



ESTUDIO SOBRE PREFACTIBILIDAD
EN LA INSTALACIÓN DE MICRO CENTRAL
HIDRO-ELECTRICA EN "LUTTI",
PROVINCIA DE CÓRDOBA

*Trabajo realizado en el marco de
Práctica Supervisada*

Alumno: Andres Leal
Tutora interno: Mag. Ing. María Lábaque
Tutora externo: Dra. Ing. Teresa María Reyna
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Universidad Nacional de Córdoba
Dic 2013

PRESENTACION

El presente informe tiene como objetivo dejar plasmado en forma concisa y ordenada el trabajo realizado por el alumno Andrés Alejandro Leal, en el marco del convenio de Práctica Supervisada, en la empresa CEAS S.A. dentro de la cual se desarrollaron las tareas a fin de ser evaluada y calificada por un tribunal examinador.

La actividad ejecutada se trató de realizar un estudio sobre la factibilidad de emplazar una micro central hidroeléctrica en una localidad rural aislada, más precisamente la localidad de Lutti, provincia de Córdoba.

INDICE

Capítulo 1 - Introducción.....	11
1.1.- Introducción.....	11
1.2.- Objetivos	13
Objetivos Particulares.....	13
Capítulo 2 - Energías Renovables	14
2.1.- Introducción.....	14
2.2.- Las distintas fuentes renovables de energía.....	17
1.3.- Argentina desde el punto de vista de las energías renovables.....	20
Marco Legal	22
1.4.- Energía solar	23
1.5.- Energía Eólica	24
1.6.- Biomasa	26
1.7.- Geotérmica.....	30
1.8.- Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos	32
Capítulo 3 - Micro centrales hidroeléctricas	35
3.1.- Introducción.....	35
3.2.- Situación de la generación hidroeléctrica en Argentina	36
3.3.- Micro centrales hidroeléctricas	37
3.4.- Tipos de micro aprovechamientos.....	40
3.5.- Principios básicos de la electricidad.....	41
Energía eléctrica	41
Circuitos eléctricos.....	41
Corriente eléctrica	42
Redes de distribución.....	44
3.6.- Energía a partir del agua	46

3.7.- Configuraciones del sistema eléctrico	48
3.8.- Diseño de un aprovechamiento hidroeléctrico	49
Determinación del salto neto	50
Determinación del caudal	52
Capítulo 4 - Obra Civil	57
4.1.-Introduccion	57
4.2.- Elementos de la Obra Civil.....	58
4.3.- Azud.....	61
4.4.- Aliviaderos	63
4.5.- Estructuras de toma de agua.....	64
4.6.- Desarenador y cámara de carga.....	66
4.7.- Canales	68
4.8.- Tuberías de presión	73
4.9.- Casa de maquinas	75
4.10.- Canal de descarga.....	76
Capítulo 5 - Equipo electromecánico.....	77
5.1.-Introducción	77
5.2.- Turbinas Hidráulicas.....	77
5.3. - Partes de una turbina hidráulica.....	78
5.4.- Fenómenos en las turbinas hidráulicas.....	79
5.5.- Tipos de turbinas hidráulicas	80
Turbinas de acción.....	81
Turbina Pelton	81
Turbina Michell-Banki	83
Turbinas de reacción	84
Turbina Francis.....	84

Turbina Kaplan.....	85
5.6.- Generador.....	88
Síncrono.....	89
Asíncrono.....	90
5.7.- Tablero de control.....	90
5.8.- Regulador.....	91
Regulador de caudal.....	91
Regulador de carga.....	91
5.9.- Elementos de control y protección.....	92
Capítulo 6 - Turbina Michell-Banki.....	95
6.1.- Introducción.....	95
6.2.- Características generales.....	96
6.3.- Partes de la turbina Michell-Banki.....	97
6.4.- Principio de funcionamiento.....	100
6.5.- Dimensionamiento de la turbina.....	101
6.6.- Condiciones iniciales de Diseño.....	102
Altura Neta.....	102
Caudal de Diseño.....	103
6.7.- Diseño Hidráulico.....	105
Generalidades.....	105
Coeficiente de Velocidad k_c del inyector.....	108
Resolución del triángulo de velocidades a la entrada del rotor.....	109
6.8.- Dimensionamiento del Rodete.....	110
Selección del diámetro y velocidad de giro de la turbina.....	110
Número de álabes del rotor.....	111
Cálculo del Ancho del Rotor.....	113

Diseño del Inyector	114
Tubo de Aspiración o desfogue	116
Capítulo 7 - Micro Central Hidroeléctrica en la localidad de Lutti	118
7.1.- Introducción	118
7.2.- Antecedentes y Documentación	119
Trabajos Previos	119
Visita a la Comuna de Lutti	121
Cartografía e Imágenes Satelitales.....	127
Registros Pluviométricos y de caudal	127
Capítulo 8 - Obtención de los parámetros de diseño	129
8.1.- Introducción.....	129
8.2.- Modelo Digital de Elevación	129
MED generados de sistemas satelitales.....	131
8.3.- Determinación del salto bruto.....	133
8.4.- Estimación de caudales.....	136
Transposición de cuencas homologable	137
Caudal de diseño y Caudal Máximo	139
8.5.- Resumen.....	141
Capítulo 9 - Diseño de Elementos Estructurales	142
9.1.- Introducción.....	142
9.2.- Predimensionado de la tubería.....	142
9.3.- Azud – Tipo Creager	144
Perfil	144
Estabilidad del azud.....	148
9.4.- Cámara de Reja.....	150
9.5.- Desarenador.....	153

9.6.- Cámara de Carga.....	156
9.7.- Tubería a presión.....	157
Pérdidas en la reja	158
Pérdidas de entrada	158
Pérdidas por fricción en la tubería	159
Pérdidas en válvulas	159
Tabla resumen	160
Espesor de la pared	161
Golpe de ariete.....	162
Capítulo 10 – Conclusiones.....	165
11.- Bibliografía.....	166
12.- Anexos	168

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Energías Renovables	17
Figura 2-2: Mecanismo de presentación de proyectos	23
Figura 2-3: Irradiación Solar	23
Figura 2-4: Potencial de Biomasa	27
Figura 2-5: Ubicación de aprovechamientos geotérmicos.....	30
Figura 2-6: Ubicación de PAH.....	32
Figura 3-1: Tipos de Micro Aprovechamientos	40
Figura 3-2: Generación y distribución de electricidad.....	45
Figura 3-3: Salto hidráulico	46
Figura 3-4: Perdidas en el sistema.....	47
Figura 3-5: Altura de carga.....	50
Figura 3-6: Método del recipiente.....	53
Figura 3-7: Sección de control	54
Figura 4-1: Configuración del aprovechamiento	57
Figura 4-2: Elementos de la Obra Civil.....	60
Figura 4-3: Aliviadero	63
Figura 4-4: Longitud del desarenador	68
Figura 4-5: Revestimiento en canales	69
Figura 4-6: Esquema de una conducción de PVC.....	73
Figura 5-1: Tipos de turbinas	81
Figura 5-2: Turbina Pelton	83
Figura 5-3: Rango de aplicación de distintos tipos de turbinas.....	88
Figura 6-1: Distintas configuraciones de la turbina	96
Figura 6-2: Partes de la turbina Michell-Banki.....	99
Figura 6-3: Eficiencia de la turbina.....	100
Figura 6-4: Altura Neta.....	103
Figura 6-5: Triangulo de velocidades.....	105
Figura 6-6: Relación de velocidades	106
Figura 6-7: Sección del inyector.....	115

Figura 6-8: Inyector sin regulador.....	115
Figura 6-9: Inyectores con regulación	116
Figura 7-1: Localidad de Lutti	118
Figura 7-2: Esquema de la longitud de la conducción.....	120
Figura 7-3: Escuela Leopoldo Lugones - Lutti.....	121
Figura 7-4: Esquema de ubicación.....	122
Figura 7-5: Midiendo el tirante.....	123
Figura 7-6: Ubicación de cierre tentativo.....	125
Figura 7-7: Punto 119	126
Figura 7-8: Estaciones.....	128
Figura 8-1: Comparativa de MDE	131
Figura 8-2: Visualización en Global Mapper	134
Figura 8-3: Sector de estudio.....	134
Figura 8-4: Perfil generado con SRTM	135
Figura 8-5: Perfil generado con ASTER	135
Figura 8-6: Perfil corregido	136
Figura 8-7: Cuenca Estación Grande-La Puente	138
Figura 9-1: Perfil del azud.....	145
Figura 9-2: Azud.....	146
Figura 9-3: Diseño con diente al final del zampeado	147
Figura 9-4: Diagrama.....	147
Figura 9-5: Diagrama de fuerzas actuantes.....	149
Figura 9-6: Coeficiente según forma de las barras.....	152
Figura 9-7: Velocidad de sedimentación.....	154
Figura 9-8: Cámara de carga.....	156
Figura 9-9: Valores de Ke	159
Figura 9-10: Coeficiente de pérdidas en válvulas.....	160
Figura 9-11: Diámetros comerciales. Plastiferro.....	162

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Energías Renovables vs. Energías No Renovables.....	16
Tabla 2-2: Parques Eólicos en Argentina.....	26
Tabla 2-3: Proyectos.....	34
Tabla 3-1: Características de Pequeños Aprovechamientos.....	38
Tabla 3-2: Comparativa entre los métodos.....	52
Tabla 4-1: Características de distintos tipos de toma.....	66
Tabla 4-2: Velocidades Máximas.....	71
Tabla 4-3: Coeficientes de rugosidad.....	72
Tabla 5-1: Comparativa de distintos tipos de turbinas.....	87
Tabla 6-1: Rango de operación.....	100
Tabla 6-2: Relación entre los ángulos.....	108
Tabla 6-3: Selección del diámetro del rotor.....	111
Tabla 6-4: Selección número de alabes.....	112
Tabla 6-5: Selección del número de alabes (Instituto Nacional de Energía, 1986).....	112
Tabla 7-1: Valores medidos.....	120
Tabla 7-2: Coordenadas.....	122
Tabla 7-3: Ubicación de la Obra de cierre.....	123
Tabla 7-4: Determinación del Caudal.....	124
Tabla 7-5: Datos relevados.....	125
Tabla 8-1: Comparativa entre SRTM y ASTER.....	132
Tabla 8-2: Superficie de las cuencas.....	138
Tabla 8-3: Parámetros de diseño.....	141
Tabla 9-1: Calculo del perfil del azud.....	145
Tabla 9-2: Calculo del tirante y2.....	148
Tabla 9-3: Valores de f.....	149
Tabla 9-4: Tamaño de los barrotes de acuerdo al tipo de limpieza.....	151
Tabla 9-5 : Valores de k segun material.....	159
Tabla 9-6: Perdidas de carga.....	160
Tabla 9-7: Espesores mínimos.....	161

Capítulo 1 - Introducción

1.1.- Introducción

En El Presente Informe Técnico se describe las actividades desarrolladas en el marco de Práctica Supervisada del alumno Andrés Alejandro Leal en la empresa CEAS S.A.

La Práctica consintió en la realización de un estudio de factibilidad sobre la instalación de una micro central hidroeléctrica en la localidad cordobesa de Lutti. Dicho estudio comprendió la evaluación del potencial energético del Arroyo Lutti y de los medios necesarios para llevar a cabo la explotación del recurso.

De acuerdo con el cronograma planteado para el desarrollo de la Práctica Supervisada, el mismo se puede dividir en 8 capítulos:

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se detallan los objetivos propuestos para esta Práctica Supervisada y se presenta un resumen de los contenidos de cada capítulo.

Capítulo 2: Energías Renovables

Se realiza una breve introducción al tema realizando una separación y posterior descripción de las distintas fuentes de Energías Renovables. Luego se comenta la situación actual de Argentina en la materia, mencionando los proyectos desarrollados y previstos

Capítulo 3: Micro Centrales Hidroeléctricas

Se describen los principios por los cuales se obtiene energía eléctrica a través del agua, mencionando los tipos de aprovechamientos, las pérdidas que pueden existir en el sistema y los parámetros fundamentales en este tipo de aprovechamientos: el salto neto y el caudal de diseño

Capítulo 4: Obra Civil

En esta sección se mencionan las distintas estructuras que componen la obra civil de una micro central hidroeléctrica. Se mencionan las características principales y las consideraciones a tener en cuenta para su diseño y dimensionado.

Capítulo 5: Equipos Electromecánicos

Breve descripción de los equipos electromecánicos que componen un aprovechamiento hidroeléctrico.

Capítulo 6: Turbina Michell-Banki

Desarrollo de lo expuesto en el capítulo anterior sobre la turbina Michell-Banki, describiendo sus características generales, principio de funcionamiento y pautas para el diseño

Capítulo 7: Micro central hidroeléctrica en la localidad de Lutti

Descripción de la zona afectada al proyecto, mención de los antecedentes y la cartografía con la que se cuenta y un rápido cálculo de la potencia bruta disponible para la hidrogenación

Capítulo 8: Obtención de los parámetros de diseño

Se recurre a herramientas digitales para obtener los valores de diseño, se realiza una breve descripción de la metodología empleada. Determinación del salto bruto, la longitud tentativa de la tubería forzada y el caudal máximo de avenida para el dimensionado de la obra de cierre.

Capítulo 9: Diseño de elementos estructurales

En este capítulo se describe y lleva a cabo el cálculo de los principales elementos de la obra civil que componen la micro central proyectada

Capítulo 10: Conclusiones

Se desarrolla una breve descripción de los resultados obtenidos.

1.2.- Objetivos

El objetivo general de la Práctica Profesional Supervisada es la participación en el desarrollo de un estudio de prefactibilidad de una Micro Central Hidroeléctrica, buscando arribar a una alternativa competitiva, tanto desde el punto de vista técnico como económico, para la generación de energía eléctrica en la localidad de Lutti, con miras a fomentar y extender esta propuesta a otras localidades rurales.

Objetivos Particulares

- Afianzar y ampliar los conocimientos adquiridos durante el cursado de la carrera y aprender a aplicarlos en un ámbito profesional de trabajo.
- Tomar contacto con diversas herramientas y ramas existentes en el campo de la Ingeniería Civil y utilizarlas para generar soluciones técnicas y económicamente viables.
- Introducirse en el ámbito laboral, participando en un grupo de trabajo profesional e interactuando con distintos Ingenieros Civiles.
- Redacción de Memoria del trabajo realizado correctamente fundamentada, mejorando y afianzando los conceptos estudiados en el cursado de la carrera.

Capítulo 2 - Energías Renovables

2.1.- Introducción

A medida que una sociedad crece y se desarrolla, la demanda energética también aumenta, y en orden de satisfacer esta creciente necesidad de energía, se consumen más recursos para su generación. Pero la energía que se puede obtener del carbón, del petróleo y del gas no es renovable: se van agotando año tras año. La mejor y más inteligente opción es aprovechar otras fuentes de energía que garanticen abastecimiento en el futuro, y es aquí cuando ganan relevancia las Energías Renovables.

Cuando hablamos de energías renovables nos referimos a aquellas que a diferencia de las energías convencionales usan como fuente de generación recursos renovables y poseen una fuente prácticamente inagotable en relación al tiempo de vida del hombre en el planeta. Se producen de manera continua, no se agotan, y tienen su origen en los procesos ambientales y atmosféricos naturales: el viento, el sol, los cursos de agua, la descomposición de la materia orgánica, el movimiento de las olas en la superficie del mar y océanos, el calor interior de la tierra son fuentes de energías alternativas.

¿Por qué es necesario utilizar fuentes energéticas diferentes de las tradicionales? Ante esta pregunta se pueden enumerar diversas razones, entre ellas:

- Las energías no renovables se van agotando
- Pueden producir impactos negativos en el medio ambiente
- En muchos casos se deben transportar desde otros lugares, no garantizando el abastecimiento

Las energías renovables, como ya se mencionó, proceden del sol, del viento, del agua de los ríos, del mar, del interior de la tierra, y de los residuos. Hoy por hoy, constituyen un complemento a las energías convencionales fósiles (carbón, petróleo, gas natu-

ral) cuyo consumo actual, cada vez más elevado, está provocando el agotamiento de los recursos y graves problemas ambientales.

Se puede realizar la siguiente comparativa entre las energías renovables y las no renovables:

	<u>E. Renovables</u>	<u>E. No Renovables</u>
Diferencias	Son limpias	Contaminan
	Sin residuos	Generan emisiones
	Inagotables	Son limitadas
	Autóctonas	Provocan dependencia exterior
	Equilibran desajustes interterritoriales	Utilizan tecnología importada
Ventajas medioambientales	Las energías renovables no producen emisiones de CO2 y otros gases contaminantes a la atmósfera	Las energías producidas a partir de combustibles fósiles si las producen
	Las energías renovables no generan residuos de difícil tratamiento	La energía nuclear y los combustibles fósiles generan residuos que suponen durante generaciones una amenaza para el medio ambiente
	Las energías renovables son virtualmente inagotables	Los combustibles fósiles son finitos
Ventajas estratégicas	Son autóctonas	Los combustibles fósiles existen solo en un número limitado de países
	Disminuyen la dependencia exterior	Son importados en un alto porcentaje
Ventajas socio-económicas	Las energías renovables contribuyen decisivamente al equilibrio interterritorial porque suele instalarse en zonas rurales	Las energías tradicionales se sitúan en general cerca de zonas muy desarrolladas
	Permiten desarrollar tecnologías propias	Utilizan en su mayoría tecnología importada

Tabla 2-1: Energías Renovables vs. Energías No Renovables

2.2.- Las distintas fuentes renovables de energía

En consideración a su grado de desarrollo tecnológico y a su nivel de penetración en la matriz energética de los países, las Energías Renovables se clasifican en Energías Renovables Convencionales y Energías Renovables No Convencionales.

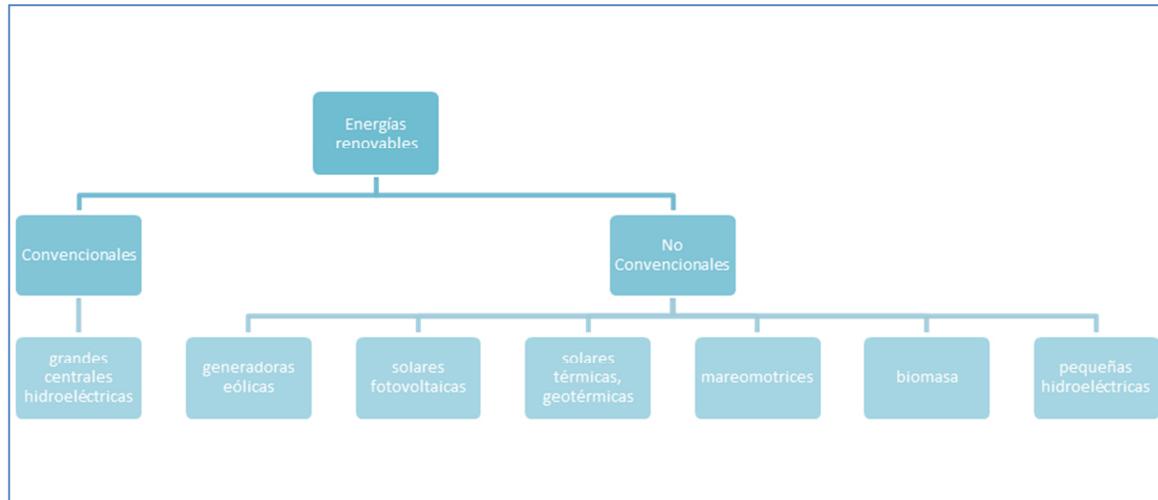


Figura 2-1: Energías Renovables

Dentro de las primeras se considera a las grandes centrales hidroeléctricas; mientras que dentro de las segundas se ubica a las generadoras eólicas, solares fotovoltaicas, solares térmicas, geotérmicas, mareomotrices, de biomasa y las pequeñas hidroeléctricas. Se desarrollaran en detalle estas últimas.

Energía eólica

La energía eólica aprovecha la energía cinética del viento y la convierte en electricidad, aunque también se puede aprovechar para usos mecánicos (por ejemplo bombeo de agua). Tradicionalmente se ha empleado en pequeñas instalaciones, a veces en combinación con la energía fotovoltaica.

Actualmente, se encuentra en pleno auge, instalándose numerosos parques eólicos para producción de electricidad a gran escala. Puede decirse que se ha convertido en una energía muy competitiva en lugares donde la velocidad del viento supera los 6 me-

tros por segundo. Los aerogeneradores que se instalan hoy en día tienen una potencia de 600 kW. y se están aprobando ya molinos de 1,5 MW.

Energía solar térmica

La conversión térmica se realiza en los colectores solares planos para baja temperatura y mediante sistemas de concentración, para media y alta temperatura. Consiste en la utilización de paneles solares para calentar agua para usos industriales, piscinas, calefacción o más comúnmente para agua caliente sanitaria. Es una técnica sencilla que permite su uso tanto en el sector doméstico, como en los servicios o en las industrias.

Energía solar fotovoltaica

Una de las opciones más prometedoras, dentro de las diferentes fuentes de energía, es la basada en la conversión fotovoltaica: transformación de la radiación solar directamente en electricidad. Para que la energía solar fotovoltaica pueda ser considerada una opción para la generación de potencia, es necesario reducir el costo de producción.

Actualmente el kWh. fotovoltaico resulta unas 5 veces más caro que el producido con otros sistemas convencionales, pero es competitivo para viviendas y otras muchas instalaciones a las que no llegan los tendidos eléctricos. La energía solar fotovoltaica no puede ser estrictamente comparada con las restantes fuentes de energía pues su tecnología se encuentra en su fase de desarrollo y con un escaso nivel de implantación industrial.

Mini y micro hidráulica

Se denomina energía hidráulica o energía hídrica a aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente de ríos, saltos de

agua o mareas. Es un tipo de Energía Renovable No Convencional cuando su impacto ambiental es mínimo y usa la fuerza hídrica sin represarla, en caso contrario es considerada como una forma de energía renovable convencional.

El agua en su transcurso por la superficie terrestre tiende, por la gravedad, a ocupar las posiciones bajas y la energía que esto produce es explotable por las instalaciones hidroeléctricas.

Si bien este tipo de energía puede generar un cierto impacto ambiental en la cabecera de los ríos donde se instala, dicho impacto es de baja intensidad y puede minimizarse realizando un análisis de las condiciones particulares de la zona de emplazamiento.

Biomasa

El término biomasa abarca a una variada serie de fuentes energéticas que van desde la simple combustión de la leña para calefacción hasta las plantas térmicas para producir electricidad usando como combustible residuos forestales, agrícolas, ganaderos o incluso lo que se denomina cultivos energéticos, pasando por el biogás de los vertederos o lodos de depuradoras o los biocombustibles. Existe un enorme potencial energético derivado de la biomasa, siempre que se potencie desde los poderes públicos, puesto que las compañías eléctricas no están muy interesadas en su desarrollo.

Oficialmente se considera también la incineración de residuos urbanos como una fuente de energía renovable, aunque la mayor parte de los materiales que se emplean para la combustión no se pueden considerar como recursos renovables. Es de considerar que para incinerar los residuos, se deben utilizar hornos especiales que eviten la emisión de compuestos nocivos a la atmósfera.

Además tal como pone de manifiesto un estudio realizado por Greenpeace el potencial de ahorro energético de los materiales de la basura es 3,95 veces superior si se recicla que si se incineran.

Energía geotérmica

La energía geotérmica, como excepción, no tiene su origen inmediato en la radiación solar, sino en una serie de reacciones químicas naturales que suceden en el interior de la tierra y que producen grandes cantidades de calor. El hombre también puede aprovechar esta fuente de calor extrayéndolo mediante perforaciones y transfiriendo este calor. El gradiente térmico resultante de las altas temperaturas del centro de la Tierra (superiores a los mil grados centígrados), genera una corriente de calor hacia la superficie. El valor promedio del gradiente térmico es de 25° C por cada kilómetro, siendo superior en algunas zonas sísmicas o volcánicas. El potencial geotérmico almacenado en los diez kilómetros exteriores de la corteza terrestre supera en 2000 veces a las reservas mundiales de carbón.

La explotación comercial de la geotermia comenzó a finales del siglo XIX en Italia, con la producción de electricidad. La geotermia puede llegar a causar algún deterioro al ambiente por la emisión de gases, aunque la inyección del agua es parte del proceso de conversión de la energía térmica, minimizando los posibles riesgos.

1.3.- Argentina desde el punto de vista de las energías renovables

Se estima que en la Argentina, de los aproximadamente 40 millones de habitantes, unos 35 millones viven en zonas urbanas o semiurbanas, conectadas o con posibilidades de conectarse a las redes eléctricas. De los 5 millones restantes, que es población netamente rural, unos 2.5 millones corresponden a viviendas rurales aisladas que no están conectados a red eléctrica alguna, siendo altamente improbable que lleguen a estarlo en un futuro cercano, debido a los altos costos de este tipo de obras.

Menos del 2% de la producción energética argentina se consume en las zonas rurales. Debido a los costos elevados de suministrar electricidad a estas zonas a través de las redes de distribución, las empresas de electricidad no han podido acelerar la electrificación rural. Esto ha generado un impacto negativo con respecto a la densidad demográfica rural y ha contribuido a una migración de la población a zonas urbanas.

Adicionalmente, cabe mencionar que existe una concientización limitada de los consumidores respecto del uso racional de fuentes de energía: la protección del medio ambiente mediante el uso racional, así como la aplicación de fuentes renovables de energía no son consideradas aun como un problema serio por las autoridades nacionales y provinciales. Solo recientemente, debido a la preocupación internacional respecto de contaminación ambiental y a la necesidad de una mejor administración de los recursos, aparece una toma de conciencia sobre la conservación de los recursos energéticos mediante la aplicación de tecnologías apropiadas y el uso de energías no convencionales y renovables, en zonas rurales y urbanas.

Para acelerar la aplicación de sistemas alternativos en las zonas rurales, y hacer de esta una práctica habitual, se necesita desarrollar equipos adecuados, adaptarlos para su producción progresiva en las industrias locales, y establecer un sistema de financiación en colaboración con los bancos locales para asistir a los usuarios y propietarios potenciales. Existe entonces una demanda insatisfecha de equipos robustos y confiables que puedan suministrar pequeñas cantidades de energía a bajo costo.

Cualquiera sea el sistema elegido, los equipos deben brindar un servicio confiable en condiciones de trabajo continuo y escaso mantenimiento, las turbinas empleadas deben tener robustez y confiabilidad. Se debe tratar de lograr la incorporación de la mayor cantidad de piezas y componentes producidos por la industria local. El empleo de elementos locales brinda seguridad respecto de la disponibilidad de repuestos, lo cual puede definir, en muchos casos, la aplicación del equipamiento propuesto.

Las Administraciones Publicas locales y los responsables de energía y medioambiente tienen un papel fundamental para el desarrollo de estos sistemas alternativos favoreciendo su difusión a través de instrumentos de programación y planificación, de incentivos y de adhesión a proyectos e iniciativas locales. Estas acciones deben ser acompañadas con la labor de los profesionales, quienes deben identificar las potencialidades del territorio para los sistemas de energías alternativas, así como también definir proyectos pilotos que ayuden a la difusión e implementación.

A continuación se describe la situación en que se encuentra el país respecto al uso de energías alternativas.

Marco Legal

La Ley 26190 establece el “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la producción de Energía Eléctrica”, declarando de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energía renovables con destino a la prestación de servicio público como así también la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos con esa finalidad.

El objetivo del citado régimen es lograr que la contribución de fuentes de energía renovables alcance el 8% del consumo de energía eléctrica nacional en el plazo de 10 años a partir de la puesta en vigencia del presente régimen. Esta ley es complementaria de la ley n° 25.019/1998, decreto n° 1.597/1999 (Régimen Nacional de Energía Eólica y Solar), extendiéndose a las demás fuentes renovables (energía geotérmica, mareomotriz, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás).

Indica que serán beneficiarios del régimen instituido, las personas físicas y/o jurídicas que sean titulares de inversiones y/o concesionarios de obras nuevas de producción de energía eléctrica, generada a partir de fuentes de energías renovables con radicación en el territorio nacional, cuya producción esté destinada al mercado eléctrico mayorista y/o la prestación del servicio público de electricidad.

La ley indica que se dará especial prioridad, en el marco del régimen de inversiones, a todos aquellos emprendimientos que favorezcan, cualitativa y cuantitativamente, la creación de empleo y que propongan una integración con bienes de capital de origen nacional. Asimismo indica un mecanismo de presentación de proyectos que se inicia ante el Consejo Federal de la Energía Eléctrica quien los evalúa y les asigna un orden de mérito, el que finalmente debe aprobar la Secretaría de Energía

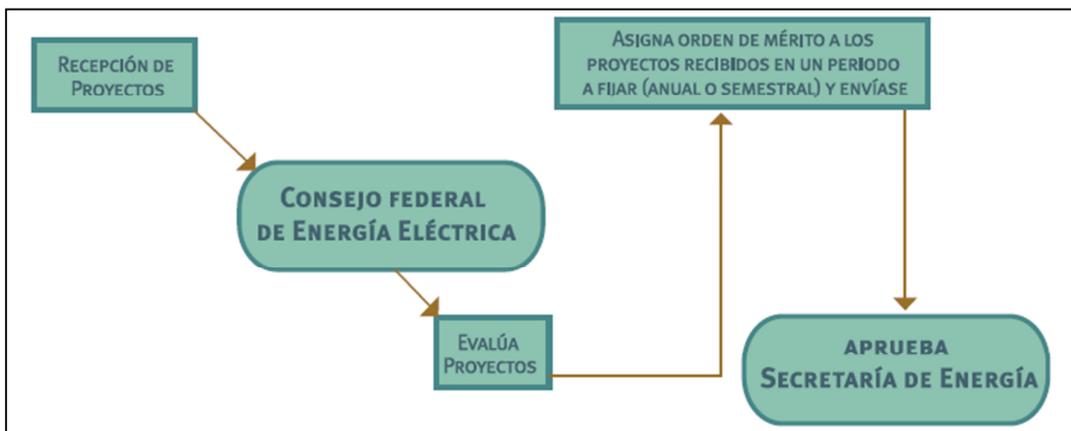


Figura 2-2: Mecanismo de presentación de proyectos

1.4.- Energía solar

Se tiene un razonable conocimiento del recurso solar disponible y de su distribución geográfica, sin embargo existen regiones donde se deberían realizar estudios en mayor detalle, por lo que se requiere continuar la medición del recurso mejorando la cobertura espacial y la instrumentación utilizada. En la siguiente imagen, se presenta la distribución espacial del promedio de la irradiación solar global diaria correspondiente a los meses de enero y junio. La misma ha sido expresada en unidades convenientes para la conversión fotovoltaica, esto es, kWh/m²-día.

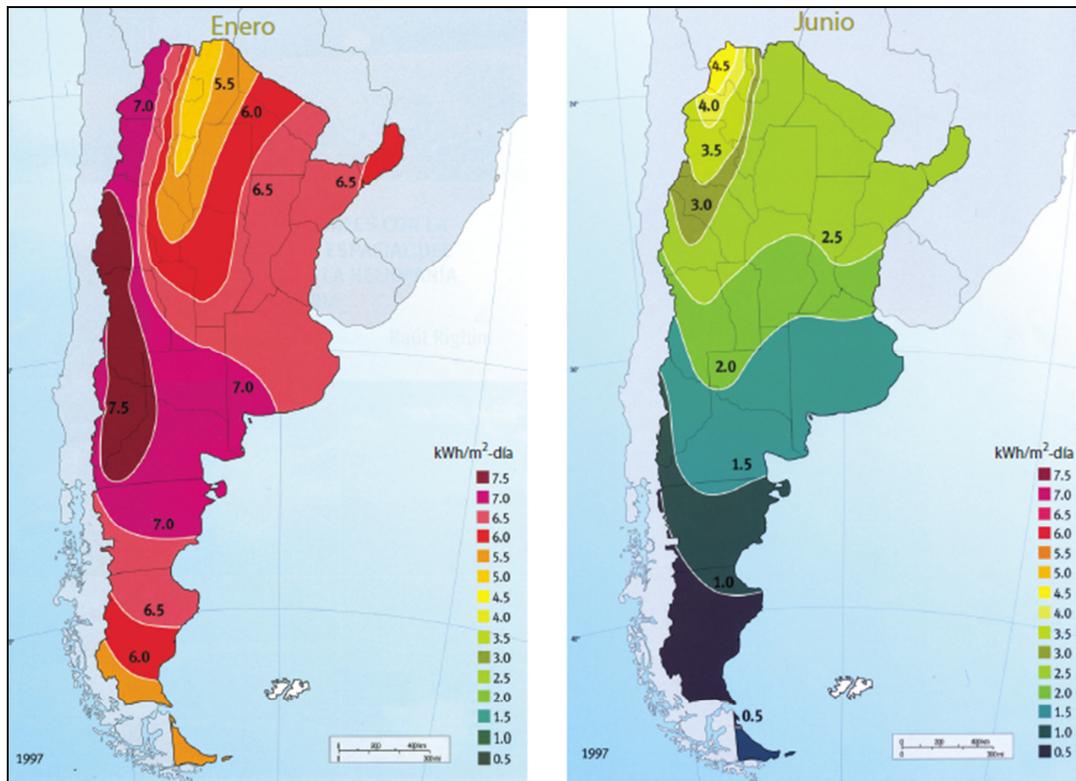


Figura 2-3: Irradiación Solar

Analizando las isohelias, se observa que solamente una pequeña franja del noroeste del país (parte occidental de Salta, Jujuy, Catamarca, La Rioja y San Juan) presenta irradiación alta (superior 5 kWh/m²-día), con posibilidades de aprovechamiento en proyectos de potencia. Sin embargo gran parte de la superficie del país presenta irradiaciones que permitirían su aprovechamiento en proyectos de generación eléctrica de baja potencia y sobre todo en calentamiento de agua.

El proyecto más importante que se encuentra en ejecución por la Secretaría de Energía de la Nación es el PERMER (Proyecto de Energía Renovable en Mercados Rurales Dispersos) que persigue como objetivo la electrificación de escuelas rurales, los concesionarios y de los clientes. Dentro de este marco, las instalaciones realizadas y en etapa de licitación o adjudicación totalizan las instalaciones fotovoltaicas realizadas en el marco del PERMER y en etapa de licitación o adjudicadas totalizan alrededor de 1mWp (residencial, escuelas y servicios públicos).

Entre los proyectos fuera del PERMER que contribuyen a la potencia instalada se encuentran entre otros: la electrificación de escuelas rurales en la provincia de Buenos Aires, la provisión de energía eléctrica residencial y para servicios públicos en Neuquén, y experiencias de bombeo de agua en Catamarca.

En el área de generación termoeléctrica, Enarsa participa en el desarrollo de un prototipo en base a un motor Stirling (500 W) en conjunto con el Instituto de Investigaciones en Energías No convencionales de la Universidad Nacional de Salta (INENCO), se estima un potencial para generación termoeléctrica que podría alcanzar varios cientos de mW.

1.5.- Energía Eólica

Parques eólicos instalados en Argentina							
Localidad	Provincia	Puesta en servicio	Potencia total (kW)	Detalle de maquinas	Marca y modelo	Vel. Media anual	Propietario-operador

						(m/s)	
Comodoro Rivadavia	Chubut	19/01/94	500	2 x 250 kW	MICON M530	9.4	PECORSA
Cutral-Co	Neuquén	20/10/94	400	1 x 400 kW	MICON M750-400/100	7.2	COPELCO Coop. Ltda.
Pehuén-Co	Buenos Aires	17/02/95	400	1 x 400 kW	MICRON M750-400/100	7.3	Coop. Eléctrica de Punta Alta
Tandil	Buenos Aires	26/05/95	800	2 x 400 kW	MICRON M750-400/100	7.2	CRETAL Coop. Ltda.
Rada Tilly	Chubut	18/03/96	400	1 x 400 kW	MICRON M750-400/100	10.2	CO AGUA Coop. Ltda.
Comodoro Rivadavia	Chubut	12/09/97	6000	8 x 750 kW	NEG-MICON NM750/44	9.4	SCPL Com. Riv.
Mayor Buratovich	Buenos Aires	22/10/97	1200	2 x 600 kW	AN BONUS 600kW/44	7.4	Coop. Eléctrica de M. Buratovich
Darregueira	Buenos Aires	19/09/97	750	1 x 750 kW	NEG-MICON NM750/44	7.3	CELDA Coop. Ltda.
Punta Alta	Buenos Aires	10/12/98	1800	3 x 600 kW	AN BONUS 600kW/44	7.8	Coop. Eléctrica de Punta Alta
Claromecó	Buenos Aires	26/12/98	750	1 x 750 kW	NEG-MICON NM750/48	7.3	Coop. Eléctrica de Claromecó
Pico Truncado	Santa Cruz	05/03/01	2400	4 x 600 kW	ENERCON E-40	10.3	Municipalidad de Pico Truncado
Comodoro Rivadavia	Chubut	10/01/13	10560	16 x 660 kW	GAMESA G-47	9.4	SCPL Com. Riv.

Gral. Acha	La Pampa	11/02/13	1800	2 x 900 kW	NEG-MICON NM900/52	7.2	COSEGA Ltda.
Veladero	San Juan	09/07/13	2000	1 x 2000 kW	DEWIND D8.2	--	BARRICK GOLD Corp.
		POTENCIA TOTAL	29760				

En el marco del Plan Estratégico Nacional Eólico y a fin de ampliar el conocimiento del recurso, el Centro Regional de Energía Eólica (CREE) en conjunto con la UTN y con apoyo del MINPLAN, realizó el Desarrollo del Atlas Eólico del Potencial del Sur Argentino para cada una de las provincias que lo componen. Estos datos se han volcado a un SIG Eólico disponible online, que ofrece información de los vientos para cualquier punto; y es gracias a esta información se puede estimar el potencial eólico técnicamente aprovechable en nuestro país, existiendo cifras que lo sitúan aproximadamente en 5000mW.

En la actualidad existen casi 30 mW eólicos de media/alta potencia instalados en Argentina (0.11% de la potencia total instalada en 2007), muchos de ellos pertenecientes a cooperativas eléctricas, según puede verse en el cuadro siguiente. Durante ese año las turbinas existentes entregaron cerca de 62 gWh, constituyendo una contribución aproximada del 0.06% de la generación total de electricidad.

En relación a la energía eólica de baja potencia, según el censo nacional agropecuario 2002, en dicho año había 1.162 aerogeneradores instalados para producción de electricidad. Suponiendo un valor promedio de 500 W por equipo, se obtiene una capacidad instalada aproximada de 0,6 mW. Independientemente de los aerogeneradores instalados según el censo mencionado, se identificaron en la provincia de Chubut 93 kW instalados en aldeas escolares y en poblados dispersos.

1.6.- Biomasa

Tabla 2-2: Parques Eólicos en Argentina

Para estimar el potencial de biomasa sería necesario considerar como tal a toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial, clasificándola de la siguiente forma:

- biomasa natural: producida en la naturaleza sin la intervención humana.
- biomasa residual: generada por cualquier actividad humana, principalmente en procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, tales como basuras y aguas residuales.
- biomasa producida: cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible, en algunos casos al conocimiento del recurso disponible como la caña de azúcar, orientada a la producción de etanol para carburante.

La FAO, dentro del marco institucional conformado por la Secretaría de Energía, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, la Secretaría de Agricultura Ganadería, Pesca y Alimentación y el INTA, ha llevado adelante una evaluación de la biomasa natural a nivel detallado, utilizando el modelo Wisdom. Dicha evaluación contempla una estimación realizada en base a información secundaria proveniente de estadísticas productivas con datos sobre la distribución geográfica del potencial de leña, otra biomasa

leñosa (generada por el procesamiento de los rollizos), del bagazo, y de residuos agrícolas y agroindustriales.

El estudio del proyecto de FAO indica que la biomasa total accesible y potencialmente contabilizada por el modelo utilizado, ascendió a más de 148 millones de ton, en tanto que la denominada “biomasa comercial” accesible y potencialmente disponible alcanzó a más de 124 millones de ton.

A fin de acotar el potencial disponible, la Secretaría de Energía ha realizado un relevamiento de proyectos destinados a la generación de electricidad con biomasa, cuantifi-

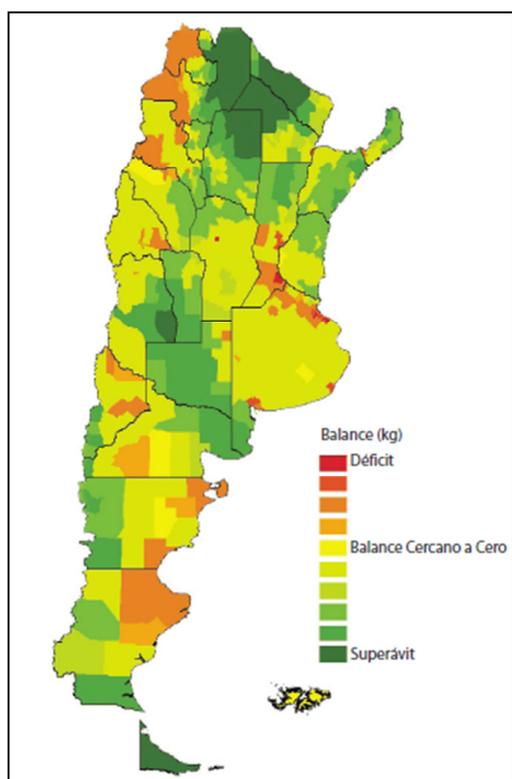


Figura 2-4: Potencial de Biomasa

cado mediante estudios de campo.

Dentro de los proyectos identificados, merecen especial mención los siguientes:

En la Provincia de Entre Ríos:

- San Salvador, con un potencial de generación de 7,5 mW utilizando residuos de cáscara de arroz y con tecnología de combustión en lecho fluidizado y grilla vibrante (actualmente en proceso de licitación).
- Villaguay, con un potencial de generación de 2 mW utilizando residuos de cáscara de arroz y con tecnología de grilla vibrante.
- Concordia, un potencial de generación de 25 mW, utilizando residuos foresto-industriales, mediante tecnología de gasificación y combustión.
- Federación con un potencial de 25 mW, utilizando residuos foresto-industriales, con tecnología de gasificación y combustión (actualmente en proceso de licitación).

En la Provincia de Corrientes:

- La planta propuesta para la población de San Antonio Isla es un sistema de gasificación de 10 kW. la planta sería operada manualmente y necesita 300 kg/día de residuos.

En la Provincia de Misiones:

- Para la población de Picada Unión, se propone un sistema de gasificación con una potencia de 20 kW, con operación manual, precisando 300 kg/día de residuos.

En la Provincia de Mendoza:

- Localidad de San Martín, esta planta podría abastecerse con 142.563 tn/año de biomasa (proveniente de industria vitivinícola), con lo que la potencia instalada sería de 26 mW.
- Localidad de Villa General Gutiérrez (Maipú), con 112.523 tn/año de biomasa (proveniente de industria vónica, aserraderos y residuos de industria aceitera) y una potencia de 20mW.

- Localidad de Cordón del Plata, departamento de Tupungato, con disponibilidad de 48.757 tn/año de biomasa (proveniente de industria vitivinícola), con lo que se podría generar 6 mW.
- Localidad de San Rafael, con un potencial biomásico de 53.391 tn/año (proveniente de industria vínica), podría instalarse una planta de 6 mW.

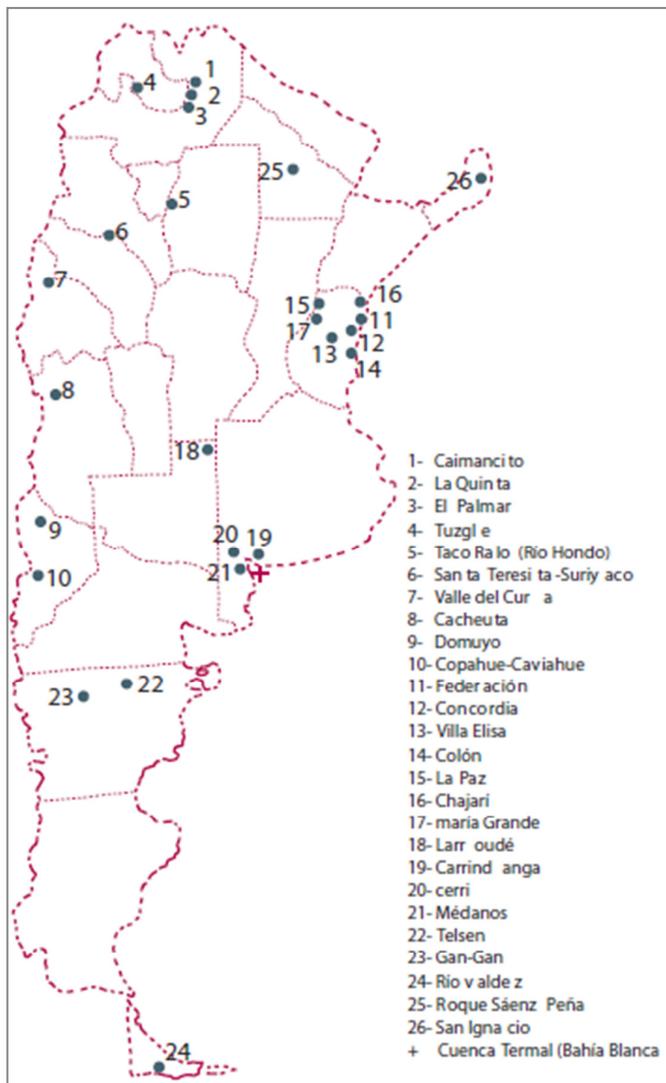
Uno de los mayores aprovechamientos de la biomasa en la actualidad es el empleo de bagazo de caña de azúcar como combustible para las calderas en ingenios azucareros. En algunos casos, este recurso permite la autosuficiencia energética de los mismos y en otros, los excedentes de energía eléctrica son entregados a la red de servicio Público.

Otra fuente energética considerada como una subcomponente de la biomasa natural está relacionada a la producción de estiércol de origen pecuario, asociado al número de cabezas de los principales animales de campo y su respectiva producción diaria de estiércol seco. Para determinar el estiércol aprovechable, se debe afectar a la producción total por un porcentaje, el que varía según el tipo de animal que dé origen al estiércol y que refleja el potencial que podría recolectarse.

Finalmente, cabe destacar que, si bien gran parte de este residuo pecuario estaría disponible, en muchos casos sería de difícil recolección por la gran dispersión de los animales sobre el terreno. Los residuos más accesibles serían aquellos recolectados en tambos, corrales de engorde o en establecimientos avícolas. Además a diferencia de lo que sucede con los residuos agrícolas, la utilización de los residuos pecuarios para la producción de biogás no resta nutrientes a los suelos ya que uno de los productos obtenidos es una excelente enmienda orgánica que se puede compostar o mezclar con otros materiales orgánicos y agregar directamente al suelo.

1.7.- Geotérmica

El Departamento de Geotermia de la Dirección de Recursos Geológico-Mineros del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) de la Secretaría de Minería realizó estudios de reconocimiento del potencial teórico del recurso geotérmico en la Argentina. Este trabajo constituye un importante avance en el conocimiento del recurso geotérmico en el país, dado que permite conocer previamente los principales parámetros de los fluidos



termales, en futuras prospecciones. Según el SEGEMAR, el grado de conocimiento del recurso termal es satisfactorio. Se tiene cubierto, con estudios de reconocimientos, un 90% de las regiones del país con posibilidades de alta entalpía (más de 150°C) y mediante trabajos de reconocimientos o expeditivos, a un 75% de las regiones con posibilidades de baja entalpía que presentan indicios superficiales.

Sin embargo, es poco el grado de utilización de este recurso

Figura 2-5: Ubicación de aprovechamientos geotérmicos

En base a las recomendaciones derivadas de los trabajos de reconocimiento se profundizaron los estudios en 25 zonas geotérmicas con características favorables, en las que se continuó con la etapa siguiente de prefactibilidad. Los mismos se desarrollaron para proyectos de alta entalpía, en las áreas volcánicas constituidas por cuatro reservorios: Tuzgle, Domuyo, Copahue-Caviahue y Valle del Cura.

Para proyectos de baja entalpía, se realizaron estudios en las áreas de Cerri, Médanos, Carrindanga, Caimancito, La Quinta, El Palmar, Tacorralo-Río Hondo, Río Valdéz, Santa Teresita-Suriyaco, Colón, Villa Elisa, Federación, Concordia, la Paz, Chajarí.

El campo geotérmico de Copahue es el más estudiado y tiene un potencial comprobado de 30 mW eléctricos, razón por la cual el gobierno provincial, a través de la Agencia para la Promoción y Desarrollo de Inversiones (ADI-NQN-SEP), ha convocado a inversionistas privados a construir y operar la planta de generación de energía eléctrica de 30 mW de potencia instalada, denominada "Las Mellizas de Copahue". El proyecto aprovechará los vapores endógenos del yacimiento y demandará una inversión de 70 millones de dólares.

Los principales usos de la geotermia en Argentina son: balneología, deshielo de calles y rutas, invernaderos, calefacción y acuicultura. Según el SEGEMAR "en la actualidad existen 134 emprendimientos con una capacidad instalada anual de 25,7 mWt, que utilizan los fluidos termales en uso directo. De los diversos tipos de uso la balneología es el tipo dominante con el 52,7% que representa una equivalencia a capacidad instalada anual de 13,56 mWt. otros tipos comunes son: el uso doméstico con 24,6% de capacidad instalada anual (6,33 mWt); la calefacción domiciliaria con el 4,6%, equivalente a 1,17 mWt; invernaderos con 4,5% de capacidad instalada (1,14 mWt); acuicultura con el 1,5% con un equivalente de 0,38 mWt; usos industriales con el 6,7% de la capacidad instalada (1,72 mWt) y derretimiento de nieve con el 5,4% que corresponde a una capacidad instalada de 1,4 mWt".

1.8.- Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos

La Secretaría de Energía cuenta con un inventario nacional de Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos (PAH), que cubre 116 proyectos de potencias menores de 15 mW y representan una oferta de potencia de casi 430 mW y una energía media anual de más de 1.900 gWh. El mapa siguiente indica la localización de los principales PAH proyectados y en servicio.

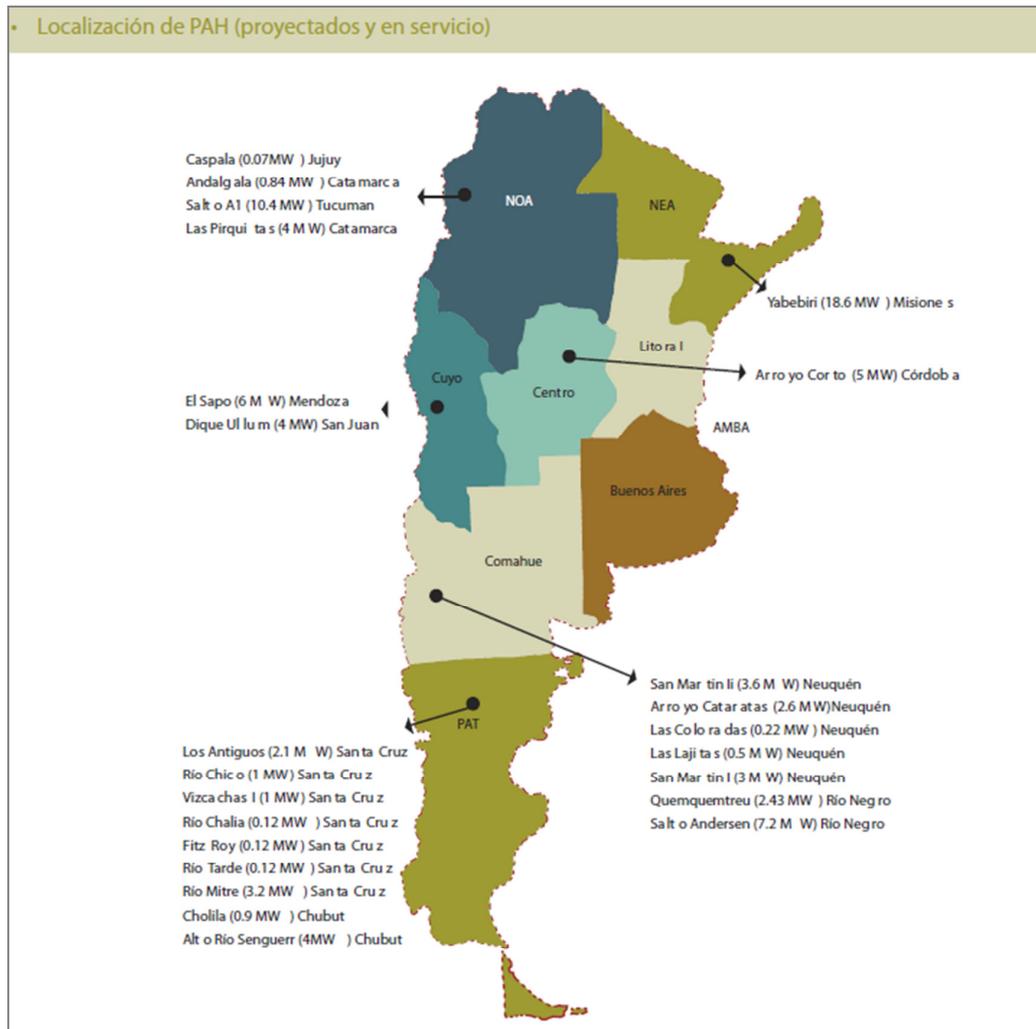


Figura 2-6: Ubicación de PAH

Los resultados del estudio mencionado favorecen entre otros a los PAH que se encuentran en la región sur del país y que, en general, están aislados, lo cual mejora los resultados económicos de los mismos. Sin embargo el nivel de desarrollo de los estudios es bajo ya que de los 116 proyectos analizados, hay sólo 4 que han llegado a nivel de Proyecto Ejecutivo y 20 a nivel de Factibilidad. Se estima entonces que se cuenta en principio con un potencial superior a los 400 mW pero se ha estimado posible incorporar una potencia instalada nueva de 100 mW en el término de 10 años en diferentes regiones del país.

Los proyectos de PAH en desarrollo suman 30 mW, mientras que los existentes y en funcionamiento suman casi 380 mW. La producción de energía de las mismas es de 1,152gWh. Esta potencia mini hidráulica representa cerca del 1.3% de la potencia total instalada en la Argentina y el 3.7% de la potencia hidroeléctrica total. En términos de energía representan el 1.1% y 3.0% de la energía total producida en Argentina y de la energía hidroeléctrica respectivamente.

Como cierre de este apartado, se coloca el siguiente cuadro que representa los principales proyectos identificados que evidencian la potencialidad de las Energías Renovables en el país:

Clasificación de los Proyectos de Energías Renovables						
Clasificación de proyectos	Solar Fotovoltaica	Solar Térmica	Eólica	Biomasa	Geotérmica	Mini-Hidráulica
Proyectos y/o potencial identificado	5 kWh/m ² día media anual al Norte Rio Colorado	100 mW al años 2015	5000 mW	422 mW	4 reservorios	430 mW
Proyectos en Desarrollo	1.2 mW en San Juan + PERMER	0.5 mW	0.9 mW (PERMER) + 2850 mW	156 mW	30 mW en Copahue	30 mW

Potencia instalada	10 mWp		29.76 mW + 0.6 mW baja potencia	720 mW	0.67 mW	380 mW
---------------------------	--------	--	---------------------------------------	--------	---------	--------

Tabla 2-3: Proyectos

Considerando que desde los comienzos de la producción de electricidad, la hidráulica ha sido, y sigue siendo, la primera fuente renovable utilizada para su generación, resulta sensato pensar en la mini hidráulica como la primera alternativa para suministrar de energía eléctrica a pequeñas comunidades y de este modo evitar a declinación rural y fomentar el desarrollo de las regiones aisladas.

Capítulo 3 - Micro centrales hidroeléctricas

3.1.- Introducción

La disponibilidad de energía eléctrica y la capacidad de explotar este potencial han sido siempre esenciales para el crecimiento y el desarrollo de las sociedades modernas, ya que no solo permiten cubrir las necesidades de consumo y bienestar, también condiciona las actividades productivas de esa sociedad y el grado de especialización técnica que estas puedan emplear.

Bajo esta óptica, las áreas rurales aisladas presentan un importante desafío al momento de satisfacer la demanda de energía eléctrica, demanda que muchas veces resulta postergada ya sea por los elevados costos que implica la extensión de las redes de electricidad existentes o por los grandes impactos en el medioambiente que representa el uso de fuentes de energía fósil.

Actualmente las energías renovables han dejado de ser tecnologías caras y minoritarias para ser plenamente competitivas y eficaces al momento de cubrir las demandas energéticas. Razones que, sumado a una creciente concientización sobre los efectos medioambientales que conllevan los actuales sistemas de generación, impulsan al desarrollo de proyectos donde las energías renovables sean las protagonistas.

Dentro de los proyectos que utilizan energías renovables, las micro centrales hidroeléctricas constituyen una alternativa para la generación de energía limpia, confiable y económica. Con las micro centrales independientes se evita incurrir en el costo de las líneas de transmisión y, por otro lado, los sistemas de extensión de la red están constituidos por equipos muy costoso, además de los costos de personal. Por el contrario, las micro centrales pueden ser diseñados y construidos por personal local y organizaciones más pequeñas cumpliendo con requisitos menos estrictos y usando componentes fabricados en serie y maquinaria fabricada localmente.

3.2.- Situación de la generación hidroeléctrica en Argentina

En Argentina la hidroeléctrica posee una alta cuota de participación en la generación eléctrica total. Históricamente, la construcción de los grandes aprovechamientos que hoy prestan servicios ha favorecido la creación de empleo, la promoción económica y social de sus zonas de influencia, y la concreción de importantes obras de infraestructura para riego, provisión de agua potable, turismo y control de inundaciones. Como aspectos salientes de ese desarrollo actual y potencial se pueden mencionar:

- El 38% de la capacidad instalada es hidroeléctrica (cerca de 9761 mW)
- De casi un centenar de centrales en servicio, solo 3 grandes plantas (Yacyretá, Piedra del Águila y Salto Grande) contribuyen con casi el 50% de la generación hidráulica total
- Yacyretá será la central eléctrica más grande del país cuando esté terminada
- Es un modesto el aprovechamiento del potencial hidráulico total

Dada su naturaleza renovable, la hidroeléctrica es una forma de generación eléctrica que no implica la producción de desechos ni la emisión de gases de efecto invernadero, reportando una serie de ventajas entre las que es posible señalar:

- Generación limpia, económica y virtualmente inagotable
- Sustitución de combustibles fósiles y ahorro de sus emisiones contaminantes
- Posibilidad de beneficios adicionales como riego, agua potable, turismo y recreación, además de la generación de electricidad
- Larga vida útil
- Empleo de recursos nacionales y empleo de mano de obra local

Por supuesto no hay formas de generación que no tenga impacto ambiental de mayor o menor severidad, y los grandes aprovechamientos hidroeléctricos no están exentos. Conocer la magnitud del impacto provocado sobre el medio natural, económico y social en la zona de afectación del proyecto, obliga a los grandes aprovechamientos a que su estudio, proyecto y construcción queden supeditados a la racional explotación y

preservación de todos los recursos naturales vinculados a la cuenca hídrica en la que se hallan emplazados. Entre las principales desventajas de orden ambiental y económico es oportuno citar:

- Mayor costo unitario(\$/kW) que otro tipo de centrales
- Mayores periodos de estudio y construcción
- Posible inundación de zonas aledañas
- Eventual relocalización de poblados

En este sentido, los pequeños aprovechamientos se caracterizan por no requerir los prolongados estudios técnicos, económicos y ambientales asociados a los grandes proyectos, pudiéndose iniciar y completar más rápidamente, lo que los torna en una opción viable para la generación eléctrica en aquellas zonas aisladas dentro del país no servidas por sistemas convencionales.

Es de destacar que no existe una oposición entre aprovechamientos grandes y pequeños, ya que mientras los grandes abastecen al sistema interconectado, los pequeños proveen electricidad a zonas remotas de una manera comparativamente más económica y ambientalmente benigna.

3.3.- Micro centrales hidroeléctricas

La generación hidroeléctrica es fundamentalmente transformar la energía potencial, presente en un curso de agua tomando un caudal y un salto de agua, en energía mecánica. Esta energía se transforma en energía eléctrica mediante un generador.

Las micro centrales hidroeléctricas utiliza este sistema en escala muy pequeña, en general dentro de un rango de potencias de 1 a 100 kW. Se localizan en áreas aparta-

das y permiten suministrar de energía eléctrica a las poblaciones rurales. Entre las principales ventajas de estos sistemas, podemos mencionar:

- Una alta eficiencia, pudiendo operar con bajos caudales y pequeños saltos
- Confiabilidad, pueden producir un suministro continuo de energía eléctrica en comparación con otras alternativas de generación en la misma escala.
- Bajo impacto ambiental, la mayoría de los sistemas son de tipo agua fluyente, es decir que el agua pasa al generador y es devuelto al flujo principal con pequeño impacto en el ambiente local.
- Poca variación en el flujo suministrado, la variación en la energía generada varía gradualmente de día a día, no de minuto a minuto como con otras tecnologías (eólica, solar)

Característica	Micro	Mini	Pequeña
Potencia Máxima (kW)	100	1000	10000
Altura Máxima de la Presa (m)	2	5	10
Caudal máximo (m ³ /s)	2	15	20
Número mínimo de grupos generadores	1	2	2
Periodo de recurrencia para obras de desvío (años)	-	5 a 10	10
Periodo de recurrencia para obras permanentes (años)	-	500 a 1000	500 a 1000
Periodo máximo de ejecución (meses)	6	12 a 24	18 a 36

El sistema de generación depende del salto que se pueda materializar y del caudal que se derive hacia la turbina, y la potencia generada es directamente proporcional a estos parámetros. De ello se desprende que en un sistema donde la caída sea baja se necesita derivar más caudal para generar la misma cantidad de energía eléctrica que genera un sistema con caída alta. Existe un amplio rango de micro turbinas que se adaptan al salto y el caudal presentes en el sitio de proyecto.

Dentro de la generación eléctrica, los sistemas pueden dividirse en de baja altura de carga y de alta altura de carga:

- Sistema de baja altura de carga: pueden tener menos de 2 m de caída vertical. En estos casos, para maximizar la generación de energía la mayor parte del caudal debe ser derivado hacia la turbina. Las longitudes de conducción se reducen al mínimo para evitar pérdidas de carga.
- Sistema de alta altura de carga: cualquier sitio con un salto mayor a 5 metros. En estos sistemas se tienen grandes longitudes de conducción para poder materializar la caída.

3.4.- Tipos de micro aprovechamientos

Es muy útil distinguir entre los sistemas de "agua fluyente o de derivación" (izquierda) y los de "embalse" (derecha).

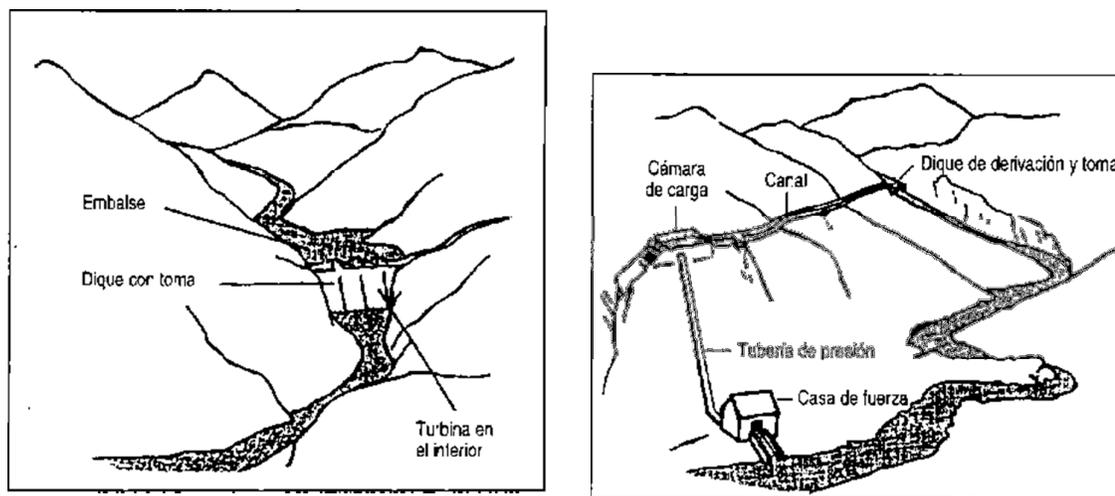


Figura 3-1: Tipos de Micro Aprovechamientos

Un sistema de derivación no detiene al caudal del río sino que desvía parte del caudal a un canal y una tubería y luego hacia una turbina. La gran mayoría de los sistemas de micro hidrogenación son del tipo de derivación. La desventaja de este método es que el agua no se puede almacenar de una estación de lluvias a una estación seca del año. La ventaja es que el sistema se puede construir localmente a un bajo costo y su simplicidad proporciona una mejor confiabilidad a largo plazo. Los sistemas de derivación son preferibles desde el punto de vista del impacto ambiental, dado que las características estacionales del flujo aguas abajo de la instalación no son afectadas y tampoco hay necesidad de inundar los valles ubicados aguas arriba de la instalación.

Un sistema de embalse hace uso de un pequeño dique para detener el caudal del río, formándose un reservorio de agua desde donde fluye el agua hacia las turbinas cuando se necesita energía. La ventaja de este método es que el agua puede acumularse durante la estación de lluvias y luego generar potencia durante los períodos secos del año.

Los sistemas de embalse con diques tienen la desventaja de ser más costosos, además de poder presentar ciertas problemáticas muy serias, por ejemplo, los reservorios se pueden llenar de sedimento después de algunos años. Cuando esto sucede se encuentra a menudo que el dragado del reservorio es demasiado caro, y el sistema termina por generar menos energía que la esperada.

3.5.- Principios básicos de la electricidad

Energía eléctrica

Se denomina de este modo a la forma de energía que resulta de la diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos cuando se los pone en contacto por medio de un conductor, es decir, que la energía eléctrica se manifiesta como el movimiento de cargas eléctricas negativas, o electrones. Esta energía puede transformarse en otras formas de energía, tales como energía lumínica, energía mecánica, energía térmica.

La mayor parte de la energía eléctrica que se consume de forma cotidiana en los distintos aparatos eléctricos –lavarropas, televisor, computadora, etc.- es suministrada a través de la red eléctrica por las empresas encargadas de su generación y distribución.

Circuitos eléctricos

Un circuito es una red eléctrica (interconexión de dos o más componentes, tales como resistencias, inductores, condensadores, fuentes, interruptores y semiconductores) que contiene al menos una trayectoria cerrada, es el recorrido preestablecido por el que se desplazan las cargas eléctricas.

Las cargas eléctricas que constituyen una corriente eléctrica pasan de un punto que tiene mayor potencial eléctrico a otro que tiene un potencial inferior. Para mantener permanentemente esa diferencia de potencial, llamada también voltaje o tensión entre los extremos de un conductor, se necesita de un dispositivo llamado generador.

Existen varios tipos de circuitos eléctricos que se pueden clasificar por el tipo de señal (alternos, continuos), por el tipo de régimen (periódico, transitorio, permanente). A continuación se desarrollaran los circuitos según su fase: monofásicos y trifásicos.

- Monofásicos: circuitos monofásicos de corriente directa o corriente alterna son habituales en instalaciones domiciliarias y públicas, pero su aplicación está restringida a pequeñas potencias eléctricas.
- Trifásicos: permiten transmitir una gran cantidad de energía eléctrica sobre una larga distancia, de allí que las redes de distribución sean trifásicas.

Corriente eléctrica

Corriente directa

La corriente directa (CD) o corriente continua (CC) es aquella cuyas cargas eléctricas o electrones fluyen siempre en el mismo sentido en un circuito eléctrico cerrado, moviéndose desde polo negativo hacia el polo positivo de una fuente de fuerza electromotriz tal como ocurre en las baterías, las dinamos. Es importante mencionar que ni las baterías, ni los generadores, ni ningún otro dispositivo similar crea cargas eléctricas pues, de hecho, todos los elementos conocidos en la naturaleza las contienen, pero para establecer el flujo en forma de corriente eléctrica es necesario ponerlas en movimiento aplicando una diferencia de potencial.

El movimiento de las cargas eléctricas se asemeja al de las moléculas de un líquido, cuando al ser impulsadas por una bomba circulan a través de la tubería de un circuito hidráulico cerrado. Si la función de una bomba hidráulica es poner en movimiento el líquido contenido en una tubería, la función de la tensión o voltaje que proporciona la fuente de fuerza electromotriz (FEM) es, precisamente, poner en movimiento las cargas contenidas en el cable conductor del circuito eléctrico.

La primera aplicación comercial de este tipo de corriente eléctrica ocurrió en los inicios de los sistemas de distribución de energía eléctrica, a instancias del inventor estadounidense Thomas Alva Edison. A partir de año 1893, este sistema fue sustituido por el de corriente alterna (CA) propuesto por el inventor serbo-estadounidense Nikola Tes-

la, sobre cuyos desarrollos se construyó la primera central hidroeléctrica en las Cataratas del Niágara.

Corriente alterna

La corriente alterna (CA) se diferencia de la directa por el cambio constante de polaridad que efectúa por cada ciclo de tiempo. Una pila o batería constituye una fuente de suministro de corriente directa, porque su polaridad se mantiene siempre fija. La característica principal de una corriente alterna es que durante un instante de tiempo un polo es negativo y el otro positivo, mientras que en el instante siguiente las polaridades se invierten tantas veces como ciclos por segundo o Hertz posea esa corriente. No obstante, aunque se produzca un constante cambio de polaridad, la corriente siempre fluirá del polo negativo al positivo, tal como ocurre en las fuentes de FEM que suministran corriente directa.

La variación de la tensión con el tiempo puede tener diferentes formas: senoidal (la forma fundamental y más frecuente en casi todas las aplicaciones de electrotecnia), triangular, cuadrada, trapezoidal, etc.; si bien estas otras formas de onda no senoidales son más frecuentes en aplicaciones electrónicas. Las formas de onda no senoidales pueden descomponerse por desarrollo en serie de Fourier en suma de ondas senoidales (onda fundamental y armónicos), permitiendo así su estudio matemático y el de sus circuitos asociados.

La corriente alterna presenta serias ventajas de cara a la producción y transporte de la energía eléctrica, respecto a la corriente continua, a saber:

- Generadores y motores más baratos, eficientes, y menos complejos
- Posibilidad de transformar su tensión de manera simple y barata (transformadores)
- Posibilidad de transporte de grandes cantidades de energía a largas distancias con un mínimo de sección de conductores (a alta tensión)
- Posibilidad de motores muy simples, (como el motor de inducción asíncrono de rotor en cortocircuito)

- Desaparición o minimización de algunos fenómenos eléctricos indeseables (magnetización en las maquinas, y polarizaciones y corrosiones electrolíticas en pares metálicos)

Los dos tipos de corriente no pueden siempre utilizarse para los mismos objetivos, la producción de los tipos de corriente exige instalaciones y equipo de distintos materiales y costos. Varios factores deben considerarse en decidir si se instala una unidad de corriente continua o alterna, por ejemplo, la demanda de energía probablemente variara a lo largo del día, mientras que el flujo constante de agua en la entrada de la turbina hará que la potencia de salida de la turbina y esto llevará a que la potencia exceda excederá varias veces la demanda.

Al producir la corriente alterna (CA), el flujo del agua o el voltaje necesitaran regularse porque la corriente alterna no puede almacenarse. Cualquier tipo de regulación requiere de equipo adicional que puede incrementar sustancialmente el costo de la instalación hidroeléctrica.

El flujo del agua a una turbina que produce corriente continua no tiene que ser regulado, ya que el exceso de energía se puede almacenar en baterías. Los generadores y las baterías de almacenaje actuales son relativamente de bajo costo al ser producidos en serie.

Redes de distribución

Las redes de distribución son un conjunto de conductores y demás accesorios de soporte, protección, control, medición y mando, que tienen el propósito de llevar la electricidad desde la central hasta cada uno de los usuarios. Son una parte importante de los servicios eléctricos, debido a que cuando ocurre una falla en ellas se interrumpe el servicio.

En servicios eléctricos a pequeña escala es frecuente encontrar tres tipos de redes:

- Línea de transmisión: son aquellas que unen la central de generación con el punto de consumo.

- Red primaria de distribución: recibe la electricidad de la red de transmisión y se encarga de distribuirla en el centro de consumo. En aquellas redes que tienen la central de generación próxima al punto de consumo, la red primaria reemplaza a la red de transmisión.
- Red secundaria de distribución: recibe de la red primaria y lleva la electricidad a cada uno de los usuarios. Esta red generalmente está conformada por dos circuitos, uno para los servicios domiciliario y otro dedicado al alumbrado público.

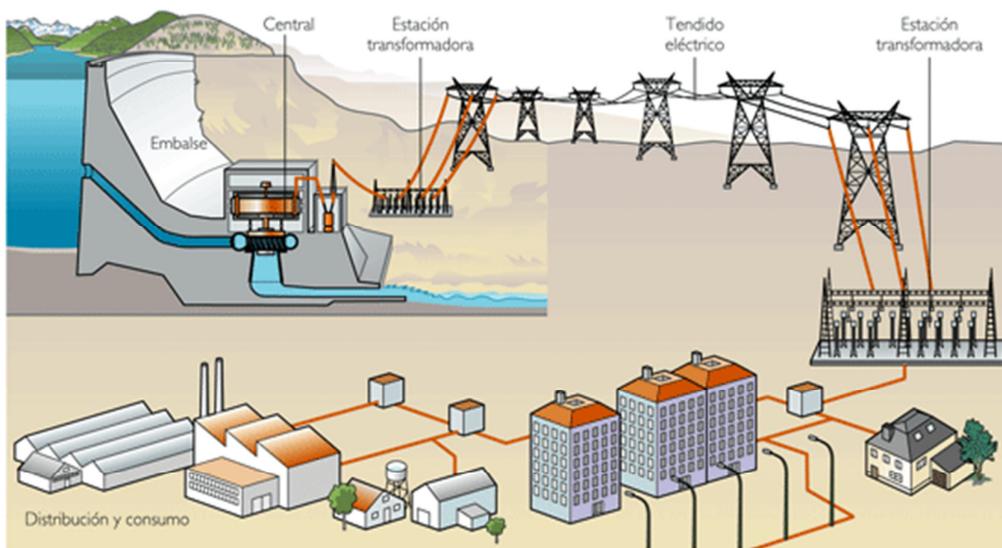


Figura 3-2: Generación y distribución de electricidad

3.6.- Energía a partir del agua

Un hidrosistema requiere de un caudal de agua y una diferencia de altura (conocida como "salto") para producir potencia útil. Se trata de un sistema de conversión de energía, es decir, se toma energía en la forma de caudal y salto y se entrega energía en forma de electricidad o energía mecánica en el eje. Ningún sistema de conversión puede entregar la misma cantidad de energía útil como la que absorbe, pues una parte de la energía se pierde en el sistema mismo en forma de fricción, calor, ruido, etc.

La ecuación de conversión en su forma más simple se puede expresar como:

Potencia de entrada = Potencia de salida + pérdidas

Potencia de salida = Potencia de entrada $\times \eta$

Ecuación 3-1

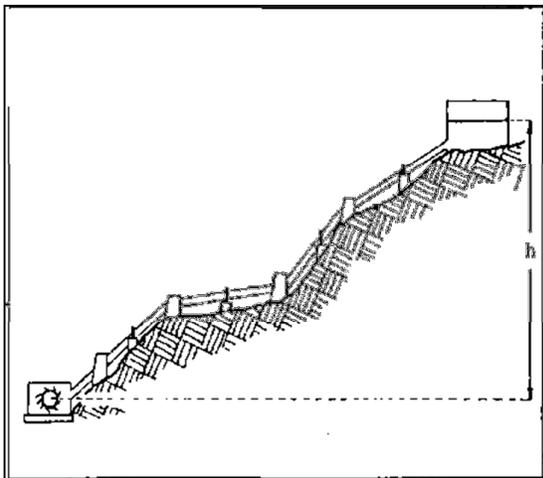


Figura 3-3: Salto hidráulico

La ecuación de arriba se expresa por lo general de una manera ligeramente diferente. La potencia de entrada, o potencia total disponible en el sistema hidráulico, es la potencia disponible P_{disp} , la potencia útil entregada es la potencia neta P_{neta} , η representa la eficiencia en la conversión.

$$P_{neta} = P_{disp} \times \eta \quad \text{kW}$$

Ecuación 3-2

La potencia disponible es igual al salto disponible (h_{disp}) multiplicado por el caudal (Q) y también multiplicado por un factor de 10, obteniéndose la ecuación fundamental de potencia hidráulica:

$$P_{neta} = 10 \cdot h_{disp} \cdot Q \cdot \eta \quad \text{kW}$$

Ecuación 3-3

Donde el salto está en metros y el caudal en metros cúbicos por segundo.

La potencia producida en la turbina será mucho menor que la potencia disponible debido a las pérdidas por fricción en la tubería y en la turbina. La potencia de salida del generador es menor nuevamente debido a la ineficiencia del sistema de transmisión y generador; más aún, las pérdidas en el transporte de la energía harán al final que el usuario reciba alrededor de la mitad de la potencia disponible del sistema.

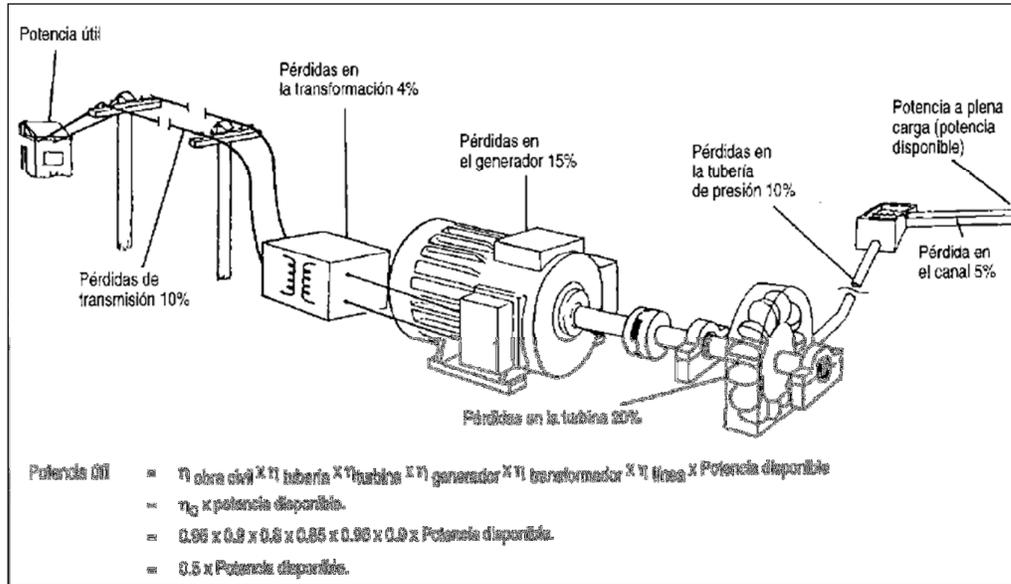


Figura 3-4: Pérdidas en el sistema

El estudio para un aprovechamiento constituye un proceso complejo, durante el cual se comparan desde una óptica económica, pero sin perder de vista los aspectos técnicos y ambientales; distintas soluciones, para terminar escogiendo el que más ventajas ofrece.

Se puede indicar los pasos fundamentales a seguir, antes de proceder o no a un estudio detallado de factibilidad, dichos pasos se pueden definir como:

- Identificación topográfica del lugar, incluido el salto bruto disponible
- Evaluación del recurso hidráulico, para calcular la producción energética
- Definición de aprovechamiento y evaluación preliminar de su costo
- Turbina hidráulicas, generadores eléctricos, equipos de control

- Estudio económico del aprovechamiento y vías de financiación
- Conocimiento de los requisitos institucionales y de los procedimientos administrativos para su autorización

El potencial hidroeléctrica en pequeña escala bien proporcionado y ubicado, resulta económicamente competitivo respecto a las otras fuentes energéticas renovables y, considerando los costos globales reales, también frente a las fuentes tradicionales. Por lo tanto, las micro centrales hidroeléctricas representan una forma de generación de energía muy valiosa, por su bajo impacto ambiental y el utilizar una fuente de energía renovable, que de otra manera se perdería.

3.7.- Configuraciones del sistema eléctrico

Como con otros sistemas de energías alternativas, las micro centrales hidroeléctricas pueden dividirse en cuatro configuraciones:

- Conectado a la red sin baterías: es un sistema simple y eficiente que envía cualquier excedente de energía durante la generación hacia la red, con la correspondiente compensación económica. Estos sistemas no proveen respaldo cuando se debe detener la generación.
- Conectado a la red con baterías: este sistema también envía los excedentes de electricidad a la red, pero al contar con baterías provee de respaldo durante las paradas de la turbina. La capacidad de respaldo queda determinada por el tamaño del banco de baterías
- Sin conexión a la red y sin baterías: esta configuración se adopta para sistemas de gran generación de corriente alterna. El pico de capacidad de carga está determinado por el pico en la capacidad de generación de la turbina. No se recomienda aplicarlo en sistema con una potencia instalada menor a 5 kW.
- Sin conexión a la red con baterías: la configuración más común, donde la energía generada por la turbina se almacena en un banco de baterías. Se suministra la

energía directamente desde las baterías si la red interna es a corriente continua, o se incorpora un inversor al sistema si se planea una red interna a corriente alterna.

Las micro centrales hidroeléctricas pueden hacer frente a los consumos dependiendo de las características de la zona de aprovechamiento. Los sistemas más pequeños solo pueden brindar energía para iluminación y algunos aparatos eléctricos básicos.

La alturas de carga y el caudal son aquello que limita la potencia y la energía del sistema, ya que con buenos valores de estos parámetros, estas centrales pueden abastecer sistemas de calentamiento o refrigeración, herramientas eléctricas y hasta equipamiento con altos picos de arranque.

3.8.- Diseño de un aprovechamiento hidroeléctrico

Como se mencionó anteriormente, la potencia de una central hidroeléctrica es proporcional a la altura del salto y al caudal turbinado, por lo que es muy importante determinar correctamente estas variables para lograr un correcto diseño de las instalaciones y el dimensionamiento de los equipos. Se deben considerar ciertos aspectos del proyecto, a modo de evitar futuros problemas durante el uso del aprovechamiento:

- Al seleccionar el sitio de instalación del sistema se debe considerar la distancia desde la fuente de poder al punto donde la energía es requerida, caudal y caída de agua, y balance entre los componentes eléctricos (inversor, banco de baterías, controles, líneas de transmisión)
- No son posibles expansiones en la capacidad instalada: fijado el caudal y el salto con el cual operará la micro central, se fija la potencia máxima que puede entregar el sistema. Cualquier cambio en los parámetros del diseño de la instalación, reducirían la eficiencia de la misma.

Determinación del salto neto

En una micro central hidroeléctrica, el salto es una de las magnitudes fundamentales a determinar para el diseño de la misma, y deberá ser el máximo permitido por la topografía del terreno, teniendo en cuenta los límites que marcan los impactos al medio ambiente y la viabilidad económica de las inversiones necesarias para su materialización.

Resulta útil definir una serie de conceptos:

- **Salto bruto (H_b):** Altura existente entre el punto de la toma de agua del azud y el punto de descarga del caudal turbinado al río.
- **Salto útil (H_u):** Desnivel existente entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe en la turbina.
- **Salto neto (H_n):** Es la diferencia entre el salto útil y las pérdidas de carga producidas a lo largo de todas las conducciones. Representa la máxima energía que se podrá transformar en trabajo en el eje de la turbina.
- **Pérdidas de carga (H_p):** Son las pérdidas por fricción del agua contra las paredes del canal y sobre todo en la tubería forzada, más las pérdidas ocasionadas por turbulencia, al cambiar de dirección el flujo, al pasar a través de una rejilla o de una válvula, etc.

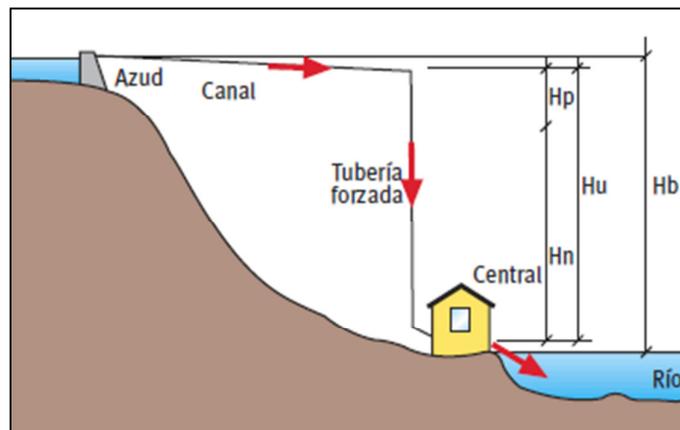


Figura 3-5: Altura de carga

Para una primera aproximación, se puede estimar el salto bruto mediante un plano con curvas de nivel de la zona de emplazamiento. No obstante, para una determinación más correcta y exacta, será necesario realizar mediciones en la zona. Para ello se puede recurrir a distintos métodos, entre ellos:

Método del altímetro

El altímetro es un instrumento de medición fácil de usar con una precisión de los resultados que depende principalmente de la destreza del operador. Si se cuenta con mucha experiencia en su uso y las mediciones se realizan con cuidado, los resultados obtenidos serán buenos y válidos para efectuar cálculos y toma de decisiones. Sin embargo, si este no es el caso, las mediciones solo servirán como datos referenciales más acordes a un estudio preliminar que a estudios de factibilidad.

El instrumento mide la presión atmosférica, la cual está directamente relacionada con la altura sobre el nivel del mar, variando ligeramente debido al clima, la temperatura y la humedad relativa. Dichas variaciones pueden ser significativas para evaluar el salto, por lo tanto se recomienda tomar varias lecturas a lo largo del día para luego estimar el valor final

Método del nivel

El nivel es capaz de registrar mediciones con mucha precisión pero es un equipo caro y requiere de operadores con experiencia. Por lo general, los errores se producen por las largas series de cálculos que hay que efectuar, por lo tanto es necesario proceder cuidadosamente para no invalidar las tareas de campo por errores de procesamiento.

En terrenos donde existen obstrucciones en las visuales, el método se torna lento por tener que reubicar el equipo para realizar nuevas mediciones.

	Ventajas y Limitaciones	Precisión	Observación
Altímetro	Usado en caídas altas y medianas (<40 m) Rápido	Probabilidad de grandes errores	Necesita calibrar instrumentos y manejo diestro de los mismos. Tomar tres o más medidas
Nivel	Rápido. Costo alto	Muy buena	En terrenos con obstrucciones en la visual, se torna lento
Mapas	Solo para caídas altas. Costo bajo	Aceptable solo en las primeras etapas de proyecto	Se necesita experiencia para hacer la lectura de los mapas

Tabla 3-2: Comparativa entre los métodos

Determinación del caudal

Es fundamental la elección de un caudal de diseño adecuado para definir el equipamiento a instalar, de forma que la energía producida sea la máxima posible en función de la hidrología. Es poco probable que en un esquema de derivación se use un caudal mayor al caudal medio del río o arroyo, ya que esto no sería ambientalmente aceptable ni económicamente atractivo por la dimensión de las obras de derivación.

La medición de los caudales del río se realiza en las estaciones de aforo, donde se registran los caudales instantáneos que circulan por el tramo del río donde está ubicada la estación. Si no se cuenta con datos de esta naturaleza, se puede recurrir a series de datos pluviométricos en la zona y realizar un análisis de las mismas para transformar el dato de precipitación en un dato de caudal.

Pero cuando no existen datos de aforos, se deben recurrir a mediciones directas del caudal en una sección del río, pero realizar una medida del caudal instantáneo resulta un registro aislado que aporta relativamente poco a la definición de este parámetro del sistema. Debido a las variaciones que experimenta el caudal de un río a lo largo del

año, las mediciones instantáneas del caudal deben tomarse regularmente a lo largo de al menos un año.

Método del recipiente

El método del recipiente es una manera muy simple de medir caudal, desviando todo el caudal a medir hacia un balde o barril y registrar el tiempo que tomará llenarlo. El volumen del envase se conoce y el resultado del caudal se obtiene simplemente divi-

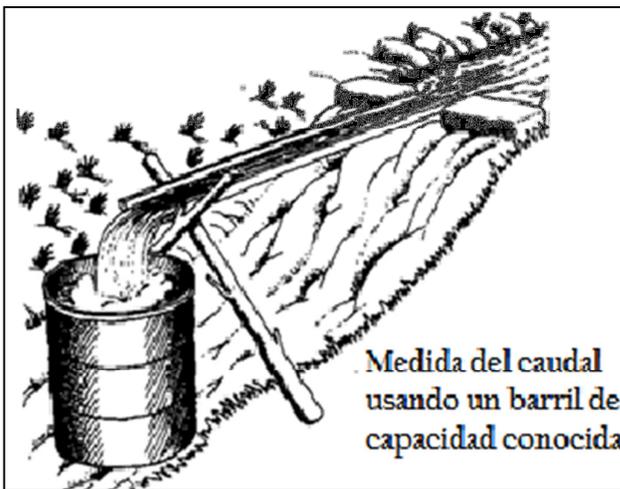


Figura 3-6: Método del recipiente

diendo este volumen por el tiempo de llenado.

La desventaja de este método es que todo el caudal debe ser canalizado o entubado al envase. A menudo es necesario construir una pequeña presa temporal. Este método resulta práctico para caudales pequeños.

Método del flotador

Se dibuja el perfil de la sección del lecho del río y se establece una sección promedio para una longitud conocida de corriente. Utilizamos una serie de flotadores, podría ser una serie de pedazos de madera, para medir el tiempo que se demoran en correr una longitud preestablecida del río. Los resultados son promediados y se obtiene la velocidad superficial del flujo de agua.

Esta velocidad deberá ser reducida por un factor de corrección para hallar la velocidad media de la sección. Este factor depende de la profundidad de la corriente. Multiplicando el área de la sección promedio por la velocidad del caudal promediada y corregida, se obtiene un estimado del valor del volumen de agua que fluye.

Este método presenta una serie de imprecisiones, ya que obtener un valor preciso del área de la sección del río es una tarea difícil y tediosa. Es recomendable escoger un tramo de la mayor longitud posible que presente orillas paralelas y una sección transversal uniforme, de este modo los valores obtenidos con este método contarán con buena precisión.

Método de la sección de control y regla graduada

En este método, la característica física es utilizada para observar la relación entre el tirante de agua y el caudal. La sección de control se ubica donde un cambio dado en el caudal se traduce en un cambio apreciable en el tirante de agua en la sección de control. Deberá evitarse una sección de control ancha porque los cambios en el caudal resultaran en cambios pequeños en el tirante.

Si algún objeto obstruye la sección de control o la erosión hace que la pendiente cambie, entonces las lecturas no serán válidas. El medidor, típicamente un listón de manera graduado, deberá estar situado donde sea factible leerlo y no esté expuesto a daños.

Este método es válido para comparar un caudal con otro, pero un caudal de referencia debe ser conocido y relacionado con la tabla graduada de modo de obtener una estimación cuantitativa del caudal.

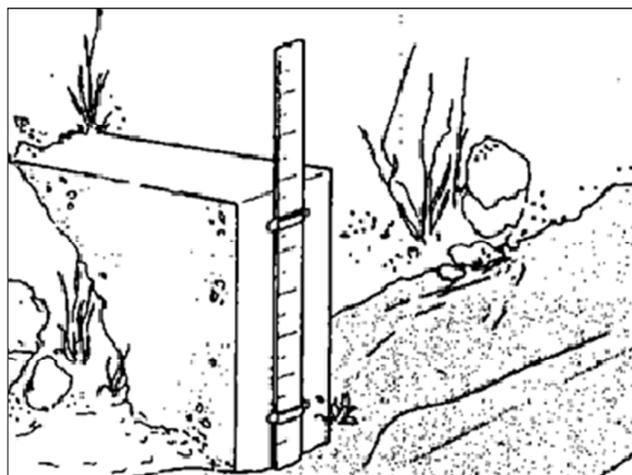


Figura 3-7: Sección de control

Método del vertedero de pared delgada

Un vertedero es una estructura similar a un muro de baja altura ubicado a lo ancho de un río o canal. Un vertedero de medición de caudal tiene una muesca a través de la cual toda el agua en la corriente fluye.

Los vertederos son generalmente estructuras temporales y son diseñados de modo que la descarga volumétrica pueda ser determinada por una simple lectura de la diferencia de altura entre el nivel del agua antes del vertedero y el vértice o cresta de este.

Para alcanzar mejores resultados hay que utilizar vertederos de pared delgada y además evitar que el sedimento se acumule tras ellos. Estos vertederos se hacen de plancha de acero, siendo tres tipos de vertederos los de uso más frecuente:

- El vertedero triangular, que mide descargas pequeñas con mayor precisión que los otros tipos.
- El vertedero trapezoidal llamado cipoletti. Este puede compensar las contracciones en los bordes con caudales reducidos, lo cual introduce errores en los vertederos rectangulares. La fórmula para calcular la descarga se simplifica al eliminar el factor de corrección en los vertederos rectangulares.
- El vertedero rectangular, que permite medir descargas mayores y su ancho puede ser cambiado para diferentes caudales.

Hay que ubicar el vertedero en un punto donde la corriente sea uniforme y esté libre de remolinos. La distancia entre el fondo del lecho del río y la cresta del vertedero aguas arriba de este, deberá ser al menos dos veces la altura máxima a medirse.

No debe haber ninguna obstrucción al paso de agua cerca al vertedero y los lados de este deben estar perfectamente sellados a fin de evitar fugas o goteos. Para ello puede emplearse una lámina plástica. La cresta del vertedero deberá ser lo suficientemente alta como para permitir que el agua caiga libremente dejando un espacio bajo el chorro.

Las ecuaciones para la mayoría de vertederos de pared delgada por lo general no son precisas para alturas muy pequeñas (menores de 5cm). En comparación con otros, el vertedero triangular puede medir un rango mayor de caudales. La cresta del vertede-

ro debe ser lo suficientemente ancha para recibir la mayor descarga esperada, por lo tanto es necesario conocer los probables valores del caudal antes de seleccionar o diseñar un vertedero.

Capítulo 4 - Obra Civil

4.1.-Introducción

Existen diversos tipos de esquemas de micro centrales hidroeléctricas cuya elección intervienen la topografía y las condiciones hidrológicas del río o arroyo desde el cual se desvía agua hacia la turbina. Estos parámetros de funcionamiento del sistema obligan a tomar decisiones sobre las dimensiones del azud, las longitudes relativas de la tubería de presión y del canal, así como también de la mejor ruta a seguir para el trazado de las mismas.

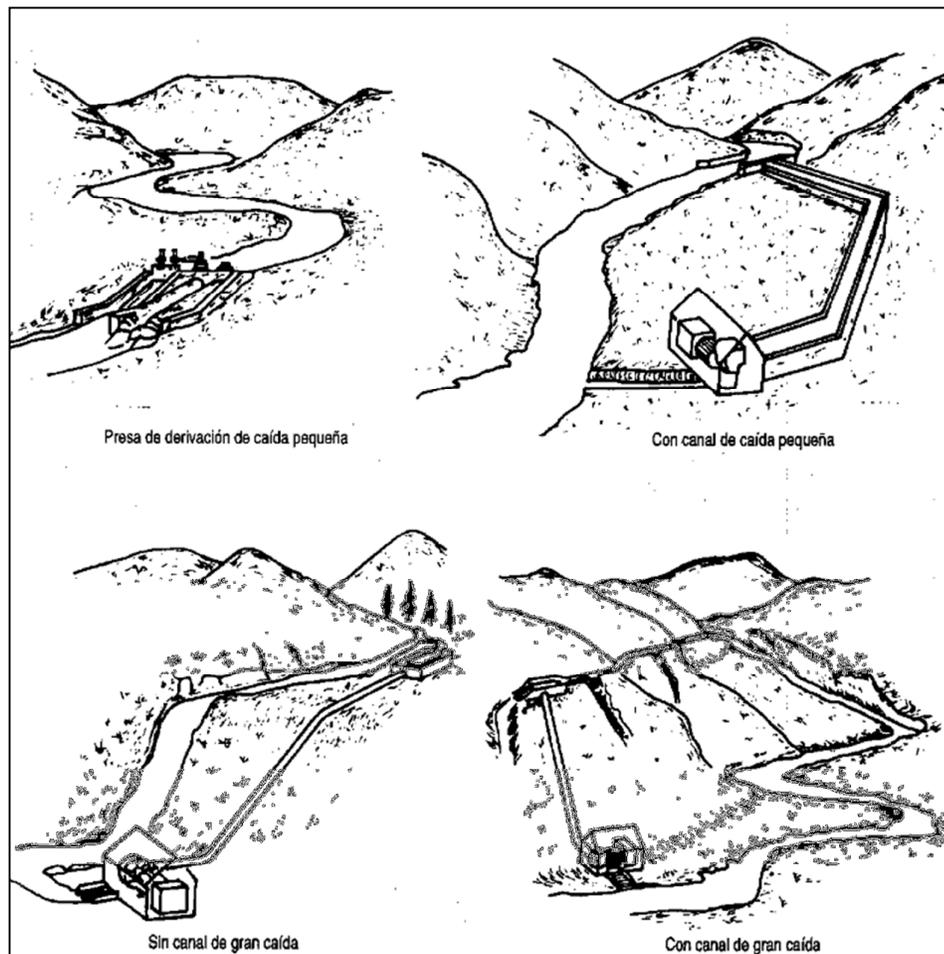


Figura 4-1: Configuración del aprovechamiento

A modo de generalizar, el funcionamiento de un esquema de micro central hidroeléctrica se puede resumir en un azud que actúa elevando el nivel del agua para que esta ingrese a través de una apertura en el margen del río, obra de toma. Un desarenador elimina las partículas sólidas del agua. Posteriormente un canal conduce el agua hasta la cámara de carga, para luego ingresar en una cañería cerrada conocido como tubería a presión. Esta conduce el agua hasta la casa de fuerza donde se encuentra la micro turbina.

Existen muchas variantes para materializar el aprovechamiento, las cuales dependerán de las características del sitio en particular y los requerimientos de los usuarios que motivan implantar una micro central.

4.2.- Elementos de la Obra Civil

Una micro central hidroeléctrica se compone de una serie de pequeñas obras civiles para lograr materializar el salto y derivar el caudal a la turbina. En general, podemos mencionar:

1. Azud, Es una estructura de derivación que sirve para elevar el nivel de agua y se construye en sentido transversal al río con fines de captación, siempre y cuando sea necesario, es decir, en aquellos casos en que el tirante del río no sea lo suficientemente grande y no abastezca los requisitos de captación. Dependiendo de la relación entre los caudales del río y la captación, algunas veces (cuando el tirante del río permite el acceso al caudal de diseño a través de la ventana de captación, es decir cuando la cota del río es mayor que la cota inferior de la ventana de captación), no es imprescindible construir el azud. En estas ocasiones, bastará con construir espigones, que son estructuras provisionales o temporales hechas de piedras, que principalmente sirven para desviar parte del caudal del río hacia la captación.

2. Obra de toma, son obras hidráulicas cuya función es regular y captar un determinado caudal de agua, en este caso, para, la producción de hidroenergía sea esta mecánica o eléctrica. Las bocatomas permiten tomar el agua de los ríos y conducirla aprovechando la fuerza gravitatoria.
3. Aliviaderos, son estructuras de regulación y de protección que sirven para evacuar caudales de demasías o caudales superiores a los del diseño. Si estas aguas excedentes ingresaran a las diferentes obras que componen el sistema, podrían ocasionar daños de imprevisibles consecuencias.
4. Desarenador, el agua captada del río y conducida a la turbina transporta pequeñas partículas de materia sólida en suspensión compuesta de materiales abrasivos (como arena) que ocasionan el rápido desgaste de los álabes de la turbina. Para eliminar este material se usan los desarenadores. En ellos la velocidad del agua es reducida con el objeto de que las partículas de arena o gravas se asienten en el fondo de donde podrán ser removidas oportunamente. Es necesario que el sedimento se asiente tanto a la entrada del canal como a la entrada de la tubería o cámara de carga.
5. Canal, en una determinada instalación se pueden adecuar diferentes tipos de canales, estos son: canal de tierra sin revestir, canal de tierra revestido (con una aplicación de una capa delgada de material que no agrega resistencia estructural, pero reduce la fricción y la filtración), canal de mampostería o concreto.
6. Cámara de carga, deberá tener una capacidad de colección menor que el desarenador ya que la carga del sedimento debe ser baja. En la práctica, es muy posible que el agua del canal contenga sedimento a causa de desechos o de fallas en el depósito de la entrada.
7. Tubería de presión, transportan agua bajo presión hasta la turbina. Debido a que el costo de esta tubería puede representar gran parte del presupuesto de toda la micro central, es prioritario optimizar su diseño para reducir no sólo los costos de mantenimiento sino la inversión inicial. Para que los costos de mantenimiento sean bajos hay que colocar los soportes y los anclajes de la tubería en pendientes estables y encontrar buenos cimientos. No deberá haber peligro de erosión por desprendimientos en las laderas, pero sí acceso seguro

para hacer los trabajos de mantenimiento y reparación (por ejemplo, repintado en el caso de tuberías en acero).

8. Casa de maquinas

9. Canal de descarga

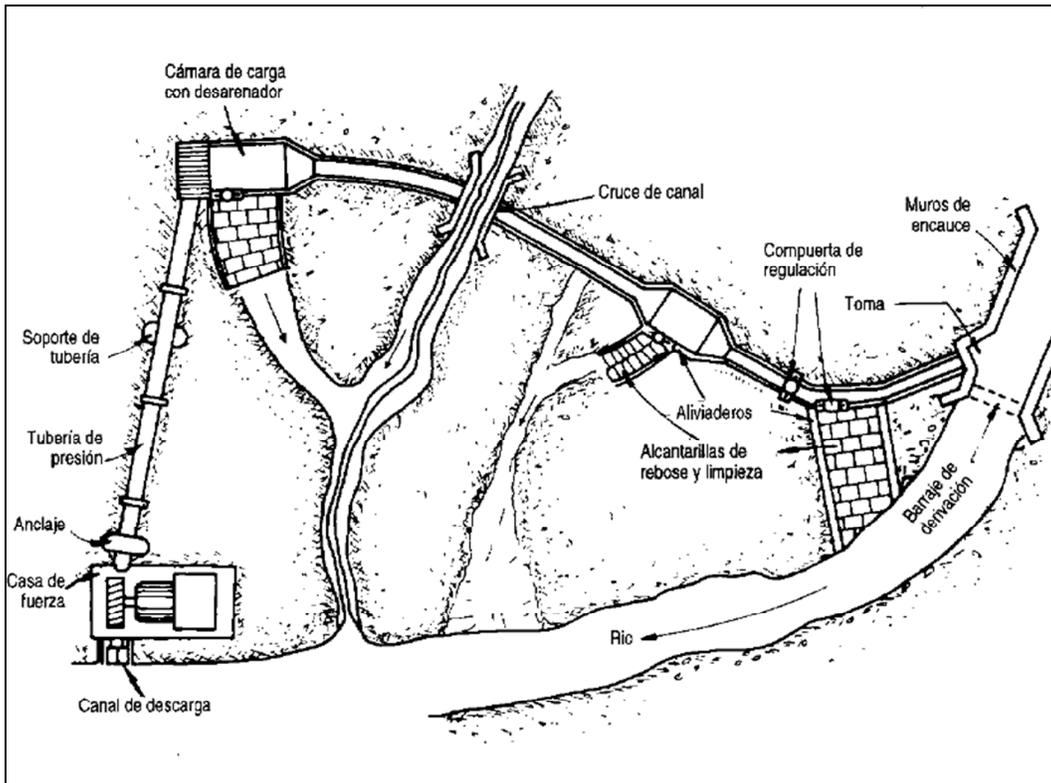


Figura 4-2: Elementos de la Obra Civil

Para el diseño de todos estos componentes es necesario tener en cuenta una serie de factores esenciales.

Sedimento

El agua del río acarrea pequeñas partículas de material duro y abrasivo que pueden ocasionar daños considerables a la turbina, así como su rápido desgaste, si no son extraídos antes de su ingreso a la tubería de presión. El sedimento puede producir además, el bloqueo de la toma en caso de que el ingreso al canal no se encuentre correctamente ubicados.

Caudal adecuado

El caudal del río varía durante el año, pero la micro central está diseñada para captar un caudal constante. Si ocurriera una sobrecarga en el canal, inevitablemente se producirán daños. La bocatoma debe, en lo posible, derivar el caudal adecuado hacia el canal, sea que el río tenga mucha o poca cantidad de agua. La función principal del azud es asegurar que el caudal del canal se mantenga, incluso en época de estiaje. Por otro lado, la función principal de la estructura de la toma del canal es regular el caudal dentro de los límites razonables cuando el río tiene mucho volumen de agua.

Avenidas

Las avenidas requieren especial atención por parte del proyectista. Las aguas de avenida acarrearán gran cantidad de material e incluso hacen que grandes piedras rueden a lo largo del lecho del río. Todo ello puede dañar el azud, la estructura de la toma del canal y los muros de encauce, si es que no han sido cuidadosamente diseñados.

Pérdidas del salto

Dado que la potencia desarrollada por la turbina depende en gran medida de la presión del agua a la entrada de ésta, es claro que el canal no debe perder "salto" innecesariamente. Además, la tubería de presión deberá estar dimensionada de manera tal que las pérdidas por fricción no reduzcan excesivamente el salto.

Golpe de ariete

Si el flujo de agua en la tubería se detiene bruscamente (por ejemplo a causa de un bloqueo repentino cerca de la turbina), se originarán sobrepresiones muy altas llamadas golpes de ariete. La tubería debe ser lo suficientemente fuerte como para no romperse cuando esto suceda. Por otro lado, tales presiones harán que la tubería se mueva, lo que ocasionará daños si los anclajes no son resistentes.

4.3.- Azud

Es el primer elemento que compone un aprovechamiento hidroeléctrico, cuya función es obstaculizar el curso del río y remansar las aguas para su derivación al sistema de conducción.

Emprendimientos de micro centrales hidroeléctricas en raras ocasiones pueden afrontar el costo de ejecutar una presa de grandes dimensiones. Los sitios donde materializar la obra de cierre usualmente están asociados con presas ya existentes donde se incorpora una micro turbina o aprovechar una caída de agua natural. Cuando es necesario construir una presa para remansar el río, las opciones técnica y económicamente aptas son las presa de gaviones o de hormigón en masa, con una altura no superior a 2 a 3 metros.

Existen algunas consideraciones a tener en cuenta cuando se diseñan este tipo de estructuras:

- Debe ser lo suficientemente alto para que el agua remansada alcance un cota tal que se pueda acomodar la obra de toma. Como regla general se puede fijar como altura mínima a dos veces el diámetro de la cañería de toma.
- Poder soportar el paso de crecidas por sobre su coronamiento, e inmediatamente aguas abajo, su fundación debe ser capaz de absorber el impacto del agua al caer sin ocasionar erosión. Esto implicar fundar sobre roca o realizar tomar medidas para evitar la erosión del fondo del cauce.

Si se elige un azud de hormigón en masa, se debe considerar construirla con hormigón ciclópeo ya que habitualmente en los lugares donde se debe materializar la presa el acceso para la maquinaria y los materiales pueden elevar los costos de la tarea. Por otro lado al contar con mano de obra no calificada, el hormigón ciclópeo resulta una alternativa económica.

En su forma más elemental, un azud es un simple obstáculo, cuya misión no es almacenar agua sino remansarla para que pueda ser derivada en condiciones favorables, es decir, tomar parte del caudal y dirigirlo hacia la micro central mientras se permite el paso del resto por sobre el mismo. Para pequeños aprovechamientos, las obras también son pequeñas, y por motivos económicos, se deben mantener simples.

Todas deben ser construidas sobre fundaciones impermeables, diseñadas para resistir fuerzas de volcamiento y deslizamientos ejercidas por el agua. El sitio de empla-

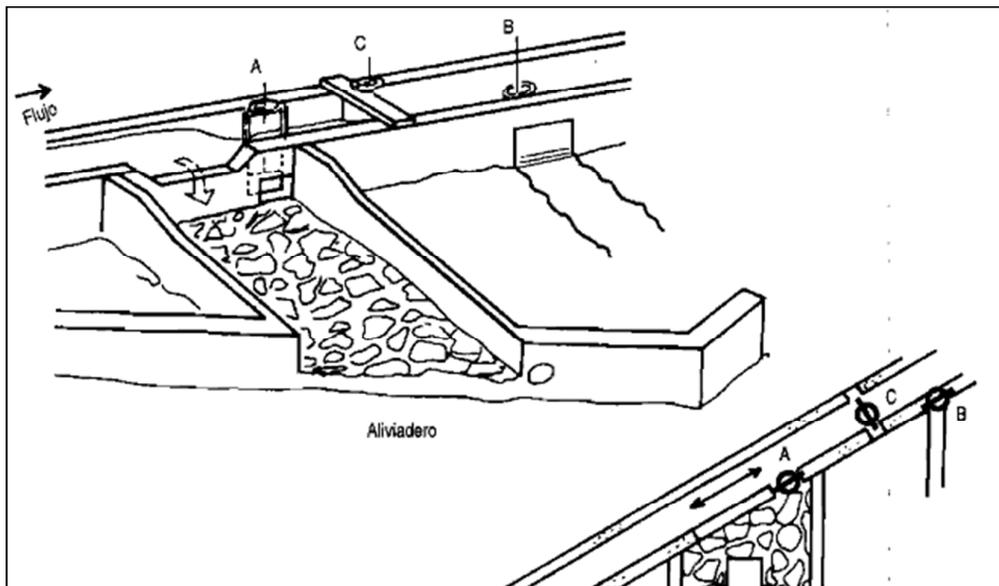
zamiento debe elegirse de modo tal que la presa pueda ser fundada sobre roca, y la roca de fundación de ser limpiada cuidadosamente antes de comenzar con los trabajos de materialización de una presa de gaviones u hormigón. Si una fundación sobre roca no es posible, la presa puede fundarse sobre un manto de material seleccionado por su granulometría que garantice impermeabilidad.

La presa debe ser diseñada para ser segura contra desbordamientos por inundaciones, para ello la altura de coronamiento debe estar por encima del nivel normal de agua y del nivel posible en ocasión de crecida. La altura de coronamiento a seleccionar dependerá de las condiciones de flujo del río o arroyo a remansar.

4.4.- Aliviaderos

Son estructuras de regulación y de protección que sirven para evacuar excesos en el caudal de diseño, ya que si estas aguas excedentes ingresaran, podrían ocasionar daños a los distintos componentes del sistema. El aliviadero debe devolver el exceso de agua al río. Su diseño consiste básicamente en definir tres características: largo, altura y tipo de cresta que será definida por un coeficiente de descarga. La forma y tamaño del aliviadero controla el caudal que pasa por sobre él y define la relación entre la altura de la lámina de agua, aguas arriba del aliviadero y el citado caudal.

El aliviadero se combina con compuertas de control para el desagüe. En ciertos casos, se requiere detener el ingreso de agua en el canal o tubería de conducción para realizar tareas de mantenimiento en los componentes aguas abajo.



En épocas de avenidas se pueden presentar emergencias, y ante la posibilidad de que la compuerta no funcione por falta de control y mantenimiento, es sensato considerar contar con más de un mecanismo para cortar el paso de agua. Cuando se tienen grandes longitudes en el trazado del canal de conducción, es recomendable construir aliviaderos a intervalos de 100 m a lo largo de todo el canal, ya que esto permite una mejor regulación del caudal durante avenidas y facilita las tareas de mantenimiento del canal.

4.5.- Estructuras de toma de agua

Una toma de agua tiene que desviar el caudal requerido para generar la energía, respetando el medio ambiente en que se integra, con la mínima pérdida de carga posible. La toma actúa como zona de transición entre un curso de agua, que puede ser un río tranquilo o un torrente turbulento, y el canal de derivación por donde circula un caudal de agua, que debe estar controlado, tanto en cantidad como en calidad.

Su diseño, basado en consideraciones geomorfológicas, hidráulicas, estructurales y económicas, requiere un cuidado especial para evitar problemas de funcionamiento y conservación a todo lo largo de la vida de la micro central. Además de minimizar las pérdidas de carga en la estructura, se debe tener en cuenta:

- Un juego de rejas para retener los elementos que floten en la corriente

- Una compuerta o válvula para cortar el flujo

La toma de agua puede ser una caja de hormigón o de acero o simplemente una extensión de tubería. Debe ser diseñada para resistir el total de la presión de agua, en caso de que la reja quede obstruida. Si se utiliza hormigón o acero, se procura generar una estructura de entrada para minimizar las pérdidas de carga, siendo recomendable recurrir a líneas rectas en el desarrollo de la superficie dado que utilizar líneas curvas llevaría a diseños complejos y costosos para la magnitud de una micro central.

Las rejas serán formadas por barras de acero con un espaciamiento que debe estar en un rango de 2-3.5% del diámetro de la tubería de conducción a la turbina, con un mínimo de 20 mm. La velocidad de paso a través del área neta de la reja debe estar comprendida entre 1.0 y 1.5 m/s; las pérdidas de carga en la zona de la reja pueden ser bastante altas, por tanto mientras menor sea la velocidad de paso, menores serán las pérdidas.

En la práctica, se considera que la reja operará con parte del área neta de paso obstruida por materiales arrastrados por la corriente. Esta obstrucción se tiene en cuenta en el cálculo de sus dimensiones, y oscila entre el 10% y el 25% antes de que las tareas de limpieza sean efectuadas. Si la obra de toma es de difícil acceso, y la corriente arrastra mucho material residual, sería prudente sobredimensionar el bastidor para reducir la frecuencia de limpieza de los mismos.

Una compuerta o válvula se requiere para cerrar el paso del flujo, en caso de necesitar realizar operación de mantenimiento en algún tramo aguas abajo de la toma. En general, se puede utilizar una válvula mariposa o una compuerta como alternativas más económicas de solución. La válvula mariposa puede ser de la misma dimensión que la tubería de conducción, mientras que la compuerta será del mismo ancho que el diámetro de la tubería de conducción, y aproximadamente un 25% más alta que la tubería.

Aguas abajo de la compuerta o válvula mariposa, se debe colocar una tubería de ventilación para prevenir la aparición de presiones negativas en la tubería de conducción cuando se efectuó el cierre del paso del agua hacia la tubería.

Estas tomas de agua pueden clasificarse en tres tipos: toma lateral, toma frontal y toma de montaña, cuyas características se resumen en la tabla 4-1.

		Pendiente del cauce	Anchura del cauce	Planta del cauce	Transporte de sedimentos
Toma lateral	En la orilla exterior de la curva	$0.001\% < i < 10\%$	Todos los anchos	El tramo curvo es óptimo	Pocos detritos flotantes y fuerte carga de fondo
	Con canal de deposición de grava	$0.01\% < i < 10\%$	< 50 m	El tramo puede ser rectilíneo	
Toma frontal	Con canal de deposición de grava	$0.01\% < i < 10\%$	< 50 m	Rectilíneo es óptimo	Si hay carga de fondo, purga continua
Toma de montaña		$i > 2.5\%$	< 50 m	Rectilíneo	Detritos en grano

Tabla 4-1: Características de distintos tipos de toma

La toma de agua más frecuente es la toma lateral. Se debe ubicar, si es posible, en el borde exterior de una curva del cauce, para evitar la entrada de broza y los arrastres de fondo, o intercalar un canal de sedimentación.

4.6.- Desarenador y cámara de carga

El agua derivada desde el río y conducida a la turbina transporta pequeñas partículas de materia sólida en suspensión que no son retenidas por las rejillas en la obra de toma. Este material es abrasivo y ocasionará un rápido desgaste de los álabes de la turbina. Para eliminar este material se usan los desarenadores, donde la velocidad del agua es reducida provocando que las partículas decanten.

La cámara de carga recibe el caudal libre de materiales abrasivos y lo conduce hacia la tubería forzada que termina en la turbina.

Es usual combinar ambos depósitos en uno solo, teniendo en cuenta que se cumplan estos principios:

- Deben tener una longitud y un ancho adecuados para que los sedimentos se depositen, sin ser demasiados voluminosos
- Deben permitir una fácil eliminación de los depósitos
- La eliminación de los sedimentos a través de la compuerta debe hacerse cuidadosamente para evitar la erosión del suelo que rodea y soporta la base de la tubería y del depósito
- Se debe impedir la turbulencia del agua causada por los cambios de sección de circulación
- Tener capacidad suficiente para permitir la acumulación de sedimentos

Ancho y longitud del desarenador

La longitud total del desarenador se divide en tres partes: entrada (L_e), una parte central llamada de decantación (L_d) y salida (L_s).

La profundidad del desarenador se divide en dos partes: decantación (D_d) y de recolección (D_r). Es importante proyectar correctamente estas profundidades, ya que el desarenador funcionará correctamente solo si no se permite que la sedimentación que se va formando exceda del borde del área de recolección que se encuentra en el límite superior de la zona de recolección.

La velocidad horizontal del agua (V_h) será baja ya que la zona de decantación del desarenador presenta una gran sección transversal. Para diseñar el desarenador se elige una velocidad entre 0.20-0.50 m/s.

En cuanto a fijar la profundidad de decantación (D_d), se recomienda no seleccionar valores mayores a 1 m por fines prácticos, a una mayor profundidad puede resultar difícil realizar el drenaje o limpieza del desarenador.

La siguiente figura muestra la trayectoria seguida por las partículas cuando ingresan en el desarenador: al estar limpio el depósito, la velocidad del agua tendrá valo-

res menores al supuesto en el cálculo pero a medida que se llena el depósito la velocidad del agua será mayor y las partículas viajarán hacia delante del desarenador.

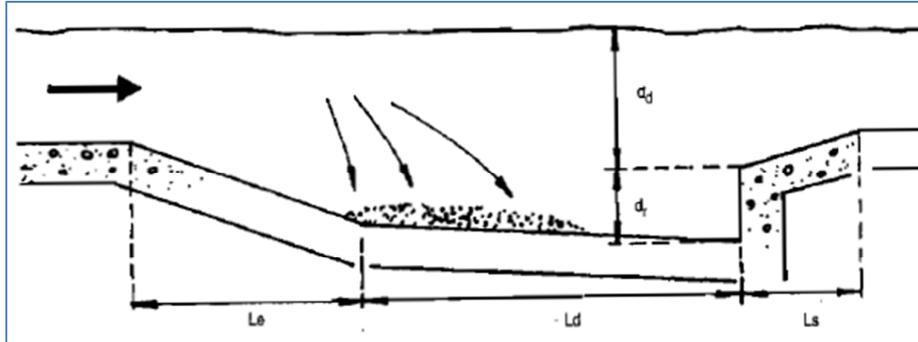


Figura 4-4: Longitud del desarenador

La velocidad con que caen las partículas depende de su tamaño, forma, densidad y grado de turbulencia del agua. Cuando el flujo de agua no es turbulento, la velocidad de decantación V_d puede ser determinada con facilidad.

Con respecto a la limpieza del desarenador, la compuerta de control de la boca-toma debe estar cerrada a fin de parar la turbina. El vaciado hay que realizarlo en periodos en que no se necesita la energía de la turbina o planear estas operaciones con previo aviso de parada de la turbina.

El diseño de la cámara de carga sigue exactamente el procedimiento esbozado anteriormente para los desarenadores, excepto que la sección de salida es la tubería a presión. En teoría, la cámara de carga deberá tener una capacidad colectora menor que el desarenador porque la carga del sedimento debe ser baja. En la práctica, es muy posible que el agua del canal contenga sedimento a causa de desechos o fallas en el depósito de la entrada, y es por esta razón que la cámara de carga debe ser dimensionada del mismo modo que el desarenador.

4.7.- Canales

En una determinada instalación se pueden materializar diferentes tipos de canales de acuerdo a las características del proyecto. Estos son:

- Canal de tierra sin revestimiento.
- Canal de tierra con sello o revestimiento, el "sellado" o revestido se refiere a la aplicación de una capa delgada de material que no agrega resistencia estructural; pero sirve para reducir la fricción y la filtración.
- Canal de mampostería o concreto.
- Acueductos: hechos de planchas de acero galvanizado, madera o tubos cortados por la mitad.

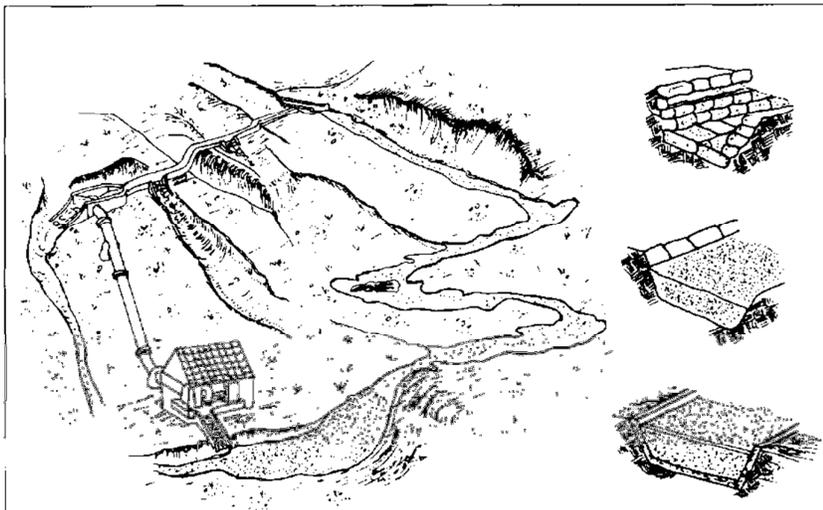


Figura 4-5: Revestimiento en canales

Es muy importante elegir correctamente el tipo de canal para cada parte del trazado. Por lo general, es necesario examinar el suelo a lo largo del trazado del canal, ya que si el terreno muy arenoso puede llegar a ser necesario revestir el canal para evitar pérdida por infiltración.

Es bastante más económico construir canales sin revestimiento pues estos no requieren mucha mano de obra ni el transporte de materiales hasta el lugar. No obstante, sólo luego de una adecuada evaluación del trazado se podrá determinar si se requiere un canal revestido o no. Es necesario hacer evaluaciones por ejemplo cuando:

- el terreno es excesivamente poroso
- el terreno rocoso impide excavar
- el terreno es escarpado y el suelo inestable

Una vez que se ha elegido el tipo de canal y el material de revestimiento correspondiente, es posible calcular las dimensiones adecuadas así como el desnivel correcto entre el inicio y final de éste.

El tipo y el material del canal determinan los tres factores básicos que deciden la pendiente y las dimensiones de este.

Sección y ángulo del talud del canal

El flujo de agua en un canal hecho de material suelto -como suelo arenoso- hará que las paredes se desmoronen hacia adentro, a menos que los lados estén inclinados ligeramente y el ancho del canal esté en relación a su profundidad. La ventaja de revestir los canales es que resultan más angostos para el mismo caudal. De allí que no se necesita una gran excavación horizontal en una ladera angosta.

Normalmente, se prefiere perfiles trapezoidales porque son muy eficientes hidráulicamente, aunque dependiendo del material, los rectangulares son a veces más fáciles de construir.

Velocidad del agua "v"

Un flujo de agua excesivamente rápido erosionará las paredes de un canal, mientras que velocidades demasiado bajas permitirán el depósito de sedimento y la obstrucción del mismo. La tabla proporciona las velocidades recomendadas para canales de diferentes materiales.

Velocidad máxima del agua recomendada		
Material	Velocidad máxima	
	Menos de 0.3 m de profundidad	Menos de 1.0 m de profundidad
Arena	0.3 m/s	0.5 m/s
Greda arenosa	0.4 m/s	0.7 m/s
Greda	0.5 m/s	0.8 m/s
Greda de arcilla	0.6 m/s	0.9 m/s
Arcilla	0.8 m/s	2.0 m/s
Mampostería	1.5 m/s	2.0 m/s
Concreto	1.5 m/s	2.0 m/s

Tabla 4-2: Velocidades Máximas

Rugosidad "n"

Cuando el agua pasa por el canal, pierde energía en el proceso de deslizarse por las paredes y el lecho. Mientras más rugoso es el material del canal, hay más pérdida por fricción y mayor será la pendiente o desnivel que se requerirá entre la entrada y la salida del canal.

	Coeficiente de rugosidad "n"
Canales de tierra	n
Arcilla	0.0130
Material sólido, suave	0.0167
Arena con algo de arcilla o roca partida	0.0200
Fondo de arena y grava, con lados empedrados	0.0213
Grava fina de unos 10/20/30 mm	0.0222
Grava regular, de unos 20/40/60 mm	0.0250
Grava gruesa, de unos 50/100/150 mm	0.0286
Greda en terrones	0.0333
Revestido con piedras	0.0370
Arena, greda, grava y hierbas	0.0455
Canales en roca	
Roca medianamente irregular	0.0370
Roca irregular	0.0455
Roca muy irregular con muchas salientes	0.0588
Mampostería de piedra con cemento	0.0200
Paredes de mampostería con base de arena y grava	0.0213
Canales de concreto	
Buen acabado con cemento (enlucido)	0.0100
Acabado con yeso o concreto suave con alto contenido de cemento	0.0118
Concreto no enlucido	0.0149
Concreto con superficie suave	0.0161
Revestimiento de concreto irregular	0.0200
Superficies de concreto irregular	0.0200

Canales de madera	
Tablas cepilladas y bien unidas	0,0111
Tablas sin cepillar	0.0125
Canales viejos de madera	0.0149
Cursos Naturales de agua	
Lecho natural de río con fondo sólido, sin irregularidades	0.0244
Lecho natural del río, con hierbas	0.0313
Lecho natural del río con piedras e irregularidades	0.0333
Torrente con piedras irregulares grandes, lecho sedimentado	0.0385
Torrente con piedras gruesas, con bastante sedimento	0.0500

Tabla 4-3: Coeficientes de rugosidad

El diseño ideal estará basado en los cinco siguientes principios básicos:

- La velocidad del agua debe ser lo bastante alta como para asegurar que los sólidos en suspensión no se asienten en el fondo del canal o ingresen a la tubería de presión.
- La velocidad del agua en el canal debe ser lo bastante baja como para asegurar que no se erosionen sus paredes laterales. Si esto es imposible se deberá considerar el uso de un revestimiento más resistente.
- El desnivel en todo el canal deberá ser reducido. La tabla 4-3 da los valores del coeficiente de rugosidad "n" para distintos materiales.
- El canal debe ser duradero y confiable, estar libre de sedimentación y protegido de los efectos destructores debidos a escurrimientos causados por las lluvias. También debe protegerse frente a caudales inusualmente elevados en caso de que la estructura de la bocatoma no lo haga adecuadamente. Los caudales de avenida pueden ser regulados mediante aliviaderos.
- Sus costos de construcción y mantenimiento deben ser mínimos. Es necesario evaluar la disponibilidad de los técnicos de construcción requeridos así como el precio de la mano de obra.

4.8.- Tuberías de presión

Son tuberías que transportan agua bajo presión hasta la turbina, pudiendo ser instaladas sobre la superficie del terreno o enterradas en el mismo en función de los materiales de la tubería, de los condicionantes ambientales y de los requerimientos medio ambientales.

Las tuberías enterradas son preferibles a las instaladas en superficie, por el menor impacto visual de las primeras y por no generar barreras físicas en el movimiento de animales y personas. Sin embargo, el enterramiento de la tubería a presión podría presentar importantes riesgos geotécnicos relacionados con la estabilidad de las laderas o taludes donde se entierra la tubería. De hecho, durante la etapa operativa, fugas de agua podrían desencadenar deslizamientos de tierra mucho más fácilmente que si la tubería estuviese expuesta.

Los principales componentes de una estructura de tubería de presión pueden ser apreciados en la siguiente figura:

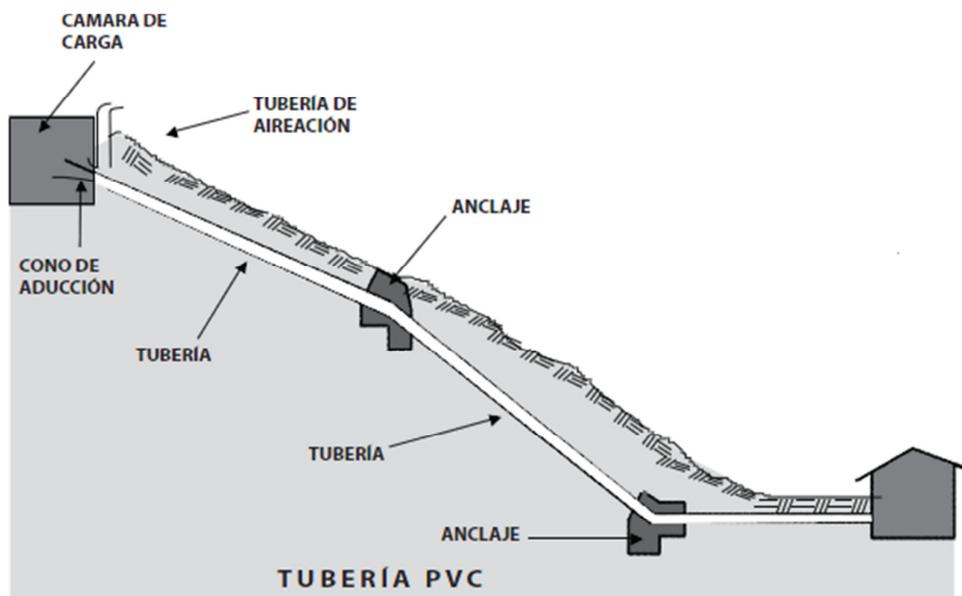


Figura 4-6: Esquema de una conducción de PVC

La materialización de esta conducción conlleva un elevado costo y en muchos casos este ítem representar gran parte del presupuesto de una obra de micro central hi-

droeléctrica, por ello es prioritario optimizar su diseño para reducir no sólo los costos de mantenimiento sino la inversión inicial. Los materiales frecuentemente empleados en las tuberías de presión son:

- Acero comercial
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Polietileno de alta densidad
- Polipropileno reforzado con fibras de vidrio (PRFV)

Al decidir que material se usará en proyecto deben tenerse en cuenta condicionantes propios de cada uno de ellos: presión de diseño, tipo de unión, diámetro y pérdida de fricción, mantenimiento y vida esperada de la instalación, costo relativo, etc. Al momento de hacer la proyección de los costos de la tubería es fácil subvalorar los gastos de diversas operaciones secundarias como uniones y pintura

Se puede enunciar una serie de pautas que permiten guiar la selección del material a emplear en la tubería:

- Inspeccionar el trazado de la tubería y determinar si esta irá sobre la superficie del terreno o enterrada.
- Considerar las diferentes clases de material disponible, tipos de uniones; comparar formas y costos de mantenimiento. Anotar también los diámetros de tubería y los espesores de pared disponibles.
- Calcular la pérdida de altura por fricción del 4-10% para una serie de materiales y diámetros. Tabular los resultados y determinar el diámetro más económico para el caudal que debe circular por la tubería.
- Diseñar los soportes, anclajes y uniones para la tubería de presión.
- Preparar una tabla de opciones calculando el costo total de cada una y ver si los componentes están disponibles en el mercado.

La selección del diámetro se hará buscando obtener las menores pérdidas de carga y el menor costo posible para las tuberías.

Accesorios

- Junta de dilatación: son accesorios que conectan dos tubos de acero, dejando un espacio de aproximadamente 1" para absorber variaciones longitudinales, debido a la variación de temperatura.
- Soportes o apoyos: sirven fundamentalmente como apoyo de la tubería de presión cuando ésta es de acero. Cuando la tubería es de PVC no se utilizan apoyos, ya que va enterrada.
- Acoplamiento: los tramos de tubería son unidos mediante soldadura o bridas cuando la tubería es de acero. Cuando es de PVC el acoplamiento es rígido utilizándose pegamento o a través de una unión flexible.
- Anclajes: los anclajes se colocan para soportar los esfuerzos generados por los cambios de dirección en el perfil de la tubería de presión, generalmente se hacen de hormigón en masa.

4.9.- Casa de maquinas

Cumple con las funciones de proteger, ubicar y cimentar adecuadamente al equipo electromecánico. En ella se guardaran las herramientas y repuestos propios de la micro central. Además debe contar con dimensiones que faciliten el trabajo del operador y las tareas de mantenimiento.

La fundación de la casa de máquinas debe ejecutarse sobre roca o terreno competente, mediante una fundación directa, recurriendo generalmente a una platea con hormigón ciclópeo.

En cuanto a las dimensiones de la casa de máquinas, deben ser las necesarias para contener el equipamiento y brindar espacio para reparaciones y mantenimiento de la turbina. Para pequeñas unidades que producen menos de 100 kW, resulta más sencillo remover la unidad y trasladarla a un pequeño taller. Sin embargo en poblaciones rurales aisladas esta práctica puede no ser viable y debe dotarse a la casa de máquinas de los medios necesarios para realizar el mantenimiento en ese lugar.

Para obtener un estima del tamaño de la construcción, se debe determinar el espacio ocupado por el conjunto turbina-generator y proveer de un pasaje de acceso de entre 1.0-1.5 m. alrededor del perímetro de la turbina.

4.10.- Canal de descarga

Después de pasar por la turbina, el agua retorna al río a través de un corto canal llamado canal de descarga. En las turbinas de impulsión (Pelton), las velocidades de salida son relativamente altas, por lo tanto el canal debe estar diseñado para asegurar que los cimientos de la casa de máquinas no se vean afectados por la erosión del agua. Con las turbinas de reacción (Francis) el nivel de agua en el canal de descarga influye en el funcionamiento de la turbina, por lo que el diseño de dicho canal deberá tener esto en consideración para evitar el principio de cavitación.

Capítulo 5 - Equipo electromecánico

5.1.-Introducción

En este apartado se desarrolla una breve descripción de los principales componentes electromecánicos presentes en una micro central, los son: la turbina, el generador, el sistema de control y las protecciones.

La acción del flujo sobre la turbina transforma la energía potencial del recurso en trabajo mecánico, y es este trabajo el que hace girar el rotor del generador, en el cual se realiza la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica.

Generalmente los ejes de ambas maquinas, como consecuencia de estar rígidamente unidos, forman un eje único con el cual se obtiene el sincronismo de giro entre la turbina y el generador. En máquinas que trabajan con poca altura de salto, se suele disponer de un multiplicador de velocidad a fin de que las dimensiones del generador sean reducidas.

5.2.- Turbinas Hidráulicas

Máquinas destinadas a transformar la energía hidráulica de una corriente en energía mecánica. Toda turbina convierte la energía del agua, presente como energía potencial y energía cinética, en el trabajo mecánico existente en un eje de rotación.

Una turbina hidráulica es accionada por el agua en movimiento, la cual es debidamente conducida hacia el distribuidor de la turbina, el cual distribuye, regula y direcciona el caudal que incide sobre el rotor o rodete. La energía potencial del tipo gravitatorio del agua se convierte en energía cinética al pasar sucesivamente por el distribuidor y el rodete. En consecuencia, se provocan cambios en la magnitud y dirección de la velocidad del fluido, lo que hace que se produzcan fuerzas tangenciales en el rodete, generándose energía mecánica al girar éste.

Estas máquinas presentan rendimientos elevados, rondando el 90%, después de considerar las pérdidas hidráulicas por fricción, por choque, mecánicas.

5.3. - Partes de una turbina hidráulica

Distribuidor

Es un elemento estático, pues no posee velocidad angular y en él no se produce trabajo mecánico. Sus funciones son:

- Acelerar el flujo de agua al transformar total (turbinas de acción), o parcialmente (turbinas de reacción) la energía potencial del agua en energía cinética.
- Dirigir el agua hacia el rodete, siguiendo una dirección adecuada.
- Actuar como un órgano regulador de caudal.

El distribuidor adopta diferentes formas; puede ser del tipo inyector en las turbinas de acción, o de forma radial, semi axial y axial en las turbinas de reacción.

Rodete

Llamado también rotor o rueda, este elemento es el órgano fundamental de las turbinas hidráulicas. Consta esencialmente de un disco provisto de un sistema de álabes, paletas o cucharas, que está animado por una cierta velocidad angular.

La transformación de la energía hidráulica del salto en energía mecánica se produce en el rodete, mediante la aceleración y desviación, o por la simple desviación del flujo de agua a su paso por los álabes.

Tubo de aspiración

Este elemento, muy común en las turbinas de reacción, se instala a continuación del rodete y por lo general tiene la forma de un conducto divergente; puede ser recto o acodado, y cumple las siguientes funciones:

- Recupera la altura entre la salida del rodete y el nivel del canal de desagüe.
- Recupera una parte de la energía cinética correspondiente a la velocidad residual del agua en la salida del rodete, a partir de un diseño del tipo difusor.

El tubo de aspiración, también llamado tubo de succión, se utiliza frecuentemente en las turbinas de reacción. Ocasionalmente se usa en las turbinas de acción, como las del tipo Michell-Banki, donde adopta la forma cilíndrica.

Carcasa

Este elemento tiene la función general de cubrir y soportar a las partes de la turbina. En las turbinas Francis y Kaplan, por ejemplo, tiene la forma de una espiral.

Con el diseño de micro turbinas aparece en consideración el tema de los costos de fabricación y mantenimiento. Al proyectar la máquina, el procedimiento de fabricación apunta hacia minimizar los costos de manufactura y mantenimiento. Deben cuidarse en extremo las tolerancias dimensionales y las rugosidades superficiales, debido a que al tratarse de equipos de reducidas dimensiones los errores relativos adquieren relevancia. Esto toma capital importancia en la construcción de los elementos destinados a la conversión de la energía hidráulica en mecánica (rodete, alabes), siendo necesarios la precisión en las dimensiones de diseño y que su terminación superficial sea adecuada al tamaño de la máquina, sin incrementar notablemente los costos de la misma.

5.4.- Fenómenos en las turbinas hidráulicas

Velocidad de embalamiento

Se entiende por velocidad de embalamiento, cuando la turbina descargada con distribuidor abierto, suele ser 1.8 a 2.2 veces la velocidad de régimen. Si se supone a la

turbina en régimen estacionario, y por algún motivo desaparece la carga y el regular no actúa, la turbina se acelera.

Cavitación

Consiste en la formación, dentro del seno del fluido, de espacios huecos o cavidades llenas de gas, producidas por una vaporización local debido a acciones dinámicas: se produce una reducción de presión dentro del seno del líquido cuando se mueve a grandes velocidades. Al restituirse la presión a valores normales, las burbujas colapsan y las fuerzas involucradas pueden dañar al equipo.

Golpe de ariete

Al interrumpir bruscamente el caudal de agua que circula con cierta velocidad a través de un conducto, se producen fuertes variaciones de presión sobre las paredes interiores de éste y del elemento que corta al caudal suministrado como consecuencia del cambio brusco en el movimiento del agua.

Además de las deformaciones motivadas por las sobrepresiones y depresiones mencionadas, se presentan vibraciones y otros efectos perjudiciales que pueden ocasionar roturas, aplastamientos, etc.

Efecto ventilante

Se produce dentro de la carcasa cuando se tiene un espacio muy grande entre ésta y el rodete. Se debe a un mal diseño de la carcasa donde el aire actúa oponiendo resistencia al giro del rodete.

5.5.- Tipos de turbinas hidráulicas

Como se señaló anteriormente, las turbinas hidráulicas se pueden clasificar en dos grandes grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción. A estos dos grupos corresponden las turbinas modernas que hoy en día se emplean en las centrales hidráulicas, sean estas pequeñas o grandes.

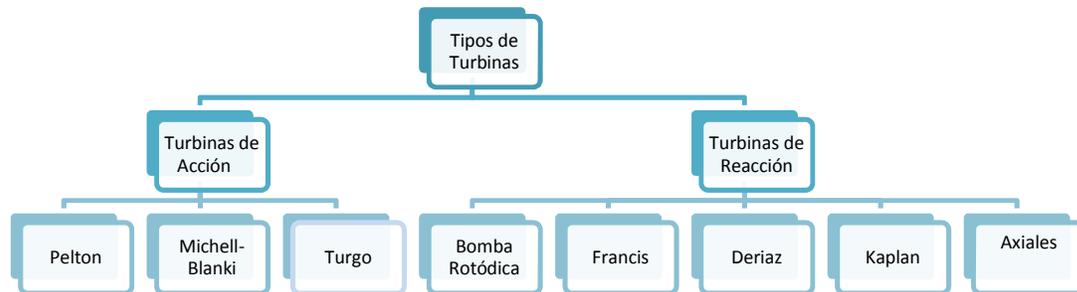


Figura 5-1: Tipos de turbinas

Turbinas de acci3n

La energa del agua que sale del distribuidor es totalmente cin3tica (la transformaci3n de energa potencial a cin3tica, se produce al pasar a trav3s de una aguja que provoca un estrechamiento del di3metro del conducto forzado). A lo largo de todo el recorrido a trav3s del rodete, el fluido se encuentra a la presi3n atmosf3rica. Se utiliza esta clase de turbinas en los grandes saltos donde las p3rdidas de altura resultan de escasa importancia.

- Turbinas Pelton de 1 o m3s inyectoros
- Turbinas Turgo
- Turbinas Michell-Banki

Turbina Pelton

La rueda Pelton, cuyo nombre proviene del ingeniero estadounidense Lester Allen Pelton, se empez3 a aplicar durante la segunda mitad del siglo XIX, en instalaciones donde la presi3n del agua era equivalente a una columna de agua de entre noventa y

novecientos metros (90 y 900 m). En este tipo de turbinas el agua se conduce desde un depósito a gran altura a través de un canal o una tubería forzada hasta una boquilla eyectora que convierte la energía cinética del agua en un chorro a presión.

Desde el punto de vista de diseño, existe adaptabilidad para diferentes caudales y alturas. La turbina Pelton puede estar equipada con una, dos o más toberas para mayores salidas. En la fabricación se usa comúnmente la fundición para el rotor, siendo los materiales, acero o bronce.

Un chorro de agua de alta velocidad, emerge de una tobera incidiendo en las paletas y poniendo la rueda en movimiento. La velocidad de rotación, está determinada por la magnitud de caudal y la velocidad del agua es controlada por medio de una aguja en la tobera (la turbina funciona más eficientemente cuando la rueda gira a un medio de la velocidad del chorro).

Si la carga en la rueda disminuye súbitamente, el deflector de chorro desvía parcialmente el chorro que proviene de la tobera hasta que la aguja ha reducido adecuadamente el caudal. Este arreglo es necesario debido a que, si en la eventualidad de una disminución súbita de la carga, la aguja fuera cerrada rápidamente, el flujo de agua se reducirá demasiado abruptamente, causando el fenómeno del "golpe de ariete" en el sistema hidráulico.

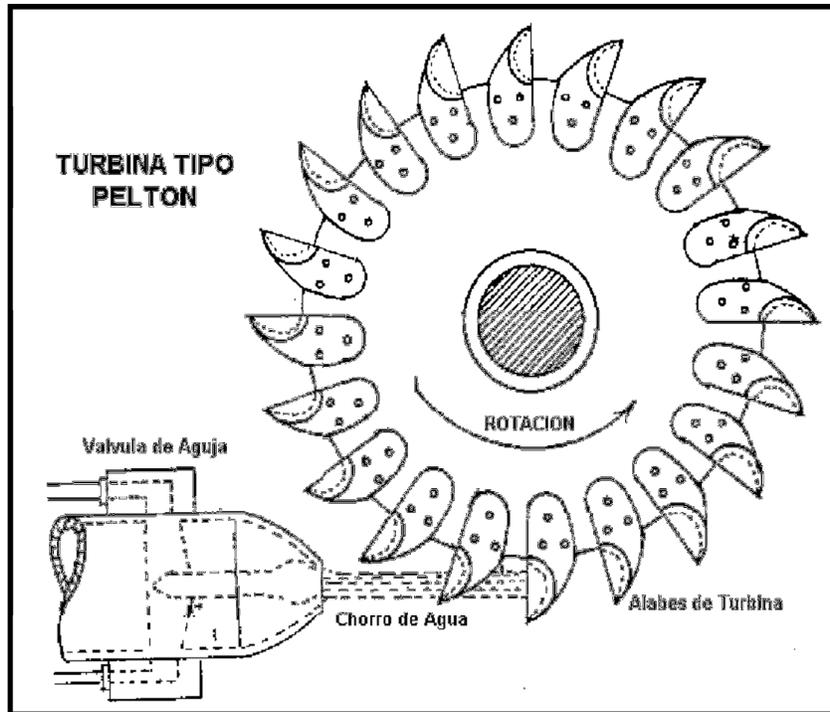


Figura 5-2: Turbina Pelton

Turbina Michell-Banki

La característica principal de la turbina de flujo cruzado es el chorro de agua de sección transversal rectangular que pasa dos veces a través de los álabes del rotor, ubicados en la periferia del rotor cilíndrico, perpendicular al eje de éste. El agua fluye a través de los álabes, primero desde la periferia hacia el centro y entonces, después de cruzar el espacio abierto del rotor, desde dentro hacia fuera.

La conversión de energía tiene lugar dos veces; primero en la incidencia del agua sobre el álabe en la entrada y luego cuando el agua golpea el álabe en el escape desde el rotor. Es una turbina de libre desviación, de admisión radial y parcial. Debido a su número específico de revoluciones cuenta entre las turbinas de régimen lento.

La turbina de flujo cruzado puede aplicarse sobre un rango de alturas de caída desde menos de 2 m a más de 100 m. Una gran variedad de caudales pueden acomodarse con un diámetro constante del rotor.

Turbinas de reacción

La energía del agua que sale del distribuidor es en parte cinética y en parte de presión (la transformación de potencial a cinética que se produce en el distribuidor no es completa: el agua sale con una velocidad inferior a la de las turbinas de acción, pero con una presión no nula). Al moverse el agua por los espacios que hay entre los álabes del rodete, que se encuentran llenos de agua, ocurre una aceleración; así pues, en el mismo álabe se transforma aún parte de la energía potencial en cinética. El chorro de agua que sale, ejerce entonces una reacción sobre la cámara de álabes, cuya componente horizontal se convierte en una fuerza centrífuga.

Las turbinas de reacción trabajan completamente sumergidas en el agua y en la parte final tienen un difusor.

- Bomba rotodinámica operando como turbina
- Turbinas Francis, en sus variantes: lenta, normal y rápida
- Turbina Deriaz
- Turbinas Kaplan y de hélice
- Turbinas axiales, en sus variantes: tubular, bulbo y de generador periférico

Turbina Francis

Se trata de una turbina de reacción de flujo interno que combina conceptos tanto de flujo radial como de flujo axial, se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los diez metros hasta varios cientos de metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbina sea el más ampliamente usado en el mundo, principalmente para la producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas.

La turbina Francis es una turbina de reacción, lo cual significa que el fluido cambia de presión a medida que se desplaza a través de la turbina, perdiendo su energía. Se necesita una carcasa para contener el caudal de agua.

La admisión tiene forma de espiral. Los álabes directores dirigen el agua tangencialmente hacia el rodete. Este flujo radial actúa sobre los álabes del rodete, causando que este gire. Los álabes directores, también conocidos como álabes giratorios, pueden ser ajus-

tables para permitir un funcionamiento eficiente en un rango amplio de condiciones del caudal de agua.

A medida que el agua se mueve a través del rodete su radio de giro disminuye, actuando sobre él. En la salida, el agua actúa sobre unas excepcionales tazas situadas en el rodete, que hacen su trabajo sobre el agua, dejándola sin remolinos y con muy poca energía cinética o potencial. El tubo de salida tiene una forma especialmente diseñada para ayudar a decelerar el flujo de agua y recuperar energía cinética.

Turbina Kaplan

El aumento de las necesidades de energía hidroeléctrica durante los albores del siglo XX puso de manifiesto la necesidad de turbinas que pudieran aprovechar caídas de agua de 3-9 m, que podrían utilizarse en muchos ríos construyendo pequeños embalses de agua. En el año 1913, el ingeniero austriaco Viktor Kaplan planteó por primera vez la turbina de hélice, que actúa al contrario que la hélice de un barco. Kaplan mejoró la turbina haciendo que las palas pudieran pivotar sobre su eje. Los distintos ángulos de las palas aumentaban el rendimiento ajustando el ángulo al volumen de la caída de agua.

Las turbinas Kaplan son turbinas de agua de reacción de flujo axial, con un rodete que funciona de manera semejante a la hélice de un barco. Se emplean en saltos de pequeña altura. Las amplias palas o álabes de la turbina son impulsadas por agua a alta presión liberada por una compuerta.

Los álabes del rodete en las turbinas Kaplan son siempre regulables y tienen forma de una hélice, mientras que los álabes de los distribuidores pueden ser fijos o regulables. Si ambos son regulables, se dice que la turbina es una turbina Kaplan verdadera; si solo son regulables los álabes del rodete, se dice que la turbina es una turbina Semi-Kaplan. Las turbinas Kaplan son de admisión radial mientras que las semi-Kaplan pueden ser de admisión radial o axial.

Para su regulación, los álabes del rodete giran alrededor de su eje, accionados por unas manijas, que son solidarias de unas bielas articuladas a una cruceta, que se desplaza hacia arriba o hacia abajo por el interior del eje hueco de la turbina. Este desplazamiento es accionado por un servomotor hidráulico, con la turbina en movimiento.

Las turbinas de hélice se caracterizan porque tanto los alabes del rodete como los del distribuidor son fijos, por lo que solo se utilizan cuando el caudal y el salto son prácticamente constantes.

La siguiente tabla compara las ventajas y desventajas de las distintas turbinas utilizadas para micro aprovechamientos:

CARACTERISTICAS PARA PEQUEÑOS APROVECHAMIENTOS HIDRAULICOS (<100 kW)		
DE LAS TURBINAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
IMPULSO EN GENERAL	Reducida posibilidad de cavitación. Buen rendimiento a cargas parciales	Aplicación de límites bajos de velocidad específica. Bajos picos de eficiencia sobre las turbinas de reacción Las turbinas deben operar generalmente sobre el nivel de restitución
Pelton	Los daños por erosión son fácilmente reparables	Requiere múltiples inyectores para hacer frente a grandes caudales
Michell-Banki	Velocidad específica entre 40-200 obtenido por variación del ancho solamente	Eficiencia entre el 70-80% son más bajos que los de las Pelton, Francis o Turgo
Turgo	Rango de aplicación similar al de las Pelton, multi-inyector	Grandes cargas axiales sobre los cojinetes
REACCION EN GENERAL	Altos números específicos permitidos por diseños compactos. Altos picos de rendimiento. El uso del tubo de aspiración permite un aprovechamiento más efectivo del mismo	Requiere un diseño elaborado de los sellos, mantenimiento más complicado y caro. Aplicación y operación mas limitada por cavitación
Francis	Fabricación estándar disponible en varios fabricantes	Una eficiencia relativamente baja a cargas parciales
Kaplan, Bulbo	Los tipos Bulbo y Tubo ofrecen ventajas cuando se los aplica a presas existentes	Altas velocidades de embalamiento
Bombas centrifugas y axiales	Bajo costo y amplio stock	Bajo rendimiento a cargas parciales. Falta experiencia de aplicación

Tabla 5-1: Comparativa de distintos tipos de turbinas

Se puede realizar una selección rápida de la turbina para una MCH, utilizando el siguiente diagrama en la que aparecen las diversas turbinas que se usan en la actualidad ubicadas por zonas de aplicación referidas al salto neto, caudal, potencia y una eficiencia promedio

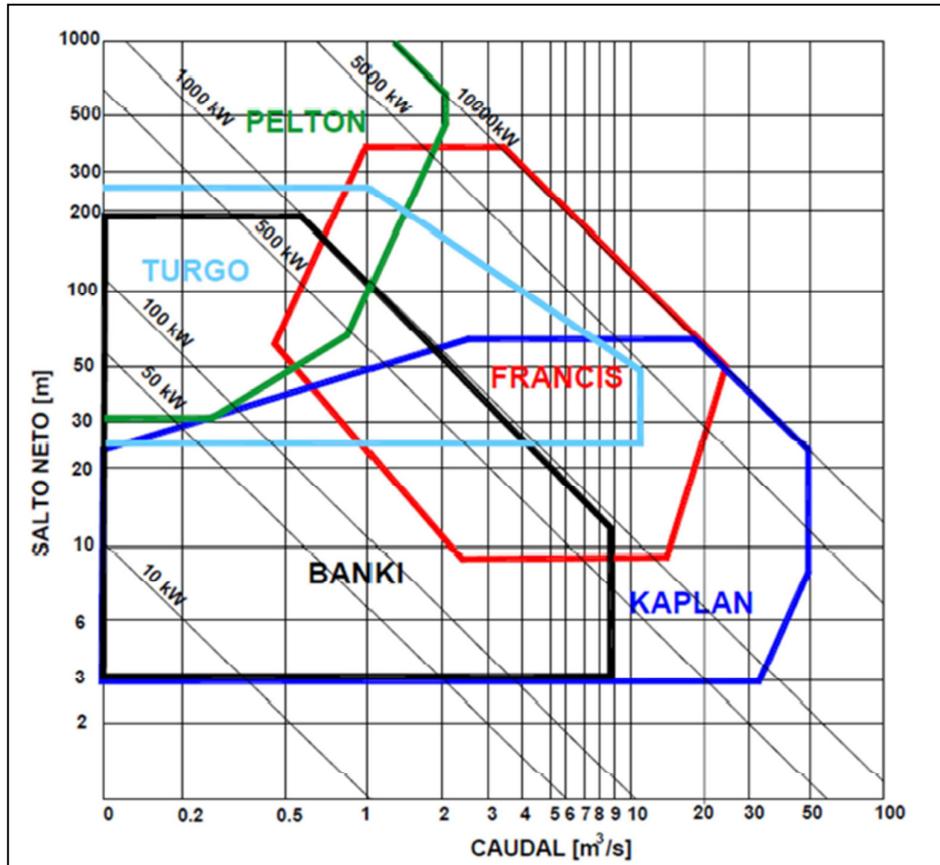


Figura 5-3: Rango de aplicación de distintos tipos de turbinas

El tipo más adecuado para las características de los pequeños ríos y arroyos es el tipo de turbomaquina denominada Michell-Banki, este tipo de turbina posee un buen funcionamiento con bajos caudales y alturas de salto relativamente bajas.

5.6.- Generador

Es la máquina que transforma la energía mecánica de rotación de la turbina en energía eléctrica. El generador basa su funcionamiento en la inducción electromagnética. El principio de su funcionamiento se basa en la ley de Faraday, mediante la cual, cuando un conductor eléctrico se mueve en un campo magnético se produce una corriente eléctrica a través de él.

El generador, o alternador, está compuesto de dos partes fundamentales:

- Rotor o inductor móvil. Su función es generar un campo magnético variable al girar arrastrado por la turbina.
- Estator o inducido fijo. Sobre el que se genera la corriente eléctrica aprovechable.

El generador puede ser de dos tipos: síncrono o asíncrono.

Síncrono

En este tipo de generador la conversión de energía mecánica en eléctrica se produce a una velocidad constante llamada velocidad de sincronismo, que viene dada por la expresión

$$N_s = 60 \cdot f_p$$

N_s = velocidad de sincronismo expresada en r.p.m.

f = frecuencia en Hz

p = número de pares de polos del generador

Las bobinas arrolladas crean el campo magnético en los polos del rotor. Para que esto ocurra, por estas bobinas debe circular una corriente eléctrica continua. Para producir esta corriente continua pueden emplearse diferentes sistemas de excitación:

- Autoexcitación estática. La corriente proviene de la propia energía eléctrica generada, previamente transformada de alterna en continua.
- Excitación con diodos giratorios. Se crea una corriente alterna invertida, con polos en el estator y se rectifica por un sistema de diodos, situado en el eje común.

- Excitación auxiliar. La corriente necesaria se genera mediante una dinamo auxiliar regulada por un reóstato.

Asíncrono

Debido a la simplicidad, robustez y bajo costo de los clásicos motores eléctricos, éstos han venido utilizándose como generadores eléctricos sobre todo en centrales de pequeña potencia. Para ello es necesario que el par mecánico comunicado al rotor produzca una velocidad de giro superior a la de sincronismo. Este exceso de velocidad produce un campo giratorio excitador. Es importante que la diferencia entre las velocidades de funcionamiento y la de sincronismo sea pequeña, para reducir las pérdidas en el cobre del rotor.

El generador toma la corriente de la red para la creación del campo magnético. También es necesaria la colocación de una batería de condensadores que compense la energía reactiva generada.

El uso de este tipo de generadores no precisa regulador de velocidad en la turbina. Para arrancar el grupo se abre el distribuidor de la turbina hasta que se llega a una velocidad superior a la de sincronismo (aunque próxima a la misma) y en este momento se conecta a la red por medio de un interruptor automático.

5.7.- Tablero de control

Los principales instrumentos de medición que se encuentran en el tablero de control son: voltímetro, amperímetro, frecuencímetro y vatímetro. Estos y otros instrumentos de control y medición se describen a continuación:

- Voltímetro, amperímetro y medidor de frecuencia: se proporcionan como elementos básicos de un generador. Estos tres instrumentos están normalmente si-

tuados con un suministro de entrada y salida, tales como una entrada o salida de transformador. Es normal controlar estos instrumentos de medición cada hora, en especial el voltaje y la frecuencia ya que afectan la calidad de la generación.

- Vatímetro y medidor de energía (kWh): el vatímetro da una lectura instantánea de potencia, relacionada con la potencia en el eje producida por la turbina. El medidor de energía registra el total generado. Generalmente se toman lecturas horarias de los medidores para utilizarlos en el momento de calcular el rendimiento y la eficiencia de la central.

5.8.- Regulador

La carga o demanda de potencia en un sistema es variable, lo que se traduce como variaciones de velocidad de la turbina y del voltaje producido. Para mantener tales variaciones dentro de límites aceptables, es necesario incorporar un controlador a la turbina, llamado regulador cuya función es mantener constante la velocidad de la turbina. Esto se puede lograr básicamente de dos maneras: regulando el caudal o regulando la carga.

Regulador de caudal

Este método regula el flujo de caudal a través de la turbina de acuerdo a la carga o demanda de potencia sobre el conjunto turbina-generador. A mayor carga permite un ingreso mayor de agua e inversamente a menor carga reduce el ingreso de agua de tal forma que se mantiene constante la velocidad de giro de la turbina.

Regulador de carga

En este sistema, el flujo de agua a través de la turbina se mantiene constante y la carga debe ser mantenida constante dentro de los límites tolerables. Esto se logra con controladores electrónicos que transfieren la carga no consumida por los usuarios a un circuito adicional o un banco de resistencias, manteniendo de esta forma la carga total constante.

5.9.- Elementos de control y protección

La instalación de estos elementos es necesaria para regular y controlar el buen funcionamiento de la central, además de los dispositivos de protección que deben colocarse en la central y la línea eléctrica, y que actuarán cuando se produzca algún fallo en la central.

Los principales bucles de control y sistemas de supervisión y mando para una mini y micro central hidroeléctrica son:

Para el control de la turbina:

- Regulador de velocidad en instalaciones con grupos síncronos.
- Reguladores de nivel para centrales con grupos asíncronos conectados a la red.
- Regulador de potencia generada para centrales en red aislada.
- Regulador de caudal turbinado.

Para el control del generador:

- Regulador de tensión para grupos síncronos.
- Equipo de sincronización, cuando existen grupos síncronos funcionando conectados a la red.
- Baterías de condensadores y un relé taquimétrico, cuando existan grupos asíncronos funcionando conectados a la red.

Para el control de la turbina y el generador se pueden distinguir tres casos, en función del tipo de generador utilizado y del funcionamiento previsto:

Central con generador síncrono funcionando conectado a la red. Aunque el control de la turbina no necesita un regulador de velocidad porque la frecuencia está mantenida por la red, es conveniente su instalación. El mando del distribuidor se realiza por medio

de un servo-oleo hidráulico, y las órdenes de apertura y cierre proceden del regulador de nivel.

El control del generador es una regulación del factor de potencia, ya que al estar conectado a la red está fija la tensión, y la variación de la excitación modifica la potencia reactiva suministrada por el grupo. El equipo automático de sincronización estará provisto de ajuste de velocidad y tensión del grupo, a través de un relé de sincronismo.

Central con generador síncrono funcionando aislado. Se necesita un sistema de regulación de velocidad y de potencia, para que el control de la turbina asegure el mantenimiento de la frecuencia de la red en cualquier condición de carga.

El control del generador necesita un regulador de tensión que actúe sobre la excitación del alternador, con el fin de mantener la tensión dentro de los límites admisibles.

Central con generador asíncrono funcionando conectada a la red. No es necesario el control de la turbina al estar mantenida la frecuencia por la red. El mando del distribuidor se realiza mediante un servo-oleo hidráulico, y las órdenes de apertura y cierre proceden del regulador de nivel.

Las protecciones de los sistemas que componen la micro central actúan al producirse un hecho anormal en su funcionamiento, provocando una alarma, la parada de algún grupo e incluso la parada total de la central. Esto depende del motivo que haya provocado dicha irregularidad. Las principales causas que pueden accionar las protecciones son:

Protecciones mecánicas

- Embalamiento de turbina y generador.
- Temperatura de eje y cojinetes.
- Nivel de circulación del fluido de refrigeración.
- Temperatura de aceite del multiplicador de velocidad.
- Nivel mínimo hidráulico.
- Desconexión de la bomba del aceite de regulación.

Protecciones eléctricas del generador y transformador

- Intensidad máxima.
- Retorno de potencia (máxima admitida 5% de la nominal).
- Calentamiento del generador y/o del transformador.
- Derivación en el estator.
- Producción de gases en el transformador (Buchholz).
- Nivel de tensión (entre el 85 y el 100% de la tensión nominal).
- Nivel de frecuencia (entre 47,5 y 51 HZ).

Protecciones de la línea de media tensión

- Derivación de una fase de tierra.
- Cortocircuito o inversión de fases.
- Sobreintensidad.
- Red de tierra, para limitar la tensión con respecto al terreno.

Capítulo 6 - Turbina Michell-Banki

6.1.- Introducción

Esta turbina fue inventada por A.G.Michell (Australia) y patentada en 1903. Posteriormente, entre 1917 y 1919, fue estudiada por Donat Banki (Hungría), en la Universidad de Budapest. Se trata de una turbina de acción, de flujo radial centrípeto-centrífugo, de flujo transversal, de doble paso y de admisión parcial.

La turbina se basa en la teoría de Poncelet, ingeniero francés (1788-1867) quien desarrollo la clásica rueda hidráulica de eje horizontal. Posteriormente, el profesor húngaro Donat Banki hizo un trabajo extensivo sobre esta máquina (1912-1918). A través de una serie de publicaciones especificó que, para obtener la máxima eficiencia, el ángulo con el cual el chorro golpea al álabe debe ser tan pequeño como sea posible. Basado en esta suposición calculó los ángulos de entrada y salida del rodete, ancho del mismo, la forma del flujo a través de este y la curvatura del álabe.

Considerando todas las pérdidas posibles que ocurren en el distribuidor y el rodete, expreso el rendimiento máximo posible con la siguiente ecuación:

$$\eta_{\max} = 0.771 - 0.384 \frac{D}{H}$$

η_{\max} : *rendimiento máximo*

D : *diámetro de la turbina (m)*

H : *altura bruta (m)*

Ecuación 6-1

Sonnek, (1923) modifico la teoría de Banki asumiendo un ángulo del álabe constante e igual a 30º grados, con lo que la ecuación de rendimiento máximo resultó en:

$$\eta_{\max} = 0.863 - 0.264 \frac{D}{H}$$

η_{\max} : rendimiento máximo

D : diámetro de la turbina (m)

H : altura bruta (m)

Ecuación 6-2

Desde esa época fueron muchas las investigaciones realizadas sobre esta turbina a través del tiempo, las cuales han introducido mejoras sustanciales en la eficiencia de la misma.

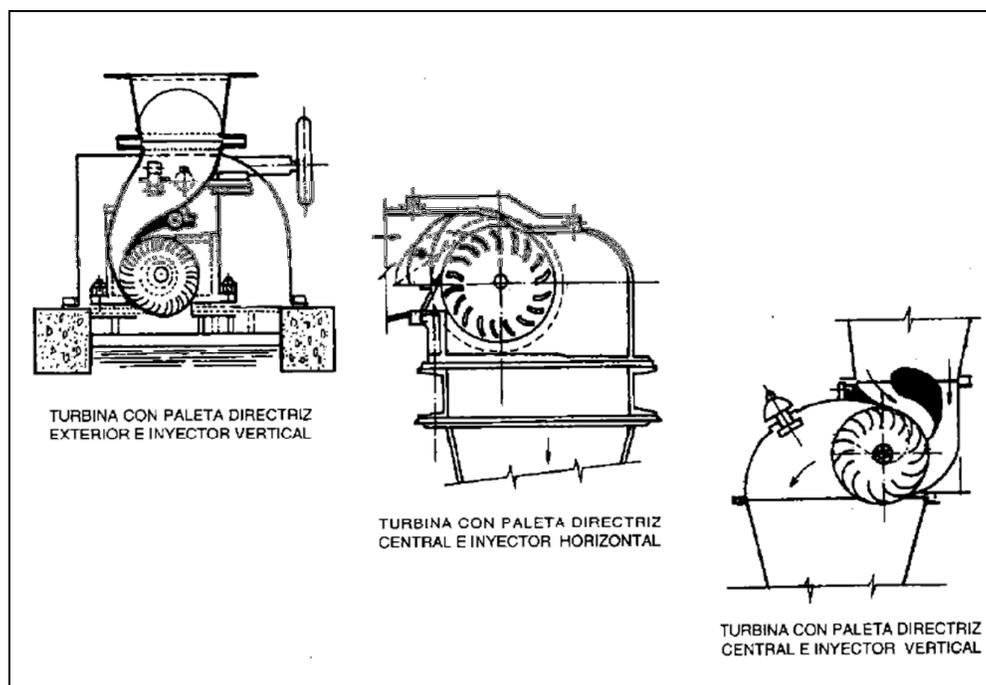


Figura 6-1: Distintas configuraciones de la turbina

6.2.- Características generales

La turbina de Flujo Cruzado o turbina Michell-Banki es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, basa sus ventajas fundamentalmente en un sencillo diseño y fácil construcción lo que la hace especialmente atractiva en el balance económico de un aprovechamiento en pequeña escala.

A diferencia de las turbinas de flujo axial o radial el agua en una turbina de flujo cruzado pasa a través del rodete en forma transversal y solo de forma parcial; como en una rueda de agua, esta es admitida por su perímetro exterior, la cual luego ingresa al rodete y pasa por los alabe del lado opuesto del rodete. Esto implica que el agua pasa dos veces por los alabes entregando un trabajo adicional, mejorando la eficiencia

Las principales características de esta máquina son las siguientes:

- la velocidad de giro puede ser seleccionada en un amplio rango
- se puede regular el caudal y la potencia por medio de un mecanismo sencillo
- el diámetro de la turbina no depende necesariamente del caudal
- se alcanza un aceptable nivel de rendimiento con pequeños caudales
- diseño e instalación sencilla

6.3.- Partes de la turbina Michell-Banki

Las principales partes de la turbina se muestran en la Figura 6-2 y se describen a continuación:

Pieza de transición

Es una pieza que une la tubería a presión con el distribuidor. Esta pieza es importante debido a la geometría de ingreso que tiene el inyector, que al no coincidir con la geometría de la tubería, genera perturbaciones en el flujo. El objetivo es hacer que el flujo sea más uniforme.

Distribuidor:

Consiste en una tobera de sección rectangular que abarca al rodete en un cierto ángulo de admisión parcial. Está dotado de una paleta directriz para la regulación del caudal. Se puede operar manual o automáticamente.

Rodete

Tiene forma de tambor o cilindro y está compuesta por un par de discos, entre los cuales se fijan periféricamente una cierta cantidad de alabes de perfil circular y de simple curvatura. Por lo general, los álabes se fijan a los discos mediante soldadura. Para grandes caudales y bajas alturas de instalación, se construyen con discos intermedios. La forma cilíndrica del rodete permite que la turbina pueda trabajar dentro de grandes rangos de variación de caudal con sólo darle la longitud conveniente.

Eje

Elemento mecánico que transmitirá el torque hacia el generador o maquina impulsada.

Carcasa

Soporta y cubre las partes de la turbina, evita también que agentes externos ingresen a ella.

Canal de descarga

Desaloja el agua luego de su paso por el rotor a través de una abertura inferior.

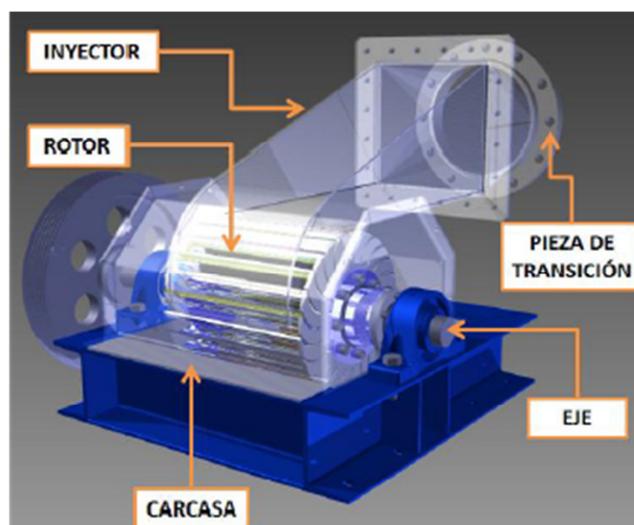


Figura 6-2: Partes de la turbina Michell-Banki

Se observa que la turbina responde a un diseño simple, el cual permite una realización apropiada del mismo ajustándose a las características particulares del sitio de interés, ya que el elemento principal, el rodete, al constar de un par de discos en los que se sueldan los álabes, se puede fabricar con láminas de acero soldadas requiriendo herramientas y técnicas de armado simples, con lo que cualquier taller podría hacer frente a su construcción.

La turbina opera por lo general a presión atmosférica. No obstante, en el caso de saltos bajos suele dotársele de un tubo de aspiración cilíndrico para recuperar parte de la altura de montaje. Esto crea una depresión en el interior, por lo que se debe impedir que el agua inunde el rodete; para ello se utiliza una válvula automática regulada, de manera que permita la entrada de una cierta cantidad de aire al interior de la carcasa.

Este tipo de turbinas pueden presentar una curva de rendimientos de forma aplanada, permitiendo variar ciertos parámetros sin sacrificar valores apreciables en eficiencia. Se logra alcanzar esta característica con un diseño de turbina con admisión parcial: se divide el rodete en 3 partes iguales y la admisión del agua se puede realizar por 1/3, 2/3 o por la totalidad del área del rodete.

Este tipo de diseño es desarrollado por la firma Ossberger, cuya maquina presenta una curva de rendimiento como la mostrada en la Figura 6-3, donde se la compara con el rendimiento de una turbina tipo Francis. La turbina de flujo transversal es adecuada para pequeños ríos que durante varios meses pueden tener un bajo caudal.

Los rangos generales de operación de esta turbina son los siguientes:

Altura (m)	$1 < H < 100$
------------	---------------

Caudal (m ³ /s)	0.2 < Q < 7
Potencia (MW)	P < 1
Velocidad especifica	30 < N _s < 210 o 23 < N _q < 70

Tabla 6-1: Rango de operación

El rango de N_s y N_q depende de las condiciones de diseño: altura neta disponible y caudal de diseño. Los valores de N_s y N_q corresponden a un rango establecido en base a las experiencias e investigaciones por parte de fabricantes y universidades que han realizado estudios sobre este tipo de turbinas.

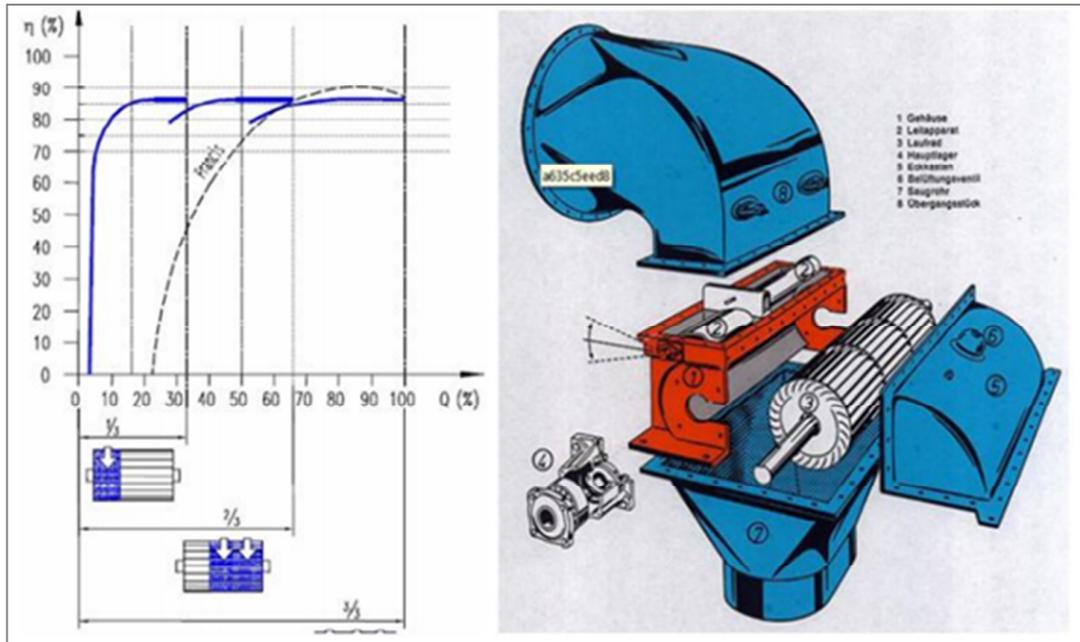
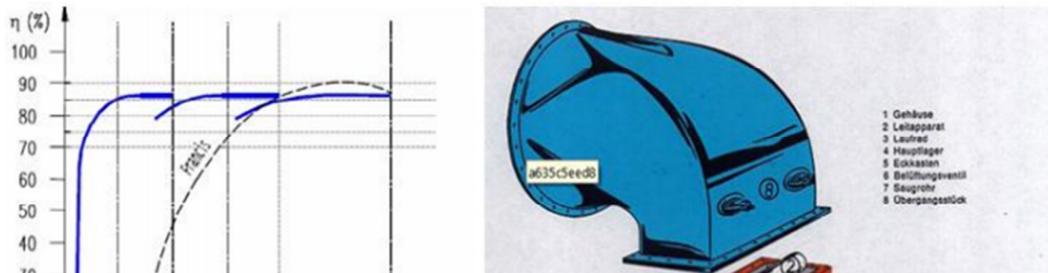


Figura 6-3: Eficiencia de la turbina

La eficiencia es buena dentro de un amplio rango, de caudal, aunque no muy alta si se la compara con las turbinas Pelton y Francis. Sin embargo, debido a su bajo costo y fácil construcción local, es una alternativa interesante para las pequeñas centrales.

6.4.- Principio de funcionamiento



La turbina consta de dos mecanismos principales: un inyector y un rotor. El agua es restituida mediante una descarga a presión atmosférica o a través de un tubo inyector a una presión menos que la atmosférica. El rotor está compuesto por dos discos paralelos a los cuales van unidos los alabes curvados.

El inyector posee una sección transversal rectangular que va unida a la tubería por una transición de rectangular a circular. Este inyector es el que dirige el agua hacia el rotor a través de una sección que intercepta una determinada cantidad de alabes del mismo, y guía el agua para que entre al rotor con un determinado ángulo, con lo que se pretende obtener un mayor aprovechamiento de la energía.

En cuanto a su funcionamiento, una vez que el agua hace su entrada, el distribuidor regula la cantidad de fluido que ingresa a la turbina, según gire sobre su eje, habilitando una entrada mayor o menor. Además se encarga de direccionar el flujo para que el agua incida sobre el rodete, sobre los primeros alabes que encuentra en su camino, propiciando así el giro del mismo. Una vez atravesados estos alabes, el fluido continuo su camino en el interior y reincide sobre los álabes inferiores, ayudando al giro.

Un aspecto interesante derivado de la constitución de la máquina y su forma de funcionamiento es que cualquier elemento extraño que durante la entrada del agua quede entre los álabes, vuelve a ser expulsado después de medio giro del rodete con el agua de salida por efecto de la fuerza centrífuga. De este modo el rodete tiene un funcionamiento poco sensible a elementos no deseados, que es una ventaja que posee respecto a otras turbinas.

La energía del agua es transferida al rotor en dos etapas, de las cuales la primera entrega un promedio de 70% de la energía total transferida al rotor y en la segunda alrededor del 30% restante.

6.5.- Dimensionamiento de la turbina

El procede para un correcto dimensionamiento de una turbina de flujo cruzado se detalla con los siguientes puntos:

- 1.- Determinar que las condiciones con que se dimensionara la turbina se encuentren dentro del rango de aplicaciones de las TFC (turbina de flujo cruzado). Para ello se calcula el valor de N_q o N_s . Como inicialmente no se conoce el caudal de diseño con plena certeza, se evalúa un rango de valores delimitado por el máximo y el mínimo caudal registrado en el lugar del aprovechamiento
- 2.- Dimensionar el diámetro y el largo del rodete. Es posible partir de la velocidad angular que se busca a la salida del sistema, con ello es más fácil determinar el diámetro y consecuentemente el largo de los alabes}
- 3.- Se selecciona el número de alabes necesarios para el rodete.
- 4.- Se selecciona el número de alabes que se encontrarán activos simultáneamente a la salida del inyector. Es recomendable que la relación de los alabes activos con el total de alabes no sea mayor a 0.35
- 5.- El diseño del inyector depende del acondicionamiento del flujo de agua que se requiere al ingreso del rodete. Si no se requiere regulación del caudal, es recomendable dimensionar un inyector a partir de una curva helicoidal como la propuesta por la ITDG (Intermediate Technology Development Group). Si la regulación de caudal es necesaria, es posible optar por dimensionar según las directrices propuestas por organizaciones como la Organización Latinoamericana de la Energía (OLADE).

6.6.- Condiciones iniciales de Diseño

Altura Neta

Como puede observarse en la figura 6-4, si no se utiliza un tubo de desfogue, la altura neta se calcula como la altura útil, desde la cámara de carga hasta la el eje de la turbina menos las pérdidas por fricción por la longitud de la tubería forzada.

$$H_n = H - H_v$$

Ecuación 6-3

En el caso de utilizar un tubo de aspiración es posible recuperar parte de la energía no aprovechada en la caída. El cálculo de la altura neta se tiene por la diferencia de la bruta menos las pérdidas por rozamiento y una altura no aprovechada a la salida de la turbina equivalente al 60% del diámetro de la turbina.

$$H_n = H_1 + H_2 = H - H_v - h$$

Ecuación 6-4

H = Altura Bruta

H_1 = Altura Neta sobre la Turbina

H_2 = Altura Neta bajo la Turbina

H_v = Pérdidas de Altura por fricción

H_n = Altura Neta

La altura no tomada en cuenta responde a la necesidad de la turbina de trabajar con un flujo parcial, ya que no está diseñada para trabajar completamente sumergida, además la altura desde la que cae el chorro libre que ha ingresado a la turbina es despreciable. El principal beneficio que se obtiene por el tubo de aspiración es la obtención de una cámara con aire a presión inferior a la atmosférica, lo cual provoca un aumento en la velocidad del chorro a la entrada de inyector.

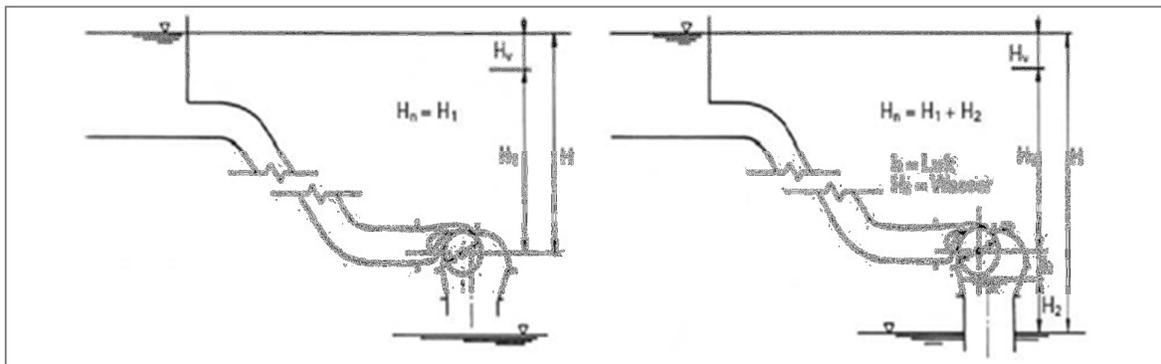


Figura 6-4: Altura Neta

Caudal de Diseño

El caudal de diseño se puede seleccionar básicamente de dos formas diferentes:

- Buscando el menor costo por kW instalado, para ello se espera alcanzar el máximo factor de planta.
- Generando el máximo de eléctrica posible en la zona afectada por el proyecto.

Para determinar el caudal de diseño ya sea por cualquiera de estas dos alternativas, es necesario contar con:

- La curva de rendimiento de la turbina proyectada.
- La curva de duración de caudales (CDC) para del lugar donde se realizara el proyecto.
- El factor de Planta proyectado para la central.

La curva de rendimiento de este tipo de turbina, como se mencionó anteriormente, presenta una forma aplanada que se alcanza dividiendo el inyector y el rotor en secciones. De esta manera, con caudales muy pequeños, una sección de la turbina se cierra, de modo que la turbina trabaja con un caudal menor pero más cercano al de diseño, mejorando la eficiencia.

En cuanto a la Curva de Duración de Caudal, se construye a partir de un hidrograma obtenido a para un aprovechamiento hidroeléctrico y muestra el porcentaje valor de caudal es excedido o superado. CDC es representativa del régimen de caudales medios de la corriente y por lo tanto puede utilizarse para pronosticar el comportamiento del régimen futuro de caudales, o sea el régimen que se presentará durante la vida útil del aprovechamiento energético.

Comúnmente en cuencas pequeñas, la información hidrológica es escasa, es poco confiable o no existe. En tales casos la curva de duración de caudales diarios no puede determinarse por métodos matemáticos, pero pueden hacerse estimativos utilizando relaciones empíricas entre lluvias y caudales.

Uno de los métodos más empleados para construir la CDC es el método de correlación de caudales. Este método consiste en realizar aproximadamente diez o doce mediciones de caudales en el sitio de interés, en momentos diferentes durante el año. Pudiendo tomar al azar los intervalos entre mediciones. Por lo general se sabrá de antemano que el caudal es suficiente para el aprovechamiento hidroeléctrico propuesto durante la parte lluviosa del año, y el único periodo crítico que necesita una predicción de caudales cuidadosa es la estación seca. En este caso usted podría tomar seis a diez medidas distribuidas al azar a intervalos en el periodo seco.

Finalmente sobre el factor de Planta se puede decir que es la relación entre la energía generada durante periodo definido de tiempo con respecto a la energía disponible durante el mismo periodo de tiempo. Bajos factores de planta implican un costo por kW mayor.

6.7.- Diseño Hidráulico

Generalidades

En la Figura 6-5 se aprecian los triángulos de velocidades para las dos etapas ya mencionadas. Como puede verse, existe una total semejanza entre el triángulo de velocidades a la salida de la primera etapa y el de entrada a la segunda etapa. Esto se debe a que el flujo en esa transición es una corriente libre que no interfiere con elemento alguno del rotor.

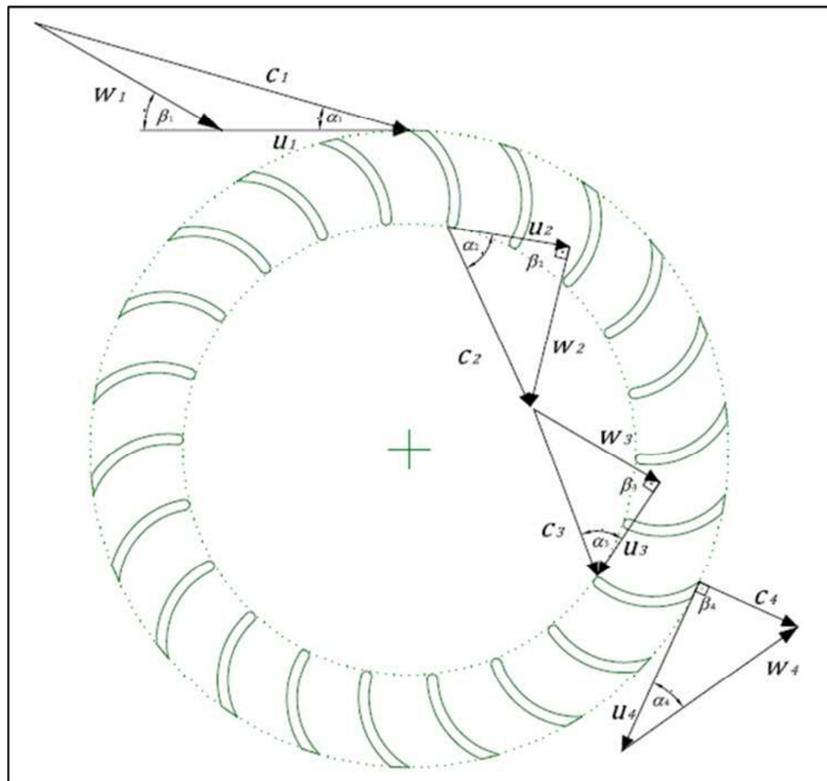


Figura 6-5: Triángulo de velocidades

El diseño hidráulico de esta máquina se realiza con base a la suposición de que es una turbina de acción. Pero debido a las características de ésta se debe modificar el principio de máxima utilización de la energía en lo referente a la relación de velocidades. De la Figura 6-6 se desprende que deberá cumplirse que:

$$u_1 = \frac{c_{u1}}{2}$$

Ecuación 6-5

u = velocidad tan gencial de la turbina (m / s)

c_u = componente de la velocidad absoluta en la dirección tan gencial (m / s)

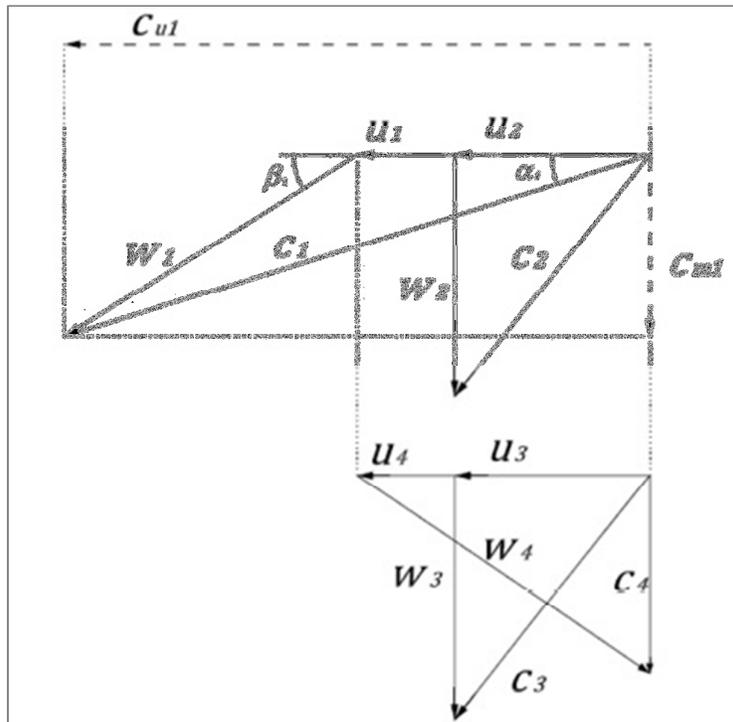


Figura 6-6: Relación de velocidades

Esto se debe a que el agua no ingresa en forma totalmente paralela al plano longitudinal que contiene al eje como ocurre en una turbina Pelton. Esta modificación traerá aparejada una variación en los ángulos de entrada del fluido, considerados óptimos.

La velocidad absoluta de entrada del agua en el inyector para una máquina de acción está dada por:

$$c_1 = k_c \cdot \sqrt{2gH_n}$$

Ecuación 6-6

c = velocidad absoluta (m / s)

k_c = coeficiente de velocidad del inyector

g = aceleracion de la gravedad (m / s²)

H_n = altura neta (m)

De acuerdo a esto, analizando los triángulos de velocidades y aplicando el principio de máxima utilización:

$$w_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2 \cdot c_1 \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1$$

$$w_1^2 = c_1^2 + \left(\frac{c_{u1}}{2}\right)^2 - 2 \cdot c_1 \cdot \frac{c_{u1}}{2} \cdot \cos \alpha_1$$

Ecuación 6-7

w = velocidad relativa al fluido (m / s)

c = velocidad absoluta (m / s)

c_u = componente de la velocidad absoluta en la direccion tan gencial (m / s)

α = angulo entre la velocidad absoluta y la velocidad tan gencial

Y observando el triángulo de velocidades

$$w_1^2 = c_1^2 + \left(\frac{c_1 \cdot \cos \alpha_1}{2}\right)^2 - 2 \cdot c_1 \cdot \frac{c_1 \cdot \cos \alpha_1}{2} \cdot \cos \alpha_1$$

Ecuación 6-8

Agrupando términos, se tiene que:

$$w_1^2 = c_1^2 \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \cos^2 \alpha_1\right)$$

Ecuación 6-9

Cumpléndose lo siguiente:

$$c_{m1} = c_1 \cdot \text{sen } \alpha_1$$

$$c_{m1} = w_1 \cdot \text{sen } \beta_1$$

Ecuación 6-10

c_m = componente de la velocidad absoluta en la direccion perpendicular (m / s)

c = velocidad absoluta (m / s)

w = velocidad relativa del fluido (m / s)

α = angulo entre la velocidad absoluta y la velocidad tan gencial

β = angulo entre la velocidad relativa y la velocidad tan gencial

Relacionando las ecuaciones anteriores, se puede despejar el valor del ángulo:

$$\beta_1 = \arcsen \frac{\text{sen } \alpha_1}{\sqrt{1 - \frac{3}{4} \cos^2 \alpha_1}}$$

Ecuación 6-11

De acuerdo a esta ecuación, el valor de ambos ángulos se encuentra relacionado y la forma en que varía el valor β se muestra en la siguiente tabla:

α	β
15	28.187
15.2	28.519
15.4	28.850
15.6	29.179
15.8	29.507
15.9	29.671
16	29.834
16.1	29.997
16.102	30.000
16.2	30.159
16.4	30.482
16.6	30.804
16.8	31.125
17	31.444

Tabla 6-2: Relación entre los ángulos

Coefficiente de Velocidad k_c del inyector

El coeficiente de velocidad afecta a la velocidad absoluta de entrada y tiene en cuenta las pérdidas que se generan en el escurrimiento dentro del inyector. De acuerdo a esto se puede indicar que el coeficiente afectará en forma directa al rendimiento hidráulico de la turbina, de manera que cuando se aleja de la unidad decreciendo su valor (lo que equivale a un inyector ineficiente) se hace necesario un incremento en el ángulo de admisión.

El coeficiente es un valor determinado generalmente en forma experimental y se han obtenido valores que van desde 0,95 a 0,98.

Resolución del triángulo de velocidades a la entrada del rotor

La velocidad del inyector está dada por la Ec. 6, que reduciéndola se obtiene:

$$c_1 = 4.429 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \quad \text{Ecuación 6-12}$$

Considerando a la turbina como de impulso y de acuerdo al triángulo de velocidades a la entrada del rotor se tiene:

$$u_1 = \frac{c_{u1}}{2} = \frac{c_1 \cdot \cos \alpha_1}{2} = \frac{4.429 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \cos \alpha_1}{2} \quad \text{Ecuación 6-13}$$

Luego:

$$u_1 = 2.214 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \cos \alpha_1 \quad \text{Ecuación 6-14}$$

Y si el ángulo $\alpha_1 = 16.102^\circ$ la velocidad tangencial será:

$$u_1 = 2.127 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \cos \alpha_1 \quad \text{Ecuación 6-15}$$

Aplicando el teorema del seno sobre el triángulo de velocidades a la entrada y despejando:

$$\frac{c_1}{\text{sen}(180 - \beta_1)} = \frac{w_1}{\text{sen} \alpha_1} \quad \text{Ecuación 6-16}$$

$$w_1 = \frac{c_1 \cdot \text{sen} \alpha_1}{\text{sen}(180 - \beta_1)}$$

Reemplazando el valor de c_1 en la última expresión se obtiene:

$$w_1 = 4.429 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \frac{\text{sen} \alpha_1}{\text{sen}(180 - \beta_1)} \quad \text{Ecuación 6-17}$$

Para completar la resolución del triángulo de velocidades a la entrada, se obtiene la expresión para el valor de c_m :

$$c_m = c_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 = 4.429 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \text{sen } \alpha_1$$

Ecuación 6-18

6.8.- Dimensionamiento del Rodete

Selección del diámetro y velocidad de giro de la turbina

El diámetro de esta máquina no depende del caudal, lo que facilita el diseño otorgando al diámetro un carácter de parámetro independiente. Esto se afirma por el hecho de que esta turbina puede trabajar dentro de un amplio rango de velocidades de rotación. De acuerdo con esto el diámetro podrá ser seleccionado en primer término.

Muchos autores señalan que para aprovechamientos hidráulicos de pequeña escala los diámetros comúnmente utilizados van desde los 200 mm hasta los 500 mm. Algunos factores a tener en cuenta son los siguientes:

- Si se reduce el diámetro del rodete se reduce el rendimiento hidráulico.
- Los rodetes más grandes tienen una velocidad de embalamiento menor.
- Se debe mantener una cierta proporcionalidad entre el diámetro y el ancho de la turbina a fin de evitar cambios de sección demasiado bruscos entre la tubería y el inyector que provocan fuertes perturbaciones en la vena fluida.
- Se debe tener en cuenta al seleccionar el diámetro del rodete el grado de simplicidad en la fabricación de la turbina.

En una turbina Michell-Banki la eficiencia no varía apreciablemente en amplios intervalos de valores de Q y Hn. Se presenta la Tabla 6-3 que es resultado de la experiencia recabada de distintos aprovechamientos hidroeléctricos:

$Q/\sqrt{H_n}$	Diámetro del rotor (mm)
0.02236 – 0.04743	200
0.04743 – 0.07906	300

0.07906 – 0.11068	400
0.11068 – 0.15812	500

Tabla 6-3: Selección del diámetro del rotor

El diámetro interno de rotor se obtiene de la siguiente expresión:

$$D_i = 0.66D_e \quad \text{Ecuación 6-19}$$

Una vez seleccionado el diámetro se procede a calcular la velocidad de giro esperada en la turbina. Para ello se calcula previamente la velocidad del chorro libre (c_1) a la salida del inyector:

$$c_1 = c_v \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} \quad \text{Ecuación 6-20}$$

La velocidad de giro relativa al rodete (u) en la periferia de turbina será:

$$u_1 = \frac{\pi \cdot N}{60} \cdot D_e \quad \text{Ecuación 6-21}$$

u_1 = velocidad de giro o tangencial del rotor (m/s)

N = número de giros de la turbina (RPM)

D_e = diámetro exterior del rotor (m)

Despejando N y reemplazando u_1 por su forma expresada en la Ec. 14, se tiene que:

$$N = 42.284 \cdot k_c \frac{\sqrt{H_n}}{D} \cos \alpha_1 \quad \text{Ecuación 6-22}$$

Número de álabes del rotor

La selección del número de álabes se realizará en base al diámetro y las condiciones de funcionamiento de la turbina, es decir, altura y caudal. Se deberá tener en cuenta que un reducido número de álabes provocará pulsaciones en la generación de la potencia, y un número elevado producirá una aceleración de la vena fluida con el consiguiente aumento de las pérdidas y el efecto de reja.

Según las investigaciones de A. Ulku y H. Olgun existe un número óptimo de álabes. En la tabla 6-4 se transcriben los resultados de diferentes investigaciones reflejadas en la literatura.

Referencia	D/Di	D/B	Z	η_h
YOKOHAMA, 1985, Japón	0.66	4.25	26	80.60
VIGM, 1986, CCCP	0.63	3.00	24	78.00
GANZ, 1984, HUNGRIA	0.66	1.00	30	75.00
ALABAMA, 1983, EEUU	0.66	0.25	20	75.00
RESITA, 1983, RUMANIA	0.66	1.28	24	73.00
KTU, 1987, TRAZBON TURQUIA	0.54	0.81	24	71.30
OREGON, 1949, EEUU	0.66	1.09	20	68.00
VDI, 1981, ETIOPIA	0.67	3.26	36	66.00
LOS ANDES, 1973, COLOMBIA	0.62	1.87	27	60.60
ODTU, 1985, ANKARA TURKIA	0.83	1.44	30	55.50

Tabla 6-4: Selección número de alabes

D_i = diametro interno del rotor (m)

D_e = diametro externo del rotor (m)

B = ancho del rotor (m)

Z = numero de alabes del rotor

η_h = rendimiento hidraulico

La tabla 6-5 que se muestra a continuación permite seleccionar un numero de alabes optimo en función del diámetro externo del rotor

Diámetro del rotor (mm)	Numero de Alabes
200	22
300	24
400	26
500	28

Tabla 6-5: Selección del número de alabes (Instituto Nacional de Energía, 1986)

De esta tabla se desprende que el número óptimo de álabes se encuentra entre 24 y 30.

Cálculo del Ancho del Rotor

Un factor importante a tener en cuenta es el cálculo del ancho del rotor. Este se calcula teniendo en cuenta el diámetro seleccionado y los parámetros de funcionamiento H y Q. El área de admisión está dada por:

$$A_a = \frac{Q}{c_{m1}} \quad \text{Ecuación 6-23}$$

$A_a = \text{area de admision (m}^2\text{)}$

Se puede definir el área de admisión mediante la siguiente expresión:

Además, se tiene que:

$$A_a = B \cdot P_z \cdot Z_a \quad \text{Ecuación 6-24}$$

$P_z = \text{paso entre los alabes (m)}$

$Z_a = \text{numero de alabes en la admision}$

El paso P_z estará dado por:

$$P_z = \frac{\pi \cdot D}{Z} \quad \text{Ecuación 6-25}$$

Si definimos como X_z a la relación entre el número de alabes de admisión y el número de álabes totales, se tendrá que una vez seleccionado el número de alabes del rotor se podrá determinar el número de alabes que actúan en la admisión, y por lo tanto el valor de X_z . El coeficiente X_z varía entre 0,05 y 0,35. Como límite se adopta $X_z = 0.175$

Igualando la Ec. 24 y la Ec. 25, y despejando B tenemos:

$$B = \frac{Q \cdot z}{\pi \cdot D_e \cdot c_1 \cdot \text{sen } \alpha_1 \cdot Z_a} \quad \text{Ecuación 6-26}$$

Al final la expresión para calcular el ancho del rotor queda:

$$B = 0.259 \frac{Q}{k_c \cdot D_e \cdot \sqrt{H_n} \cdot X_z}$$

Ecuación 6-27

La ecuación 27 brinda el valor mínimo requerido para el ancho del rotor, se recomienda que el ancho del rotor sea entre un 20 a 40% mayor que el ancho del inyector para evitar que existan pérdidas de caudal en la interfase inyector-rotor.

Diseño del Inyector

El inyector de la turbina de flujo transversal es el segundo componente de esta máquina que junto con el rotor influyen en la eficiencia total de la turbina. Este es el que dirige el agua hacia el rotor, a través de una sección denominada arco de admisión que cubre una determinada cantidad de alabes del mismo.

Un inyector adecuadamente diseñado asegura un bajo nivel de pérdidas de carga y permite obtener distribución uniforme de velocidades en la sección de salida, permitiendo la mayor transformación posible de energía potencial en energía cinética.

El inyector posee una sección trasversal de forma rectangular, compuesta principalmente de dos caras laterales rectas y una cara superior envolvente, que guía el flujo y que permite descargar el flujo sobre todo el ancho del rotor. La cara superior posee una curva con un ángulo α_1 óptimo constante en cada punto de la misma donde la velocidad absoluta será tangente. La cara inferior es recta y puede tener un ángulo de 5° como máximo.

La diversidad de diseño en la geometría del inyector hace que se adopten distintos ángulos de admisión. A través de las diversas investigaciones que se han realizado sobre esta máquina se tiene ángulos de admisión que van desde los 30° hasta los 120°, aunque la gran bibliografía existente parece coincidir en que el ángulo de admisión óptimo es cercano a los 90°.

El ángulo de admisión y el arco de admisión estarán definidos de acuerdo al número de alabes seleccionados anteriormente para la admisión.

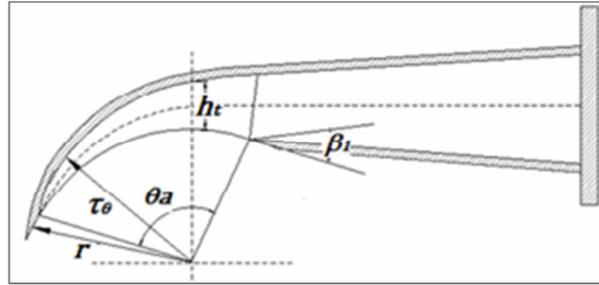


Figura 6-7: Sección del inyector

El arco de admisión viene dado por la siguiente expresión:

$$L_a = \frac{\pi \cdot D}{Z} + Z_a + Z_a \cdot e \tag{Ecuación 6-28}$$

e = espesor de los alabes (m)

L_a = longitud del arco de admision (m)

$$\theta_a = \frac{360}{\pi \cdot D} \cdot L_a \tag{Ecuación 6-29}$$

θ_a = *angulo de admision del rotor*

Actualmente existen varias propuestas para diseñar el inyector, diferenciadas fundamentalmente por el ángulo de admisión y, si posee o no un órgano regulador.

Inyector sin regulación

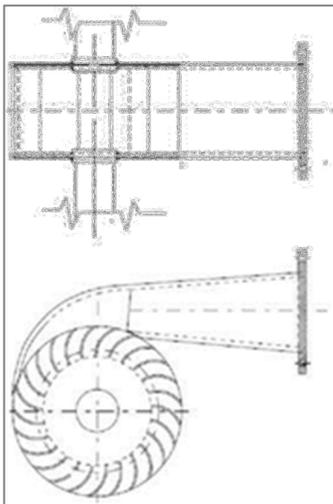


Figura 6-8: Inyector sin regulador

El inyector sin regulación, es diseñado a partir de una curva elíptica siguiendo las teorías de vórtice libre. Esto permite una verdadera flexibilidad en el diseño ya que se puede obtener una curva suave para todo tamaño de rodete, y al mismo tiempo asegurar el ingreso de agua con un ángulo de ataque óptimo constante en cada punto de la curva de rodete, y que la velocidad absoluta sea tangente a esta curva en todo punto.

La figura 6-8 muestra una geometría típica de un inyector sin regulación diseñada a partir de una curva elíptica.

Inyector con regulación

La regulación de la potencia se realiza variando el caudal que ingresa a la máquina, mediante un alabe regulador que permite estrechar la sección de pasaje del agua a través de un movimiento sobre su eje. Los principales diseños de inyectores con regulación utilizados actualmente son el tipo SKAT y el recomendado por la Organización Latinoamericana de Energía denominado tipo OLADE. Estos se caracterizan por poseer un ángulo de entrada característico en su diseño: 71° para el tipo SKAT y 120° para el tipo OLADE.

En la Figura 6-9, se puede ver el diseño tipo SKAT.

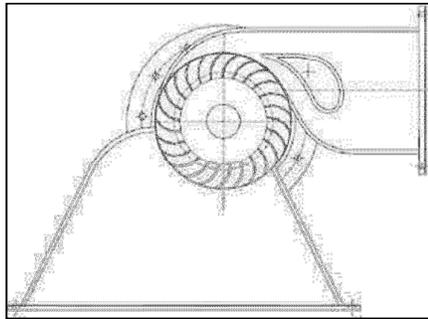


Figura 6-9: Inyectores con regulación

Ambas tipologías presentan en sus diseños un regulador que divide el flujo en dos partes, una superior y otra inferior, con la finalidad de disminuir el par de accionamiento de dicho alabe regulador.

Tubo de Aspiración o desfogue

Si la turbina se instala con una altura de salto grande, generalmente se instala sin tubo de aspiración ya que la altura que se pierde es despreciable con respecto a la caída total. No obstante si la turbina se instala con alturas de salto medianas a pequeñas, se instala un tubo de aspiración. Este tubo permite realizar un montaje a prueba de crecidas con un aprovechamiento de toda la altura disponible en el salto.

El tubo de aspiración se instala con el extremo inferior sumergido en el canal de restitución y el agua contenida en su interior genera una presión negativa en la zona del rodete, por lo cual la carcasa debe tener un cierre hermético.

La regulación del nivel de agua generalmente se realiza por medio de una válvula de aireación que influye sobre el vacío en la carcasa de la turbina. La empresa Ossberger asegura que esto permite un aprovechamiento óptimo de saltos de hasta 1 metro. Este tipo de válvula trae aparejado el inconveniente que se manifiesta cuando asciende el nivel del agua en el canal de restitución en periodo de crecidas, y no se logra alcanzar la diferencia de presión para el ingreso de aire previamente ajustada; con lo que el nivel del agua inunda el rodete.

Capítulo 7 - Micro Central Hidroeléctrica en la localidad de Lutti

7.1.- Introducción

La localidad de Lutti se encuentra en el departamento de Calamuchita, Córdoba; está a unos 200 Km. hacia el sur-oeste de la ciudad de Córdoba Capital a 1700 metros sobre el nivel del mar.

Lutti fue fundada el 12 de mayo de 1910, y actualmente cuenta con 10 casas, las cuales no cuentan con suministro de energía eléctrica, a excepción de la escuela Leopoldo Lugones que tiene un sistema autónomo de energía solar fotovoltaica. Dicho sistema está constituido por módulos fotovoltaicos de 65 W/h que en conjunto alcanzan 2400 W/h, un banco de baterías de 48 Vcc - 700Amp y un inversor de 48Vcc a 220Vca de 3Kw/h. La capacidad de esta instalación permite satisfacer las necesidades mínimas de la escuela, como ser la iluminación de las aulas.



Figura 7-1: Localidad de Lutti

Debido a la falta de suministro de energía eléctrica a la población, y a la improbable conexión a la red de distribución, se debe recurrir a las energías alternativas para satisfacer las necesidades de la localidad. De entre las diferentes opciones de energías alternativas, la micro hidráulica es la más atractiva, dada la presencia de un arroyo cercano (el arroyo Lutti que forma parte de los afluentes del río Grande), por tanto resulta interesante plantear un proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico a través de una micro turbina.

7.2.- Antecedentes y Documentación

Trabajos Previos

Entre ellos, se cuenta con la Tesis de Maestría “Micro Turbinas para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Turbina Michell-Banki” del Ing. Carlos Alberto Góngora Valdivia, quien basándose en la modelación computacional del flujo en el interior de la turbina y analizando diferentes situaciones, determinó modificaciones en el diseño de la turbomaquina aumentando su eficiencia.

Esta Tesis de Maestría cuenta con un Anexo “Aplicación de la turbina Michell-Banki en la localidad de Lutti”, donde se realiza un cálculo de las dimensiones necesarias para lograr la máxima eficiencia de la turbomaquina. Los valores medidos de los parámetros caudal y salto bruto, se detallan a continuación.

Caudal

Para la estimación del caudal se aplicó un método de medición aproximado, conocido como el método del flotador, estimándose el caudal instantáneo. El método consiste en determinar el tiempo que tarda en recorrer un flotador a lo largo de una distancia conocida, en una sección también de dimensiones conocidas de la corriente del río.

Tiempo registrado (s)	Velocidad=L/t (m/s)	Área de la sección (m2)	Caudal (m3/s)
1.50	0.66	0.08	0.05

Tabla 7-1: Valores medidos

Determinación del salto bruto y longitud de conducción

Para la determinación del salto bruto aproximado se utilizó un navegador del que se obtuvo el desnivel entre los puntos considerados de $H_b = 15\text{ m}$

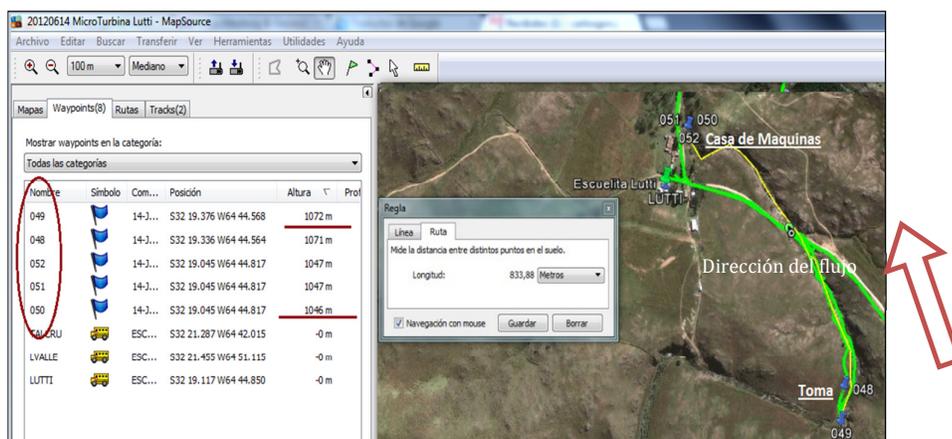


Figura 7-2: Esquema de la longitud de la conducción

La longitud de conducción desde la obra de toma hasta el emplazamiento de la turbina como se muestra en la Figura 35, siguiendo la margen del río es de aproximadamente de $L = 830\text{ m}$

A partir de estos datos se puede obtener la potencia bruta que se desarrollaría con el emplazamiento seleccionado. La potencia bruta se expresa mediante:

$$P_b = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_b \tag{Ecuación 7-1}$$

$$P_b = 7.78\text{ kW}$$

Dónde:

$$\rho = \text{densidad del agua (kg / m}^3\text{)}$$

$$g = \text{aceleracion de la gravedad (m / s}^2\text{)}$$

$Q = \text{caudal (m}^3 / \text{s)}$

$H_b = \text{altura bruta (m)}$

Con estos datos se diseñó la turbina Michell-Banki buscando que la misma cumpla con un alto rendimiento y un bajo costo de fabricación.

Visita a la Comuna de Lutti

El día 9 de abril del corriente año, acompañando a un equipo de trabajo de la "Dirección de Energías Alternativas y Comunicaciones" del "Ministerio de Agua, Ambiente y Energía" del gobierno provincial, encargado de realizar tareas de mantenimiento al sistema fotovoltaico de la escuela, se viajó hacia la comuna pudiendo realizar un recorrido por los márgenes del arroyo, buscando evaluar las características del terreno y posibles ubicaciones para las estructuras de la obra civil; además de efectuar mediciones del caudal instantáneo del arroyo.



Figura 7-3: Escuela Leopoldo Lugones - Lutti

La escuela Leopoldo Lugones se encuentra a 350 m. de distancia del Arroyo Lutti. El camino de acceso a la localidad cruza el mencionado arroyo mediante un puente que cuenta con cuatro alcantarillas para permitir el paso del agua.

Punto	Descripción	Coordenadas	Cota
94	Escuela	S32 19.117 W64 44.854	1065

103	Inicio Puente	S32 19.171 W64 44.652	1063
-----	---------------	-----------------------	------

Tabla 7-2: Coordenadas

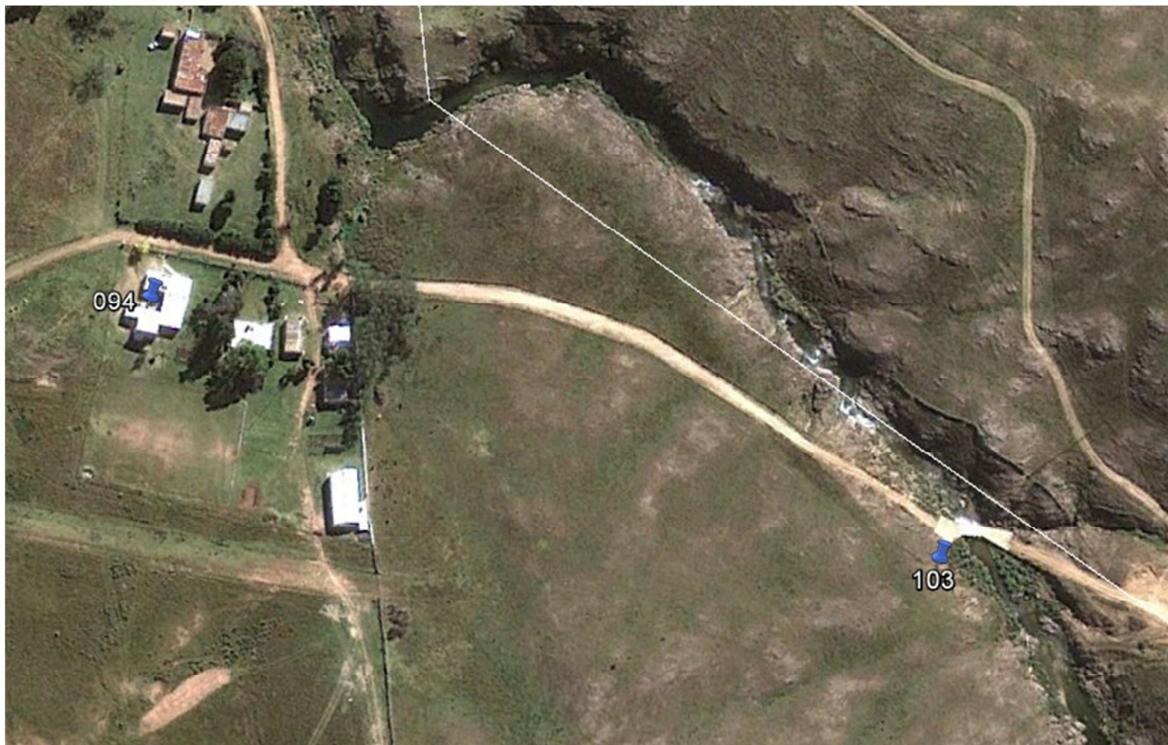


Figura 7-4: Esquema de ubicación

Realizando una inspección de la margen derecha hacia aguas arriba del arroyo, se pudo relevar planialtimétricamente, con la ayuda de un navegador GPS, aquellos puntos considerados para la ubicación de la obra de cierre y la estructura de toma. Los datos altimétricos obtenidos sirvieron como una primera aproximación a la realidad topográfica de la zona ya que no se cuenta con un equipo de precisión.

En cuando al Arroyo Lutti, se pudo observar que este corre sobre un lecho rocoso, que se extiende sobre ambos márgenes del arroyo, los cuales se encontraban limpios de la acumulación de arenas o limos, lo que evidencia la acción de caudales mayores al presente en el día de la visita.

El margen izquierdo es rocoso, presentando una pendiente abrupta y elevándose hasta una altura aproximada de 10 m. con respecto a al lecho del rio, consistente con lo observado al trabajar con imágenes satelitales de Lutti. Por otro lado, el margen derecho

presenta una pendiente más suave, con los primeros metros compuestos por roca que va dejando lugar a un suelo compacto y cubierto de vegetación.

Posibles ubicaciones de la obra de cierre

Punto	Ubicación	Altura [m]	Ancho aproximado del río [m]
109	S32 19.235 W64 44.589	1064	8,00
119	S32 19.339 W64 44.542	1066	7,50
121	S32 19.379 W64 44.562	1069	9,00

Tabla 7-3: Ubicación de la Obra de cierre

Medición del caudal

Para efectuar la medición se tomó ventaja de la presencia de las alcantarillas y se utilizó el método del flotador tomando el tiempo que le tomaba a un flotador cruzar la alcantarilla. Es necesario para aplicar este método que el canal de paso sea de unas dimensiones conocidas, por lo que se procedió a medir el largo, el ancho y la altura alcanzada por el tirante en la boca de la alcantarilla. Se efectuaron 3 medidas del tirante para cada alcantarilla utilizando una regla, y se adopta el valor promedio como valor del tirante.



Figura 7-5: Midiendo el tirante

Usando un cronometro, se tomó el tiempo que tardaba el flotador en cruzar la alcantarilla, realizando mediciones para todas las alcantarillas.

En la siguiente tabla se exponen los resultados:

Alcantarilla	Hm [m]	Sección [m ²]	t [s]	V [m/s]	Q [m ³ /s]
A1	76,60	0,115	4,62	1,210	0,139
A2	90,00	0,135	4,16	1,350	0,182
A3	50,00	0,075	4,81	1,160	0,087
A4	66,60	0,100	4,80	1,170	0,117

Qt	0,525
-----------	--------------

Tabla 7-4: Determinación del Caudal

El caudal medido es varias veces superior al que fue estimado anteriormente, lo que lleva a repensar la forma de utilizar el potencial hidroeléctrico del aprovechamiento y a plantearse la necesidad de realizar nuevas determinaciones que ayuden a seleccionar el caudal de diseño con el cual se operaría la micro turbina.

Emplazamiento de la obra de toma

Un proyecto de una micro central hidroeléctricas debe equilibrar los costos que conlleva la ejecución de las obras civiles necesarias y los beneficios que genera el proveer de energía eléctrica a la población aislada. El costo de la obra civil no deber llegar nunca a ser tal que imposibilite la ejecución del proyecto, aun cuando el potencial de generación sea elevado. Por tanto el proyecto debe equilibrar los aspectos técnicos y económicos.

En el trabajo de tesis al que se tuvo acceso, se ubicó la obra de toma de forma tal de materializar un salto de 15 m., la longitud de conducción forzada ronda varios cientos de metros. Esto encarece de sobremanera el proyecto pudiendo llegar a imposibilitar la ejecución de la misma.

La medición del caudal instantáneo efectuada durante la visita devuelve un valor varias veces superior al determinado en un primer momento, lo que abre la posibilidad de reducir considerablemente la altura de carga con la cual operaria la micro central.

Esta variación en la altura de carga necesaria para el funcionamiento de la micro central, implica una reducción en la longitud de la conducción con la correspondiente reducción en los costos totales del proyecto. Considerando unos de los puntos posibles para la obra de cierre se puede apreciar de un mejor modo lo antes expuesto:

Punto	Descripción	Ubicación	Altura [m]	Longitud conducción [m]
119	Ubicación cierre y captación	S32 19.339 W64 44.542	1065	51,00
112	Ubicación casa de fuerza	S32 19.311 W64 44.550	1061	

Tabla 7-5: Datos relevados

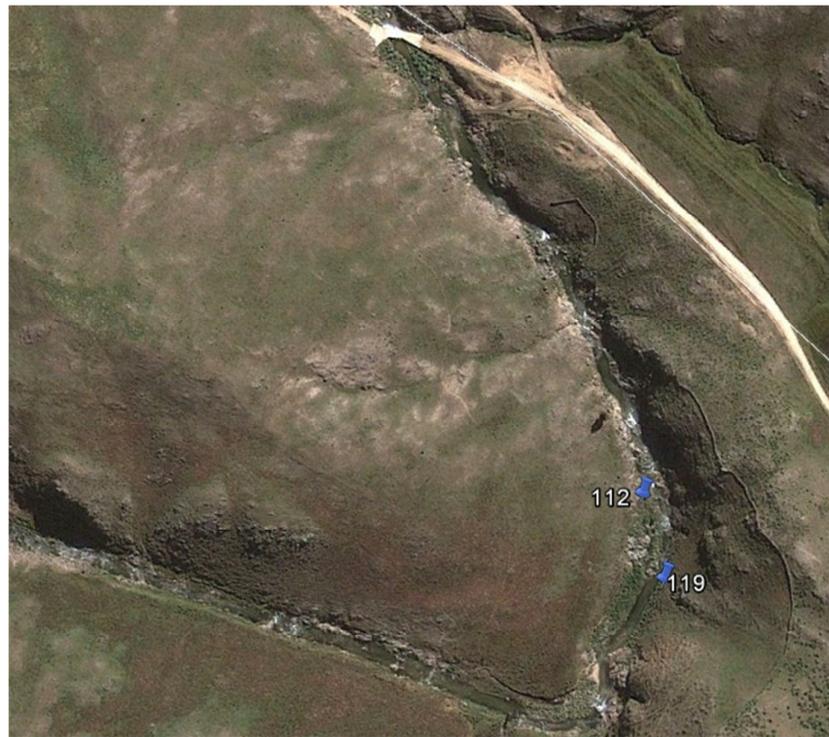


Figura 7-6: Ubicación de cierre tentativo



Figura 7-7: Punto 119

Además del punto de cierre indicado, existen otros puntos de interés aguas arriba del arroyo Lutti, para la decisión definitiva del emplazamiento del cierre será necesario realizar un relevamiento topográfico con instrumental de mayor precisión (nivel, estación total)

Por la presencia de la obra de cierre, se puede esperar tener una mayor altura de carga debido al agua remansada, se considera una altura bruta de $H_b = 5.00 \text{ m}$

Considerando las variaciones que pueda tener el caudal del arroyo, se toma conservadoramente para el cálculo de la potencia la mitad del caudal medido durante la visita: $Q_d = 0.200 \text{ m}^3 / \text{s}$

Fijados estos valores para los parámetros, la potencia bruta sería:

$$P_b = \rho \cdot g \cdot Q_d \cdot H_b$$

$$P_b = 9.81 \text{ Kw}$$

En este nuevo planteo, no solo se logra reducirse considerablemente la longitud de conducción por tubería, sino que además la potencia bruta obtenida de esta forma

resulta mayor de la generada en la anterior propuesta. Es decir, se lograría una importante reducción en los costos del proyecto con una mayor potencia que permitiría abastecer a más habitantes.

Cartografía e Imágenes Satelitales

Adicionalmente se cuenta con Cartas IGM de la zona de Santa Rosa de Calamuchita en escala 1:100000, restituciones aerofotogramétricas donde se observa la Comuna de Lutti en escala 1:50000, una fotografía aérea de la comuna en escala 1:20000 y dos modelos de elevación digital: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, 90m) y Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER, 30m).

Registros Pluviométricos y de caudal

Consultando la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) de la Secretaría de Recursos Hídricos de la Nación, para la cuenca del Río Carcaña, a la que el Arroyo Lutti pertenece, se cuenta con dos estaciones de interés:

- Grande-La Puente: con datos de precipitación total diaria desde 01/03/1984 a 31/08/2013
- Grade-Ume Pay: con datos de caudal diario medio desde 01/12/1957 a 31/06/2012

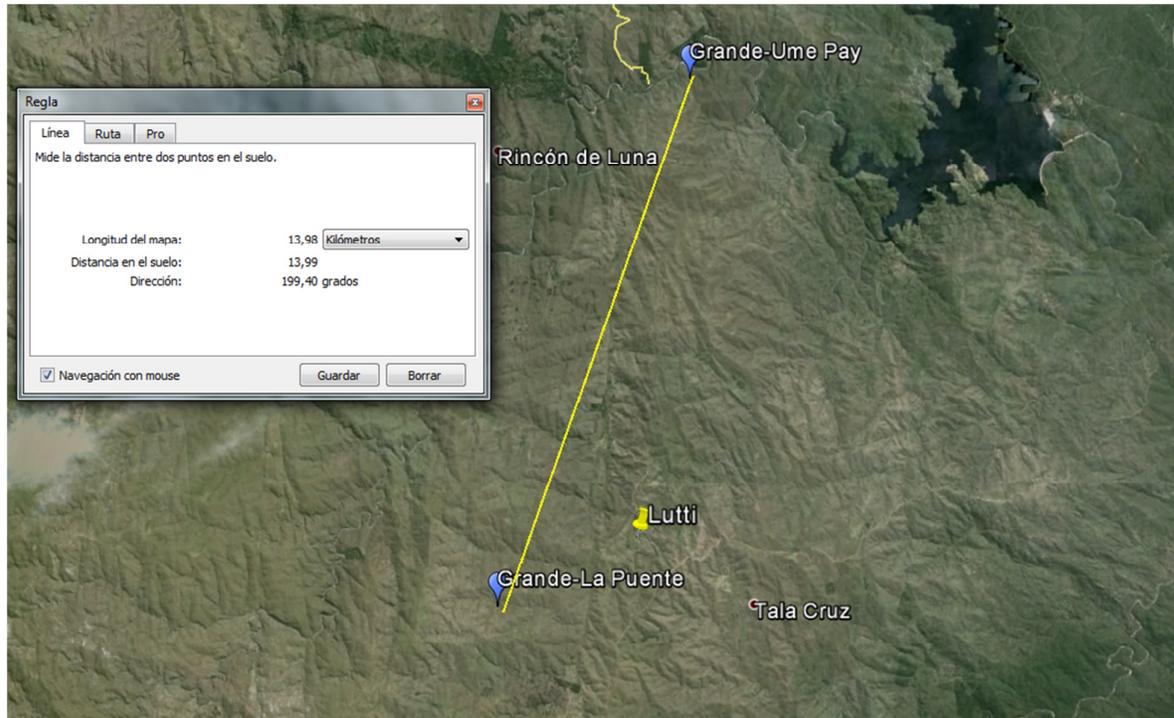


Figura 7-8: Estaciones

Con la información recolectada y disponible se decidió lo siguiente para la selección de los parámetros de diseño:

- H_b : utilizando los modelos digitales de elevación se busca obtener una aproximación de la topografía del terreno.
- Q_d : de los datos de la estaciones antes mencionadas, se buscara estimar el caudal medio diario para el Arroyo Lutti

En el siguiente capítulo se explicara en detalle la metodología empleada en la obtención de los parámetros de diseño

Capítulo 8 - Obtención de los parámetros de diseño

8.1.- Introducción

Al no contar con datos suficientes en el caso del caudal para determinar un valor de diseño y no poseer cartografía en una escala suficiente que permita conocer las particularidades topográficas de la zona alrededor del Arroyo Lutti, se recurren a ciertas técnicas que permiten obtener valores aproximados para los parámetros de diseño del aprovechamiento. Dado que se trata de un estudio de prefactibilidad, los valores que se obtendrán a continuación permitirán conocer y orientar el proceso de decisión, impulsando posteriormente la realización de relevamientos y estudios de campo más detallados

8.2.- Modelo Digital de Elevación

Es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

Los modelos Digitales de Elevación pueden ser de dos tipos:

- Modelo digital de superficie (MDS) que representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra (vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente).
- Modelo digital del terreno (MDT) recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno.

Al existir dos tipos, superficie y terreno, a través de los modelos digitales de elevación es posible conocer la existencia, disposición, forma y posición de los elementos que conforman un espacio geográfico y que pueden ser de origen natural o antrópico.

La generación de estos modelos puede realizarse de varias formas:

- mediante interferometría radar;
- mediante estereoscopía, a partir de pares de imágenes aéreas (fotogrametría) o tomas por satélite;
- mediante digitalización de las curvas de nivel de un mapa;
- mediante la entrada directa de las coordenadas (x, y, z) de los puntos del terreno, medidas por GPS, triangulación (por topógrafos) o lasergrametría (técnica que permite capturar las coordenadas de un punto en x,y,z por medio de un telémetro láser);
- mediante un sistema láser aerotransportado (Lidar).

En los tres primeros casos, la red dependerá de la red utilizada para las imágenes iniciales, que será generalmente una red regular rectangular. En casos aislados, se tratará de una red regular triangular o hexagonal. En los dos últimos casos, la red suele ser triangular de cualquier tipo, ya que la técnica de selección de los puntos característicos del terreno no garantiza su distribución regular sobre el plano (x, y).

Algunos organismos cartográficos (principalmente estadounidenses, gracias a las subvenciones de las que disponen) ponen gratuitamente a disposición del público bases de datos importantes, a las que se puede acceder a través de Internet. Citemos algunos de los principales: la NASA (DEM ASTER, SRTM-1, SRTM-3, SRTM30, MOLA MEGDR), la National Imagery and Mapping Agency (NIMA) (SRTMs) y el USGS (DEM SDTS, 1 grado, 7.5 minutos, NED, GTOPO30). La cantidad de datos gratuitos sigue siendo limitada, ya que los organismos cartográficos que disponen de ellos se financian generalmente a través de su venta (es el caso, en concreto, del IGN en Francia, que edita los MDT BD Alti). Sin embargo, la situación está mejorando, ya que las administraciones públicas están tomando conciencia de la importancia de estos datos en numerosos ámbitos civiles que no pueden permitirse comprarlos a precio de oro. Por ejemplo:

- El gobierno estadounidense autorizó recientemente (septiembre de 2003) la distribución de archivos [SRTM]] (Shuttle Radar Topography Mission), que ofrecen una resolución de 90 metros sobre el 80% de las tierras emergidas, aproximadamente. Anteriormente, solo existían resoluciones de 1 km (GTOPO30).
- En 2009, se distribuyó gratuitamente un nuevo MDT (cubre el 99% de la superficie del globo y tiene una resolución de 30 m); creado por la NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón1 ·2 a partir de pares estereoscópicos ASTER.
- Desde 2002, el instrumento HRS de Spot 5 ha adquirido más de 100 millones de km² de pares estéreo que sirven para producir MDE de 30 metros en formato DTED2 sobre más de 50 millones de km².3
- En 2014, las adquisiciones de los satélites radar TerraSAR-X y TanDEM-X estarán disponibles en forma de cobertura mundial homogénea con una resolución de 12 metros.

Año	DEM	Cobertura	Metodología	Resolución Espacial	Desarrollado por	Disponibilidad	Error
1996	GTOPO	Global	Interpolación Curvas a Nivel	30 arc- seg. (1km)	USGS (U.S. Geological Survey's)	Gratuito	
Febrero 2000	SRTM	80%	RADAR (trasbordador espacial Endeavour durante una misión de 14 días)	90- 30 m	NASA, USGS, NGA	Gratuito 90 m - Restringido 30 m	± 11 y 15 m
2000-2008	ASTER (GDEM)	Global	Estereoscopia Satelital	30 m	METI y NASA	Gratuito	± 20 y 26 m
1999	STAR3I	Áreas Especificas	RADAR	10 m	Inter Map		± 3m
	LIDAR		Láser	alta resolución			± 1 m

Figura 8-1: Comparativa de MDE

MED generados de sistemas satelitales

En la actualidad existen dos técnicas para obtener MDE desde sistemas satelitales. Una se refiere al uso de imágenes satelitales estereoscópicas provistas por sensores ópticos satelitales; la otra se basa en el uso de datos provistos por sistemas de radar satelitales.

En el caso de los barredores satelitales ópticos, la generación de imágenes de alta resolución proporciona una importante fuente de datos para el mapeo topográfico.

ASTER, es un instrumento japonés a bordo del satélite Terra de NASA, el cual permite una resolución de 15m en el visible e infrarrojo cercano, con capacidad de rotar hasta 24° sus dos telescopios permitiendo obtener una extensa visión transversal de la superficie. Sin embargo, debido a la naturaleza pasiva de estos sensores, la adquisición de imágenes apropiadas está fuertemente condicionada por la presencia de nubes y la ausencia de luz solar.

En cuanto a los sistemas de radar interferométrico, estos consisten en la interrelación de señales de radar provenientes de dos antenas por separado, la separación entre ellas se denomina línea base. Comúnmente esta separación es del orden de 10 a 500m, reproduciendo así un arreglo estereoscópico, en donde dos radares de apertura sintética se desplazan idealmente en líneas paralelas, monitoreando la superficie desde dos vistas diferentes.

El SRTM consiste en un sistema de radar especialmente modificado que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour durante los 11 días de la misión STS-99 de febrero de 2000. Para adquirir los datos de elevación topográfica estereoscópica, la SRTM llevaba dos reflectores de antenas de radar. Cada reflector-antena estaba separado del otro 60 metros gracias a un mástil que extendía la anchura del transbordador en el espacio, logrando así una configuración de interferometría de una misma órbita, solventando potenciales problemas por decorrelación temporal, calibración de la línea base y variaciones atmosféricas.

Comparativa MDE		
	SRTM	ASTER
Resolución	90 m	30 m
Alcance	Global	Depende de la escena satelital
Error Vertical	Bajo	Alto
Nubes	No afectado	Afectado

Tabla 8-1: Comparativa entre SRTM y ASTER

Si bien ambos MDE son capaces de reproducir un modelo topográfico útil y aprovechable del relieve del área de estudio, se debe observar y analizar el resultado de su uso ya que estos datos pueden presentar inconsistencias en ciertos sectores reduciendo el nivel de precisión y confiabilidad. Dentro de los factores responsables de estas inconsistencias se pueden citar pendientes pronunciadas de más de 60° de inclinación, vegetación, las características internas del sensor.

8.3.- Determinación del salto bruto

Para el tratamiento de los modelos digitales de elevación, se empleó la aplicación Global Mapper que combina una gama completa de herramientas de tratamiento de datos espaciales con acceso a una variedad de formatos de datos.

Este software incluye la posibilidad de acceder directamente a varias fuentes en línea de imágenes, mapas topográficos, y los datos DEM/DSM. Esto incluye el acceso a las imágenes de color de alta resolución de DigitalGlobe para el mundo entero (con marca de agua para su uso gratuito), mapas detallados de calles de OpenStreetMap.org, y el acceso a la base de datos completa de TerraServer-USA/MSRMaps.com imágenes de satélite y mapas topográficos de la USGS gratuito.

Para la obtención del modelo digital de elevación buscado, se comenzó generando un archivo KMZ con la herramienta Google Earth indicando la posición coordenada de la Comuna de Lutti. Posteriormente se inicializo el Global Mapper y una vez configurada la proyección sobre la que se trabajaría, se abrió el archivo de datos KMZ. Cargando la librería de mapas de OpenStreetMap.org se obtiene la salida de pantalla de la figura 8-2.

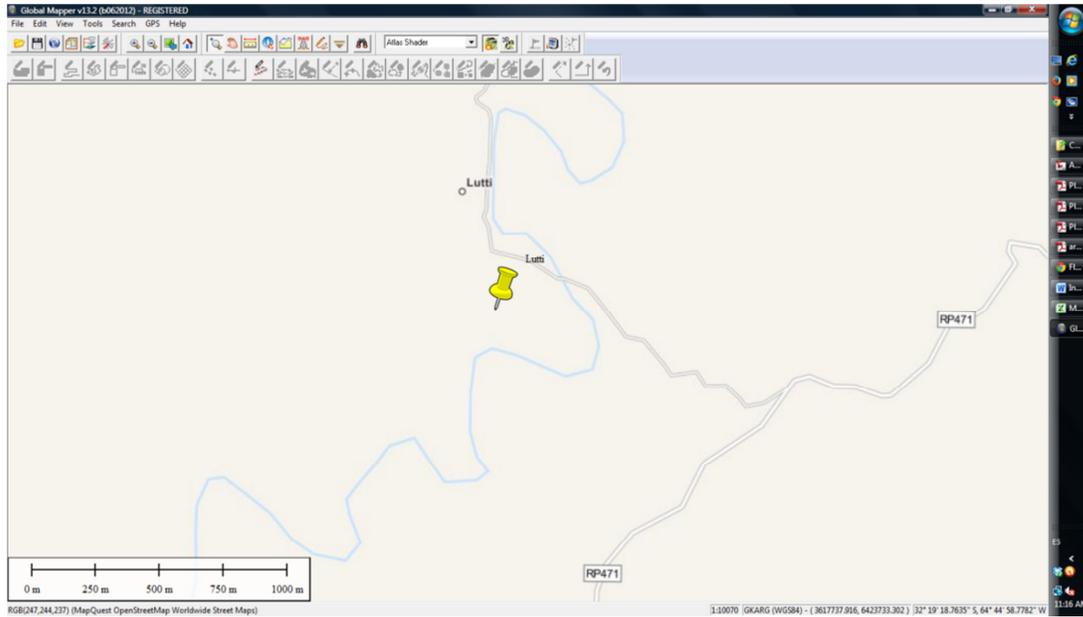


Figura 8-2: Visualización en Global Mapper

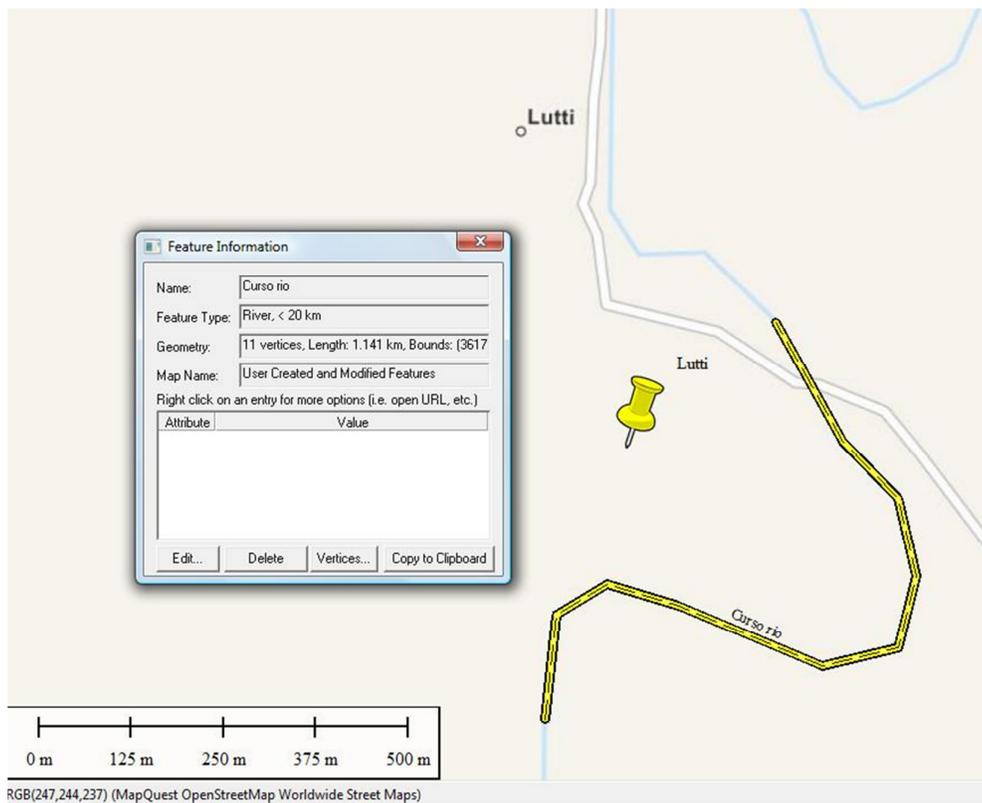


Figura 8-3: Sector de estudio

Posteriormente se cargaron para la zona de estudio los modelos digitales de elevación SRTM y ASTER GDEM, sobre los cuales se realizó un trazado del perfil longitudi-

nal hacia aguas arriba del Arroyo Lutti a fin de contrastar las salidas obtenidas de los modelos con los datos relevados en la visita realizada anteriormente.

A continuación se pueden visualizar las salidas del programa al trazar el perfil longitudinal del arroyo para la sección de estudio.

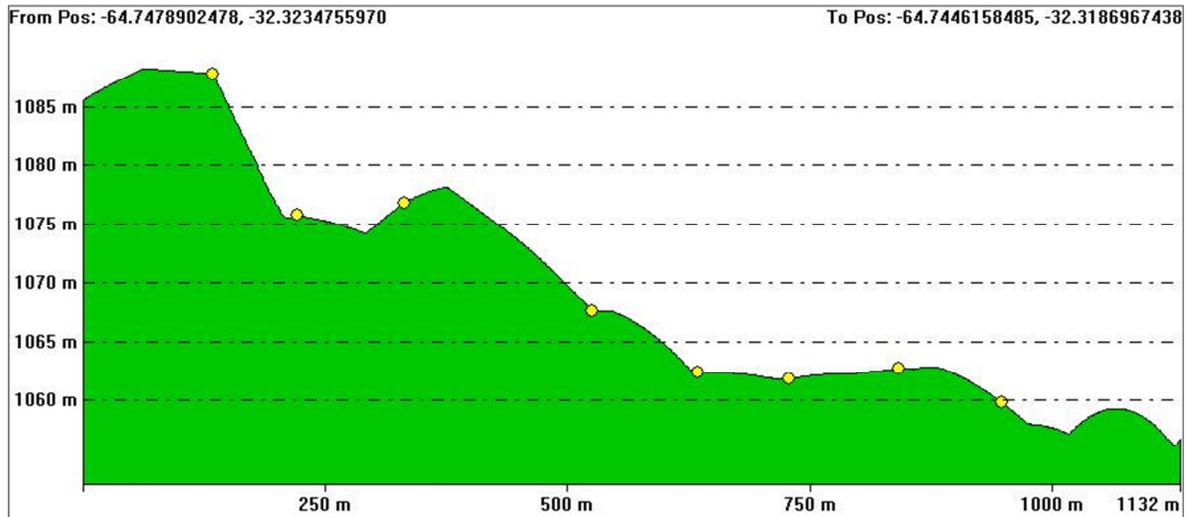


Figura 8-4: Perfil generado con SRTM

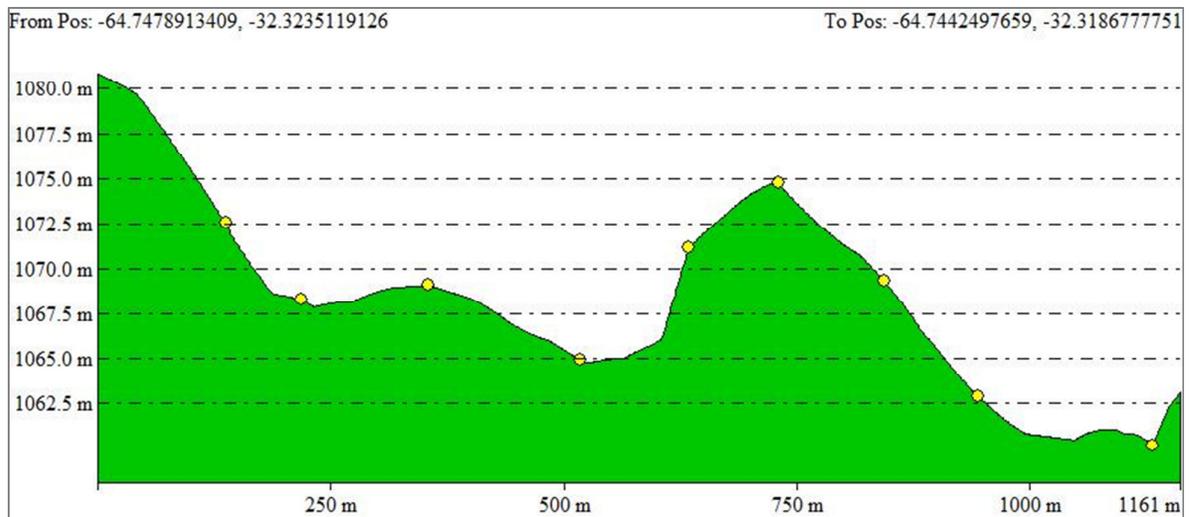


Figura 8-5: Perfil generado con ASTER

Contrastando con los observado durante la visita a la Comuna de Lutti, se puede observar que ambos modelos presentan exageraciones verticales, mas notablemente la del perfil generado con ASTER en el piquete de 750 m. Se decide combinar ambos mode-

los buscando generar una corrección a las exageraciones verticales del programa, seleccionando las elevaciones mínimas para cada estación.

El producto final es un perfil con una pendiente suavizada que se adapta de mejor modo a lo observado y relevado en campo.

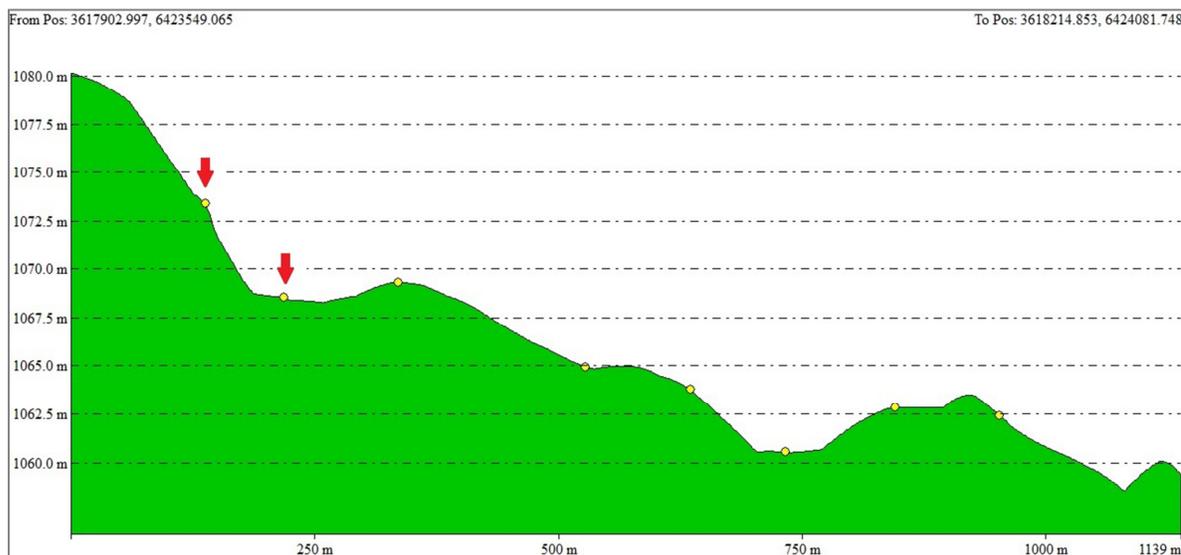


Figura 8-6: Perfil corregido

Las flechas rojas indican los puntos que resultan de interés para ubicar la obra de cierre y la casa de fuerza, ya que garantizan un salto bruto de importancia con la menor separación entre ellos, es decir, con un menor trazado de cañería.

De la figura 47, para la ubicación indicada de las obras, se obtiene que:

$$H_b = 4.50 \text{ m}$$

$$L \approx 80.00 \text{ m}$$

8.4.- Estimación de caudales

Es bastante habitual que no se cuente con registros de escurrimientos en el sitio de interés que permitan determinar los parámetros necesarios para el diseño de obras hidráulicas. En general se dispone de registros de precipitaciones que, a diferencia de los escurrimientos, no se afectan por cambios en la cuenca como la construcción de obras de

almacenamientos, urbanizaciones, etc. Esto implica que es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y los registros de datos disponibles. A grandes rasgos, se pueden clasificar los métodos en:

- Cuencas sin información fluviométrica
 - Transposición de caudales con cuenca homologable
 - Formulas precipitación-esorrentía
- Cuencas con información fluviométrica
 - Análisis de estadísticas de caudales
- Modelos hidrológicos

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de obtención del escurrimiento en la cuenca son los siguientes:

- Área de la cuenca
- Altura total de la precipitación
- Características generales de la cuenca (vegetación, pendiente, forma, etc.)
- Distribución de la lluvia en el tiempo
- Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca

En el presente trabajo se cuenta con datos de precipitaciones diarias totales y datos de caudales medios diarios para estaciones cercanas a la Comuna de Lutti. Con lo expuesto anteriormente, se decide por tanto tratar a la cuenca como una sin información fluviométrica siguiendo la metodología de la transposición de caudales.

Transposición de cuencas homologable

Es posible estimar los caudales en una cuenca sin datos de fluviométricos, si se acepta que los caudales en la misma son similares a los registrados en una cuenca próxima de características homologas. Para hacer la transposición, se relaciona el caudal registrado a través de la relación entre las áreas de las cuencas.

Determinación del área de influencia de una cuenca

La delimitación de cuencas puede realizarse mediante la interpretación de mapas cartográficos. Este proceso evolucionó con la tecnología, y actualmente con la ayuda de los sistemas de información geográfica y los modelos digitales de elevación se pueden delimitar el área de escurrimiento en forma sencilla y precisa.

Utilizando el Global Mapper y el modelo digital de elevación corregido, se delimitó el área de la cuenca a la que pertenecen las estaciones con las cuales se quiere realizar la transposición. Obteniéndose los siguientes resultados:

Cuenca	Superficie	
	Ha	Km2
Estación Grande-La Puente	1354,30	13,50
Estación Grande-Ume Pay	9752,06	97,50

Tabla 8-2: Superficie de las cuencas

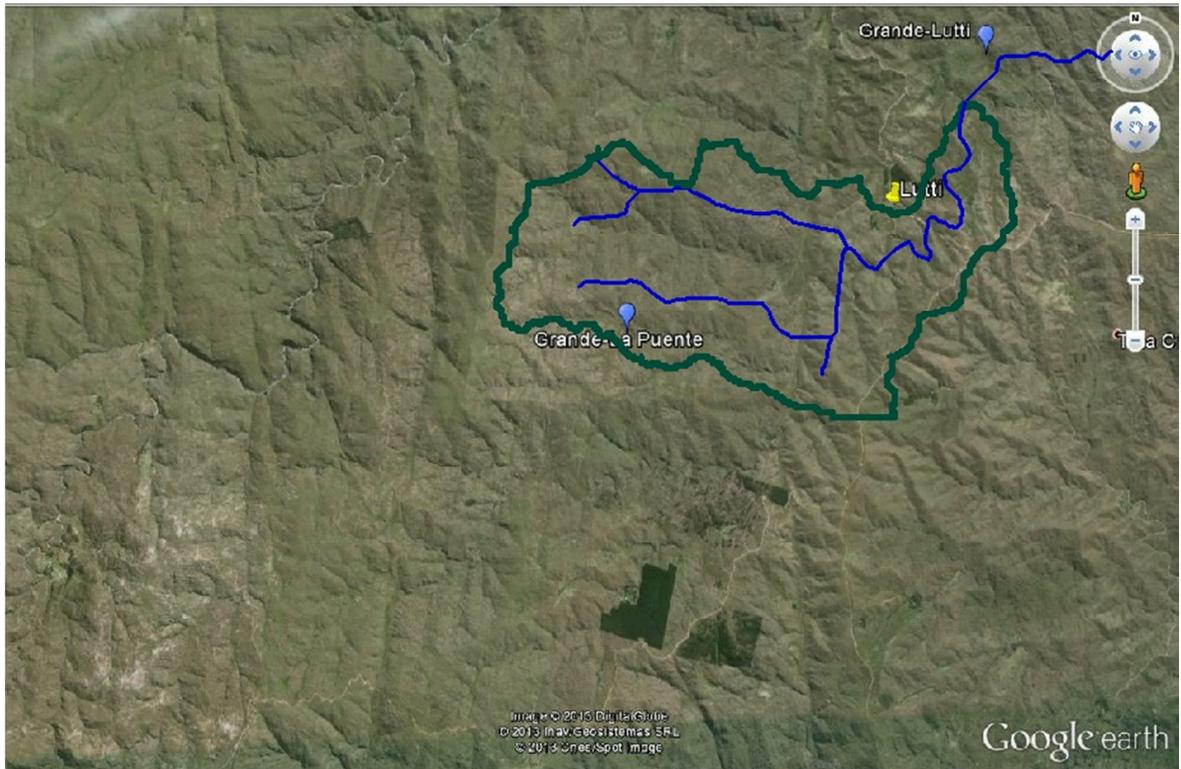


Figura 8-7: Cuenca Estación Grande-La Puente

Conociendo la superficie de cada cuenca, se procede a aplicar el método de transposición sobre la serie de datos correspondientes a la estación Grande-Ume Pay.

Caudal de diseño y Caudal Máximo

Es necesario determinar el caudal máximo de avenida a fin de dotar a la obra de cierre de las dimensiones adecuadas para resistir y evacuar este caudal. Así mismo fijar un caudal de diseño que garantice el mayor número de días de operación a la micro central. La complejidad de los procesos físicos que tiene lugar en la generación de los caudales dentro de una cuenca hace imposible una estimación confiable de la misma por métodos basados en leyes físicas, es por ello que se recurre al camino de la estadística para alcanzar los valores buscados.

En la estadística existen decenas de funciones de distribución de probabilidades teóricas, por lo que es necesario escoger, de estas funciones, las que se mejor se adapten al problema bajo análisis.

Entre las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología se tienen:

- Normal
- Log normal
- Pearson III
- Gumbel

Las funciones normal y log normal son generalmente apropiadas para variables aleatorias que cubren todo el rango de valores de resultados posibles. La función Gumbel se desarrolla para el análisis de las situaciones de eventos extremos.

Por lo expreso en el párrafo anterior, la serie de caudales obtenidas a través de la transposición de caudales serán tratados con la función de probabilidad de distribución normal.

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Ecuación 8-1

Donde μ y σ son los parámetros de la distribución. Estos parámetros determinan la forma de la función $f(x)$ y posición respecto al eje x .

Se definió una variable estandarizada, que esta normalmente distribuida con media cero y desviación estándar unitaria, para la cual se cuenta con valores de tabulados que permiten conocer la probabilidad $f(x)$ a través de la función de probabilidad para la misma.

La variable estandarizada se define como:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Ecuación 8-2

Los valores de z y $f(Z)$ se encuentran tabulados

De la serie de datos para la cuenca de la estación Grande-La Puente, se tienen los siguientes valores:

Cuenca Grande-La Puente	
Método de obtención	Transposición de Cuenca
Inicio registro	01/09/1985
Final registro	30/08/2012
Nº registros	18394
Media	1,49
Desvió	2,38

Caudal Máximo para T=25 años

$$P(X \leq x) = \frac{T-1}{T} = 0.96$$

$$F(x) = P(X \leq x) = 0.96$$

Consultando las tablas correspondientes a la distribución normal, es posible obtener el valor de la variable aleatoria.

$$z = 1.75$$

Por lo tanto despejando x de la ecuación 32, se tiene lo siguiente:

$$x = z \cdot \sigma + \mu = 1.75 \cdot 1.49 + 2.38$$

$$x = 4.987 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Confiabilidad del Caudal de diseño

En el capítulo anterior se definió un caudal de diseño para el aprovechamiento de $Q_d = 0.200 \text{ m}^3 / \text{s}$. Aplicando la distribución normal, se determinara la probabilidad de que el caudal del arroyo sea menor al caudal de diseño.

$$\frac{x - \mu}{\sigma} = \frac{0.200 - 1.49}{2.38} = -0.542$$

$$F(x) = 0.292$$

8.5.- Resumen

Salto Bruto	4,50	m
Longitud cañería	80,00	m
Caudal de diseño	0,20	m ³ /s
Caudal máximo de avenida	4,90	m ³ /s

Tabla 8-3: Parámetros de diseño

Capítulo 9 - Diseño de Elementos Estructurales

9.1.- Introducción

En este capítulo se llevan a cabo los cálculos de los diferentes elementos que constituyen la obra civil, tales como obra de cierre, obra de captación, desarenador, cámara de carga y otros presentes en los esquemas de construcción para micro centrales hidroeléctricas.

9.2.- Predimensionado de la tubería

Se realiza un predimensionado del diámetro de la tubería de conducción forzada, ya que este valor interviene en el dimensionado de algunas estructuras de la obra civil.

El diámetro es el resultado de lograr un equilibrio entre el costo y la pérdida de carga. El salto neto se obtiene deduciendo del salto bruto la suma de todas las pérdidas de carga, incluidas las generadas por fricción y turbulencia en la tubería forzada, ambas proporcionales al cuadrado de la velocidad de la corriente. Para transportar un cierto caudal, una tubería de pequeño diámetro, necesitara más velocidad del flujo que otra de mayor diámetro, y consecuentemente las pérdidas serán mayores.

Un criterio simple para determinar el diámetro de la tubería, es el de limitar las pérdidas de carga a un determinado porcentaje del salto bruto. Para esta aproximación solo se consideran las pérdidas friccionales, ya que se consideran menores las otras pérdidas. Utilizando la ecuación de Manning:

$$\frac{h_f}{L} = 10.3 \frac{n^2 Q_d^2}{D^{5.333}}$$

Ecuación 9-1

$$D = \left(\frac{10.3 \cdot Q_d^2 \cdot n^2 \cdot L}{h_f} \right)^{0.1875}$$

Ecuación 9-2

Limitando la pérdida de carga h_f al 4% de la altura bruta, para una tubería de PVC $n = 0.009$, luego:

$$D = 2.69 \left(\frac{Q_d^2 \cdot n^2 \cdot L}{H} \right)^{0.1875} = 2.69 \left(\frac{0.200^2 \cdot 0.009^2 \cdot 80}{4.5} \right)^{0.1875}$$

Ecuación 9-3

$$D = 0.413 \rightarrow 0.450 \text{ m}$$

Otro criterio es el expuesto en el "Small Hydro Canada 87", donde en función de un análisis estadístico de un gran número de tuberías relevadas, se arribó a la siguiente formula:

$$D = C \cdot Q_d^{0.43} \cdot h^{-0.14}$$

Ecuación 9-4

D=diametro (m)

Q_d = caudal de diseño (m^3/s)

h= salto bruto

C = factor adimensional, entre 1.26-1.44

Se usa un mayor valor de C para proyectos ubicados en localidades remotas y aisladas, se adopta un valor de 1.30

$$D = 1.30 \cdot 0.200^{0.43} \cdot 4.50^{-0.14}$$

$$D=0.527 \text{ (m)}$$

A los fines de aproximar las dimensiones de la tubería, se adapta un diámetro de 400 mm y se continúa con el siguiente elemento

9.3.- Azud – Tipo Creager

Perfil

Entre las ventajas de este tipo de perfil, están las siguientes:

- El azud de derivación tiene una sección transversal trapezoidal que ayuda a su estabilidad
- Flujo estable, sin desprendimientos ni entradas de aire
- El perfil está sometido a una presión casi nula en todos sus puntos

La descarga libre sobre la cresta del vertedero se calcula con la siguiente expresión:

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

Ecuación 9-5

Q = caudal de diseño

C = coeficiente de descarga

L = longitud efectiva de la cresta

H = carga total sobre la cresta

Se tiene un coeficiente de descarga igual a 2.21, y una longitud de cresta igual al ancho del río en la zona de ubicación de la obra de cierre, es decir, $L = 7.00 \text{ m}$. Despejando la altura de carga de la ec. 9-5 se tendrá:

$$H = \left(\frac{Q}{C \cdot L} \right)^{2/3} = \left(\frac{5}{2.21 \cdot 7} \right)^{2/3}$$

$$H = 0.470 \text{ m}$$

Conocida la altura de carga, para una primera aproximación del perfil del azud se puede utilizar tablas como la de Ofizeroff, la cual ha sido calculada para una altura de carga unitaria, es decir, que los valores deben ser corregidos si H es distinto de 1.0 m

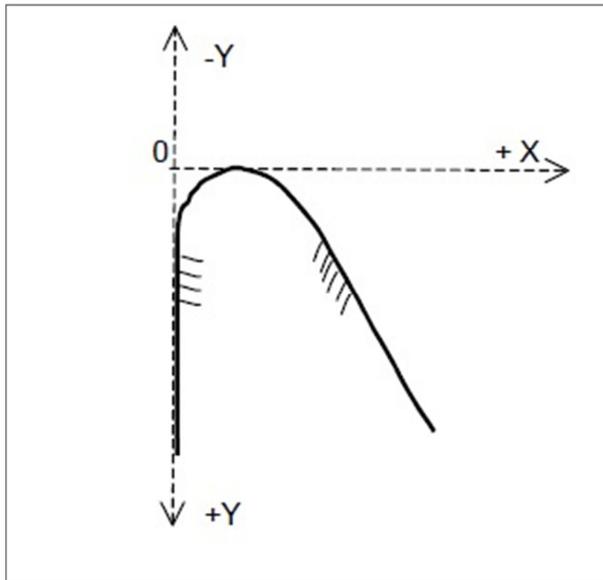


Figura 9-1: Perfil del azud

Para
Ho=1m

Para Ho =
0,470 m

X	Ordenada del azud	Ordenada de la lamina
0,00	0,126	-0,831
0,10	0,036	-0,803
0,20	0,007	-0,772
0,30	0,000	-0,740
0,40	0,006	-0,702
0,60	0,060	-0,620
0,80	0,147	-0,511
1,00	0,256	-0,380
1,20	0,393	-0,219
1,40	0,565	-0,030
1,70	0,873	0,305
2,00	1,235	0,693
2,50	1,960	1,500
3,00	2,824	2,500
3,50	3,818	3,660
4,00	4,930	5,000

X	Ordenada del azud	Ordenada de la lamina
0,00	0,059	-0,391
0,05	0,017	-0,377
0,09	0,003	-0,363
0,14	0,000	-0,348
0,19	0,003	-0,330
0,28	0,028	-0,291
0,38	0,069	-0,240
0,47	0,120	-0,179
0,56	0,185	-0,103
0,66	0,266	-0,014
0,80	0,410	0,143
0,94	0,580	0,326
1,18	0,921	0,705
1,41	1,327	1,175
1,65	1,794	1,720
1,88	2,317	2,350

Tabla 9-1: Calculo del perfil del azud

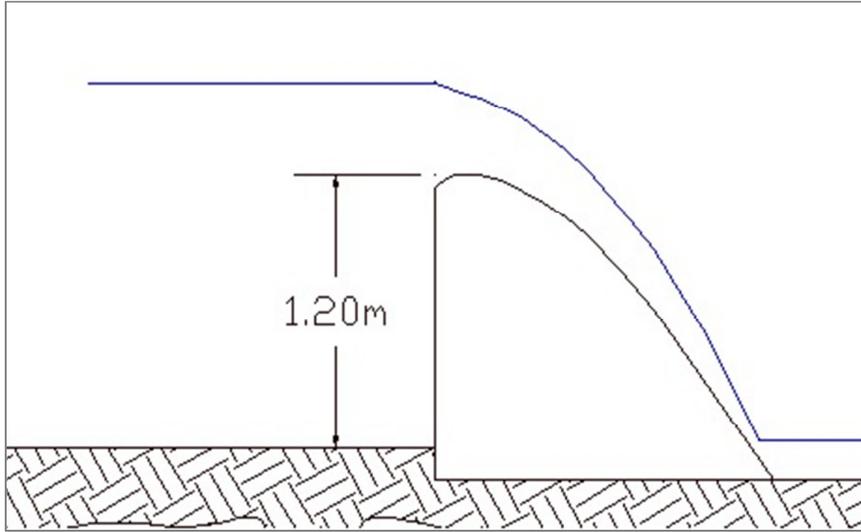


Figura 9-2: Azud

La fundación del azud se realiza 0.20 m por debajo de la cota del lecho del río hacia aguas arriba de la estructura.

Para calcular el tirante al pie del azud, se sigue el procedimiento recomendado por el USBR, United States Bureau of Reclamations:

$$y_1 = \frac{Q_{\max}}{V_1 \cdot L} \quad \text{Ecuación 9-6}$$

V_1 = velocidad al pie del azud (m/s)

L = ancho del vertedero (m)

$$V_1 = \sqrt{2g \cdot (Z - 0.5H_0)} \quad \text{Ecuación 9-7}$$

Z = altura medida desde el nivel máximo aguas arriba hasta el nivel del zampeado (m)

H_0 = carga hidráulica sobre la cresta (m)

Para el caso de estudio $Z = 1.67 \text{ m}$, $H_0 = 0.47 \text{ m}$; reemplazando en la ec. 9-7:

$$V_1 = \sqrt{2g \cdot (1.67 - 0.5 \cdot 0.47)} = 5.30 \text{ m/s}$$

$$y_1 = \frac{6.00}{5.30 \cdot 7.00} = 0.16 \text{ m}$$

Conociendo el valor del tirante al pie del azud, es posible conocer la longitud del zampeado y la altura del diente al final del mismo.

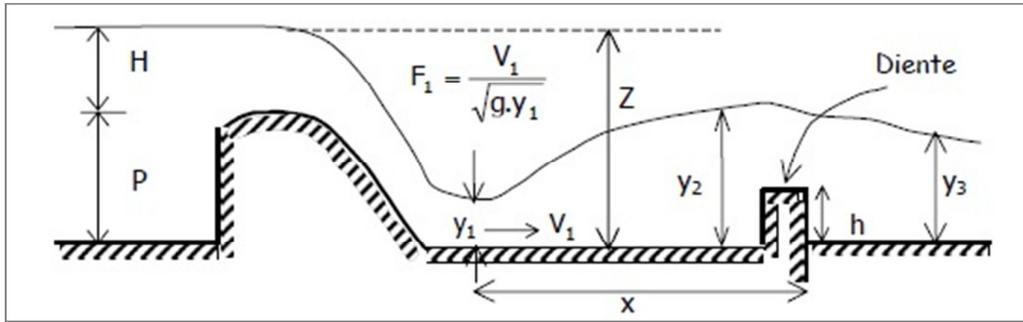


Figura 9-3: Diseño con diente al final del zampeado

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$$

Ecuación 9-8

F = numero de Froude

$$F_1 = \frac{5.30}{\sqrt{g \cdot 0.16}} = 4.20$$

Utilizando el diagrama de la figura 9-4, se puede encontrar la relación h / y_1

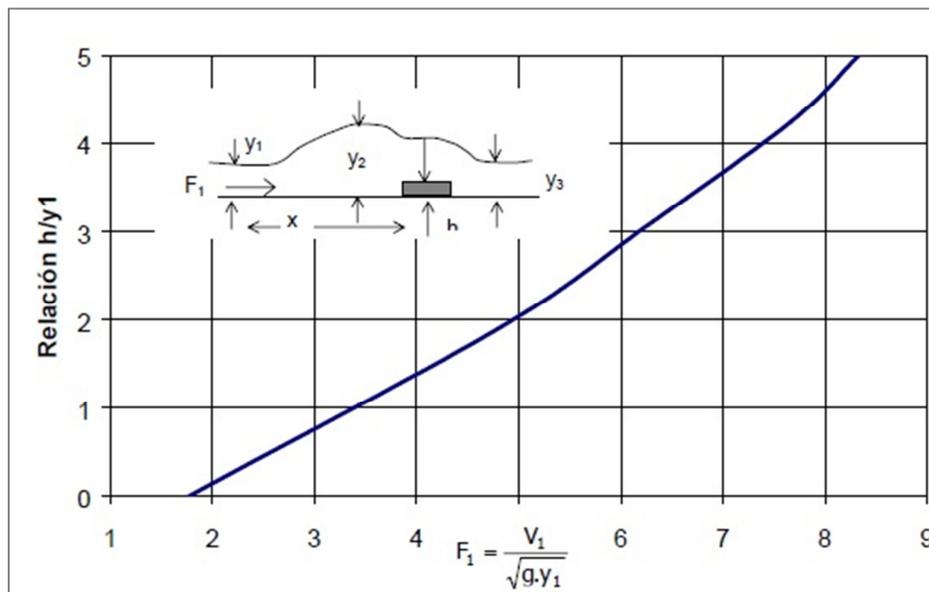


Figura 9-4: Diagrama

Para $F_1 = 4.20 \rightarrow \frac{h}{y_1} = 1.50 \rightarrow h = 0.24 \text{ m}$

Aplicando la siguiente ecuación por tanteos, se puede obtener el tirante conjugado y_2

$$2.66 \cdot F_1^2 \cdot \left[1 + \frac{\frac{h}{y_1}}{\frac{y_2}{y_1}} \right] = \left[\frac{y_2}{y_1} - \frac{h}{y_1} \right]^3 \tag{Ecuación 9-9}$$

Valores

F1	y1	h	h/y1	y2	y2/y1	Termino izquierdo	Termino derecho	Diferencia
4,1	0,161	0,2415	1,50	0,200	1,242	98,707	-0,017	98,725
				0,300	1,863	80,710	0,048	80,662
				0,400	2,484	71,711	0,954	70,757
				0,500	3,106	66,312	4,139	62,173
				0,600	3,727	62,712	11,041	51,672
				0,700	4,348	60,141	23,096	37,045
				0,800	4,969	58,213	41,744	16,469
				0,850	5,280	57,419	53,989	3,430
				0,862	5,354	57,242	57,246	-0,004
				0,870	5,404	57,127	59,489	-2,362

Tabla 9-2: Calculo del tirante y2

Para que el resalto se pueda formar, necesita una cierta longitud que es la que debe darse al zampeado. Existen varias fórmulas experimentales utilizadas para determinar ésta longitud, entre las cuales se tienen:

$$L = 5 \cdot (y_2 - y_1) = 3.50 \text{ m} \tag{Ecuación 9-10}$$

$$L = 2.5 \cdot (1.9 \cdot y_2 - y_1) = 3.70 \text{ m} \tag{Ecuación 9-11}$$

$$L = 10.3 \cdot y_1 (F_1 - 1)^{0.81} = 4.25 \text{ m} \tag{Ecuación 9-12}$$

Se adopta una longitud de 4.00 m para el zampeado.

Estabilidad del azud

El coeficiente de seguridad al deslizamiento se evalúa por medio de la siguiente expresión:

$$FS = \frac{(P-S)}{E} \cdot f \geq 1.2-1.5$$

Ecuación 9-13

P = peso propio azud

S = resultante de la subpresion

E = empuje horizontal

f = coeficiente de friccion

Material	f
Roca	0,6-0,7
Grava	0,5-0,6
Arena	0,4-0,6
Limo	0,-0,4
Arcilla	0,1-0,3

Tabla 9-3: Valores de f

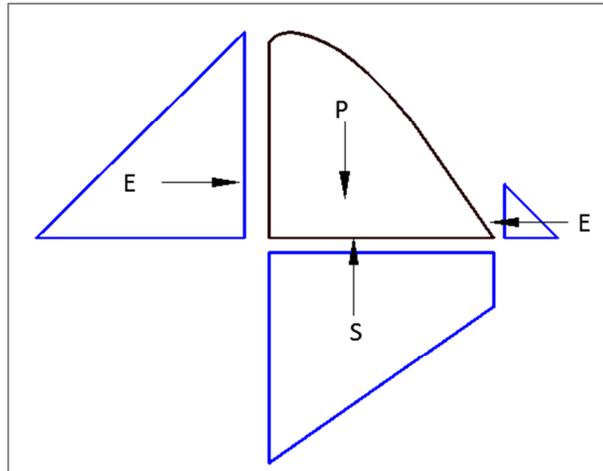


Figura 9-5: Diagrama de fuerzas actuantes

Despreciando el aporte del empuje aguas abajo del azud, las fuerzas actuantes son

$$E = \gamma_a \cdot \frac{h^2}{2} \cdot 1.00m = 1.00 \text{ tn} / m^3 \cdot \frac{1.20^2}{2} \cdot 1.00m = 0.72 \text{ tn}$$

$$S = \gamma_a \cdot \frac{(h_1 - h_2)}{2} \cdot L \cdot 1.00m = 1.00 \text{ tn} / m^3 \cdot \frac{(1.20 - 0.16)}{2} \cdot 1.50 \cdot 1.00m = 0.78 \text{ tn}$$

$$P = \gamma_H \cdot Seccion \cdot 1.00m = 2.40 \text{ tn} / m^3 \cdot 1.34 \text{ m}^2 \cdot 1.00m = 3.21 \text{ tn}$$

$$FS = \frac{(3.21 - 0.78)}{0.72} \cdot 0.60 = 2$$

9.4.- Cámara de Reja

La reja se instala en la orilla de la conducción para la captación del agua. El umbral del orificio debe estar a una altura no menor de 0.60 a 0.80 m del fondo, mientras que el dintel debe llegar a una altura superior a la de la mayor crecida.

El muro en el cual se localiza la reja, se ubica generalmente perpendicular a la dirección de azud, con una pequeña inclinación respecto a la dirección del río, situación que mejora las condiciones hidráulicas de la toma.

Datos

H : altura de carga = 0.30 m

h_1 : altura umbral = 0.80 m

e : espesor muro = 0.15 m

Q_d : caudal de diseño = 0.200 m³ / s

El ancho libre L necesario para la reja se calcula a partir de la expresión para vertederos de cresta delgada, si $e / H < 0.70$

$$Q = K \cdot C \cdot L \cdot H^{\frac{3}{2}}$$

Ecuación 9-14

$K = 0.85$ coeficiente por pérdida lateral en los barrotes

$C =$ coeficiente de descarga

Para el caso de vertedero libre de cresta delgada, el coeficiente de descarga puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$C = \left(1.794 + \frac{0.133}{H} \right) \left[1 + 0.55 \cdot \left(\frac{H}{H + h_1} \right)^2 \right] \quad (\text{Bazin})$$

Ecuación 9-15

$$C = \left(1.794 + \frac{0.133}{0.30} \right) \left[1 + 0.55 \cdot \left(\frac{0.30}{0.30 + 0.80} \right)^2 \right]$$

$$C = 2.32$$

Con el coeficiente ya calculado, se procede a obtener la longitud total de la reja despejando L de la ec. 9-6:

$$L = \frac{0.200}{0.85 \cdot 2.32 \cdot 0.30^2}$$

$$L = 0.617 \approx 0.70 \text{ m}$$

Dado que la reja se obstruirá por arrastre y acumulación de material flotante y en suspensión, se puede asumir un porcentaje de obstrucción f . Luego la longitud total efectiva de la reja viene dada por la siguiente expresión:

$$L_e = L(1 + f) \left[1 + \frac{t}{f} \right] \quad \text{Ecuación 9-16}$$

$t = \text{espesor de barrotos}$

Considerando un porcentaje de obstrucción del 25% y el espesor y separación de las barras se obtienen de acuerdo a los valores consignados en la tabla 9-2

Tamaño de las barras	Limpieza	
	Manual	Mecánica
Ancho (cm)	0.5-1.5	0.5-1.5
Profundidad (cm)	2.5-7.5	2.5-7.5
Separación (cm)	2.5-5.0	1.5-7.5
Angulo inclinación de la rejilla	50-55°	70-76°

Tabla 9-4: Tamaño de los barrotos de acuerdo al tipo de limpieza

La limpieza de las rejillas se realizara de forma manual, para lo cual se eligen barras de 1.0 cm de espesor con un espaciamiento de 5.0 cm

$$L_e = 0.70(1 + 0.25) \left[1 + \frac{0.01}{0.25} \right]$$

$$L_e = 0.91 \rightarrow L_e = 0.90 \text{ m}$$

El número de espacios N es calculado con la siguiente expresión:

$$N = L / s$$

Ecuación 9-17

$$N = 0.70 / 0.05$$

$$N = 14$$

Luego el número de barras será:

$$n = N - 1$$

$$n = 13$$

Se debe verificar que la longitud total efectiva cumpla con la siguiente expresión:

$$L_e = N \cdot s + n \cdot t$$

Ecuación 9-18

$$L_e = 14 \cdot 0.05 + 13 \cdot 0.01$$

$$L_e = 0.83 \rightarrow \text{cumple la condicion}$$

Las rejas obstaculizan el flujo y producen perdidas en la altura de carga, estas pérdidas se calculan con la siguiente expresión:

$$h_f = k_r \frac{V_0^2}{2g}$$

Ecuación 9-19

$V_0 =$ velocidad de aproximacion (m / s)

$k_r =$ coeficiente de perdida para el flujo normal

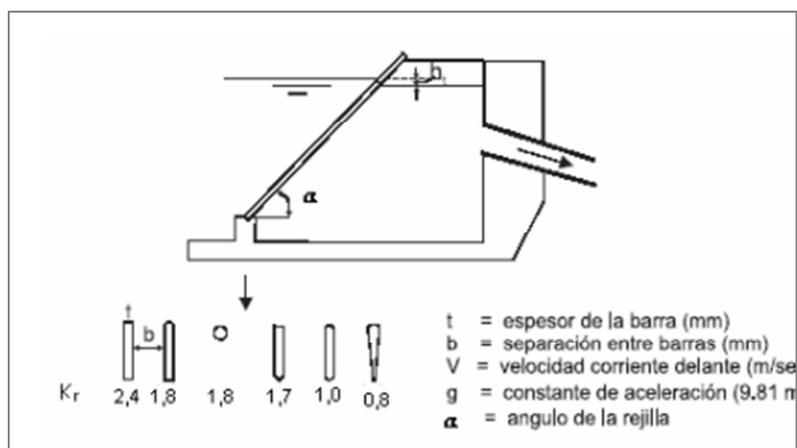


Figura 9-6: Coeficiente según forma de las barras

$$V_0 = \frac{Q}{A} = \frac{0.200}{0.30 \cdot 0.70} = 0.95 \text{ m/s}$$

$$h_f = 1.8 \cdot \frac{0.95^2}{2g} = 0.082 \text{ m}$$

9.5.- Desarenador

Para el dimensionado del desarenador se debe tener en cuenta la naturaleza de los residuos sólidos arrastrados por el río. El Arroyo Lutti del cual se abastecerá la obra de toma presenta residuos sólidos de pequeño diámetro.

Diámetros: Grava > 3 mm; Arena 3-0.05 mm; Limo 0.05-0.01 mm; Arcilla < 0.01 mm

Eligiendo un diámetro de 0.01 mm y recurriendo al siguiente diagrama, se obtiene una velocidad de sedimentación de aproximadamente $V_s = 0.08 \text{ m/s}$

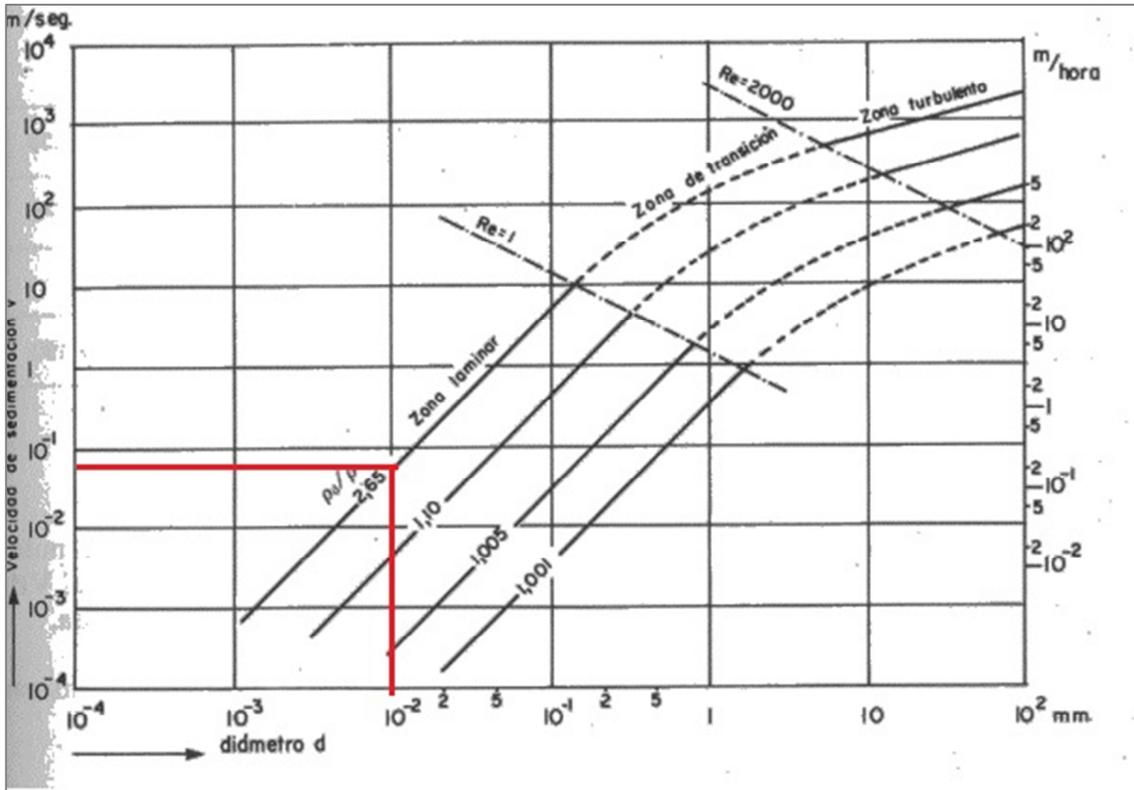


Figura 9-7: Velocidad de sedimentación

Se predimensionado la sección del canal desarenador con los siguientes valores:

$b = \text{ancho del desarenador } 1.00 \text{ m}$

$h = \text{altura del desarenador } 1.00 \text{ m}$

Con esta sección, la velocidad horizontal de la corriente en el canal será igual a:

$$V_H = \frac{Q}{b \times h} = \frac{0.200}{1.00 \times 1.00}$$

$$V_H = 0.200 \text{ m/s}$$

Para la velocidad de sedimentación determinada anteriormente, se tiene un tiempo de sedimentación de:

$$t_s = \frac{h}{V_H}$$

Ecuación 9-20

$$t_s = \frac{1.00}{0.08} = 12.5 \text{ s}$$

La longitud del desarenador se obtiene multiplicando el tiempo de sedimentación por la velocidad horizontal del flujo que arrastra las partículas:

$$L = V_H \cdot t_s \quad \text{Ecuación 9-21}$$

$$L = 0.200 \cdot 12.5$$

$$L = 2.50 \text{ m} \rightarrow \text{se adopta } L = 5.00 \text{ m}$$

Se dimensionada además un vertedero lateral en el canal desarenador, el cual cumplirá la función de aliviadero evacuando los excedentes o todo el caudal cuando se realicen tareas de mantenimiento aguas debajo de la instalación.

El ancho de este vertedero se determina con base en la condición más desfavorable, la cual ocurre cuando se debe evacuar todo el caudal captado por la toma. Dicho valor se multiplica por un coeficiente por seguridad.

$$Q = 1.2 \cdot Q_d \quad \text{Ecuación 9-22}$$

$$Q = 0.240 \text{ m}^3 / \text{s}$$

El aliviadero será de cresta gruesa y la ecuación que lo representa es la siguiente:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \quad \text{Ecuación 9-23}$$

Con una altura de carga igual a $h = 0.20 \text{ m}$ y con un coeficiente de descarga $C = 0.65$, el ancho del vertedero se obtiene despejando L de la ec. 9-15

$$L = \frac{0.240}{\frac{2}{3} \cdot 0.65 \cdot \sqrt{2g} \cdot 0.20^{3/2}}$$

$$L = 1.39 \text{ m} \rightarrow L = 1.50 \text{ m}$$

9.6.- Cámara de Carga

De acuerdo a lo estipulado en la sección 4.6, el diseño de esta cámara sigue el procedimiento esbozado para el desarenador, por lo tanto se adopta las mismas dimensiones determinadas en el apartado anterior. Uniendo ambos depósitos existirá un canal donde está ubicado el aliviadero calculado previamente.

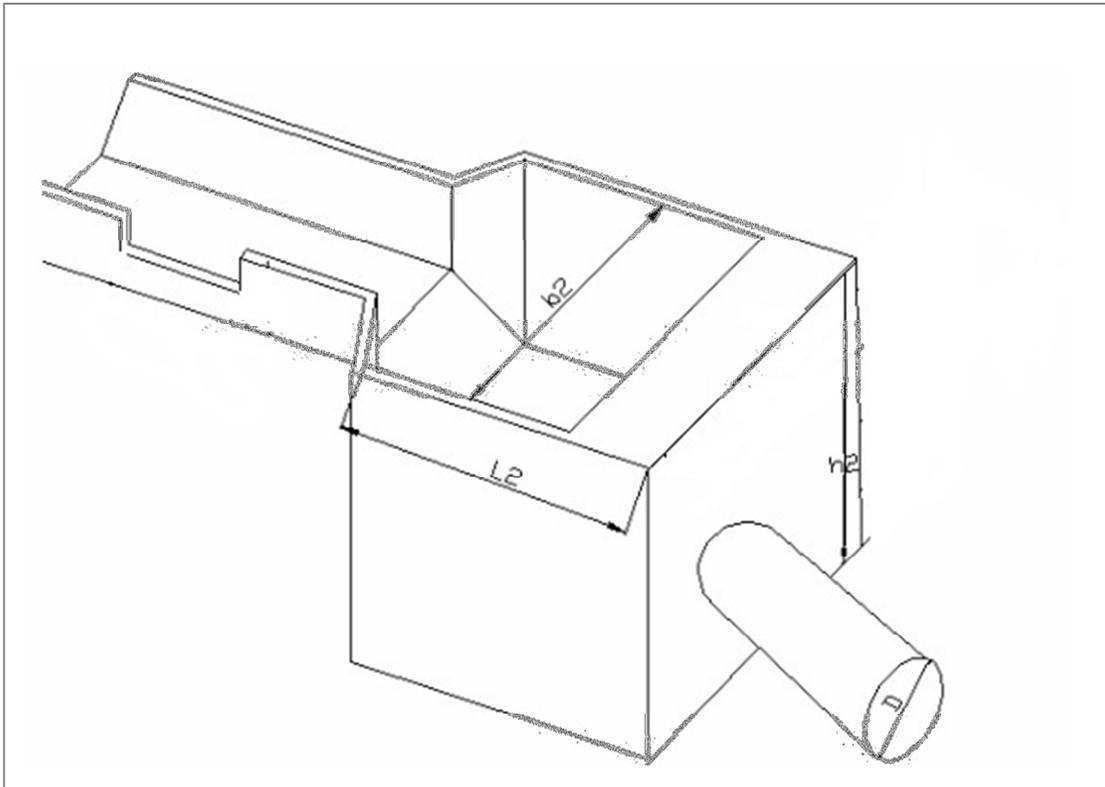


Figura 9-8: Cámara de carga

$$b_2 = 1.00 \text{ m}$$

$$h_2 = 1.00 \text{ m}$$

$$L_2 = 5.00 \text{ m}$$

Fijando las dimensiones del canal que unirá ambas estructuras, se calcularán las transiciones buscando minimizar las pérdidas de carga en la corriente.

$$\text{Canal: } b_c = 0.60 \text{ m}$$

$$h_c = 0.50 \text{ m}$$

$$s = 0.20\%$$

$$L_{transicion} = \frac{(b - b_2)}{2 \cdot \tan(12.5^\circ)}$$

Ecuación 9-24

$$L_{transicion} = \frac{(1.00 - 0.60)}{2 \cdot \tan(12.5^\circ)}$$

$$L_{transicion} = 0.90 \text{ m}$$

La longitud total del canal será tal que pueda contener las dos transiciones y la longitud del vertedero. Se adopta una longitud total de 5.00 m.

9.7.- Tubería a presión

Tiene por finalidad conducir el agua desde la cámara de carga hasta la turbina, en su trazado se debe preferir una disposición recta, aunque en algunas ocasiones es difícil de obtener, debido a las condiciones del terreno.

Se pueden seguir las siguientes pautas al momento de plantear la tubería a presión:

- Considerar las diferentes clases de material disponible, tipos de uniones, costos de mantenimiento. Además los diámetros y espesores comerciales de las tuberías.
- La selección del diámetro se hará tratando de obtener el menor costo y las menores pérdidas de carga
- El espesor se determina de acuerdo con los esfuerzos generados por el golpe de ariete, el peso del agua y de la tubería

El material utilizado en este proyecto será el policloruro de vinilo (PVC), el cual es relativamente económico, liviano y fácil de transportar, tiene un factor de pérdidas de fricción bajo y es resistente a la corrosión.

Ubicando tentativamente las estructuras previamente dimensionadas sobre un plano, es posible materializar el recorrido aproximado de la tubería forzada. En la si-

guiente figura se puede observar un tramo recto de cañería de PVC con una longitud de 75.00 m. Además por la presencia del azud, el tirante del agua se eleva y el salto bruto toma un valor de 5.50 m.

En el apartado 9.2 se realizó un predimensionado del diámetro de la tubería asumiendo una pérdida de carga correspondiente al 4% del salto bruto disponible. A continuación se enumeraran las pérdidas de carga que afectan a la tubería del trazado inicial, para luego calcularlas para 3 diámetros diferentes: el obtenido en el predimensionado, un diámetro menor y un diámetro mayor.

Pérdidas en la reja

En la reja ubicada en la entrada de la toma de agua, se genera una turbulencia que se traduce en una pérdida de carga. Esta pérdida se calculó en el apartado correspondiente a la cámara de rejillas:

$$h_f = 0.082 \text{ m}$$

Pérdidas de entrada

$$h_E = K_e \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 9-25

Donde K_e es el coeficiente de pérdidas que depende de la forma de entrada a la tubería como se muestra en la figura.

V es la velocidad del agua en el tubo (m/s)

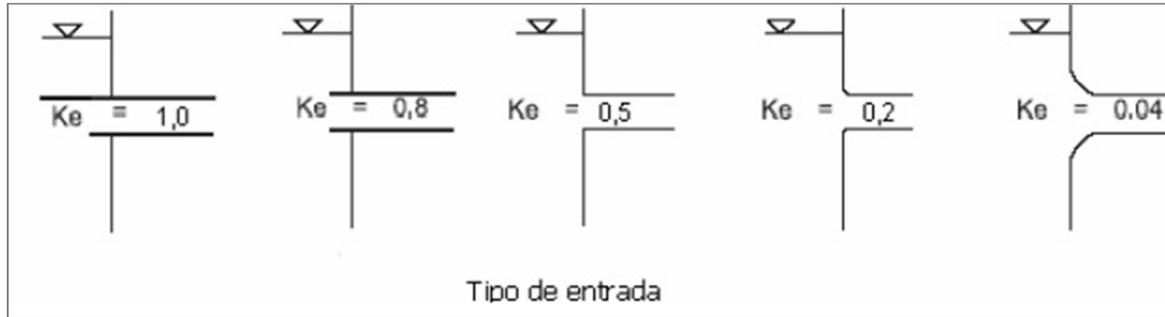


Figura 9-9: Valores de Ke

Pérdidas por fricción en la tubería

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 9-26

f = factor de fricción

L = longitud de la tubería (m)

D = diametro de la tubería (m)

V = velocidad dentro de la tubería (m / s)

El factor de fricción equivale a:

$$f = 0.01 \cdot \left(\frac{K}{D} \right)^{0.134}$$

Ecuación 9-27

Material	K
Acero	1,15
Hierro fundido	2,50
PVC	0,50

Tabla 9-5 : Valores de k segun material

Pérdidas en válvulas

Las válvulas se empleas, en general, para aislar determinados tramos a fin de poder intervenir en operación de mantenimiento o reparaciones importantes.

$$h_f = K_v \cdot \frac{V^2}{2g}$$

K_v es el coeficiente de pérdida que depende del tipo de válvula.

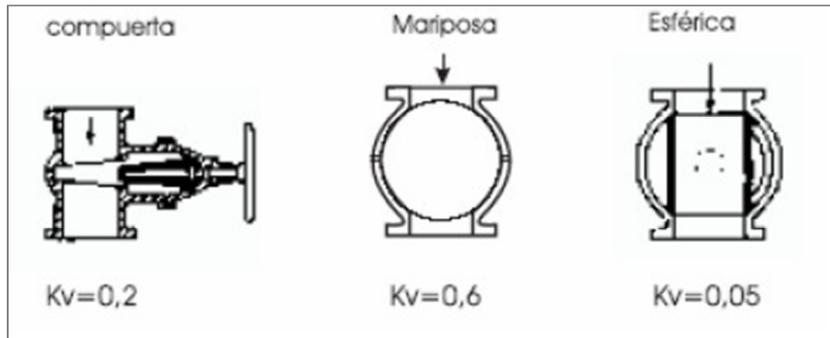


Figura 9-10: Coeficiente de pérdidas en válvulas

La tubería contara con una válvula esférica para cortar el flujo de agua a la turbina cuando sea necesario realizar mantenimiento en la central

Tabla resumen

Q= 0,200 m3/s
L= 75,00 m

	Calculo		
Diámetro	0,400	0,450	0,500
Velocidad(m/s)	1,59	1,26	1,02
Factor de fricción f	0,0103	0,0101	0,0100
Factor por tipo de entrada	0,50		
Factor por válvula	0,05		
Reja	0,082		
Entrada	0,065	0,040	0,026
Fricción	0,249	0,136	0,079
Válvula	0,006	0,004	0,003
Pérdida total	0,402	0,262	0,190

Tabla 9-6: Perdidas de carga

La selección definitiva del diámetro para la tubería deberá equilibrar el costo y las pérdidas admisibles para el caso de estudio.

Espesor de la pared

El espesor es función de la presión interna, de la carga de rotura y el límite elástico del material escogido, y del diámetro de la tubería

$$e = \frac{P_i \cdot D}{2\sigma_f \cdot K_f}$$

Ecuación 9-28

P_i = presión interna

D = diámetro de la tubería (m)

σ_f = resistencia a la tracción (500 kg/cm²)

K_f = eficiencia de la unión (0.80)

	Calculo		
Diámetro (m)	0,400	0,450	0,500
espesor pared (mm)	2,75	3,09	3,43

Tabla 9-7: Espesores mínimos

En la figura 9-7, se observa que para los diámetros utilizados en este caso, las dimensiones comerciales cumplen con el requisito de espesores mínimos

DN	d1	m	Presión de servicio					
			KB4 (4 kg/cm ²)		KB6 (6 kg/cm ²)		KB10 (10 kg/cm ²)	
			e	di	e	di	e	di
50	50,6	102,0	-	-	1,7	46,6	2,4	45,2
63	63,6	105,0	-	-	1,9	59,2	3,0	57,0
75	75,6	110,0	-	-	2,2	70,6	3,6	67,8
90	90,7	116,0	-	-	2,7	84,6	4,3	81,4
110	110,8	125,0	-	-	3,2	103,6	5,3	99,4
125	125,8	131,0	-	-	3,7	117,6	6,0	113,0
140	140,9	137,0	-	-	4,1	131,8	6,7	126,6
160	161,0	146,0	3,2	153,6	4,7	150,6	7,7	144,6
200	201,3	151,3	4,0	192,0	5,9	188,2	9,6	180,8
225	226,2	160,0	4,5	216,0	6,6	211,8	10,8	203,4
250	251,5	168,4	4,9	240,2	7,3	235,4	11,9	226,2
315	316,8	192,2	6,2	302,6	9,2	296,6	15,0	285,0
355	357,0	206,4	7,0	341,0	10,4	334,2	16,9	321,2
400	402,2	220,0	7,9	384,2	11,7	376,6	19,1	361,8
450	452,5	237,6	8,8	432,4	13,1	423,8	21,5	407,0
500	502,6	255,0	9,8	480,4	14,6	470,8	23,8	452,4
630	631,6	295,0	12,4	605,2	18,4	593,2	30,0	570,0

Dimensiones en milímetros

Figura 9-11: Diámetros comerciales. Plastiferro

Golpe de ariete

Cuando el operador cierra rápidamente la válvula de entrada a la turbina, por ejemplo para evitar que la turbina se embale, el régimen hidráulico varía bruscamente. Este cambio afecta a una gran masa de agua y genera una onda de presión importante, que en ocasiones da lugar a sobrepresiones que revientan las tuberías o a depresiones que las aplastan.

La onda de presión consecuente al cambio brusco de velocidad del agua, viaja a la velocidad del sonido en el medio. Esa velocidad viene dada por la ecuación:

$$c = \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot K}{1 + \frac{K \cdot D}{E \cdot t}}}$$

Ecuación 9-29

K = modulo de elasticidad del agua: $2.1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

D = diametro de la tuberia (mm)

E = modulo de elasticidad del material de la tuberia: PVC $2.75 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$

t = espesor de la pared de la tuberia (mm)

De la figura 9-7, para una presión de servicio KB6, un diámetro de 500 mm y un espesor de la pared de la tubería de 14.6 mm; la velocidad de la onda de presión será:

$$c = \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot 2.1 \cdot 10^9}{1 + \frac{2.1 \cdot 10^9 \cdot 500}{2.75 \cdot 10^9 \cdot 14.6}}}$$

$$c = 278.1 \text{ m/s}$$

El tiempo que tarda la onda de presión en efectuar el recorrido de ida y vuelta se denomina tiempo crítico:

$$T_c = \frac{2 \cdot L}{c}$$

Ecuación 9-30

$$T_c = \frac{2 \cdot 75}{278.10}$$

$$T_c = 0.54 \text{ s}$$

Si la válvula se cierra por completo en un tiempo menor que el tiempo crítico, toda la energía cinética del agua contenida en el tubo será convertida en sobrepresión. Si, por el contrario, el tiempo de cierre supera en diez veces al valor crítico, el fenómeno puede ignorarse porque las sobrepresiones serán mínimas.

Para tiempos de cierre superiores al crítico pero inferiores a diez veces el crítico, la sobrepresión puede calcularse con la ecuación de Allievi:

$$\Delta P = P_0 \left(\frac{N}{2} \pm \sqrt{\frac{N^2}{4} + N} \right)$$

Ecuación 9-31

P_0 = presión estática bruta en metros columna de agua

$$N = \left(\frac{L \cdot V_0}{g \cdot P_0 \cdot t} \right)^2$$

Ecuación 9-32

$L =$ longitud de la tubería (m)

$V_0 =$ velocidad del agua (m/s)

$t =$ tiempo de cierre: 4 s

$$N = \left(\frac{75 \cdot 1.01}{g \cdot 5.5 \cdot 4} \right)^2 = 0.123$$

$$\Delta P = 5.5 \cdot \left(\frac{0.123}{2} \pm \sqrt{\frac{0.123^2}{4} + 0.123} \right)$$

$$\Delta P = 2.30 \text{ m}$$

De la ecuación 9-20 se calcula el espesor mínimo que debe tener la pared de la tubería para soportar las sobrepresiones.

$$e = \frac{P_i \cdot D}{2\sigma_f \cdot K_f} = \frac{7.8 \cdot 500}{2 \cdot 500 \cdot 0.80}$$

$$e = 4.9 \text{ mm}$$

Con un espesor de pared de 14.6 mm la tubería de diámetro 500 mm cumple con este requisito.

Capítulo 10 – Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo es mostrar que se puede generar energía eléctrica en cantidad, calidad y de manera confiable para cubrir la demanda energética de poblaciones aisladas, más específicamente en la localidad de Lutti, mediante el uso de una micro turbina Michell-Banki.

Durante el desarrollo del presente trabajo, se abarcaron diferentes ramas de la Ingeniería Civil, a saber Topografía, Hidrología, Hidráulica, entre otras; y se recurrió a herramientas digitales para la obtención de parámetros o el manejo de datos. Todo esto enfocado al diseño y dimensionado de la obra civil que compone un micro aprovechamiento.

La localidad de Lutti presenta características que hacen viable la instalación de una micro turbina hidroeléctrica como solución a su actual problemática de falta de suministro eléctrico. La generación hidroeléctrica permite utilizar, no consumir, una fuente de energía limpia y renovable, sin generar emisiones contaminantes o alterar la calidad del recurso, con bajos costos de operación y mantenimiento. Sin embargo, este tipo de emprendimientos requieren una fuerte inversión inicial para las localidades rurales, razón por la cual es importante profundizar en las determinaciones de los parámetros de diseño buscando obtener un proyecto rentable económicamente, adecuado a las posibilidades técnicas de la región, y manteniendo siempre la premisa base en este tipo de proyectos: el gran valor social que representa mejorar la calidad de vida de la población afectada al proyecto.

En lo personal, la Práctica Supervisada me ha servido para afianzar y profundizar los conocimientos en el área de Hidrología y Obras Hidráulicas, además de brindarme la posibilidad de trabajar con un grupo de profesionales en la materia.

11.- Bibliografía

- Solventa S.L. - Introducción a las energías renovables - <http://www.solventa.com.es>*
- Secretaria de Energía de la Nación (2004) - Descripción, desarrollo y perspectivas de las energías renovables en Argentina y el mundo*
- ITDG Intermediate Technology development group (1995) - Manual de mini y micro centrales hidráulicas – Guía para el desarrollo de proyectos – Perú.*
- ITDG Group, Intermediate Technology Development. 2006. Ficha Técnica Turbina Michell-Banki - Perú.*
- Ing. Carlos Alberto Góngora Valdivia (2012) - Micro Turbinas para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Turbina Michell-Banki - Argentina*
- Ing. José Daniel Vázquez de León (2007) - Micro-Hidroeléctrica Tipo Michell-Banki, funcionamiento, Mantenimiento y Componentes - Trabajo de Graduación - Guatemala*
- CEDIT, Comité Ejecutivo de Desarrollo e Innovación Tecnológico – Microturbinas Hidroeléctricas - Argentina*
- Ing. Daniel Muguerza – Micro centrales hidroeléctricas - Argentina*
- Ing. Luís Rodríguez Sánchez – Obras civiles en microcentrales hidráulicas - luisr@itdg.org.pe
Perú*
- ESHA European Small Hydropower Association (2006) - Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica - España*
- W.R. Breslin, VITA Volunteers in technical assistance - Small Michell (Banki) Turbine: a construction manual - EEUU*
- BC Hydro (2004) - Handbook for developing Micro Hydro in British Columbia - Canada*
- ESHA, European Small Hydropower Association (1998) – Como llevar a buen fin un proyecto de minicentral hidroeléctrica – España*
- K. Jacobsen, University of Hannover– Analyses of SRTM Elevation Models – Alemania*
- Rodriguez Pedraza, Maira Ginet; Torres Ferreira, Fredy Aldemar – Universidad Industrial de Santander (2006) – Dimensionamiento de una Microcentral hidroeléctrica – Colombia*

Ing. Jose Luis Garcia Velez, Universidad del Valle – Diseño hidráulico de estructuras – Colombia

Marcelo Olivares Alveal, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – Pequeñas centrales hidroeléctricas: Potencial de generación en Chile – Chile

SAGARPA, Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentacion, – Hidrologia Aplicada a las Pequeñas Obras Hidraulicas – Mexico

SAGARPA, Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentacion, Mexico – Lineas de Conduccion por gravedad – Mexico

Energy Mines and Resources Canada (1987) – Advanced Technical Workshop Civil Works Workshop – Canada

Francisco Javier Aparicio Mijares (1987) – Fundamentos de Hidrologia de Superficie - Mexico

12.- Anexos

Anexo I: Estimación de la Demanda

Anexo II: Impacto Ambiental