo de la comunidad de Urinsaya. Después, de revisar el diseño correspondiente a la obra de captación se aprecia que tanto el perfil usado, espaciamiento e inclinación de rejilla siguen los lineamientos para que el ingreso de sedimentos sea mínimo.

En el Anexo 1 se muestran las características para cada caso de estudio de toma tipo tirolesa en Bolivia (PROAGRO, 2010) y los dos casos peruanos.

2.6 PARÁMETROS DE IMPACTO AMBIENTAL

2.6.1 Caudal ecológico

El RLRH (2010) define este parámetro como el caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole o embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero, que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema. En general, como un dato preliminar se recomienda el 10% del caudal anual medio.

2.6.2 Identificación de impactos ambientales

Se identificaron los impactos recurrentes en el desarrollo de un proyecto de central hidroeléctrica de pasada, recopilados por Ordoñez (2011), para la investigación se seleccionaron específicamente los impactos generados por las obras de captación.

Tabla 5. Impactos ambientales para una obra de central hidroeléctrica en la componente de captación para la etapa de construcción.

Componente	Impacto
Aire	Emisión de gases
	Aumento de nivel de ruido
Agua	Aumento de sólidos en suspensión
	Modificación de mecánica fluvial del río
Suelo	Compactación de terreno
	Cambio en el uso del suelo
	Erosión de suelos
	Pérdida de estabilidad mecánica
Flora	Pérdida de cobertura vegetal
Fauna	Alteración de comunidades acuáticas
	Efecto barrera para la población íctica
	Alteración de comunidades de fauna terrestre
Medio Socio-Económico	Incremento de habitantes en centros urbanos cercanos
	Aumento de posibilidades de empleo
	Incremento de actividad económica
	Aumento de tránsito vehicular
	Riesgo de deterioro de vías de tránsito
	Mejoramiento y construcción de nuevas vías de acceso
Paisajístico	Alteración del valor paisajístico

Nota: Se han tomado los impactos relativos a la etapa de construcción de la captación. Adaptado de “Metodología de Identificación de Impactos Ambientales en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Pasada en Cauces Naturales, Estudio de Caso”, Ordoñez, 2011.

Tabla 6. Impactos ambientales para una obra de central hidroeléctrica en la componente de captación para la etapa de operación y mantenimiento.

Componente	Impacto
Aire	Aumento de nivel de ruido
Agua	Modificación del régimen hidrológico y mecánica fluvial del río
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica
Flora	Remoción de cobertura vegetal
Fauna	Menoscabo en el hábitat de la fauna acuática
	Efecto barrera para la población íctica
	Alteración de comunidades de fauna terrestre
Paisajístico	Alteración del valor paisajístico

Nota: Se han tomado los impactos relativos a la etapa de operación y mantenimiento de la captación. Adaptado de “Metodología de Identificación de Impactos Ambientales en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Pasada en Cauces Naturales, Estudio de Caso”, Ordoñez, 2011.

En la Tabla 5 muestra los impactos ambientales para la etapa de construcción y la Tabla 6, para la etapa de operación y mantenimiento. Los impactos ambientales serán valorados para cada toma, la convencional y la tipo tirolesa, mediante la metodología de la matriz de importancia, con la finalidad de generar valores numéricos para el análisis cuantitativo.

2.6.3 Metodología para la valoración de impactos ambientales

El impacto ambiental pretende ser cuantificado para permitir la comparación entre valores numéricos, este procedimiento se realiza a través de una matriz de importancia, considerando la magnitud del impacto en función de la siguiente expresión (Ruberto, 2006 & EVREN, 2012).

$$M = [(I \times W_I) + (E \times W_E) + (D \times W_D)]$$

[2-51]

Donde:

M = Magnitud

I = Intensidad

W_I = Peso del factor intensidad

E = Extensión

W_E = Peso del factor extensión

D = Duración

W_D = Peso del factor duración

Además, la suma de $W_I + W_E + W_D$ debe ser igual a 1, lo que admite asignar un peso a cada una de estas variables según la importancia que se le asigne por criterio propio. El valor de M tendrá un signo (+) o (–) dependiendo del tipo de impacto que genere, favorable o adverso, respectivamente.

En seguida, se procederá con el cálculo de Índice Ambiental Ponderado Modificado (VIA) mediante la siguiente expresión:

$$VIA = (R^{wr} \times RG^{wrg} \times M^{wm})$$

[2-52]

Donde:

R = Reversibilidad

RG = Riesgo

M = Magnitud

wr = Peso del criterio reversibilidad

wrg = Peso del criterio riesgo

wm = Peso del criterio magnitud, cuya suma de pesos es igual a 1

Tabla 7. Escalas para las variables dentro la matriz de importancia.

Variable	Símbolo	Carácter	Escala	Tipo de Impacto
Intensidad	I	Alto (Según impacto)	Definido por impacto	Impacto Alto
		Medio (Según impacto)	Definido por impacto	Impacto Medio
		Bajo (Según impacto)	Definido por impacto	Impacto Bajo
Área de Influencia	E	Regional: el impacto sale de los límites de influencia del proyecto	8-10	Impacto Alto
		Local: el impacto se desarrolla en el área de influencia	4-7	Impacto Medio
		Puntual: el impacto se desarrolla en área propia del proyecto	0-3	Impacto Bajo
Duración de Impacto	D	Permanente: El impacto continua después de finalizada la actividad	4-5	Impacto Alto
		Temporal: se presenta mientras se desarrolla la actividad y termina con esta.	2-3	Impacto Medio
		Transitorio: se presenta intermitentemente durante la actividad	1	Impacto Bajo
Reversibilidad	R	Alto o irrecuperable	10	Irreversible
		Recuperable a largo plazo (+30 años) y altos costos.	8-9	Parcialmente reversible

		Reversible a mediano y largo plazo	4-7	Reversible
Riesgo	RG	Riesgo alto: hay certeza de que el impacto ocurra	8-10	Alto
		Riesgo medio: existe un 50% de certeza que el impacto ocurra	4-7	Medio
		Riesgo bajo: es probable que el impacto ocurra, no existe certeza	0-3	Bajo
Índice Ambiental Ponderado Modificado	VIA	Muy alto: Impacto muy alto sobre el medio	>8	Muy alto
		Alto: Impacto alto sobre el medio	6-8	Alto
		Medio: Impacto medio	2-6	Medio
		Bajo: Impacto bajo	<2	Bajo

Nota: Se detalla la escala de los valores asignables según la variable evaluada. Adaptado de “Borrador del Estudio de Impacto Ambiental de la Primera Línea del Metro de Quito”, ERVEN, 2012.

Las variables que se muestran en las Ecuaciones 2-51 y 2-52 definen numéricamente las escalas por su tipo de impacto según la Tabla 6. En el caso de la variable intensidad, las escalas se detallan en la Tabla 8 y 9 para las etapas de construcción y operación y mantenimiento, respectivamente.

Las escalas para la intensidad se clasifican según los siguientes indicadores: aire, agua, suelo, flora, fauna, medio socio-económico y paisajístico.

Etapas de construcción:

Tabla 8. Escala de intensidad para los impactos ambientales en la etapa de construcción.

		Intensidad In		
		Bajo	Medio	Alto
		0-2	3-7	8-10
Aire	Emisión de gases	Emisión en periodos cortos, de menos de 15 min en promedio, vehículos en constante mantenimiento y uso de filtros	Emisión en intervalos no mayor a 4 horas dentro del jornal de trabajo, uso de máquinas y generadores con periodos de mantenimiento regulares	Constante emisión, uso de máquinas y generadores sin filtros o poco mantenimiento
	Aumento del nivel de ruido	Si el nivel de es menor a 40 db por menos de 4 horas	Si el nivel de ruido es mayor a 70 db por menos de 4 hr; está entre 40 db y 70 db entre 4 hr y 8 hr; o es menor a 40 db por más de 8 hr	Si el nivel de ruido es mayor a 70 db por más de 8 horas

Tabla 8. (continuación)

Agua	Aumento de sólidos en suspensión	Los movimientos de tierras y la eliminación de vegetación dejan expuestas partículas de suelo al escurrimiento superficial menor 0.1% del área de la cuenca	Los movimientos de tierras y la eliminación de vegetación dejan expuestas partículas de suelo al escurrimiento superficial entre 0.1 al 0.5% del área de la cuenca	Los movimientos de tierras y la eliminación de vegetación dejan expuestas partículas de suelo al escurrimiento superficial en más de 0.5% del área de la cuenca
	Modificación de mecánica fluvial del río	Otras intercepciones de flujos de la escorrentía superficial	Interrupción de cauces secundarios	Interrupción de cauces principales
Suelo	Compactación de terreno	Se compacta menos del 10% del área del proyecto	Se compacta entre 10% y 20% del área del proyecto	Se compacta más del 20% del área del proyecto
	Cambio en el uso del suelo	Se cambia muy poco el uso de tierras agrícolas, forestales, o ganadero perjudicando a la población (negativo) o mejora levemente los terrenos por el cambio	Se cambia parcialmente el uso de tierras agrícolas, forestales, o ganadero perjudicando a la población (negativo) o incremento de servicios naturales por el cambio de manera temporal	Se cambia el uso de tierras agrícolas, forestales, o ganadero perjudicando a la población (negativo) o incremento de servicios naturales por el cambio permanentemente
	Cambio en el uso del suelo	Se cambia muy poco el uso de tierras agrícolas, forestales, o ganadero perjudicando a la población (negativo) o mejora levemente los terrenos por el cambio	Se cambia parcialmente el uso de tierras agrícolas, forestales, o ganadero perjudicando a la población (negativo) o incremento de servicios naturales por el cambio de manera temporal	Se cambia el uso de tierras agrícolas, forestales, o ganadero perjudicando a la población (negativo) o incremento de servicios naturales por el cambio permanentemente
Flora	Erosión de suelos	Las obras generan no deterioran los suelos o no es apreciable, no se realizan excavaciones masivas	Las obras generan deterioro en algunos puntos colindantes, se realiza excavaciones masivas a mediana escala	Las obras generan gran deterioro en los suelos colindantes, se realiza excavación masiva a gran escala
	Pérdida de estabilidad mecánica	Se realizan pequeños deslizamientos que no generan grandes esfuerzos de maquinaria	Existen algunos deslizamientos por la excavaciones, se necesita maquinaria pesada para estabilizar la zona	Existen grandes derrumbamientos de los cerros por las excavaciones, con grandes esfuerzos para estabilizar la zona
	Pérdida de cobertura vegetal	Pérdida de especies que con recuperación natural o con una ligera ayuda por parte del hombre, es posible su recuperación	Pérdida de especies comunes que pueden ser recuperadas con mitigación sencilla y poco costosa	Pérdida de especies endémicas o amenazadas
Fauna	Alteración de comunidades acuáticas	Ligero cambio en el comportamiento del río que no afecta significativamente a las especies acuáticas	Se cambia el comportamiento de especies acuáticas por el cambio medio en el comportamiento de río	Se cambia el comportamiento de las especies acuáticas o desaparecen por el uso de ataguías, embalses o cambio total del flujo del río

Tabla 8. (continuación)

	Efecto barrera para la población íctica	Las obras se presentan como elemento extraños que no generan mucha dificultad de paso a las especies	Las obras impiden en algunas partes el paso de las especies	La obras impiden el paso de las especies entre aguas abajo y aguas arriba del proyecto
	Alteración de comunidades de fauna terrestre	Pérdida poco significativa y en lugares con intervención humana permanentemente	Pérdida parcial de hábitat de especies en lugares ya intervenidos por el hombre regularmente	Pérdida de hábitat de especies en lugares vírgenes
Medio socio-económico	Incremento de habitantes en centros urbanos cercanos	Incremento de demanda de servicios pero sin colapsos	Colapso de servicios eléctricos	Colapso de redes de servicios básicos
	Aumento de posibilidades de empleo	Empleo menor al 40% de la población	Empleo de por lo menos el 40% de la población	Empleo de más del 60% de la población
	Incremento de actividad económica	El porcentaje de aumento de la tasa de crecimiento de empleo es menor del 10%	El porcentaje de aumento de la tasa de crecimiento de empleo está entre el 10 – 20%	El porcentaje de aumento de la tasa de crecimiento de empleo está entre el 20 – 30%
	Aumento de tránsito vehicular	Ligero incremento en el tráfico en horas de alta demanda	Incremento en el tráfico en vías secundarias	Incremento en el tráfico en vías principales y secundarias
	Riesgo de deterioro de vías de tránsito	Tráfico pesado en algunos días	Tráfico pesado en determinadas horas	Continuos viajes de tráfico pesado
	Mejoramiento y construcción de nuevas vías de acceso	Mejoramiento de algunas vías secundarias	Mejoramiento de por lo menos el 10% de las principales vías	Mejoramiento de por lo menos el 30% de las principales vías
Paisajístico	Alteración paisajística	No se aprecia gran cambio en el paisaje	El paisaje cambia parcialmente, todavía queda parte del paisaje inicial	El paisaje cambia drásticamente

Nota: Se detalla las consideraciones para la escala de intensidad. Adaptado de “Borrador del Estudio de Impacto Ambiental de la Primera Línea del Metro de Quito”, ERVEN, 2012.

Etapa de operación y mantenimiento:

Tabla 9. Escala de intensidad para los impactos ambientales en la etapa de operación y mantenimiento.

		Intensidad In		
		Bajo	Medio	Alto
		0-2	3-7	8-10
Aire	Aumento del nivel de ruido	Si el nivel de es menor a 40 db por menos de 4 horas	Si el nivel de ruido es mayor a 70 db por menos de 4 hr; está entre 40 db y 70 db entre 4 hr y 8 hr; o es menor a 40 db por más de 8 hr	Si el nivel de ruido es mayor a 70 db por más de 8 horas
Agua	Modificación del régimen hidrológico y mecánica fluvial del río	Otras intercepciones de flujos de la escorrentía superficial	Interrupción de cauces secundarios	Interrupción de cauces principales
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	Se realizan pequeños deslizamientos que no generan grandes esfuerzos de maquinaria	Existen algunos deslizamientos por la excavaciones, se necesita maquinaria pesada para estabilizar la zona	Existen grandes derrumbamientos de los cerros por las excavaciones, con grandes esfuerzos para estabilizar la zona
Flora	Remoción de cobertura vegetal	Pérdida de especies que con recuperación natural o con una ligera ayuda por parte del hombre, es posible su recuperación	Pérdida de especies comunes que pueden ser recuperadas con mitigación sencilla y poco costosa	Pérdida de especies endémicas o amenazadas
Fauna	Menoscabo en el hábitat de la fauna acuática	Ligero cambio en el comportamiento del río que no afecta significativamente a las especies acuáticas	Se cambia el comportamiento de especies acuáticas por el cambio medio en el comportamiento de río	Se cambia el comportamiento de las especies acuáticas o desaparecen por el uso de ataguías, embalses o cambio total del flujo del río
	Efecto barrera para la población íctica	Las obras se presentan como elemento extraños que no generan mucha dificultad de paso a las especies	Las obras impiden en algunas partes el paso de las especies	La obras impiden el paso de las especies entre aguas abajo y aguas arriba del proyecto
	Alteración de comunidades de fauna terrestre	Pérdida poco significativa y en lugares con intervención humana permanentemente	Pérdida parcial de hábitat de especies en lugares ya intervenidos por el hombre regularmente	Pérdida de hábitat de especies en lugares vírgenes
Paisajístico	Alteración paisajística	No se aprecia gran cambio en el paisaje	El paisaje cambia parcialmente, todavía queda parte del paisaje inicial	El paisaje cambia drásticamente

Nota: Se detalla las consideraciones para la escala de intensidad. Adaptado de “Borrador del Estudio de Impacto Ambiental de la Primera Línea del Metro de Quito”, ERVEN, 2012.

CAPITULO 3. INGENIERÍA DE DISEÑO

3.1 PARÁMETROS PRELIMINARES DE DISEÑO PARA EL CASO DE ESTUDIO

3.1.1 Ubicación

El proyecto se ubica cerca al pueblo de Comas, que está ubicado en el distrito de Comas, provincia de Concepción, departamento Junín, al margen derecho del río Huaruchaca vertiente del río Tulumayo. Asimismo, la ciudad de Comas posee 3 vías de acceso, estas son la carretera Concepción- Satipo-La Libertad; la carretera Concepción-Satipo-Comas-Aychana y la carretera Comas-Chaca-Macon.

El emplazamiento de la toma convencional se realiza a 3453 m.s.n.m. mientras que la toma tipo tirolesa se encuentra 3474 m.s.n.m, a una distancia horizontal siguiendo el cauce del río de 454 m, entre la ubicación de las tomas no se presenta ningún tributario.

En la Figura 18 (mayor resolución en el Anexo 2) se observa la ubicación de ambas tomas, que prácticamente están a la misma altitud, en una zona de alta montaña.

Figura 18. Ubicación de las tomas de captación. Adaptado de “Ubicación de poblados y tomas” Google Earth (2017)

3.1.2 Información Hidrológica

Los datos hidrológicos utilizados para el diseño de las tomas se han adaptado de Canchaya & Chero (2014). La data original proviene de diversas fuentes de información, tales como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), Instituto Geográfico Nacional (IGN) y las consultoras Cesel Ingenieros y Golder Associates. Los registros recopilados por Canchaya & Chero (2014), de la estación pluviométrica Comas no está completa, poseen periodos de hasta 15 años donde no se tienen valores. Por ello, en la tesis de Canchaya & Chero (2014) se toma como referencia la información de la estación Runatullo, ubicada 16 km al norte, considerada a criterio pues ambas se encuentran a la misma altitud y presentan similares condiciones.

A continuación, se resume el estudio hidrológico realizado por Canchaya, Christopher & Chero, Luis (2014) en la subcuenca Huaruchaca del río Tulumayo y los datos obtenidos de cálculo que se emplearon para la presente tesis:

Delimitación de la subcuenca de estudio

La subcuenca Huaruchaca se ubica entre las coordenadas $11^{\circ}51'36''$ y $11^{\circ}45'46''$ latitud sur y $74^{\circ}59'54''$ y $75^{\circ}06'29''$ longitud oeste, delimitada por la línea roja en la Figura 19 (mayor resolución en anexo 2 Plano A-01). Se trata de una de las subcuenca del río Tulumayo cuya área es 119.34 km^2 con una elevación máxima de 5400 msnm, una cota media de 4323.40 msnm y una longitud máxima de cuenca de 14.84 km.

Figura 19. Ubicación de la subcuenca de estudio. Adaptado de “Relieve de cuenca”, Google Earth, 2017.

Régimen de caudales

La información hidrométrica de la estación Angasmayo con el que trabajaron Canchaya & Chero (2014) corresponde al periodo de 1965 a 2005, perteneciente a la cuenca del mismo nombre; después de realizar la transposición se obtuvo un caudal medio anual de $4.88 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Huaruchaca	12.46	23.08	23.09	12.58	5.34	3.16	2.67	2.67	2.65	3.22	4.01	6.71

Figura 20. Caudales mensuales de la cuenca Huaruchaca, elaborado en base a información Canchaya & Chero, 2014 “Estudio y Diseño a Nivel Preliminar de una Pequeña Central Hidroeléctrica en el Distrito de Comas, Provincia de Concepción Perteneciente al Departamento de Junín”. Adaptado de Canchaya & Chero (2014)

Caudal aprovechable y ecológico

El caudal aprovechable para el proyecto es obtenido de la curva duración (se aprecia en el anexo 2). El valor para el diseño de las tomas se seleccionará al 100% de persistencia, por ser usado para como agua potable, energético y agrícola. Este valor resulta ser de $2.17 \text{ m}^3/\text{s}$.

Por otro lado, se tomó en cuenta el caudal ecológico, necesario para preservar la vida aguas abajo de la toma, en base a dos criterios: el primero, consideró el 20% de los tres meses consecutivos más secos; el segundo, considera como mínimo el

10% del caudal medio anual; de los cuales resultó un caudal ecológico de 0.480 m³/s. Finalmente, para el diseño de las estructuras se usa 1.69 m³/s como caudal de captación.

Avenidas extraordinarias

Se consideran las avenidas máximas para 50, 100 y 1000 años en el análisis de diseño de las obras de protección en caso de suscitarse uno de estos casos para un tiempo de vida útil del proyecto de 30 años. Canchaya & Chero (2014) calcularon estos valores utilizando las distribuciones de Gumbel, Gamma, Log Normal, Log Pearson y el método complementario de Las Envolventes de Descargas Máximas de Creager.

Los resultados promediados obtenidos para la cuenca de estudio fueron de 70.69 m³/s y 80.21 m³/s para los periodos de retorno de 50 y 100 años respectivamente. Fuentes & Franco (2000) recomiendan elegir el periodo de retorno de diseño según las condiciones de la zona a proteger, proporcionados en la Tabla 10.

Tabla 10. Periodo de retorno en función de la zona a proteger.

Características de la zona por proteger	Periodo de retorno en años
Parcelas agrícolas aisladas, sin posibles pérdidas de vidas humanas	5
Distritos de riego, sin riesgo de pérdidas de vidas humanas	25
Zonas agrícolas poco pobladas	50
Zonas agrícolas con poblados	100
Zona industrial y urbana	500
Zona densamente poblada	1000
Ciudades	10000

Nota: El valor se toma en función a las zonas adyacentes a la obra y seguridad. Adaptado de “Capítulo 3 del Manual de Ingeniería de Ríos: Estudio Hidrológico para Obras de Protección”, Fuentes & Franco, 2000.

Por esta consideración, el proyecto de obra ubicada aguas arriba de zonas agrícolas con poblado cercano, será diseñado con un periodo de retorno de 100 años. El riesgo es obtenido de la siguiente ecuación:

$$r = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n$$

[3-1]

Donde:

r = Riesgo

T = Periodo de retorno

n = Años de vida útil del proyecto

Mediante la Ecuación 3-1 se determina el riesgo del proyecto.

$$r = 1 - \left(1 - \frac{1}{100}\right)^{30}$$

$$r = 26.03 \%$$

Por tanto, el riesgo de que se supere la avenida de diseño para un periodo de retorno de 100 años es de 26%, calculada para los 30 años de vida útil. Se considera una vida útil de 30 años según lo expuesto por Amílcar & Hernández (2005) que dan un rango de 25 a 30 años característico para proyectos hidroenergéticos en zonas rurales.

3.1.3 Caudal de captación

El caudal de diseño para la captación es el mismo para ambos tipos de tomas, se determina a partir de la curva de duración para un 100% de persistencia para un proyecto hidroeléctrico, con el que se obtiene un gasto de 2.17 m³/s. A este valor se le disminuye una cantidad igual al caudal ecológico, pues es el que siempre debe escurrir por el río para mantener la vida de las especies aguas abajo de la obra de toma; así el caudal de captación de diseño será de 1.69 m³/s.

La finalidad de diseñar con igual caudal de captación es para poder realizar el análisis comparativo en secciones posteriores. Además, que la zona de implantación de una y otra no se ve afectada por algún tributario que aporte mayor caudal en favor de alguna ubicación seleccionada.

3.1.4 Pendiente del tramo de río

La pendiente del cauce que posee cada toma es distinta, por la ubicación donde ha sido emplazada. La toma convencional posee una pendiente de diseño es de 0.4% debido a que se encuentra en una parte más plana, a diferencia de la toma tipo

tirollesa, que se ha situado en un lugar más escarpado, con una pendiente de 18.7%, con el fin para favorecer su funcionamiento de acuerdo a la Tabla 1.

3.1.5 Cálculo de la anchura de encauzamiento

Este parámetro se calcula como el promedio de las anchuras de las fórmulas 2-2 y 2-3 para un caudal de 80.21 m³/s, el cual representa el máximo gasto de una avenida para un periodo de retorno de 100 años. Este caudal es elegido según el artículo 9 inciso 9.2b establecida por DCPRH (2016).

Para aplicar las ecuaciones, se descarta la Ecuación 2-1 de Blench, ya que el terreno de estudio no presenta materiales cohesivos como se aprecia en la Figura 21.

Figura 21. Material grueso de fondo y material cohesivo en orilla. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos

Para la Ecuación 2-2 de Altunin, se requiere la selección de un parámetro *ha* caracterizado por la zona del río y la condición del cauce, este se obtiene de la Tabla 2; por el material rocoso o con cantos rodados se utiliza un valor de *a* igual a 0.5.

Anchura según Altunin para la toma convencional:

$$B_r = \frac{0.5 \times (80.21)^{1/2}}{(0.004)^{1/5}}$$

$$B_r = 13.51 \text{ m}$$

Anchura según Altunin para la toma tipo tirollesa:

$$B_r = \frac{0.5 \times (80.21)^{1/2}}{(0.187)^{1/5}}$$

$$B_r = 6.26 \text{ m}$$

La fórmula de Petit utiliza como único dato el caudal máximo de avenida.

$$B_r = 2.45 \times (80.21)^{1/2}$$

$$B_r = 21.94 \text{ m}$$

Promedio:

$B_r = 17.70 \text{ m}$ para la toma convencional y $B_r = 14.10 \text{ m}$ para la toma tipo tirolesa

3.1.6 Cálculo del tirante extraordinario

El tirante se determina mediante la fórmula de Manning para un caudal máximo de $80.21 \text{ m}^3/\text{s}$. Los cálculos se realizan con la anchura de encauzamiento y un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.014, ya que la zona será revestida con concreto.

Tirante en toma convencional:

$$80.21 = \frac{(17.70 \times Y_r) \left(\frac{17.70 \times Y_r}{17.70 + 2 Y_r} \right)^{2/3} 0.004^{1/2}}{0.014}$$

$$Y_r = 1.04 \text{ m}$$

Tirante en toma tirolesa:

$$80.21 = \frac{(14.10 \times Y_r) \left(\frac{14.10 \times Y_r}{14.10 + 2 Y_r} \right)^{2/3} 0.187^{1/2}}{0.014}$$

$$Y_r = 0.37 \text{ m}$$

3.2 DISEÑO DE TOMA CONVENCIONAL PARA EL CASO DE ESTUDIO

3.2.1 Dimensionamiento de la ventana de captación

De acuerdo con los criterios de diseño para la toma convencional, a continuación, se presentan los valores calculados de las características físicas en la ventana de captación:

Figura 22. Dimensiones en la entrada de agua por la ventana de captación. Adaptado de “Diseño Hidráulico”, Krochin, 1978.

- altura de la carga de agua sobre la cresta de la ventana de captación H de 0.70 m
- altura de vertedero respecto al fondo del río y_1 de 0.80 m
- pérdida de carga por efecto barrera h_z de 0.07 m
- altura de la carga de agua desde la cresta de la ventana de captación hasta el borde libre en el desripiador h de 0.64 m
- altura del vertedero respecto al fondo del desripiador y_2 de 0.40 m.

Se comprueban las condiciones para flujo sumergido dadas en la sección 2.3.1:

1. $0.60 + 0.63 > 1.00$

$1.23 \text{ m} > 1.00 \text{ m}$

Se cumple

2. $0.07/1.00 < 0.70$

$0.07 < 0.70$

Se cumple

Para calcular la longitud de la ventana de captación, mediante la Ecuación 2-8, deben calcularse, previamente, los siguientes parámetros:

a) Coeficiente de vertedero libre de pared delgada, M_0

Se determina como el promedio de la Ecuación 2-6 de Konovalov y la Ecuación 2-7 de Bazin, que utilizan los parámetros H , y_1 indicados en la Figura 3.

Konovalov:

$$M_o = \left[0.407 + \frac{0.045 \times 0.60}{0.80 + 0.70} \right] \left[1 + 0.285 \left(\frac{0.80}{0.80 + 0.70} \right)^2 \right] \sqrt{2 \times 9.81}$$

$$M_o = 2.013$$

Bazin:

$$M_o = \left[1.794 + \frac{0.0133}{0.70} \right] \left[1 + 0.55 \left(\frac{0.70}{0.70 + 0.80} \right)^2 \right]$$

$$M_o = 2.030$$

Promedio:

$$M_o = 2.022$$

b) Coeficiente de corrección por sumersión, s

Se determina como el promedio de la Ecuación 2-9 de Bazin y la Ecuación 2-10 de Villemonte, que utilizan los parámetros H, h, h_z, y₂ indicados en la Figura 3.

Bazin:

$$s = 1.05 \left[1 - 0.2 \frac{0.63}{0.40} \right]^3 \sqrt{\frac{0.07}{0.70}}$$

$$s = 0.315$$

Villemonte:

$$s = \left[1 - \left(\frac{0.64}{0.70} \right)^{3/2} \right]^{0.385}$$

$$s = 0.450$$

Promedio:

$$s = 0.382$$

Longitud L y altura h_v de la ventana de captación

La longitud de la ventana se calcula mediante la Ecuación 2-8.

$$1.69 = 0.85 \times 0.382 \times 2.022 \times L \times 0.70^{3/2}$$

$$L = 4.39 \text{ m}$$

Este resultado se utiliza como base para calcular las dimensiones finales de la reja, la cual incluye las varillas, con una altura de ventana h_v de 0.70 m.

3.2.2 Dimensionamiento de la reja

Las dimensiones de las rejillas deben ser tales que puedan soportar el impacto de los materiales que transporte el río. De acuerdo con lo mencionado, los parámetros de diseño se eligen como sigue:

- anchura de la barra s de 10 cm (4 pulgadas)
- distancia entre las caras de las varillas de la reja b de 15 cm (6 pulgadas)

Se calcula el número de espacios con la Ecuación 2-11.

$$N^{\circ} \text{ de espacios} = \frac{4.39}{0.15}$$

$$N^{\circ} \text{ de espacios} = 29$$

Se calcula el número de rejillas según la Ecuación 2-12.

$$N^{\circ} \text{ de rejillas} = 29 - 1$$

$$N^{\circ} \text{ de rejillas} = 28$$

La longitud totalizada se obtiene mediante la Ecuación 2-13 con los valores obtenidos previamente.

$$L_{total} = (29 \times 0.15) + (28 \times 0.10)$$

$$L_{total} = 7.15 \text{ m}$$

Esta es la longitud en la que se disponen finalmente los barrotes de la reja.

Pérdida de carga por rejillas

Se desarrolla con la Ecuación 2-14, para ello, se requiere conocer el valor de k , que se determina con la Ecuación 2-15 de Kirshmer para rejillas parcialmente sumergidas en la condición regular de funcionamiento. Las rejillas son de sección rectangular y el ángulo de la reja respecto a la horizontal es de 90° .

$$k = 2.42 \times \left(\frac{0.10}{0.15} \right)^{4/3} \times \sin(90)$$

$$k = 1.41$$

La velocidad en la zona de encauzamiento se calcula mediante la ecuación de continuidad, para un caudal máximo de $3.89 \text{ m}^3/\text{s}$, similar al doble del caudal de captación ($Q = 1.84 \times L \times H^{1.5}$), este resulta un valor de 0.94 m/s .

$$h_z = 1.41 \frac{0.94^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_z = 0.06 \text{ m}$$

En el caso de avenidas, las rejillas se encuentran completamente sumergidas por lo que el coeficiente k se calcula con la Ecuación 2-16 de Creager. El área neta de paso entre rejillas igual a $A_n = 29 \times 0.15 \times 0.70 = 3.045 \text{ m}^2$ y el área bruta de la estructura de la reja está determina en $A_b = 7.15 \times 0.70 = 5.005 \text{ m}^2$. Con estos valores se calcula la pérdida de carga en periodo de avenidas.

$$k = 1.45 - 0.45 \left(\frac{3.045}{5.005} \right) - \left(\frac{3.045}{5.005} \right)^2$$

$$k = 0.8126$$

$$h_z = 0.8126 \frac{0.94^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_z = 0.04 \text{ m}$$

Finalmente, las pérdidas de carga por rejillas, tanto en el periodo regular como en época de avenidas, están contempladas dentro de los 6 cm.

3.2.3 Dimensionamiento del canal de purga al lado de azud

Velocidad de arrastre V_a

Su valor se determina a través de la Ecuación 2-17 con un coeficiente en función del tipo de material c igual a 4.0 por la mezcla de arena y grava, presente como caudal sólido del río y un diámetro del grano mayor de 0.085 m , según Canchaya & Chero (2014) para este proyecto.

$$V_a = 1.5 \times 4.0 \times (0.085)^{\frac{1}{2}}$$

$$V_a = 1.75 \text{ m/s}$$

Caudal unitario q

Este parámetro depende de manera directa de la velocidad de arrastre hallada anteriormente y se calcula a través de la Ecuación 2-18.

$$q = \frac{1.75^3}{9.81}$$
$$q = 0.55 \frac{m^3}{s} / m$$

Anchura del canal de purga, b_p

Se determina a través de la Ecuación 2-19, el caudal de purga se calcula como el ancho del canal de conducción para el canal de purga de desripador o como el 10% de la longitud del azud, Gutiérrez (2014).

$$b_p = 17.7 \times 10\%$$
$$b_p = 1.77$$

La anchura del canal de purga se aproxima a 1.80 m.

Pendiente del canal de purga, I_p

Se calcula a través de la Ecuación 2-20 considerando un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.05, por efectos del flujo turbulento.

$$I_p = \frac{0.05^2 \times 9.81^{10/9}}{0.55^{2/9}}$$
$$I_p = 0.036$$

3.2.4 Dimensionamiento de azud

Se requiere calcular la altura, la anchura y la longitud del azud que permitan elevar el nivel del agua y poder derivarla hacia la ventana de captación.

Altura del barraje, P

Se determina mediante la Ecuación 2-21 y considera una altura necesaria para evitar el ingreso del material h_o , calculado en la sección 3.2.1, igual a 0.80 m.

$$P = 0.80 + 0.70$$
$$P = 1.50 \text{ m}$$

Coefficiente de descarga del azud, C_a

Se utiliza el nomograma de la Figura 6 para una mayor aproximación del coeficiente de descarga del azud.

Con un C_a inicial de 2 se calcula la carga sobre el barraje, luego se determina la relación P/H_d y, con este valor, se ingresa al ábaco para obtener un nuevo valor para C_a . Las iteraciones realizadas se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Cálculo de coeficiente de descarga de azud C_a .

C_a	H_d	P/H_d	C_a (De ábaco)
2	1.497	1.002	2.14
2.14	1.431	1.048	2.14
2.14	1.431	1.048	2.14

Nota: Valores obtenidos en la iteración con el nomograma (figura 6) para el cálculo del coeficiente C_a . Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos

El coeficiente de descarga de azud C_a definitivo resulta 2.14

Carga sobre el barraje, H_d

Se calcula con la Ecuación 2-22 con un caudal máximo de avenida para un periodo de retorno de 100 años de $80.21 \text{ m}^3/\text{s}$, un coeficiente de descarga de azud C_a igual a 2.14 y una longitud de barraje de $L_{bf} = 17.70 - 1.80 - 0.30 = 15.60 \text{ m}$. (1.8 por la compuerta de limpia y 0.3 por el muro que separa ambas estructuras)

$$H_d = \left(\frac{80.21}{2.14 \times 15.60} \right)^{2/3}$$

$$H_d = 1.79 \text{ m}$$

Forma de la cresta del barraje

La anchura de la cresta del barraje se determina con la Ecuación 2-23 con las dimensiones calculadas anteriormente.

$$A_{bf} = 0.27 \times 1.79 + [2 \times 1.50 \times (1.79)^{0.85}]^{1/1.85}$$

$$A_{bf} = 2.90 \text{ m}$$

Se utilizará el perfil de Creager para reducir la erosión por el paso del río. Los valores de las abscisas y ordenadas se obtienen del producto de la carga sobre el barraje H_d , con la Tabla 3.

Las coordenadas resultantes del cálculo se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Coordenadas del perfil de Creager para el azud.

X	Y	X	Y	X	Y
0.00	0.226	1.08	0.108	2.15	0.70
0.18	0.065	1.26	0.176	2.33	0.86
0.36	0.013	1.44	0.264	2.51	1.01
0.54	0.000	1.61	0.355	2.69	1.19
0.72	0.011	1.79	0.459	2.87	1.37
0.90	0.045	1.97	0.58		

Nota: Coordenadas que representan el desarrollo del perfil de Creager para la toma convencional. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

El perfil desarrollado por el barraje se presenta en la Figura 23, con las coordenadas calculadas en la Tabla 12.

Figura 23. Perfil del azud para la toma convencional. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos

3.2.5 Dimensionamiento del colchón disipador

Las fórmulas presentadas en la sección 2.3.5 dependen de los tirantes conjugados que se generan a pie de barraje, el procedimiento de cálculo de estos es como sigue:

Se halla el tirante conjugado menor d_1 mediante la Ecuación 2-25, considerando un desnivel de 0.1 (considerando la pendiente y la longitud de barraje) y que la pérdida de carga entre las *secciones 0 y 1* está dada por la Ecuación 2-26.

$$h_{f(0-1)} = 0.1 \frac{2.53^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_{f(0-1)} = 0.033 \text{ m}$$

$$\frac{80.21}{15.60 \times d_1} = \left[2 \times 9.81 \left(0.1 + 1.50 + 1.79 - d_1 + \frac{2.53^2}{2 \times 9.81} - 0.033 \right) \right]^{1/2}$$

$$d_1 = 0.59 \text{ m}$$

El tirante conjugado mayor d_2 se determina a través de la Ecuación 2-27.

$$\frac{80.21^2}{9.81 \times 17.70 \times 0.59} + \left(\frac{0.59^2}{2} \times 17.70 \right) = \frac{80.21^2}{9.81 \times 17.7 \times d_2} + \left(\frac{d_2^2}{2} \times 17.70 \right)$$

$$d_2 = 2.39 \text{ m}$$

Longitud de colchón disipador

La longitud del colchón disipador se determina como el máximo valor de las fórmulas por tratarse de la condición más crítica:

Schoklitsch:

$$L = 5.5 \times (2.39 - 0.59)$$

$$L = 9.88 \text{ m}$$

Safranez:

$$L = 6 \times 0.59 \times 7.68$$

$$L = 11.30 \text{ m}$$

U.S. Bureau of Reclamation:

$$L = 4 \times 2.39$$

$$L = 9.54 \text{ m}$$

Baklmnetev-Martzke:

$$L = 5 \times (2.39 - 0.59)$$

$$L = 8.98 \text{ m}$$

Pavloski:

$$L = 2.5 (1.4 \times 2.39 - 0.59)$$

$$L = 6.87 \text{ m}$$

Por tanto, la longitud del colchón disipador es 11.30 m.

Espesor del colchón disipador

Se calcula a través de la Ecuación 2-33, con el caudal por unidad de anchura del río y la diferencia de nivel de agua entre las arriba y abajo del barraje.

$$e = 0.2 \times 4.53^{0.5} \times 2.70^{0.25}$$

$$e = 0.546 \text{ m}$$

El espesor del colchón disipador para la toma convencional, por fines constructivos será de 0.55 m.

3.2.6 Dimensionamiento del desripiador

El cálculo de la longitud del vertedero del desripiador hacia la transición es el mismo que el de la ventana de captación. Por lo expuesto se inicia el cálculo con las siguientes dimensiones calculadas anteriormente:

- altura de la carga de agua sobre la cresta del vertedero $H=H_I$ de 0.70 m
- altura del vertedero respecto al fondo del desripiador $Y_2=y_{1a}$ de 0.40 m

La dimensión del vertedero se determina mediante la Ecuación 2-8; sin embargo, previamente, se calcula el siguiente parámetro:

a) Coeficiente de vertedero libre de pared delgada, M_o

Se determina como el promedio de la Ecuación 2-6 de Konovalov y la Ecuación 2-7 de Bazin, que utilizan los parámetros H_I , y_{1a} indicados en la Figura 3.

Konovalov:

$$M_o = \left[0.407 + \frac{0.045 \times 0.43}{0.70 + 0.40} \right] \left[1 + 0.285 \left(\frac{0.43}{0.70 + 0.40} \right)^2 \right] \sqrt{2 \times 9.81}$$

$$M_o = 2.038$$

Bazin:

$$M_o = \left[1.794 + \frac{0.0133}{0.70} \right] \left[1 + 0.55 \left(\frac{0.43}{0.70 + 0.40} \right)^2 \right]$$
$$M_o = 2.078$$

Promedio:

$$M_o = 2.058$$

Longitud L_p del vertedero de pared delgada a la salida del desripiador

La longitud del vertedero se calcula mediante la Ecuación 2-8.

$$1.69 = 0.85 \times 0.405 \times 2.078 \times L \times 0.70^{3/2}$$
$$L = 3.46 \text{ m}$$

Este resultado se utiliza como base para calcular las dimensiones finales del vertedero es de 3.50 m y una altura de 0.40 m

Anchura del desripiador b_r

La longitud transversal se determina de igual magnitud que la longitud máxima del resalto hidráulico (por tratarse de la condición más crítica) que se genera al ingreso del flujo al desripiador. Los tirantes conjugados que se producen son $d_B = 0.05 \text{ m}$ y $d_C = 0.33 \text{ m}$.

Schoklitsch:

$$b_r = 5.5 \times (0.33 - 0.05)$$
$$b_r = 1.55 \text{ m}$$

Safranez:

$$b_r = 6 \times 0.05 \times 4.54$$
$$b_r = 1.98 \text{ m}$$

U.S. Bureau of Reclamation:

$$b_r = 4 \times 0.33$$
$$b_r = 1.34 \text{ m}$$

Baklmnetev-Martzke:

$$b_r = 5 \times (0.33 - 0.05)$$
$$b_r = 1.41 \text{ m}$$

Pavloski:

$$b_r = 2.5 (1.4 \times 0.33 - 0.05)$$

$$b_r = 1.04 \text{ m}$$

Por tanto, la anchura del desripiador b_r se aproxima a 2.00 m.

La purga del desripiador posee un caudal de diseño distinto, el caudal de purga se determina como el ancho del canal de conducción (caudal de captación) para el canal de purga de desripiador o como el 10% de la longitud del azud, Gutiérrez (2014). Por lo que el cálculo resulta:

$$b_p = 1.20$$

La purga del desripiador b_{rp} se aproxima a 1.20 m.

3.2.7 Dimensionamiento de la transición

Se requiere calcular la transición entre la longitud del vertedero en el desripiador igual a 3.10 m y el ancho del canal de conducción de 1.20 m, por lo que la longitud de transición se determina mediante la Ecuación 2-34.

$$L = \frac{3.50 - 1.20}{2 \tan(12^\circ 30')}$$

$$L = 5.18 \text{ m}$$

Por proceso constructivo se considera una longitud de 5.00 m, el cual posee un ángulo de ampliación de sección igual a 12.95° .

El radio de curvatura está dado por la Ecuación 3-35:

$$R = \frac{5.00}{2 \sin(2 \times 19.95)}$$

$$R = 5.72 \text{ m}$$

La longitud de transición se divide en 5 secciones, espaciadas cada un metro. El ancho variable b_x se calcula con los datos obtenidos anteriormente y mediante las ecuaciones presentadas en la sección 2.3.7, para las primeras secciones se utiliza la Ecuación 2-36 y para las últimas, la Ecuación 2-37. El procedimiento realizado se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Cálculo del ancho variable para la transición.

	a	b	c	d				
x	x ²	(L _t - x) ²	(R ² - a) ^{0.5}	(R ² - b) ^{0.5}	L tan(α) - (R - c)	R - d	0.5(b _x - b ₂)	b _x
0	0.00		5.72		1.15		1.15	3.50
1	1.00		5.63		1.06		1.06	3.32
2	4.00		5.36		0.79		0.79	2.78
3		4.00		5.36		0.36	0.30	1.80
4		1.00		5.63		0.09	0.09	1.38
5		0.00		5.72		0.00	0.00	1.20

Nota: Tabulación de valores hasta la obtención de los anchos de la transición espaciados a 1m.

Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

3.2.8 Dimensionamiento de las compuertas de regulación

La estructura se ubicará en tres componentes de la toma convencional, estas son: el canal de purga, el desripiador y el canal de conducción. El diseño requiere determinar las dimensiones de la compuerta que permita el paso del caudal para el que ha sido planteado, estas se calculan mediante la Ecuación 2-38. Para todos los casos se utiliza un coeficiente de descarga de compuerta C_c igual a 0.8 y una velocidad de diseño de 2.50 m/s, por recomendación de Mansen (2000).

Compuerta de limpia en el canal junto a azud

La anchura del canal de purga es de 1.80 m, según Gutiérrez (2014) el caudal de diseño para esta componente es el mismo es el caudal medio anual.

$$4.8 = 0.80 \times 1.80 \times H \times 2.50^{1/2}$$

$$H = 1.35 \text{ m}$$

Las dimensiones de la compuerta en el canal de purga son 1.80 m y 1.35 m, para la anchura y la altura respectivamente.

Compuerta de regulación en el desripiador

La compuerta del desripiador es de 1.20 m y según Gutiérrez (2014) el caudal de diseño para esta estructura debe ser igual al caudal de captación.

$$1.69 = 0.80 \times 1.20 \times H \times 2.50^{1/2}$$

$$H = 0.75 \text{ m}$$

Las dimensiones de la compuerta en el desripiador son 1.20 m y 0.75 m, para la anchura y la altura respectivamente.

Compuerta de regulación en el canal de conducción

La anchura del canal de conducción es de 1.20 m y el caudal de diseño para este componente se determina igual al caudal de captación.

$$1.69 = 0.80 \times 1.20 \times H \times 2.50^{1/2}$$

$$H = 0.75 \text{ m}$$

Las dimensiones de la compuerta en el canal de conducción son 1.20 m y 0.75 m, para la anchura y la altura respectivamente.

3.3 DISEÑO DE TOMA TIPO TIROLESA PARA EL CASO DE ESTUDIO

3.3.1 Dimensionamiento de la reja

Krochin (1978) plantea un procedimiento para el cálculo de las dimensiones de la reja; para ello, previamente, se necesita calcular los coeficientes que se detallan a continuación:

Coeficiente de contracción, C

Como se ha visto en la sección 2.4.1, el coeficiente de contracción depende de la inclinación y del dimensionamiento de las rejillas; este último se realiza evaluando aquellos casos en los que la estructura ha funcionado correctamente, estos se encuentran detallados en el informe realizado por PROAGRO en la implementación de tomas tipo tirolesa en ríos de alta montaña de Bolivia (PROAGRO, 2010).

Krochin (1978) recomienda seleccionar una sección transversal de forma rectangular, no se aconsejan barras circulares porque estas se obstruyen más fácilmente con arena y piedra fina; además, son más difíciles de limpiar. Asimismo, la separación de rejilla debe acorde con las velocidades que generan dentro del canal colector. De acuerdo con lo expuesto e iterar los valores para satisfacer las condiciones del canal colector, los parámetros de diseño son como sigue:

- espesor t de 2.50 cm (1 pulgada)
- altura e de 7.50 cm (3 pulgadas)
- espaciamiento s de 3.00 cm de cara libre a cara libre entre las rejillas
- pendiente β con respecto a la horizontal de rejilla 2:5 (21.80°), entre el rango recomendado por Méjico (2014).

La relación e/s es igual a 2.5, por lo tanto, de acuerdo con la Ecuación 2-40, el valor de C_0 es 0.50, con lo cual, el coeficiente de contracción C es:

$$C = 0.50 - 0.325 (0.40)$$

$$C = 0.37$$

Coefficiente de obstrucción, K

Para calcular el coeficiente de obstrucción K, además de los parámetros s y t calculados anteriormente, se requiere determinar f; es decir, el porcentaje de la superficie limpia que es ocupada por arenas y gravas que se incrustan en las rejillas durante la etapa de operación; este porcentaje se prevé en un 25%. Luego, aplicando la Ecuación 2-41 se obtiene:

$$K = (1 - 0.25) \frac{3.00}{3.00 + 2.50}$$

$$K = 0.409$$

Longitud L y anchura B de la rejilla

Luego de haberse obtenido los coeficientes de contracción y obstrucción, se calcula la longitud de la rejilla por medio de la Ecuación 2-42. Este proceso es iterativo (Tabla) y busca optimizar las dimensiones de la rejilla.

$$L = \frac{0.313 (1.69)}{(0.370 \times 0.409)^{3/2} 1.10^{3/2}}$$

$$L = 7.79 \text{ m}$$

Tabla 14. Iteración de dimensiones de rejilla.

B (m)	0.85	0.90	0.95	1.00	1.10	1.20	1.25
L (m)	11.46	10.52	9.70	8.98	7.79	6.83	6.43

Nota: Tabulación de longitud y anchura de rejilla. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Siguiendo dicho proceso, se obtuvo para la longitud de rejilla L una magnitud de 7.79 m, que se aproximará a **7.80 m** por condiciones de fabricación, y la anchura B de **1.10 m**, cuya proyección horizontal resulta 1.02 m, menor a los 1.25 m que recomienda Krochin (1978).

Número de varillas

Se determinará mediante la Ecuación 2-43.

$$7.80 = (N^{\circ} \text{ de varillas} + 1) \left(\frac{3.00}{100} \right) + (N^{\circ} \text{ de varillas}) \left(\frac{2.50}{100} \right)$$

$$N^{\circ} \text{ de varillas} = 143$$

Altura de carga sobre la rejilla H_0

Aplicando la ecuación 2-39, la altura que posee el agua sobre la rejilla se estima en un valor de 0.37 m.

$$H_0 = \left(\frac{1.69}{2.5 \times 0.270 \times 0.409 \times 1.10 \times 7.80} \right)^2$$

$$H_0 = 0.27 \text{ m}$$

3.3.2 Dimensionamiento del canal colector

A partir de la anchura de la rejilla, se procede a calcular la anchura del canal colector, que resulta ser la proyección horizontal de esta dimensión de la reja. Se utiliza un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.035, por las pérdidas adicionales generadas por el flujo en espiral y altamente turbulento en la galería que cambia de dirección de paralelo a perpendicular al río.

La sección longitudinal del canal se divide en tramos de un metro treinta, con un caudal variable en cada uno de estos, determinado por la Ecuación 2-44. Se establece que, por el cambio de flujo al ingresar al canal, la velocidad del agua en la sección de inicio del canal colector es de 1 m/s y en el final de este es 2.3 m/s, según lo visto en la acápite 2.4.2. La velocidad para cada sección intermedia se calcula con la Ecuación 2-46. Se verifica la Ecuación 2-45, donde la velocidad promedio del canal es de 1.65 m/s y que supera la velocidad mínima de arrastre de 1.63 m/s, se mantiene para evitar resalto. Con el caudal y la velocidad, se calcula el área de cada sección y la profundidad de su tirante aplicando la ecuación de la continuidad. Luego, se calcula la línea de energía a través de la ecuación de Bernoulli.

Se verifica que el número de Froude en la última sección es menor que 1, siendo este un flujo subcrítico que no se produce resalto.

$$F = \frac{2.30}{\sqrt{9.81 \times 0.668}}$$

$$F = 0.90$$

Los cálculos tabulados para cada sección se muestran la Tabla 15.

Tabla 15. Cálculo de la línea de energía en el canal colector.

x	Q _x	V _x	A _x =Q _x /V _x	d=A _x /B _{canal}	P	R	R ^{2/3}	S energía	h _f	h _f acumulado	V ² /2g
0.00	0.000	1.000	0.000	0.000	1.100	0.000	0.000	-	0.000	0.000	0.051
1.30	0.282	1.217	0.232	0.210	1.521	0.152	0.285	0.0223	0.029	0.029	0.075
2.60	0.563	1.433	0.393	0.357	1.815	0.217	0.361	0.0193	0.025	0.054	0.105
3.90	0.845	1.650	0.512	0.466	2.031	0.252	0.399	0.0209	0.027	0.081	0.139
5.20	1.127	1.867	0.604	0.549	2.197	0.275	0.423	0.0239	0.031	0.112	0.178
6.50	1.408	2.083	0.676	0.615	2.329	0.290	0.438	0.0277	0.036	0.148	0.221
7.80	1.690	2.300	0.735	0.668	2.436	0.302	0.450	0.0320	0.042	0.190	0.270

Nota: En función a la posición, sección del canal y conservación de energía se estima los valores del perfil de energía en cada posición evaluada. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

A partir de la Tabla 15, se determina la altura total de la línea de energía mediante la sumatoria del tirante, las pérdidas y la carga de velocidad. Las cotas para el canal se presentan en la Tabla 16, para una cota final igual a cero. La profundidad desde la sección $x = 0.00$ hasta la parte superior de la rejilla se estima en 0.25 m.

Tabla 16. Altura total de la línea de energía.

x	d + h _f acum. + V ² /2g	Cota de canal
0.00	0.051	1.08
1.30	0.315	0.81
2.60	0.516	0.61
3.90	0.686	0.44
5.20	0.839	0.29
6.50	0.984	0.14
7.80	1.128	0.00

Nota: Valores de energía en función a la posición. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

3.3.3 Dimensionamiento de azud

Altura del barraje, P

Se aproxima a partir de la altura de carga de agua sobre la reja, calculada anteriormente.

$$H \cong 0.40 \text{ m}$$

Como la altura del barraje debe estar comprendida entre 0.20 a 0.50 m y debe ser mayor al tirante sobre la rejilla, según se menciona en el acápite 2.4.1; se elige 0.40 m de altura de barraje en su cima y cercano a 0.30 m en la zona más baja agua arriba del perfil de creager.

Carga sobre el barraje, H_d

Se calcula con la Ecuación 2-48; sin embargo, previamente se debe adicionar la Ecuaciones 2-49 y 2-50 correspondiente a los coeficientes que representan el paso de agua en la zona de vertedero más la ventana de captación. Además, se utiliza un caudal de máxima avenida para un periodo de retorno de 100 años de $80.21 \text{ m}^3/\text{s}$, el coeficiente de descarga de azud C_a calculado anteriormente y una longitud de barraje de $L_b = 14.10 - 7.80 = 6.30 \text{ m}$.

Después de iterar la ecuación variando el H_d de la Ecuación 2-48 hasta obtener el caudal de diseño se obtiene lo siguiente:

$$80.21 = (2.08 \times 6.30 \times H_d)^{3/2} + (2.19 \times 7.80 \times (0.40 + H_d))^{3/2}$$

$$H_d = 1.69 \text{ m}$$

Forma de la cresta del barraje

La anchura de la cresta del barraje se determina con la Ecuación 2-23 con las dimensiones calculadas anteriormente.

$$A_{bf} = 0.27 \times 1.69 + [2 \times 0.40 \times (1.69)^{0.85}]^{1/1.85}$$

$$A_{bf} = 1.60 \text{ m}$$

Se utilizará el perfil de Creager para reducir la erosión por el paso del río.

Tabla 17. Coordenadas del perfil de Creager para el azud.

X	Y	X	Y	X	Y
0.00	0.213	0.67	0.010	1.35	0.248
0.17	0.061	0.84	0.042	1.52	0.334
0.34	0.012	1.01	0.101	1.69	0.432
0.51	0.000	1.18	0.165		

Nota: La coordenadas corresponden al desarrollo del perfil en la toma tipo tirolesa. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

El perfil desarrollado por el barraje se presenta en la Figura 24, con las coordenadas calculadas en la Tabla 17.

Figura 24. Perfil del azud para la toma tipo tirolesa. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

3.3.4 Dimensionamiento de la purga

Se requiere dimensionar una anchura de purga que permita evacuar el material sólido que es retenido por el azud y otra para el que ingresa al canal colector.

La velocidad de arrastre V_a y el caudal unitario q son los mismos valores presentados en la sección 2.3.3.

Anchura del canal de purga, b_p

a) En la salida del canal colector:

Según Gutiérrez (2014), el ancho del canal de purga se estima como el ancho del canal de conducción.

$$b_p = 1.20 \text{ m}$$

La anchura del canal de purga será 1.20m.

Pendiente del canal de purga, I_p

El valor de la pendiente I_p para ambas componentes de purga es igual a 0.036 después de despejar las ecuaciones 2-18 y 2-20.

3.3.5 Dimensionamiento de la compuerta de regulación

La estructura se emplazará en dos componentes de la toma tipo tirolesa, estas son: el canal de purga y el canal de conducción. Para todos los casos se utiliza un coeficiente de descarga de compuerta C_c igual a 0.8 y una velocidad de diseño de 2.50 m/s, detallado en el acápite 2.3.8

Compuerta de regulación en el canal de purga para desripiador

La anchura del canal de purga es de 1.20 m y el caudal de diseño para esta componente se estima como el caudal de captación.

$$1.69 = 0.80 \times 1.20 \times H \times 2.50^{1/2}$$

$$H = 1.17 \text{ m}$$

Las dimensiones de la compuerta para el canal de purga son 1.20 m y 1.20 m, para la anchura y la altura respectivamente.

Compuerta de regulación en el canal de conducción

La anchura del canal de conducción es de 1.20 m y el caudal de diseño para este componente se estima igual al caudal de captación.

$$1.69 = 0.80 \times 1.20 \times H \times 2.50^{1/2}$$

$$H = 1.17 \text{ m}$$

Las dimensiones de la compuerta para el canal de conducción son 1.20 m y 1.20 m, para la anchura y la altura respectivamente.

A continuación se muestra un resumen de los valores obtenidos para ambos tipos de tomas.

Tabla 18. Comparación de dimensiones entre toma convencional y toma tipo tirolesa.

		Toma Convencional	Toma Tirolesa
Parámetro preliminar	Dimensión		
Ubicación	Altitud	3453 m.s.n.m.	3474 m.s.n.m.
Río	Pendiente	0.4%	18.70%
	Anchura	17.70 m	14.10 m
	Tirante	1.04 m	0.37 m
Captación	Caudal	1.69 m ³ /s	1.69 m ³ /s
Componente	Dimensión		
Ventana de captación	Largo x Anchura	7.15 m x 0.70 m	7.80 m x 1.10 m
Rejilla	Espesor x Altura x Largo	0.10 m x 0.10 m x 0.70 m	0.075 m x 0.075 m x 1.35 m
Canal de limpia adyacente a azud	Anchura	1.80 m	No presenta
Canal de purga desripiador	Anchura	1.20 m	1.20m
Azud	Altura x Anchura x Largo	1.30 m x 2.40 m x 15.60 m	0.40 m x 1.60 m x 6.30 m
Colchón disipador	Longitud x Espesor	11.20 m x 0.55 m	No presenta
Desripiador	Vertedero 1, vertedero2, Anchura	3.10 m a 1.20 m x2.4m	-
Transición	Anchura	3.10 m a 1.20 m	No presenta
Comp. de regulación	Cantidad	3	2

Nota: El cuadro muestra un resumen comparativo de parámetros y dimensiones finales de la toma tipo tirolesa y toma convencional. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

3.4 IMPACTOS AMBIENTALES PARA EL CASO DE ESTUDIO

Con los impactos identificados como se indica en el capítulo anterior, se elaboraron las Tablas 5 y 6, en las cuales se muestran los impactos más importantes que se consideran para el presente proyecto. En la Tabla 7, se muestran las escalas para la valoración de dichos impactos ambientales.

3.4.1 Toma convencional:

Se realiza la valoración de los impactos generados por el empleo de la toma convencional, los resultados se expresan en las Tablas 19 y 20 para la etapa de construcción, y las Tablas 21 y 22 para la etapa de operación mantenimiento.

Tabla 19. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma convencional y obtención de la Magnitud.

Componente	Impacto	Intensidad (I)	Área de influencia (E)	Duración de impacto (D)	Magnitud (M)
Aire	Emisión de gases	5	6	3	4.90
Aire	Aumento de nivel de ruido	9	4	2	6.10
Agua	Aumento de sólidos en suspensión	1	5	1	2.20
Agua	Modificación de mecánica fluvial del río	6	2	3	4.20
Suelo	Compactación de terreno	8	2	3	5.20
Suelo	Cambio en el uso del suelo	8	3	4	5.70
Suelo	Erosión de suelos	6	2	3	4.20
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	2	2	3	2.20
Flora	Pérdida de cobertura vegetal	6	3	3	4.50
Fauna	Alteración de comunidades acuáticas	1	5	3	2.60
Fauna	Efecto barrera para la población íctica	5	4	3	4.30
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre	2	4	3	2.80
Medio Socio-Económico	Incremento de habitantes en centros urbanos cercanos	1	5	4	2.80
Medio Socio-Económico	Aumento de posibilidades de empleo	6	5	3	5.10
Medio Socio-Económico	Incremento de actividad económica	8	5	3	6.10
Medio Socio-Económico	Aumento de tránsito vehicular	9	5	3	6.60
Medio Socio-Económico	Riesgo de deterioro de vías de tránsito	2	4	3	2.80
Medio Socio-Económico	Mejoramiento y construcción de nuevas vías de acceso	2	4	5	3.20
Paisajístico	Alteración paisajística	5	3	5	4.40

Nota: Los valores de magnitud obtenidos consideran peso de 0.5, 0.3, 0.2 para la intensidad, área de influencia y duración respectivamente. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Tabla 20. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma convencional y obtención del VIA.

Componente	Impacto	Magnitud (M)	Reversibilidad (R)	Riesgo (RG)	VIA
Aire	Emisión de gases	4.90	4	9	-5.26
Aire	Aumento de nivel de ruido	6.10	4	6	-5.13
Agua	Aumento de sólidos en suspensión	2.20	4	6	-3.59
Agua	Modificación de mecánica fluvial del río	4.20	4	9	-4.98
Suelo	Compactación de terreno	5.20	6	4	-5.16
Suelo	Cambio en el uso del suelo	5.70	6	7	-6.12
Suelo	Erosión de suelos	4.20	6	7	-5.50
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	2.20	6	6	-4.22
Flora	Pérdida de cobertura vegetal	4.50	5	5	-4.82
Fauna	Alteración de comunidades acuáticas	2.60	5	6	-4.16
Fauna	Efecto barrera para la población íctica	4.30	5	4	-4.49
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre	2.80	5	4	-3.86
Medio Socio-Económico	Incremento de habitantes en centros urbanos cercanos	2.80	7	9	-5.41
Medio Socio-Económico	Aumento de posibilidades de empleo	5.10	5	9	5.83
Medio Socio-Económico	Incremento de actividad económica	6.10	5	9	6.21
Medio Socio-Económico	Aumento de tránsito vehicular	6.60	5	8	-6.20
Medio Socio-Económico	Riesgo de deterioro de vías de tránsito	2.80	5	8	-4.59
Medio Socio-Económico	Mejoramiento y construcción de nuevas vías de acceso	3.20	7	9	5.67
Paisajístico	Alteración paisajística	4.40	7	10	-6.51

Nota: Los valores de magnitud obtenidos consideran peso de 0.4, 0.25, 0.35 para la reversibilidad, riesgo y magnitud respectivamente. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Tabla 21. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma convencional y obtención de la Magnitud.

Componente	Impacto	Intensidad (I)	Área de influencia (E)	Duración de impacto (D)	Magnitud (M)
Aire	Aumento de nivel de ruido	4	2	4	3.60
Agua	Modificación del régimen hidrológico y mecánica fluvial del río	5	5	4	4.50
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	1	3	4	2.90
Flora	Remoción de cobertura vegetal	4	1	1	1.90
Fauna	Menoscabo en el hábitat de la fauna acuática	2	3	4	3.20

Tabla 21. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma convencional y obtención de la Magnitud. (continuación)

Componente	Impacto	Intensidad (I)	Área de influencia (E)	Duración de impacto (D)	Magnitud (M)
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre	5	4	4	4.30
Paisajístico	Alteración paisajística	7	3	5	5.20

Nota: Los valores de magnitud obtenidos consideran peso de 0.3, 0.2, 0.5 para la intensidad, área de influencia y duración respectivamente. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Tabla 22. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma convencional y obtención del VIA.

Componente	Impacto	Magnitud (M)	Reversibilidad (R)	Riesgo (RG)	VIA
Aire	Aumento de nivel de ruido (-)	3.60	4	4	-3.79
Agua	Modificación del régimen hidrológico y mecánica fluvial del río (-)	4.50	9	9	-6.36
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica (-)	2.90	4	9	-4.01
Flora	Remoción de cobertura vegetal (-)	1.90	5	7	-3.30
Fauna	Menoscabo en el hábitat de la fauna acuática (-)	3.20	7	9	-4.98
Fauna	Efecto barrera para la población íctica (-)	3.80	7	7	-5.16
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre (-)	4.30	4	7	-4.64
Paisajístico	Alteración paisajística	5.20	8	8	-6.45

Nota: Los valores de magnitud obtenidos consideran peso de 0.3, 0.2, 0.5 para la reversibilidad, riesgo y magnitud respectivamente. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

3.4.2 Toma tipo tirolesa:

Se realiza la valoración de los impactos generados por el empleo de la toma tipo tirolesa, los resultados se expresan en las Tablas 23 y 24 para la etapa de construcción, y las Tablas 25 y 26 para la etapa de operación mantenimiento.

Tabla 23. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma tipo tirolesa y obtención de la Magnitud.

Componente	Impacto	Intensidad (I)	Área de influencia (E)	Duración de impacto (D)	Magnitud (M)
Aire	Emisión de gases	5	5	3	4.60
Aire	Aumento de nivel de ruido	9	4	2	6.10
Agua	Aumento de sólidos en suspensión	1	4	1	1.90
Agua	Modificación de mecánica fluvial del río	4	2	3	3.20
Suelo	Compactación de terreno	6	2	3	4.20
Suelo	Cambio en el uso del suelo	8	3	4	5.70

Tabla 23. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma tipo tirolesa y obtención de la Magnitud. (Continuación)

Componente	Impacto	Intensidad (I)	Área de influencia (E)	Duración de impacto (D)	Magnitud (M)
Suelo	Erosión de suelos	7	2	3	4.70
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	1	2	3	1.70
Flora	Pérdida de cobertura vegetal	4	3	3	3.50
Fauna	Alteración de comunidades acuáticas	1	5	3	2.60
Fauna	Efecto barrera para la población íctica	3	4	3	3.30
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre	2	4	3	2.80
Medio Socio-Económico	Incremento de habitantes en centros urbanos cercanos	1	5	4	2.80
Medio Socio-Económico	Aumento de posibilidades de empleo	5	5	3	4.60
Medio Socio-Económico	Incremento de actividad económica	8	5	3	6.10
Medio Socio-Económico	Aumento de tránsito vehicular	9	5	3	6.60
Medio Socio-Económico	Riesgo de deterioro de vías de tránsito	1	4	3	2.30
Medio Socio-Económico	Mejoramiento y construcción de nuevas vías de acceso	2	4	5	3.20
Paisajístico	Alteración paisajística	4	2	5	3.60

Nota: Los valores de magnitud obtenidos consideran peso de 0.5, 0.3, 0.2 para la intensidad, área de influencia y duración respectivamente. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Tabla 24. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma tipo tirolesa y obtención del VIA.

Componente	Impacto	Magnitud (M)	Reversibilidad (R)	Riesgo (RG)	VIA
Aire	Emisión de gases	4.60	4	9	-5.14
Aire	Aumento de nivel de ruido	6.10	4	6	-5.13
Agua	Aumento de sólidos en suspensión	1.90	4	6	-3.41
Agua	Modificación de mecánica fluvial del río	3.20	4	9	-4.53
Suelo	Compactación de terreno	4.20	6	4	-4.79
Suelo	Cambio en el uso del suelo	5.70	6	7	-6.12
Suelo	Erosión de suelos	4.70	6	7	-5.72
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	1.70	6	6	-3.86
Flora	Pérdida de cobertura vegetal	3.50	5	5	-4.41
Fauna	Alteración de comunidades acuáticas	2.60	5	6	-4.16
Fauna	Efecto barrera para la población íctica	3.30	5	4	-4.09

Tabla 24. Valoración de impactos ambientales para la etapa de construcción de la toma tipo tirolesa y obtención del VIA. (Continuación)

Componente	Impacto	Magnitud (M)	Reversibilidad (R)	Riesgo (RG)	VIA
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre	2.80	5	4	-3.86
Medio Socio-Económico	Incremento de habitantes en centros urbanos cercanos	2.80	7	9	-5.41
Medio Socio-Económico	Aumento de posibilidades de empleo	4.60	5	9	5.62
Medio Socio-Económico	Incremento de actividad económica	6.10	5	9	6.21
Medio Socio-Económico	Aumento de tránsito vehicular	6.60	5	8	-6.20
Medio Socio-Económico	Riesgo de deterioro de vías de tránsito	2.30	5	8	-4.29
Medio Socio-Económico	Mejoramiento y construcción de nuevas vías de acceso	3.20	7	9	5.67
Paisajístico	Alteración paisajística	3.60	7	10	-6.06

Nota: Los valores de magnitud obtenidos consideran peso de 0.4, 0.25, 0.35 para la reversibilidad, riesgo y magnitud respectivamente. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Tabla 25. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma tipo tirolesa y obtención de la Magnitud.

Componente	Impacto	Intensidad (I)	Área de influencia (E)	Duración de impacto (D)	Magnitud (M)
Aire	Aumento de nivel de ruido	4	2	4	3.60
Agua	Modificación del régimen hidrológico y mecánica fluvial del río	2	5	4	3.60
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	1	3	4	2.90
Flora	Remoción de cobertura vegetal	2	1	1	1.30
Fauna	Menoscabo en el hábitat de la fauna acuática	1	3	4	2.90
Fauna	Efecto barrera para la población íctica	2	3	4	3.20
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre	3	4	4	3.70
Paisajístico	Alteración paisajística	4	3	5	4.30

Nota: Los valores de magnitud obtenidos consideran peso de 0.3, 0.2, 0.5 para la intensidad, área de influencia y duración respectivamente. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Tabla 26. Valoración de impactos ambientales para la etapa de operación y mantenimiento de la toma tipo tirolesa y obtención del VIA.

Componente	Impacto	Magnitud (M)	Reversibilidad (R)	Riesgo (RG)	VIA
Aire	Aumento de nivel de ruido	3.60	4	4	3.79
Agua	Modificación del régimen hidrológico y mecánica fluvial del río	3.60	9	9	5.69
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	2.90	4	9	4.01
Flora	Remoción de cobertura vegetal	1.30	5	7	2.73
Fauna	Menoscabo en el hábitat de la fauna acuática	2.90	7	9	4.74
Fauna	Efecto barrera para la población íctica	3.20	7	7	4.73
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre	3.70	4	7	4.30
Paisajístico	Alteración paisajística	4.30	8	8	5.87

Nota: Los valores de magnitud obtenidos consideran peso de 0.3, 0.2, 0.5 para la reversibilidad, riesgo y magnitud respectivamente. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

3.5 COSTOS DE PARTIDAS SIGNIFICATIVAS PARA EL CASO DE ESTUDIO

3.5.1 Partidas para el caso de estudio

La evaluación de costos de la presente investigación tiene como alcance las partidas más significativas del proyecto hidroeléctrico en la componente de captación, estas corresponden a aquellas que representen una variación por el uso de la toma tipo tirolesa o la toma convencional. Además, los precios con los que se evalúan los costos son los estimados incluyendo el transporte a la región Junín desde Lima, ya que se requerirá el envío de materiales que están sujeto a pedidos de fábrica como el caso de perfiles de acero para cada toma.

Las partidas seleccionadas para la comparación están especificadas con mayor detalle en el Anexo 5, cabe mencionar que para la partida de excavación y eliminación de material se disgregan en dos partidas para cada tipo de toma debido a que la toma tipo tirolesa excava a mayor profundidad, lo que disminuye el rendimiento.

A continuación, en la Tabla 27 se resume los precios unitarios para cada una de las partidas en evaluación.

Tabla 27. Precios unitarios de las partidas a ser analizadas.

COD.	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO UNITARIO
01-a	Excavación y eliminación con maquinaria pesada (inc. Trabajo bajo el agua) en Toma Convencional	Soles/m3	S/.55.21
01-b	Excavación y eliminación con maquinaria pesada (inc. Trabajo bajo el agua) en Toma tipo Tirolesa	Soles/m3	S/.56.39
02	Relleno y Compactado con material propio	Soles/m3	S/.52.35
03	Concreto en Obra $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$	Soles/m3	S/.521.40
04	Instalación Compuerta Metálica Armco de 1.20m x 0.75m	Soles/und	S/.1,635.14
05	Instalación de Compuerta Metálica Armco de 1.80m x 1.35m	Soles/und	S/.3,661.60
06	Instalación de Compuerta Metálica Armco de 1.20m x 1.20m	Soles/und	S/.2,174.55
07	Habilitación y Colocación Acero en Placas y cimiento	Soles/kg	S/.5.01
08	Encofrado y Desencofrado	Soles/m2	S/.89.95
09	Rejillas para Toma tipo Tirolesa de 1.1m	Soles/m.	S/.14,074.00
10	Rejillas para Toma Convencional de 0.70m	Soles/m.	S/.1,903.10

Nota: Los análisis de cada precio considerado se puede ver en el anexo 5. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

3.5.2 Partidas para diversos caudales

La evaluación de las diversas partidas significativas adicionales, cuyo objetivo es observar el comportamiento de la curva Q vs. \$, para caudales asociados a distintos valores de persistencia, por el cual se realizaron 8 diseños adicionales, 4 para cada tipo de toma producto del diseño de ambos tipos de tomas para distintos caudales de captación, toma en cuenta los mismos criterios descritos para el caso de estudio; se omite las partidas de excavación y relleno con el fin de tener una comparación dependiente solamente de las estructuras propias de cada tipo de toma.

A continuación se detallan las partidas requeridas después del diseño de la diferente toma en la siguiente tabla:

Tabla 28. Precios unitarios de las partidas a ser analizadas.

COD.	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	PRECIO UNITARIO
TOMA CONVENCIONAL			
01a	Instalación Compuerta Metálica Armco de 1.80m x 1.35m	Soles/und	S/.3,661.60
02a	Instalación Compuerta Metálica Armco de 1.20m x 0.75m	Soles/und	S/.1,635.14
03a	Instalación Compuerta Metálica Armco de 1.20m x 0.90m	Soles/und	S/.1,793.63
04a	Instalación Compuerta Metálica Armco de 1.30m x 0.95m	Soles/und	S/.1,947.19
05a	Instalación Compuerta Metálica Armco de 1.40m x 1.05m	Soles/und	S/.2,210.14
06a	Instalación Compuerta Metálica Armco de 1.50m x 1.15m	Soles/und	S/.2,536.56
07a	Rejillas para Toma Convencional de 0.70m dm	Soles/m.	S/.1,903.10
08a	Rejillas para Toma Convencional de 0.80m xm	Soles/m.	S/.1,999.40
09a	Rejillas para Toma Convencional de 0.90m xm	Soles/m.	S/.2,095.70
10a	Rejillas para Toma Convencional de 1.00m xm	Soles/m.	S/.2,192.00
11a	Rejillas para Toma Convencional de 1.20m xm	Soles/m.	S/.2,384.60
TOMA TIROLESA			
01b	Rejillas para Toma tipo Tirolesa de 1.1m x m	Soles/m.	S/.14,074.00
02b	Rejillas para Toma tipo Tirolesa de 1.2m x m	Soles/m.	S/.15,104.10
03b	Instalación Compuerta Metalica Armco de 1.20m x 1.20m	Soles/m.	S/.2,174.55
04b	Instalación Compuerta Metalica Armco de 1.20m x 1.45m	Soles/m.	S/.2,557.10
05b	Instalación Compuerta Metalica Armco de 1.30m x 1.55m	Soles/m.	S/.2,959.77
06b	Instalación Compuerta Metalica Armco de 1.40m x 1.70m	Soles/m.	S/.3,571.04
07b	Instalación Compuerta Metalica Armco de 1.50m x 1.95m	Soles/m.	S/.4,646.88
AMBOS CASOS			
03	Concreto en Obra $f'c = 280\text{kg/cm}^2$	Soles/m3	S/.521.40
07	Habilitación y Colocación Acero en Placas y cimient	Soles/kg	S/.5.01
08	Encofrado y Desencofrado	Soles/m2	S/.89.95

Nota: Los análisis de cada precio considerado se puede ver en el anexo 7. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Los caudales de captación considerados para realizar el diseño fueron extraídos de para diferentes persistencias del caso de estudio, los cuales son 4 adicionales al mostrado anteriormente:

Tabla 29. Caudales de captación para generar curva Caudal vs Inversión.

DESCRIPCIÓN	PORCENTAJES DE PERSISTENCIA (%)					UNIDAD
	100	90	80	70	60	
Caudal de diseño (Q_d) =	2.170	2.527	2.865	3.300	3.907	m ³ /s

Nota: Los caudales fueron obtenido de la curva de persistencia del caso de estudio (Ver Anexo 2) para simular diversos proyectos. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Los parámetros de diseño y valores finales de las estructuras se detallan en el Anexo 7 y el procedimiento de calculo en el Anexo 3.

CAPITULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS COMPARATIVO

La característica de captación de los tipos de toma resultó ser la diferencia más resaltante entre ambas estructuras hidráulicas, debido a que la toma convencional busca elevar el nivel del agua para derivarlo por la parte lateral del río mientras que la toma tirolesa obtiene el caudal en el fondo del cauce.

4.1.1 Parámetros preliminares de diseño

Ubicación

La toma convencional fue ubicada en una zona llana de la cuenca, pues requería una pendiente muy pequeña, la cual se encontró a 3453 m.s.n.m.; mientras que la toma tipo tirolesa se emplazó a una altura más elevada, a 3474 m.s.n.m., ya que se buscaba encontrar un lugar con mayor inclinación.

Caudal

El caudal de captación que se utilizó para el diseño de ambas tomas fue el mismo, $2.13 \text{ m}^3/\text{s}$, esto con la finalidad de poder comparar las estructuras en común teniendo este dato como referencia al realizar el cálculo. Asimismo, con el objetivo de observar el comportamiento de la curva Q vs. $\$$, para caudales asociados a distintos valores de persistencia, se realizaron 8 diseños adicionales, 4 para cada tipo de toma. El procedimiento de diseño se detalla en el Anexo 3.

Pendiente de tramo de río

De acuerdo a la ubicación, la pendiente del tramo del cauce para la toma convencional debía corresponder a un valor pequeño, el cual fue 0.40%; por otro lado, para la toma tipo tirolesa, la pendiente debía ser superior al 1% de acuerdo a la Tabla 1 proporcionado por la GTZ, para ello, se ubicó en un tramo con 18.7%.

Anchura de encauzamiento

Por las condiciones de la zona, no se consideró aplicar el método de Blench presentado en el marco teórico, debido a que el tipo de suelo del lugar no era compatible con los clasificados dentro de su concepto. Se procedió a estimar esta dimensión como el promedio de las fórmulas de Petit y Altunnin. La anchura utilizada para la toma convencional fue de 17.70 m y para la toma tirolesa fue de 14.10 m.

4.1.2 Componente de la estructura

Ventana de captación

La ubicación de la ventana en ambos tipos de toma es distinto, mientras que en obra de captación convencional, esta se ubica en la parte lateral del río; en la toma tipo tirolesa, se encuentra en el fondo del cauce. Las dimensiones de la ventana de captación de la toma convencional son 5.90 m de largo y 0.70 m de altura. La toma tipo tirolesa posee una abertura para captación de 7.80 m de largo y 1.10 m de anchura.

Rejillas

Las rejillas de la toma convencional son de 0.10 m x 0.10 m y poseen una longitud de 0.70 m, la sección es considerable debido a que resisten el impacto del material de arrastre, como rocas y bolonería, además, el espaciamiento de 0.15 m favorece que la maleza de los árboles no impida el pase a través de estas. Las varillas de la toma tipo tirolesa son de 0.025 m x 0.075 m y de 1.1 m de largo, sin considerar los apoyos en ambos extremos, la sección es menor pues se limita a impedir el paso del sedimento de fondo. En cuanto a la separación de rejillas, según Méjico (2014), recomienda valores entre 4 y 6 cm, sin embargo, si bien su experimento busca obtener el menor ingreso de sedimentos, no considera la condición de flujo a la salida del canal colector, pues el flujo en el canal debe permanecer en un régimen subcrítico, el planteamiento de Méjico solo dispone del paso de flujo a través de la rejilla, como se ve en la Figura 24.

Figura 25. Montaje de la toma tirolesa para una inclinación α . Adaptado de “Análisis de la configuración de la rejilla de toma de agua tirolesa para obtener caudal con menor cantidad de sólidos” Méjico (2014).

En consecuencia, el espaciamiento final de la rejilla que cumple con la condición del canal colector en este caso es de 3 cm y la inclinación empleada es de 21.8° , lo que favorece la disminución de ingreso de sólidos con el caudal captado.

Azud

Las dimensiones del barraje fijo para la toma convencional son 1.30 m de alto, ya que se requiere elevar el nivel del agua en la zona de captación, 15.60 m de anchura y 2.40 m de largo. Sin embargo, para la toma tipo tirolesa apenas se alcanzan los 0.40 m, su implementación permite derivar el flujo hacia la ventana de captación en épocas de estiaje, asimismo posee una anchura de 1.60 m y un largo de 6.30 m.

Colchón disipador

La estructura de disipación en la toma convencional se desarrolla en una longitud de 11.20 m, mientras que en la toma tipo tirolesa al estar en un régimen supercrítico no requiere esta estructura; para comprobar ello se utiliza el número de Froude que cambia de 2.63 a 2.48.

Canal de purga

Ambas estructuras poseen canal de purga, la diferencia es que en la toma convencional se tiene dos y la toma tipo tirolesa omite una debido a que el paso del flujo en el encauzamiento del río es continuo, favoreciendo el movimiento constante de los sedimentos. En la convencional, existe un canal en el tramo para

el desripiador y otro después de la compuerta adyacente al azud, en cuanto a la toma tipo tirolesa, solo una después del canal colector.

Compuerta de regulación

La toma convencional presenta tres compuertas de regulación, una de distribución, en el desripiador y adyacente a la purga del azud. Por otro lado, la toma tipo tirolesa solo emplea dos compuertas, una para la zona de distribución y otra para en canal de purga después del canal colector.

Lo mencionado anteriormente se muestra resumido en la Tabla 18.

Tabla 18. Cuadro comparativo de ventajas hidraulicas cuantificadas en dimensiones entre toma convencional y toma tipo tirolesa.

		Toma Convencional	Toma Tirolesa
Parámetro preliminar	Dimensión		
Ubicación	Altitud	3753 m.s.n.m.	3474 m.s.n.m.
Río	Pendiente	0.4%	18.70%
	Anchura	17.70 m	14.10 m
	Tirante	1.04 m	0.37 m
Captación	Caudal	1.69 m³/s	1.69 m³/s
Componente	Dimensión		
Ventana de captación	Largo x Anchura	5.90 m x 0.70 m	7.80 m x 1.10 m
Rejilla	Espesor x Altura x Largo	0.10 m x 0.10 m x 0.70 m	0.075 m x 0.075 m x 1.35 m
Canal de limpia adyacente a azud	Anchura	1.80 m	No presenta
Canal de purga desripiador	Anchura	1.20 m	1.20m
Azud	Altura x Anchura x Largo	1.30 m x 2.40 m x 15.60 m	0.40 m x 1.60 m x 6.30 m
Colchón disipador	Longitud x Espesor	11.20 m x 0.55 m	No presenta
Desripiador	Vertedero 1, vertedero2, Anchura	3.10 m a 1.20 m x2.4m	-
Transición	Anchura	3.10 m a 1.20 m	No presenta
Comp. de regulación	Cantidad	3	2

Nota: El cuadro muestra un resumen comparativo de parámetros y dimensiones finales de la toma tipo tirolesa y toma convencional. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

4.1.3 Valoración de los impactos ambientales

Las valoraciones de aplicar la metodología de la matriz de importancia muestran los resultados expresados en la Tabla 30 para la etapa de construcción y la Tabla 31 para la etapa de operación y mantenimiento.

Tabla 30. Comparación de valoración ambiental en la etapa de construcción.

Componente	Etapa de construcción		VIA	Δ (T-C)/T
	Impacto		Tirolesa	
Aire	Emisión de gases		5.14	2%
	Aumento de nivel de ruido		5.13	0%
Agua	Aumento de sólidos en suspensión		3.41	5%
	Modificación de mecánica fluvial del río		4.53	10%
Suelo	Pérdida de productividad biológica		4.79	8%
	Cambio en el uso del suelo		6.12	0%
	Erosión de suelos		5.72	4%
	Pérdida de estabilidad mecánica		3.86	9%
Flora	Pérdida de cobertura vegetal		4.41	9%
Fauna	Alteración de comunidades acuáticas		4.16	0%
	Efecto barrera para la población íctica		4.09	10%
	Alteración de comunidades de fauna terrestre		3.86	0%

Tabla 30. Comparación de valoración ambiental en la etapa de construcción.

(Continuación)

Medio Socio-Económico	Incremento de habitantes en centros urbanos cercanos	5.41	5.41	0%
	Aumento de posibilidades de empleo	5.62	5.83	4%
	Incremento de actividad económica	6.21	6.21	0%
	Aumento de tránsito vehicular	6.20	6.20	0%
	Riesgo de deterioro de vías de tránsito	4.29	4.59	7%
	Mejoramiento y construcción de nuevas vías de acceso	5.67	5.67	0%
Paisajístico	Alteración paisajística	6.06	6.51	7%

Nota: Para el gráfico comparativo solo se están considerando los impactos que presenten alguna diferencia entre cada toma y con estos se calcula el promedio de variación. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Tabla 31. Comparación de valoración ambiental en la etapa de operación y mantenimiento.

Componente	Etapa de operación y mantenimiento Impacto	VIA		Δ (T-C)/T
		Tirolesa	Convencional	
Aire	Aumento de nivel de ruido	-3.79	-3.79	0%
Agua	Modificación del régimen hidrológico y mecánica fluvial del río	-5.69	-6.77	12%
Suelo	Pérdida de estabilidad mecánica	-4.01	-4.01	0%
Flora	Remoción de cobertura vegetal	-2.73	-3.30	21%
Fauna	Menoscabo en el hábitat de la fauna acuática	-4.74	-4.98	5%
Fauna	Efecto barrera para la población íctica	-4.73	-5.16	9%
Fauna	Alteración de comunidades de fauna terrestre	-4.30	-4.64	8%
Paisajístico	Alteración paisajística	-5.87	-6.45	10%

Nota: Para el gráfico comparativo solo se están considerando los impactos que presenten alguna diferencia entre cada toma y con estos se calcula el promedio de variación. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

De los resultados obtenidos se aprecia que, en la etapa de construcción, los impactos ambientales se diferencian ligeramente en la mayoría; esto se debe a que la toma tirolesa, al tener menor cantidad de estructuras, requiere menor movimiento de materiales, que la llevan a impactar en menor magnitud. Sin embargo, al necesitar excavar para construir el canal colector y las estructuras siguientes, aunque ocasiona un impacto, es menor al generado por toma convencional en esta etapa.

Para la etapa de operación y mantenimiento, la diferencia más significativa se aprecia en la remoción de cobertura vegetal, al intervenir una mayor área por el tamaño de las estructuras necesarias. En el caso de los impactos hacia fauna y alteración paisajística se observa mayor diferencia por el principio que utiliza la tirolesa respecto a la toma convencional. La toma convencional genera un efecto de barrera para captar el agua; que limita el desplazamiento entre márgenes del río y se incorpora un represamiento respecto a la toma tirolesa que se integra mejor al río al estar bajo de este.

Para fines comparativos de los 19 y 8 impactos ambientales valorados para la etapa de construcción y operación respectivamente solo 11 y 6 de ellos presentan una variación. Por ello, se toma los impactos que tienen diferencia y se estima un promedio de variación de 7% para la etapa de construcción y 11% en la etapa de operación y mantenimiento que la toma tipo tirolesa impacta en menor grado respecto a la toma convencional.

4.1.4 Costo de partidas significativa en el caso de estudio

Después de la etapa de diseño que considera operación y mantenimiento, ya que se agregan estructuras que faciliten la maniobrabilidad de la toma convencional o tipo tirolesa, se elaboraron los planos presentados en el Anexo 4. Seguidamente, se procede con el metrado respectivo para las partidas definidas anteriormente en el acápite 3.5.1

Tabla 32. Presupuesto para la toma convencional.

Descripción	Unidad	Precio Unitario	Metrado	Parcial
Excavación y eliminación con maquinaria pesada (inc. bombeo de agua)	Soles/m ³	S/.55.21	702.91	S/.38,807.79
Relleno y Compactado con material propio	Soles/m ³	S/.52.35	223.41	S/.11,695.26
Concreto en Obra f'c =280kg/cm ²	Soles/m ³	S/.521.40	588.44	S/.306,810.24
Instalación Compuerta Metalica Armco de 1.20m x 0.75m	Soles/und	S/.1,635.14	2.00	S/.3,270.28
Instalación de Compuerta Metalica Armco de 1.80m x 1.35m	Soles/und	S/.3,661.60	1.00	S/.3,661.60
Habilitación y Colocación Acero en Placas y cimient	Soles/kg	S/.5.01	10872.83	S/.54,472.90
Encofrado y Desencofrado	Soles/m ²	S/.89.95	957.05	S/.86,086.25
Rejillas para Toma Convencional de 0.70m x5.9m	Soles/m.	S/.1,903.10	7.15	S/.13,607.17
			TOTAL	S/.518,411.48

Nota: Los valores mostrados se detallan en los anexos de la tesis. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

Tabla 33. Presupuesto para la toma tipo tirolesa.

Descripción	Unidad	Precio Unitario	Metrado	Parcial
Excavación y eliminación con maquinaria pesada (incluye trabajo bajo el agua) Tirolesa	Soles/m ³	S/.56.39	187.30	S/.10,562.06
Relleno y Compactado con material propio	Soles/m ³	S/.52.35	244.49	S/.12,768.99
Concreto en Obra f'c =280kg/cm ²	Soles/m ³	S/.521.40	290.46	S/.151,444.60
Instalación de Compuerta Metalica Armco de 1.20m x 1.20m	Soles/und	S/.2,174.55	2.00	S/.4,349.10
Habilitación y Colocación Acero en Placas y cimient	Soles/kg	S/.5.01	5646.02	S/.28,286.55
Encofrado y Desencofrado	Soles/m ²	S/.89.95	469.54	S/.42,235.55
Rejillas para Toma tipo Tirolesa de 1.1m	Soles/m.	S/.14,074.00	7.80	S/.109,777.20
			TOTAL	S/.359,453.62

Nota: Los valores mostrados se detallan en los anexos de la tesis. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

De las Tabla 32 y 33 se puede apreciar la diferencia de 30.06% entre la diferencia de las partidas de la toma tipo tirolesa y la toma convencional respecto a la toma convencional. La partida con mayor diferencia monetaria entre ambos presupuestos es la partida de rejillas empleadas, debido a que la rejilla necesaria para la toma tipo tirolesa es mucho más cara; sin embargo, en las partidas de concreto, acero y encofrado, la inversión necesaria es casi la mitad del que se requiere en la toma convencional.

4.1.5 Costo de partidas significativa para diversos caudales.

De manera similar al caso de estudio, se presupuestaron las tomas requeridas para los 5 diseños por cada tipo de toma y elaboró una curva de Caudal vs Inversión que se presenta en la Tabla 34.

Tabla 34. Presupuesto y curvas Caudal Vs Inversión.

DESCRIPCIÓN	Metrado				
	Q1 (2.17)	Q2 (2.53)	Q3 (2.87)	Q4 (3.3)	Q5 (3.91)
Toma Convencional	S/.467,021.62	S/.482,393.96	S/.496,083.81	S/.510,084.95	S/.524,447.18
Toma Tirolesa	S/.336,092.58	S/.369,312.38	S/.401,110.32	S/.445,814.41	S/.483,967.95
(C-T)/T	28.03%	23.44%	19.14%	12.60%	7.72%

Nota: Los valores mostrados se detallan en los anexos de la tesis. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

De las curvas de la tabla se aprecia que la ventaja económica de la toma tipo tirolesa se ve reducida mientras se va incrementando el caudal de captación; además, la pendiente de la curva para la toma convencional es menos sensible a este parámetro respecto a la toma tipo tirolesa que presenta una mayor pendiente, lo que demuestra su cambio proporcional.

4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La ubicación adecuada fue determinada por la pendiente del terreno óptimas para cada tipo de toma y la poca proximidad a los aportes secundarios de la cuenca, que en época de avenidas tienen mayor probabilidad de traer materiales sueltos que deterioren u obstruyan las tomas; es por ello que la ubicación final de la toma convencional y la toma tipo tirolesa son diferentes y así se logra una condición favorable para cada forma de captar el agua.

Basado en el análisis realizado para los parámetros de diseño, la toma tipo tirolesa requiere menor cantidad de estructuras, al aprovechar algunas de ellas para cumplir doble función como el caso del canal de purga que también actúa como desripador. Por otro lado, al captar el agua al fondo de la sección transversal del río, en la toma tipo tirolesa la necesidad de barraje para elevar el nivel del agua no existe, sino solo para dirigirla hacia la rejilla, por lo que se aprecia una reducción de 1.50m necesarios en la convencional a 0.40 m en la toma tipo tirolesa. También, es necesario mencionar que la altura final de los muros tanto de la convencional y la toma tipo tirolesa prevén la limpieza de las estructuras, lo que implica cerrar la compuerta de ingreso al canal de distribución y desarenadores. Esta premisa se manifiesta con mayor incidencia en la toma tipo tirolesa, debido a que el nivel de captación se encuentra por debajo del nivel de río y, cuando este se interrumpe, las estructuras previas, tales como canal de purga y repartición tienden a igualar el tirante del río por lo que es necesario que los muros en estas zonas sean más altos. También, esta condición de muros más altos y el alto costo de la rejilla genera que conforme mayor caudal de captación requiera o elija para el diseño, la toma tipo tirolesa va perdiendo la ventaja económica hasta un punto de no ser rentable su uso. Respecto a la rejilla, resaltar que los perfiles necesarios para la construcción de la rejilla de la toma tipo tirolesa no son tan solicitados, por lo que requerirá hacer el

pedido con una empresa que los fabrique; en tanto, cuando se compara los precios finales de las rejilla usadas por cada tipo de toma, es evidente que la toma tipo tirolesa requiere de una mayor inversión de casi 10 veces el valor respecto a la toma convencional; aun así la toma tipo tirolesa continúa siendo más económica a la toma convencional hasta un caudal de diseño de menor a los $3.40 \text{ m}^3/\text{s}$ para la configuración planteada en esta tesis.

Además, como se detalla en la Tabla 32 y 33 de costos para el caso de estudio, el principio de captación se refleja en que la toma tipo tirolesa es más económica que la toma convencional en un 30.66%. Asimismo, cuando se quita factores como la topografía la diferencia baja a 28.03%, que aun sigue siendo un ahorro a considerar. Sin embargo, como se ve en la Tabla 34, el ahorro de la toma tipo tirolesa respecto a la toma convencional se ve disminuido mientras va creciendo el caudal de captación hasta solo un 7.72%. En otras palabras, la toma tipo tirolesa es ventajosa cuando los caudales no son grandes, menores a un $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$ aproximadamente.

Con respecto a la parte ambiental realizada, si bien ambos tipos de toma poseen valores en impactos ambientales similares, al considerar el conjunto de diferencias menores que la toma tipo tirolesa tiene respecto a la toma convencional, se infiere que ello se traduce en menores costos en los planes e implementación para mitigar los impactos. Además, se observa que la toma tipo tirolesa se llega a integrar mejor al ambiente natural que la toma convencional.

CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos de la investigación realizada se extraen las siguientes conclusiones:

- Respecto al tema hidráulico, el diseño de la toma tipo tirolesa se ve reducida respecto a la toma convencional, debido a que la estructura requerida de esta última está conformada por una mayor cantidad de elementos que elevan el nivel de complejidad y las consideraciones necesarias para el dimensionamiento; entre estas consideraciones están, por ejemplo, la estimación de pérdidas de carga, desnivel de cotas y procesos constructivos. Asimismo, la no requiere un colchón disipador en la toma tipo tirolesa por la gran pendiente en la que se emplaza y régimen supercrítico, y aprovecha el canal de purga como desripiador, en cambio en la toma convencional se requiere ambas estructuras por separado.

Tabla 18. Cuadro comparativo de ventajas hidráulicas cuantificadas en dimensiones entre toma convencional y toma tipo tirolesa.

		Toma Convencional	Toma Tirolesa
Parámetro preliminar	Dimensión		
Ubicación	Altitud	3453 m.s.n.m.	3474 m.s.n.m.
Río	Pendiente	0.4%	18.70%
	Anchura	17.70 m	14.10 m
	Tirante	1.04 m	0.37 m
Captación	Caudal	1.69 m ³ /s	1.69 m ³ /s
Componente	Dimensión		
Ventana de captación	Largo x Anchura	7.15 m x 0.70 m	7.80 m x 1.10 m
Rejilla	Espesor x Altura x Largo	0.10 m x 0.10 m x 0.70 m	0.075 m x 0.075 m x 1.35 m
Canal de limpia adyacente a azud	Anchura	1.80 m	No presenta
Canal de purga desripiador	Anchura	1.20 m	1.20m
Azud	Altura x Anchura x Largo	1.30 m x 2.40 m x 15.60 m	0.40 m x 1.60 m x 6.30 m
Colchón disipador	Longitud x Espesor	11.20 m x 0.55 m	No presenta
Desripiador	Vertedero 1, vertedero2, Anchura	3.10 m a 1.20 m x 2.4m	-
Transición	Anchura	3.10 m a 1.20 m	No presenta
Comp. de regulación	Cantidad	3	2

Nota: El cuadro muestra un resumen comparativo de parámetros y dimensiones finales de la toma tipo tirolesa y toma convencional. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

- Para un mismo caudal de captación, las dimensiones de la toma tipo tirolesa son menores que las de la toma convencional. Este aspecto conduce a una reducción de la inversión en las partidas significativas del 30.66% en la construcción de la toma tipo tirolesa con respecto a la convencional para satisfacer la misma demanda en este caso de estudio.
- La ventaja económica de la toma tipo tirolesa sobre la toma convencional se produce cuando el caudal de captación posee un valor pequeño, para el caso de la presente tesis dicho caudal cumple la condición cuando es menor a los 3.40 m³/s aproximadamente, como se aprecia en la Tabla 34.

Tabla 34. Presupuesto y curvas Caudal Vs Inversión.

DESCRIPCIÓN	Metrado				
	Q1 (2.17)	Q2 (2.53)	Q3 (2.87)	Q4 (3.3)	Q5 (3.91)
Toma Convencional	S/.467,021.62	S/.482,393.96	S/.496,083.81	S/.510,084.95	S/.524,447.18
Toma Tirolesa	S/.336,092.58	S/.369,312.38	S/.401,110.32	S/.445,814.41	S/.483,967.95
(C-T)/T	28.03%	23.44%	19.14%	12.60%	7.72%

Nota: Los valores mostrados se detallan en los anexos de la tesis. Derechos reservados 2017 por Cabello & Vallejos.

- La toma tipo tirolesa ocasiona menor impactos ambientales negativos que la toma convencional; siendo estas cifras de 7% y 11% en la etapa de construcción, y de operación y mantenimiento respectivamente; esta diferencia se debe a la magnitud de obras requeridas en cada caso.
- Para zonas de alta montaña, la toma tipo tirolesa representa una mejor alternativa frente a la toma convencional, por las ventajas en diseño, costos e impactos ambientales cuando los caudales de captación son pequeños. Con ello, se valida la hipótesis planteada en la presente investigación.

RECOMENDACIONES

- Para proyectos posteriores se recomienda realizar un estudio de caudales mínimos con el fin de afinar los niveles de la ventana de captación y azud.
- Por la importancia que posee en la colmatación de las estructuras de toma, se recomienda realizar un estudio detallado de sedimentos para el proyecto, el cual está fuera del alcance de la presente investigación.
- Dado que el detalle de esta investigación es solamente un perfil, se recomienda para la implementación del proyecto que se lleven a cabo el análisis de las otras fases en los niveles correspondientes.
- Con la información de la presente tesis se recomienda elaborar un análisis comparativo utilizando la galería filtrante como obra de captación, considerando la granulometría del río como un componente importante en la evaluación de dicha estructura.
- Se recomienda construir un desarenador en el canal de conducción para limpiar el sedimento que pueda ingresar al canal de distribución.

BIBLIOGRAFÍA

- ☞ **Amílcar & Hernández (2005).** *Metodología para la realización de pequeños proyectos de aprovechamiento hidroeléctrico en comunidades rurales.* (Tesis para optar Grado de Ingeniero Civil). San Salvador, El Salvador. Universidad de El Salvador.
- ☞ **ANA (2011).** *Tratamiento de Cauce del Río para el Control de Inundaciones en la Cuenca Santa.* Autoridad Nacional del Agua. Lima, Perú.
- ☞ **Arbulú, José (2015).** *Diseño de Obras Hidráulicas.* Lambayeque, Perú. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- ☞ **Barry, Roger (2008).** *Mountain Weather and Climate.* 3^{ra} ed. Cambridge University Press.
- ☞ **Bustamante, Juan (2012).** *Estudio de Encauzamiento y Defensas Ribereñas en el Río Chancay-Lambayeque Sector Centro Poblado “Rinconazo” Tuman.* (Tesis para optar Grado de Ingeniero Civil). Lambayeque, Perú. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- ☞ **Canchaya, Christopher & Chero, Luis (2014).** *Estudio y Diseño a Nivel Preliminar de una Pequeña Central Hidroeléctrica en el Distrito de Comas, Provincia de Concepción Perteneciente al Departamento de Junín.* (Tesis para optar al Grado de Ingeniero Civil). Lima. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
- ☞ **Castillo, Luis & Lima, Paulina (2010).** *Análisis del Dimensionamiento de la Longitud de Reja en una Captación de Fondo.* XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- ☞ **CAPECO (2014).** *Análisis de Precios Unitarios en Edificaciones.* Cámara Peruana de la Construcción. Lima, Perú.
- ☞ **Castro, Omar (2010).** *Diseño de Estructuras Hidráulicas.* Comunicación personal. Moquegua, Perú. Universidad José Carlos Mariátegui.
- ☞ **Chow, Ven Te (1994).** *Hidráulica de Canales Abiertos.* McGraw-Hill. Santafé de Bogotá.
- ☞ **DCPRH (2016).** Resolución Jefatural N° 332-2016-ANA. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua, Ministerio de Agricultura y Riego. Lima, Perú.

- ☞ **EVREN (2012).** *Borrador del Estudio de Impacto Ambiental de la Primera Línea del Metro de Quito, Capítulo 10: Identificación y Valoración de Impactos Ambientales.* Quito, Ecuador.
- ☞ **Fernández, Demetrio; Jiménez, Gonzalo; Martínez, Mario; Medina, Alfonso y Uribe, Daisy (2012).** *Obras de Toma para Aprovechamientos Hidráulicos.* Unidad Técnica Especializada de COUSSA y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México.
- ☞ **Fuentes, Oscar & Franco, Víctor (2000).** *Capítulo 3 del Manual de Ingeniería de Ríos: Estudio Hidrológico para Obras de Protección.* México. UNAM.
- ☞ **Galarza, Leoncio; Novillo, Marcelo y Romero, Guillermo (1985).** *Manual de Diseño de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas - Volumen III Obras Civiles.* Bucaramanga, Colombia.
- ☞ **Google Earth (Versión 7.3.0.) [software]. (2017).** *Relieve de Cuenca* [Captura de Pantalla]. Google.
- ☞ **Google Earth (Versión 7.3.0.) [software]. (2017).** *Ubicación de poblados y tomas* [Captura de Pantalla]. Google.
- ☞ **Guevara, Edilberto (2014).** *Planificación de Sistemas Ambientales para el Aprovechamiento de Recursos Hídricos.* Ingeniería Civil (Revista Técnica del Capítulo de Ingeniería Civil) No. 49, julio 2014. Colegio de Ingenieros del Perú.
- ☞ **Gutierrez, Cesar (2014).** *Programa para el diseño hidráulico y Estructural de bocatomas tipo barraje con el visual basic 9.0- Huamanga Ayacucho-2011.* (Tesis para optar al Grado de Ingeniero Agrícola). Ayacucho. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.
- ☞ **Gracia, Jesús & Maza, José (2000).** *Capítulo 11 del Manual de Ingeniería de Ríos: Morfología de Ríos.* México. UNAM.
- ☞ **Grupo S10 (2016).** *Costos: Construcción, Arquitectura e Ingeniería.* Año 21- Edición 264.
- ☞ **Equino, Manuel (2013).** *Obras Hidráulicas. Ventana de Captación.* [Diapositivas de PowerPoint]. (4 de febrero de 2016).

- ☞ **Herrera, Diego (2013).** *Mejoramiento Hidráulico al Desarenador y Rejilla de la Toma Caucasiana del Modelo Hidráulico Reducido del Río Arturo Implementado en la Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática* (Tesis para optar al Grado de Ingeniero Civil). Quito. Universidad Central del Ecuador.
- ☞ **Krochin, Sviatoslav (1978).** *Diseño Hidráulico*. Segunda Edición. Editorial de la Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- ☞ **Lauterjung, Helmut, & Schmidt, Gangolf (1989).** *Planning of Water Intake Structures for Irrigation or Hydropower*. GTZ-GmbH. Eschborn. RFD
- ☞ **Mansen, Alfredo (2000).** *Diseño de Bocatoma*. Comunicación personal. Lima, Perú. UNIFIC.
- ☞ **Mattos, Roger (1999).** *Pequeñas Obras Hidráulicas*. UNESCO: Instituto de Hidráulica e Hidrología. Recuperado de <http://www.unesco.org.uy/phi/biblioteca/archive/files/eadd0e8c29935c9517f15ef51e46f83f.pdf> [18 de agosto de 2015]
- ☞ **Mejico, Walter (2014).** *Análisis de la configuración de la rejilla de toma de agua tirolesa para obtener caudal con menor cantidad de sólidos*. (Tesis para optar al Grado de Magister en Tecnología Energética). Huancayo. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- ☞ **Montaño, Ariel & Salazar, Juan (2009).** *Actualización del Material de Apoyo Didáctico para la Enseñanza y Aprendizaje de la Asignatura de Obras Hidráulicas I “Texto Guía”* (Trabajo dirigido para optar a la Licenciatura en Ingeniería Civil). Cochabamba. Universidad Mayor de San Simón.
- ☞ **Ordoñez, Mario (2010).** *Automatización de las Herramientas de Cálculo para el Análisis y Diseño de Encauzamiento de Ríos – Implementación en el Laboratorio Virtual de Hidrología (HIDROVLAB)*. (Tesis para optar Grado de Ingeniero Civil). Loja. Universidad Técnica Particular de Loja.
- ☞ **Ordoñez, Rodolfo (2011).** *Metodología de Identificación de Impactos Ambientales en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas de Pasada en Cauces Naturales, Estudio de Caso*. (Memoria para optar por el Título de Ingeniero Civil). Santiago de Chile. Universidad de Chile.

- ☞ **PROAGRO (2010).** *Tomas Tirolesas: Criterios de Diseño y Construcción de Obras de Captación para Riego*. PROAGRO. Recuperado de <http://www.senari.gob.bo/archivos/TOMAS TIROLESAS.pdf> [20 de Agosto de 2015].
- ☞ **RLRH (2010).** *Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos. Ley N°29338*. Autoridad Nacional del Agua, Ministerio de Agricultura y Riego. Lima, Perú.
- ☞ **Rocha, Arturo (2003).** *La bocatoma, estructura clave en un proyecto de aprovechamiento hidráulico*. Revista Ingeniería Civil Año 1, N°2-2003. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
- ☞ **Rocha, Arturo (2010).** *¿Cuál es el ancho de un río y sus implicancias en el diseño de las obras viales?* Conferencia dictada en el IX Congreso Internacional de Obras de Infraestructura Vial. Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG). Lima, Perú.
- ☞ **Rojas, Hugo (2011).** *Lineamientos para el Diseño de Tomas de Captación del Manual de Estructuras Hidráulicas*. Chimbote, Perú. Universidad Nacional del Santa.
- ☞ **Ruberto, Alejandro (2006).** *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Editorial MUNDI-PRENSA. Madrid, España.
- ☞ **SIA (2015).** *Obra Hidráulica*. Glosario de Asociación para el Riego Sostenible. Recuperado de <http://www.riego.org/glosario/obra-hidraulica/> [7 de Setiembre de 2015]
- ☞ **Sotelo, Gilberto (1994).** *Diseño Hidráulico de Estructuras. Capítulo VIII*. México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- ☞ **Sotelo, Gilberto (1997).** *Hidráulica General Vol. 1*. Editorial LIMUSA S.A. México D.F.
- ☞ **Sulmkraft.at (2015),** Tiroler Werh [fotografía]. Recuperado de http://www.sulmkraft.at/Sulmkraft/TIROLER_WEHR.html [Consulta: 26 de Noviembre de 2015]
- ☞ **Tres Ingenieros.com (2017),** *APU | Estructuras Hidraulicas | Tomas Laterales*. Recuperado de <https://goo.gl/eyp7up> [Consulta: 13 de setiembre de 2017]

- ☞ **TNRCH (2014-a).** *Resolución N° 127-2014-ANA*. Autoridad Nacional del Agua, Ministerio de Agricultura y Riego. Lima, Perú.
- ☞ **TNRCH (2014-b).** *Resolución N° 68-2014-ANA*. Autoridad Nacional del Agua, Ministerio de Agricultura y Riego. Lima, Perú.
- ☞ **Villón, Máximo (2007).** *Hidráulica de canales*. Editorial Villón. Lima, Perú.
- ☞ **Wikipedia. (23 de diciembre de 2016).** Sombra orográfica [imagen]. Wikipedia. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Sombra_orogr%C3%A1fica [Consulta: 27 de agosto de 2017]