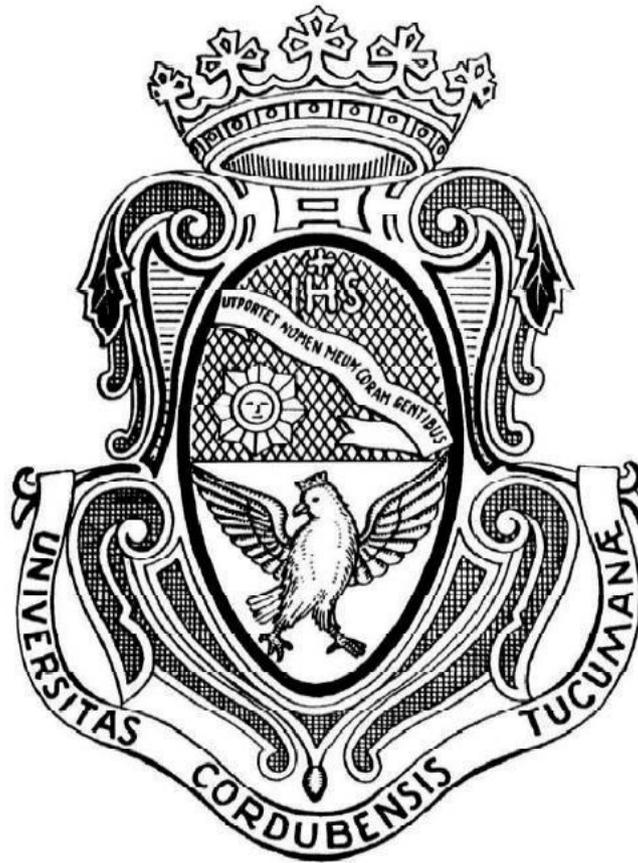


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES



PRÁCTICA SUPERVISADA

Ingeniería Ambiental

Estudios de Obras de Captación, Conducción y Desagüe de una Presa

Agostina Belén Britos

Tutor: Dr. Ing. Teresa Reyna

Supervisor externo: Ing. Fernanda Funes

Lugar: CEAS S.A.

2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, por acompañarme e impulsarme a siempre ir por más, y enseñarme que con esfuerzo y dedicación se logran los proyectos.

Gracias a los profesores que me han formado a lo largo de estos años, especialmente a los que llevan consigo la vocación de enseñar, y que contagian el entusiasmo de la profesión que han elegido.

Agradezco profundamente al equipo de CEAS S.A. que abrió sus puertas cálidamente y me permitió adentrarme en la vida profesional y conocer el trabajo en equipo de todos los días.

Y muchas gracias a las personas incondicionales que me regaló la FCEFyN, con los que compartí horas de estudio y de alegría, y con los que nos fuimos empujando para no dar brazo a torcer.

Estudios de Obras de Captación, Conducción y Desagüe de una Presa

Resumen

Las presas constituyen un elemento fundamental en el desarrollo de los centros poblados desde tiempos remotos, debido a que permiten acceder al agua en temporadas de estiaje, y proteger de crecidas durante épocas estivales a las poblaciones aguas abajo. Es por ello que los embalses generados pueden cumplir múltiples funciones tales como la de proveer agua para consumo y riego de cultivos, laminar crecidas, generar energía eléctrica, permitir desarrollar actividades de recreación y esparcimiento generando un espacio en donde se puede practicar tanto deportes como también la pesca.

Con el crecimiento de los ya existentes y el surgimiento de las nuevas poblaciones, sumado al cambio climático y cambios en el uso de suelo, se hace imperativo garantizar el acceso a agua potable y energía eléctrica, así como también protección ante eventuales inundaciones. Es por ello, que a lo largo de este informe se analiza el proyecto de la Presa La Herradura, en la provincia de Catamarca, en su función de generadora de energía. Se estudió el sitio de implantación de la central hidroeléctrica, analizando dos alternativas principales, para luego, definir las dimensiones de la sala de máquinas. Se realizó el despiece de los elementos que constituyen el circuito, considerando desde la obra de toma en la presa, la conducción y llegada del agua a la sala de máquinas, donde finalmente es restituida al cauce del río. Además, se determinaron las pérdidas de carga que implica el sistema planteado, pudiendo determinar la altura aprovechable por la turbina para la generación de energía.

ÍNDICE

1	MARCO DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	8
1.1	Introducción.....	8
1.2	Ámbito del desarrollo de la práctica supervisada	8
1.3	Objetivos de la práctica supervisada.....	9
1.4	Actividades desarrolladas durante la práctica supervisada.....	9
2	MARCO TEÓRICO	9
2.1	Introducción.....	9
2.2	Mercado eléctrico.....	10
2.3	Energía Hidroeléctrica	11
2.4	Tipos de aprovechamientos	14
2.4.1	De tipo fluyente	14
2.4.2	De Regulación	15
2.5	Obras de salida/ Órganos de desagüe.....	16
2.5.1	General	16
2.5.2	Obra de toma	17
2.5.3	Tuberías forzadas.....	20
2.6	Generación de energía eléctrica	22
2.6.1	Turbina hidráulica	22
2.7	Diseño Hidráulico.....	28
2.7.1	Flujo a Presión en conductos de salida.....	28
2.8	Tipos de centrales hidroeléctricas.....	38
2.8.1	Presa-Central:.....	39
2.8.2	Centrales de pie de presa.....	39
2.8.3	Centrales separadas de la presa.....	39
2.8.4	Tipos especiales: sistemas combinado hidráulico	39
2.9	Diseño de la central hidroeléctrica	40
2.9.1	Disposición general.....	40
2.9.2	Elementos de la central	42
2.9.3	Restitución al río	43
3	CASO DE ESTUDIO	44
3.1	Área de estudio.....	44
3.2	Ubicación Presa	47
3.3	Cuenca.....	48
3.4	Descripción general del aprovechamiento hidroeléctrico	48
3.4.1	Introducción.....	48
3.4.2	Resumen de los Parámetros de La Presa	48
3.4.3	Caudales de la presa.....	50
3.5	Estudios de hidrogeneración	53

3.5.1	Caudal	54
3.5.2	Salto hidráulico	55
3.5.3	Potencia instalada.....	55
3.6	Ubicación de sala de máquinas.....	57
3.7	Obra de toma	59
3.8	Diseño de casa de máquinas	61
3.8.1	Manifold y dimensionamiento de la central	65
3.9	Restitución al río - contradique.....	70
3.10	Pérdidas de Energía	70
3.10.1	Pérdidas en rejas	74
3.10.2	Pérdidas en entrada.....	74
3.10.3	Pérdida en codo 24°	75
3.10.4	Pérdidas en válvula mariposa VM.....	75
3.10.1	Pérdidas en cruces	75
3.10.2	Pérdidas en codo 90°.....	76
3.10.3	Pérdidas por contracción	76
3.10.4	Pérdidas por fricción	77
3.11	Descargadores de fondo.....	78
4	CONCLUSIONES	79
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
6	ANEXO	82

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	COMPORTAMIENTO DEMANDA ELÉCTRICA SADI. RECUPERADO DE HTTPS://UCEMA.EDU.AR/CONFERENCIAS/DOWNLOAD/2018/09.05ER.PDF	10
FIGURA 2.	DESPACHO TÍPICO SEMANAL DE UN SISTEMA HIDROTÉRMICO. RECUPERADO DE HTTPS://UCEMA.EDU.AR/CONFERENCIAS/DOWNLOAD/2018/09.05ER.PDF	11
FIGURA 3.	CICLO HIDROLÓGICO. (GULLIVER & ARNDT, 1991).	12
FIGURA 4.	PARTES DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA. RECUPERADO DE HTTPS://CELENDINLIBRE.FILES.WORDPRESS.COM/2012/03/PARTES-CENTRAL-HIDROELECTRI.JPG	14
FIGURA 5.	APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO DE TIPO FLUYENTE. (INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA, 2006)	15
FIGURA 6.	APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO DE REGULACIÓN. (INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA, 2006)	15
FIGURA 7.	INSTALACIONES DE ÓRGANOS DE DESAGÜE TÍPICOS EN PRESAS DE Hº. RECUPERADO DE HTTPS://INGEOEXPERT.COM/ARTICULO/SISTEMA-HIDRAULICO-PRESAS-CONSIDERACIONES-GENERALES/	16
FIGURA 8.	PRESA CON TOMA LATERAL. CFE, 1991.....	18
FIGURA 9.	PRESA DE FÁBRICA CON TOMA SOBRE PARAMENTO MOJADO. (BUREAU OF RECLAMATION, 1987)	18
FIGURA 10.	ELEMENTOS PRINCIPALES DE UN APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO. (CUESTA & VALLARINO, 2000).....	19
FIGURA 11.	DISEÑO TÍPICO PARA OBRA DE TOMA DE MEDIA Y ALTA CARGA SEGÚN USBR. (NIGAM, 1979)	20

FIGURA 12. CONEXIÓN DIRECTA DE LAS TUBERÍAS. (NIGAM, 1979).....	21
FIGURA 13. CONEXIÓN LATERAL DE LAS TUBERÍAS. (NIGAM, 1979)	21
FIGURA 14. ESQUEMA CONCEPTUAL DE UNA TURBINA HIDRÁULICA.	22
FIGURA 15. ESQUEMA DE UNA TURBINA PELTON. (POTTER, WIGGERT, & RAMADAN, 2015).....	23
FIGURA 16. ESQUEMA DE TURBINA FRANCIS. 1. CARCASA, 2. DISTRIBUIDOR, 3. RODETE, 4. CODO DE TUBO DE ASPIRACIÓN, 5. NIVEL INFERIOR DEL SALTO, S. SECCIÓN DE SALIDA DE LA TURBINA. (MATAIX, 1986)	23
FIGURA 17. ESQUEMA DE DETALLE DE TURBINA FRANCIS. (POTTER, WIGGERT, & RAMADAN, 2015).....	24
FIGURA 18. VELOCIDADES ESPECÍFICAS PARA DIFERENTES TURBINAS. HTTPS://WWW.CIVILEXCEL.COM/2012/07/DIMENSIONAMIENTO-DE-TURBINAS.HTML	25
FIGURA 19 RANGO DE UTILIZACIÓN DE LAS DISTINTAS TURBINAS EN FUNCIÓN DEL CAUDAL Q Y ALTURA H (INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA, 2006).....	26
FIGURA 20. PÉRDIDAS DE CARGA EN CONDUCTOS A PRESIÓN. (BUREA OF SMALL DAMS)	29
FIGURA 21. INSTALACIÓN DE UNA TURBINA. (ORTÍZ FLORES, 2011).....	30
FIGURA 22. DIAGRAMA DE MOODY	31
FIGURA 23. COEFICIENTE QUE TOMA EN CUENTA LA FORMA DE LAS BARRAS. (NIGAM, 1979).....	32
FIGURA 24. COEFICIENTE DE PÉRDIDA EN SECCIONES CIRCULARES ($RE = 106$) SEGÚN MILLER.	34
FIGURA 25. COEFICIENTES DE PÉRDIDA PARA DISTINTOS ÁNGULOS DE CURVA SEGÚN MILLER.....	34
FIGURA 26 ÁNGULO DE CONVERGENCIA. RECUPERADO DE: HTTPS://WWW.REDALYC.ORG/JOURNAL/5722/572261762007/MOVI/	35
FIGURA 27. COEFICIENTES DE PÉRDIDAS PARA BIFURCACIONES EN Y SIMÉTRICAS CON ÁNGULO B. (ORTÍZ FLORES, 2011).....	36
FIGURA 28. COEFICIENTES DE PÉRDIDAS PARA BIFURCACIONES ASIMÉTRICAS CON ÁNGULO B. (ORTÍZ FLORES, 2011)	36
FIGURA 29. COEFICIENTE DE PÉRDIDAS EN CRUCE KX PARA RAMAL PERPENDICULAR AL DE ALIMENTACIÓN. (MILLER, 1990)	37
FIGURA 30. COEFICIENTE DE PÉRDIDAS EN CRUCE KX PARA RAMAL ALINEADO CON EL DE ALIMENTACIÓN. (MILLER, 1990)	37
FIGURA 31. SECCIÓN DE LA PRESA IVAILOVGRAD Y SU CENTRAL BAJO EL VERTEDERO.....	40
FIGURA 32. PRESA IVAYLOVGRAD. [FOTOGRAFÍA]. RECUPERADO DE: HTTPS://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/IVAYLOVGRAD_DAM#/MEDIA/FILE:IVAYLOVGRAD-DAM-WALL.JPG	40
FIGURA 33. DISEÑO DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON TURBINA FRANCIS HORIZONTAL. (NIGAM, 1979)	41
FIGURA 34. TURBINA FRANCIS HORIZONTAL. [IMAGEN] RECUPERADO DE: HTTPS://WWW.HYDROALP.COM/ES/TURBINAS-FRANCIS/	42
FIGURA 35. ESQUEMA DE CONJUNTO TURBINA-ALTERNADOR. [IMAGEN] RECUPERADO DE: HTTP://TECNOLOGIASDONPELAYOTERCERO.BLOGSPOT.COM/2013/05/FUNCIONAMIENTO-DE-UN-SISTEMA-TURBINA.HTML	42
FIGURA 36. LOCALIDAD DE LAS JUNTAS DEPARTAMENTO DE AMBATO, PROVINCIA DE CATAMARCA HTTPS://WWW.IGN.GOB.AR/IMAGES/MAPASWEB/CATAMARCA/CATAMARCA-POLITICO-WEB.JPG	45
FIGURA 37. PUENTE SOBRE RÍO LAS TRANCAS, LAS JUNTAS. [FOTOGRAFÍA]. RECUPERADO DE: HTTPS://TWITTER.COM/CATAMARCAGOB/STATUS/1364198331702906882/PHOTO/3	46
FIGURA 38. ZONA ALEDAÑA AL PUENTE Y VADO SOBRE EL RÍO LAS TRANCAS. [FOTOGRAFÍA].....	46
FIGURA 39. ZONA DE LAS JUNTAS. [FOTOGRAFÍA] (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021)	47
FIGURA 40. UBICACIÓN DE CIERRE. [IMAGEN SATELITAL]	48
FIGURA 41 .CORTE DE LA PRESA DE ACUERDO CON LOS ESTUDIOS PRELIMINARES.....	49
FIGURA 42. CIERRE EN SECTOR DE LA PRESA. [FOTOGRAFÍA] (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021)	52
FIGURA 43. VISTA DEL VASO DESDE SECTOR DEL CIERRE DE LA PRESA. [FOTOGRAFÍA] (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021).....	52
FIGURA 44. VISTA DEL CAUCE SECTOR DE LA PRESA. [FOTOGRAFÍA] (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021)	53
FIGURA 45. CUENCA EMBALSE LAS PIRQUITAS (FUENTE: ING. BACCHIEGA, 2021)	55
FIGURA 46. SIMULACIÓN BIANUAL DE GENERACIÓN. (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021)	56

FIGURA 47. SIMULACIÓN BIANUAL DEL INGRESO Y VERTIDO SOBRE EL VERTEDERO PRESA LA HERRADURA. (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021)	57
FIGURA 48. TERRAPLÉN A COTA 1388 MSNM. TALUDES DE CORTE Y RELLENO.	58
FIGURA 49. ZONAS DE RELLENO Y CORTE.	58
FIGURA 50. TIPO DE PLANCHUELA A UTILIZAR PARA LAS REJAS. RECUPERADO DE: HTTPS://WWW.GRAMABI.COM.AR	59
FIGURA 51. COMPUERTA STOP LOG INSTALADA MONTADA EN MURO. [IMAGEN] RECUPERADA DE: HTTPS://WWW.CMOVALVES.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2016/12/CATALOGO-SERIE-AT-REV-00- 00-_CARACTER%C3%ADSTICAS.PDF	59
FIGURA 52. COMPUERTAS STOP LOG MONTADAS SOBRE MURO EN OBRA DE TOMA. [FOTOGRAFÍA] RECUPERADO DE: HTTPS://UPLOAD.WIKIMEDIA.ORG/WIKIPEDIA/COMMONS/0/04/DOBRA_STAUSEE_DAMMBALKEN .JPG	60
FIGURA 53. TOMA DE LA CENTRAL DE SONG LOU-LOU. DONDE A Y B SON GRÚAS, C RANURA PARA EL ALMACENAMIENTO DE LAS ATAGUÍAS, F REJAS, G GALERÍAS DE DRENAJE, H TUBERÍA DE PRESIÓN, I COMPUERTA DE VAGÓN, J SALA DE CONTROL Y K GALERÍA DE CABLES. (CUESTA & VALLARINO, 2000)	60
FIGURA 54. TRANSICIÓN DEL TIPO ENTRADA CIRCULAR ACAMPANADA.	61
FIGURA 55. DIMENSIONES DEL ROTOR DE TURBINA FRANCIS. (DE SIERVO & DE LEVA, 1976)	63
FIGURA 56. DIMENSIONES DE LA CARCASA DE TURBINA FRANCIS. (DE SIERVO & DE LEVA, 1976)	64
FIGURA 57. DIMENSIONES DE TUBO DE DESFOGUE DE TURBINA FRANCIS. (DE SIERVO & DE LEVA, 1976)	65
FIGURA 58. DIMENSIONES DE TURBINA FRANCIS.	65
FIGURA 59. PIEZAS UTILIZADAS EN EL MANIFOLD DE LA CENTRAL DE LA PRESA “LA HERRADURA”	67
FIGURA 60. VISTA EN PLANTA DE LA CENTRAL DE LA PRESA “LA HERRADURA”.	68
FIGURA 61. VISTA A-A DE LA SALA DE MÁQUINAS DE LA PRESA “LA HERRADURA”	69
FIGURA 62. VISTA B-B DE LA SALA DE MÁQUINAS DE LA PRESA “LA HERRADURA”	69
FIGURA 63. RESTITUCIÓN AL CAUCE DEL RÍO DE AGUA TURBINADA. PRESA “LA HERRADURA”.	70
FIGURA 64. ESQUEMA DE ENERGÍA A LO LARGO DE OBRA DE TOMA, CONDUCCIÓN Y RESTITUCIÓN AL CAUCE DE RÍO, EN CENTRAL HIDROELÉCTRICA. (ORTÍZ FLORES, 2011).	71
FIGURA 65. ESQUEMA DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO.	71
FIGURA 66. ESQUEMA DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN TUBERÍAS EN PARALELO. [IMAGEN] RECUPERADO DE: HTTPS://IETRESEARCH.ONLINELIBRARY.WILEY.COM/DOI/FULL/10.1049/IET-RPG.2018.6123 .	73
FIGURA 67. ESQUEMA DE SALA DE MÁQUINAS DE PRESA “LA HERRADURA”. RAMAL 1 Y 2.	73
FIGURA 68. CRUCE EN TUBERÍAS.	75
FIGURA 69. VISTA EN CORTE DE LA PRESA, DETALLE DE LOS DESCARGADORES DE FONDO.	79

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. COEFICIENTES DE DESCARGA Y PÉRDIDA PARA CONDUCTOS DE ENTRADA. (BUREAU OF RECLAMATION, 1987)	33
TABLA 2. COEFICIENTE DE PÉRDIDA POR REDUCCIÓN GRADUAL DE ÁNGULO θ , SEGÚN KISIELIEV. (SOTELO, 1994)	35
TABLA 3. GENERACIÓN DETERMINADA EN LOS ESTUDIOS BÁSICOS. (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021)	50
TABLA 4. PARÁMETROS DE LA PRESA LA HERRADURA. (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021)	50
TABLA 5. CURVA COTA – VOLUMEN. (GCIS - CONSORCIO DE COOPERACIÓN, 2021)	51
TABLA 6. REFERENCIAS DE LAS PIEZAS DEL MANIFOLD DE LA CENTRAL DE PRESA “LA HERRADURA”.	68
TABLA 7. PÉRDIDAS DE CARGA DEL CASO DE ESTUDIO.	78

1 MARCO DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

1.1 INTRODUCCIÓN

Los diques y sus obras anexas con fines multipropósito incluyen diversas funciones entre ellas el uso de agua para riego, agua para consumo humano, producción hidroeléctrica, control de inundaciones, uso recreacional y retención de sedimentos. Para cumplir con las diversas funciones es necesario además de la obra principal de cierre el diseño de obras que permitan cumplir con la descarga de los caudales en forma segura de manera de por cumplir las funciones de hidroelectricidad, evacuación de crecidas, obras de captación, etc.

A lo largo del informe se analiza la obra de toma, conducción hasta la central y restitución al cauce del río del caudal turbinado de la central hidroeléctrica perteneciente a la presa La Herradura, la cual se encuentra en etapa de proyecto.

En primera instancia, se realiza una revisión bibliográfica de los antecedentes más significativos para el caso en particular, teniendo en cuenta diseño hidráulico, generación de energía eléctrica, y elementos como obra de toma y casa de máquinas, tuberías forzadas, entre otros. Luego de ello, se desarrolla el caso de estudio y lo trabajado durante el desarrollo de la Práctica Supervisada. En esta instancia se busca implantar y dimensionar la sala de máquinas que alberga a 3 turbinas Francis de eje horizontal, considerando la factibilidad técnica y económica, y las pérdidas de carga que implican las diferentes alternativas.

En lo que se refiere a la estructuración de los capítulos, en Mercado eléctrico se desarrollan los principios que condicionan la generación de energía eléctrica de manera general, resaltando la implicancia de las centrales hidroeléctricas de punta y semipunta y el rol de las energías renovables dentro de las curvas de carga.

Luego, en el capítulo Energía Hidroeléctrica, se repasan los conceptos básicos de la generación hidroeléctrica, tales como caudal, salto disponible y potencia generada. Adicionalmente, se describen brevemente los tipos de aprovechamientos hidroeléctricos, principalmente los de regulación, incluyendo los elementos que los constituyen. Se hace énfasis en el estudio de obras de toma que impliquen tuberías forzadas en la conducción del caudal desde el embalse hasta la central hidroeléctrica. Además, las presas de mayor consideración en el desarrollo son las de fábrica u hormigón. Posteriormente se trata el diseño hidráulico con sus pérdidas de carga asociadas a los diversos elementos y accesorios que se encuentran en el recorrido del agua a través de la tubería a presión.

Luego se describen los tipos de turbinas utilizadas en las centrales hidroeléctricas, desarrollando la turbina Francis con mayor detalle que es la máquina que se seleccionó para este aprovechamiento. Además, se expone la sala de máquinas, los elementos que la constituyen y las disposiciones generales que suelen tomar. La descripción se centra en centrales con equipos horizontales.

Finalmente, se describe el caso de estudio, describiendo la forma de trabajo y los principales productos obtenidos, ya sea en el diseño de la central como en el cálculo de las pérdidas de energía involucradas.

1.2 ÁMBITO DEL DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

El presente trabajo corresponde a la asignatura Práctica Supervisada (PS) de la carrera de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. La práctica supervisada fue realizada en la

consultora CEAS S.A., ubicada en la ciudad de Córdoba, y tuvo lugar presencialmente desde el mes de febrero a abril de 2022.

1.3 OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

Los objetivos generales de las prácticas supervisadas se expresan a continuación:

- Brindar al estudiante la experiencia práctica complementaria en la formación elegida, para su inserción en el ejercicio de la profesión.
- Facilitar el contacto del estudiante con instituciones, empresas públicas o privadas o profesionales que se desempeñan en el ámbito de los estudios de la disciplina que realizan.
- Introducir en forma práctica al alumno en los métodos reales y códigos relativos a las organizaciones laborales.
- Ofrecer al estudiante y profesores experiencias y posibilidades de contacto con nuevas tecnologías.
- Contribuir con la tarea de orientación del alumno respecto a su ejercicio mutuo.
- Redactar Informes Técnicos convenientemente fundamentados acerca de la práctica propuesta y los resultados de su realización.

En relación con las metas planteadas en esta Práctica se mencionan a continuación las que se pretenden alcanzar durante este trabajo:

- Estudiar la implantación de la sala de máquinas de un aprovechamiento hidráulico multipropósito.
- Dimensionar la sala de máquinas con sus principales componentes.
- Diseñar la obra de toma, conducción, ingreso a las turbinas y restitución al río del caudal turbinado.
- Determinar las pérdidas de energía ocurridas a lo largo del sistema.

1.4 ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

Respecto a las actividades desarrolladas durante la práctica supervisada las mismas fueron las siguientes:

- Estudio de antecedentes y revisión bibliográfica.
- Análisis de alternativas de la implantación de sala de máquinas.
- Diseño de la sala de máquinas y manifold asociado.
- Determinación de las pérdidas de energía.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

Para comprender el funcionamiento de una central hidroeléctrica es preciso estudiar los elementos necesarios para este fin. Se debe estudiar entonces, no sólo la generación hidroeléctrica en función de los caudales, altura disponible y potencia generada, sino también el contexto en el que se encuentra enmarcada la generación, con el funcionamiento del mercado eléctrico y el análisis de los elementos que componen a la presa y a la obra de toma, los cuales se ven influenciados por la geografía del sitio en el que se encuentra emplazada la presa.

Un aprovechamiento hidroeléctrico busca formar parte de una matriz energética o resolver los problemas eléctricos o colaborar en su solución para una generación distribuida.

2.2 MERCADO ELÉCTRICO

El mercado eléctrico se compone por dos elementos principales, la demanda de energía eléctrica y la oferta generada por diversos tipos de fuentes. La generación de energía debe acompañar en todo momento a la demanda, la cual presenta variaciones diarias, mensuales y estacionales, dependiendo del lugar geográfico del que se trate. Además, la producción de energía debe cumplir con los valores de frecuencia, voltaje y continuidad del suministro eléctrico (Cuesta & Vallarino, 2000).

En las curvas de carga, en las cuales se representa la demanda de energía eléctrica, se observan las variaciones de consumo antes mencionadas, que pueden darse por factores climáticos y estacionales (temperatura, precipitaciones, etc.), culturales, según días de la semana y días festivos o de receso, factores económicos, entre otros. En la Figura 1, se observa la diferencia en la demanda debido a factores climáticos principalmente, siendo la demanda en el mes de enero (verano) superior a la de invierno.

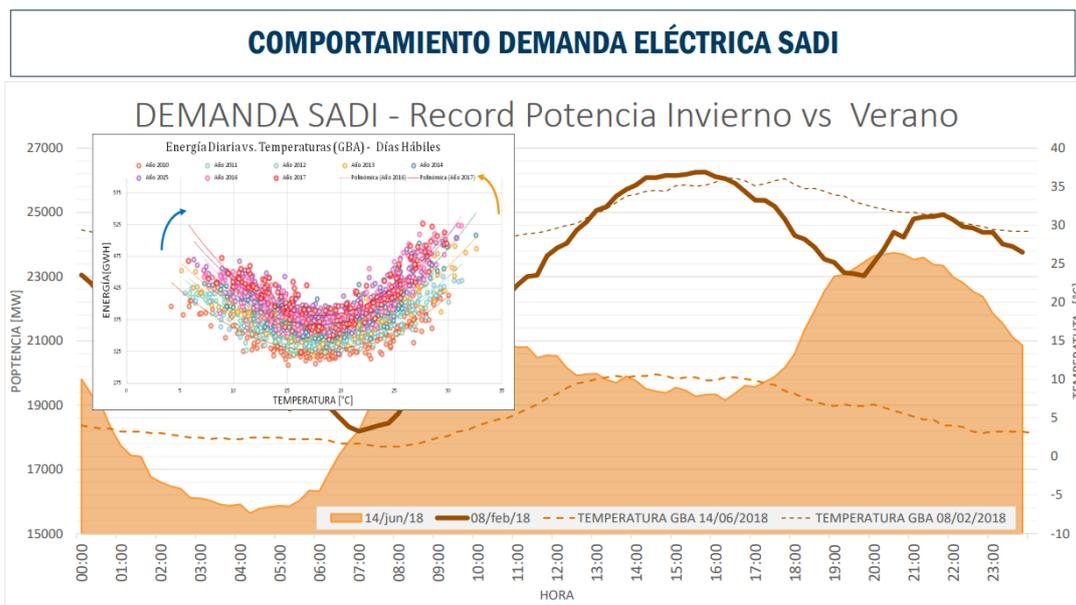


Figura 1. Comportamiento Demanda Eléctrica SADI. Recuperado de <https://ucema.edu.ar/conferencias/download/2018/09.05ER.pdf>

De manera general, este tipo de gráficos de demanda energética presentan picos y valles, pudiéndose reconocer tres zonas principales: base, semi punta y punta. Esto se puede observar en Figura 2. Despacho típico semanal de un sistema hidrotérmico. Recuperado de <https://ucema.edu.ar/conferencias/download/2018/09.05ER.pdf>.

Diversas centrales eléctricas suplen las distintas demandas de un sistema. Las centrales térmicas, nucleares e hidráulicas de pasada cubren generalmente la base de la demanda, debido a que son sistemas menos flexibles, que requieren de un cierto tiempo para ponerse en marcha y no pueden ser paradas fácilmente. Mientras que, las centrales hidroeléctricas de regulación y de bombeo, y otras centrales térmicas son

accionadas para cubrir la demanda de punta y semipunta, esto es debido a su flexibilidad de arranque y posibilidad de adaptación rápida a los cambios de demanda.

Se observa de ejemplo el caso argentino, en el cual se cubre la demanda base mediante térmica e hidráulica de base y nuclear, mientras que la punta se cubre con térmica e hidráulica de punta e importaciones de energía.

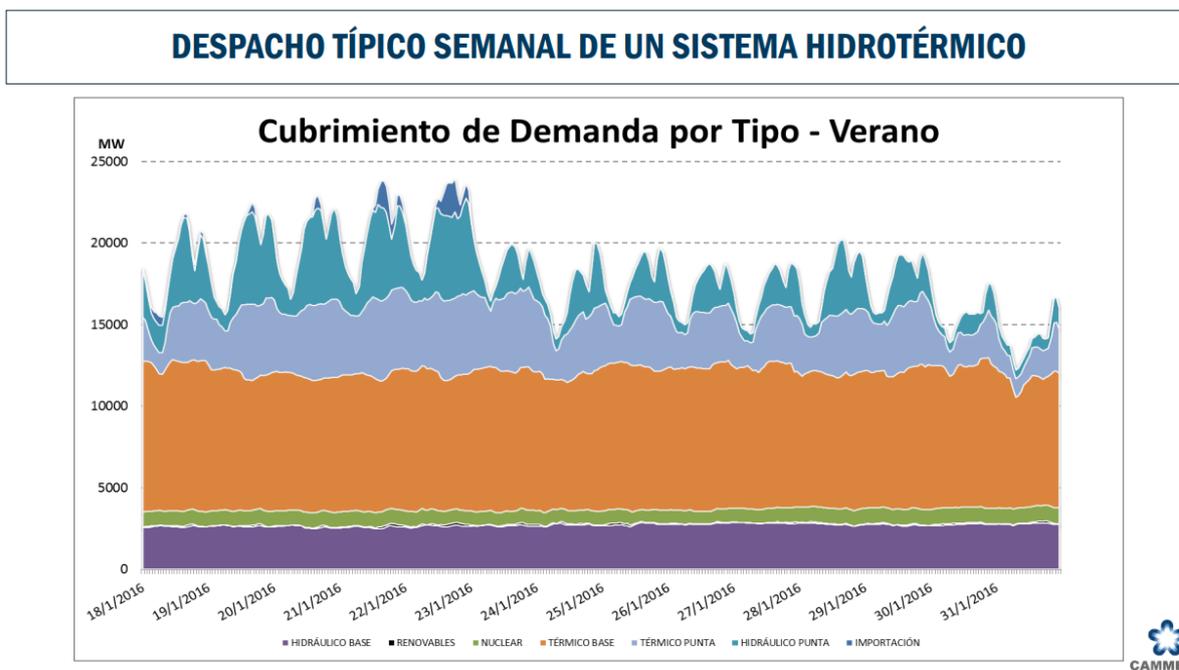


Figura 2. Despacho típico semanal de un sistema hidrotérmico. Recuperado de <https://ucema.edu.ar/conferencias/download/2018/09.05ER.pdf>

2.3 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

La energía hidroeléctrica es aquella que se obtiene al aprovechar la energía potencial y cinética del agua. Puede ser a partir de agua que se encuentra a una elevación determinada respecto a un nivel de referencia, así como también de agua que fluye a determinada velocidad. Este tipo de energía proviene indirectamente del sol, ya que la energía solar produce la evaporación del agua, la cual retorna a cotas mayores de la superficie terrestre al precipitar (lluvia, nieve, etc.). (José A. C. González, et al, 2009).

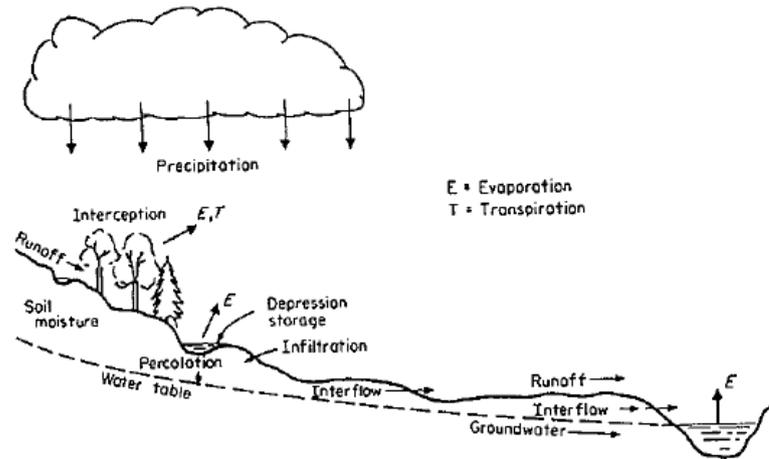


Figura 3. Ciclo Hidrológico. (Gulliver & Arndt, 1991).

A partir de una diferencia de cotas existentes en el cauce de un río, se puede generar electricidad. Para poder aprovechar la energía que existe en un tramo de río, se busca minimizar la pérdida de energía en forma de calor y de erosión que se da naturalmente en el cauce. Por ello, se busca implementar una conducción artificial como lo es un canal o una tubería, así como también aumentar la sección mojada, generando un remanso, con lo que disminuye la velocidad y, por lo tanto, las pérdidas de energía. (Cuesta & Vallarino, 2000)

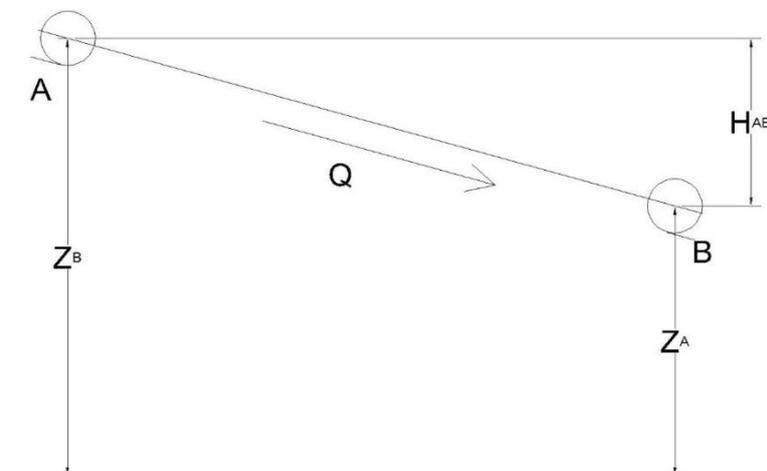


Figura 4. Diferencia de potencial entre dos puntos.

Se plantea la ecuación de Bernoulli entre dos puntos A y B, de forma de determinar la energía específica disponible en un tramo de río, siendo z el nivel respecto un plano de referencia, p la presión en ese punto, v la velocidad media del agua, ρ la densidad del agua, g la gravedad. El primer término representa la energía potencial en función del plano de referencia; la altura de presión, representada en el segundo término indica la energía potencial en presión, mientras que el último término, altura de velocidad, representa la energía cinética de la sección. (Cuesta & Vallarino, 2000)

$$e_{AB} = (z_A - z_B) + \frac{(p_A - p_B)}{\rho \cdot g} + \frac{(\alpha_A v_A^2 - \alpha_B v_B^2)}{2 \cdot g}$$

Ecuación 1. Ecuación de Bernoulli entre dos puntos A y B.

En la ecuación de Bernoulli planteada, el segundo término puede anularse ya que ambas presiones son la atmosférica, mientras que, para un cálculo aproximado de la energía, se puede despreciar el término de la altura de carga. De esta forma, se obtiene el salto bruto, que es igual al desnivel entre el punto A y B.

$$e_{AB} = (z_A - z_B) = H_{AB}$$

Ecuación 2. Salto Bruto

Multiplicando el término anterior por el peso de la masa de agua que circula en un tiempo t , se obtiene la energía total y la potencia bruta, siendo la máxima obtenible, ya que luego se ve disminuida por las eficiencias del sistema y las pérdidas de energía a lo largo de la conducción. Se define a Q como el caudal que circula entre esos dos puntos.

Energía total:

$$E_{AB} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{AB} \cdot t$$

Ecuación 3. Energía total

Potencia bruta:

$$P_{AB} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{AB}$$

Ecuación 4. Potencia Bruta

En una central hidroeléctrica, dos características del agua que fluye son aprovechadas: la cantidad de agua de la que se trate (caudal) y el salto o caída que atraviesa (altura). Por lo tanto, la ecuación de potencia depende del caudal, altura disponible y eficiencia del equipo (Nigam, 1979).

Para disminuir las pérdidas de energía en los aprovechamientos, se aplican los mecanismos previamente nombrados, generándose en muchos casos, un embalse que permita almacenar agua manteniendo el desnivel. La energía potencial debido a este desnivel pasa a ser energía cinética al comenzar a moverse a través de las conducciones, y se transforma en energía mecánica en las turbinas. Luego, gracias al generador asociado al sistema, se convierte la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Finalmente, se transmite y distribuye mediante la red eléctrica a los distintos puntos.

En un aprovechamiento hidroeléctrico se cuenta con los principales elementos:

- Presa: es la estructura implementada sobre el cauce natural del río para generar el embalse aguas arriba de la misma.

- Toma: Permite el paso del agua desde el embalse hasta la conducción. Puede estar equipada con elementos de control y protección tales como compuertas, ataguías, rejas y limpiarrejas.
- Conducción: transporta el agua hasta la central. La conducción puede ser abierta (canal) o cerrada (tubería forzada).
- Central: edificio en el cual se encuentran las turbinas y demás equipos
- Equipo electromecánico de generación: conjunto de turbina-generator y demás elementos que permiten transformar la energía cinética en energía mecánica y finalmente, en eléctrica.
- Red eléctrica: Permite el transporte de la energía eléctrica generada.

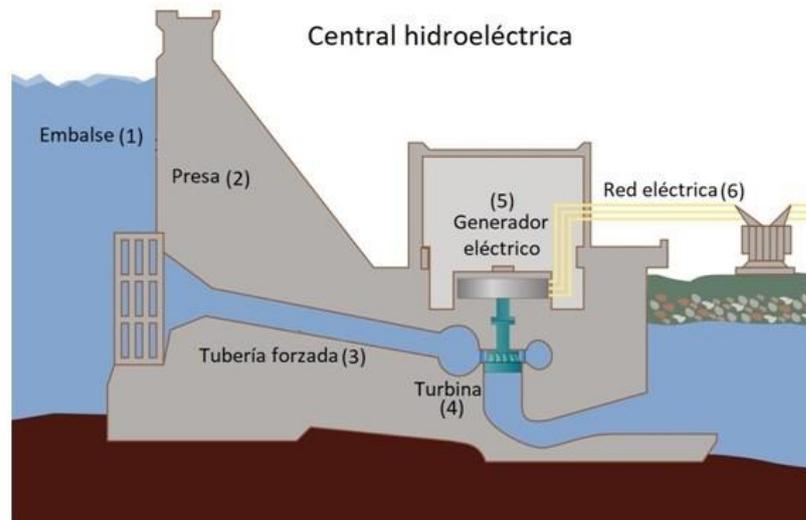


Figura 4. Partes de una central Hidroeléctrica. Recuperado de <https://celendinlibre.files.wordpress.com/2012/03/partes-central-hidroelectri.jpg>

2.4 TIPOS DE APROVECHAMIENTOS

Se pueden clasificar los aprovechamientos según el procedimiento operativo del embalse como aprovechamientos de tipo fluyente y con regulación.

2.4.1 De tipo fluyente

Las centrales de tipo fluyente captan parte del caudal del río, lo conducen a la central a través de un canal o tubería, luego este se turbinan y restituye al cauce natural. Generalmente, previo a la sala de máquinas o central, se encuentra la cámara de carga, en donde se proporciona el volumen operativo necesario para turbinar.

Estas centrales no tienen la capacidad de regular el caudal turbinado, pero presentan un salto o desnivel constante, debido a que se mantiene la diferencia de cota entre la cámara de carga y la sala de máquinas (Cuesta & Vallarino, 2000).



Figura 5. Aprovechamiento hidroeléctrico de tipo fluyente. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006)

2.4.2 De Regulación

En este tipo de aprovechamiento se genera un embalse y se coloca una central aguas abajo, pudiendo ser al pie de la presa o lejos de ella. Se utilizan generalmente tuberías forzadas para conducir el agua desde el embalse hasta la turbina en todo el tramo o en conjunto con canales o túneles. Con este aprovechamiento se logra aumentar el caudal turbinado al almacenar el caudal fluyente en época de aguas altas o cuando no es requerido generar energía. Operan con un nivel de embalse y caudal variables dentro de valores extremos característicos.

Aquellos aprovechamientos que presentan una conducción a presión logran obtener mayor desnivel al llevar el edificio de la central a un lugar más conveniente. A su vez, se consigue regular el caudal turbinado, pudiendo aumentar la calidad y cantidad de energía generada.

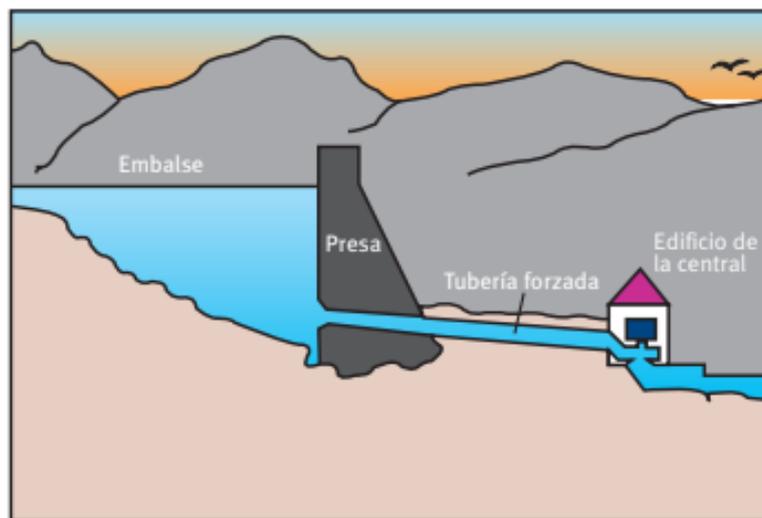


Figura 6. Aprovechamiento hidroeléctrico de regulación. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006)

2.5 OBRAS DE SALIDA/ ÓRGANOS DE DESAGÜE

2.5.1 General

Respecto a lo analizado en Bureau of Reclamation (1987), dentro de los elementos que se encuentran en una presa, están las obras de salida, las cuales permiten la regulación o liberación del agua contenida por la presa. La descarga puede darse dentro de un río, dentro de un canal, o mediante un conducto a presión.

Se los clasifica según su operación hidráulica, si utilizan o no compuertas, según si se trata de un conducto cerrado, que fluye a presión total o parte de su recorrido, o si fluye a flujo libre.

Las obras de salida cumplen funciones variadas, ya sea de tipo ambiental, manteniendo el caudal ecológico aguas abajo de la presa, como de regulación de crecidas, evacuando agua para poder aumentar la capacidad de almacenamiento de la presa en esperas de la crecida, ya que lleva al embalse a la cota de espera. Además, pueden desviar caudal, constituyendo la obra de toma para agua potable o para turbinar en una central hidroeléctrica. Si se trata de evacuación de caudales de crecida se denominan aliviaderos, vertederos, o descargadores. Mientras que, si su función es derivar agua para un uso posterior, son llamados obras de toma.

La capacidad requerida para las obras de salida está determinada por las funciones que esta cumpla, por lo que deben considerarse las necesidades aguas abajo, el control de crecidas, el almacenamiento requerido, las necesidades de generación de energía, requerimientos legales, etc.

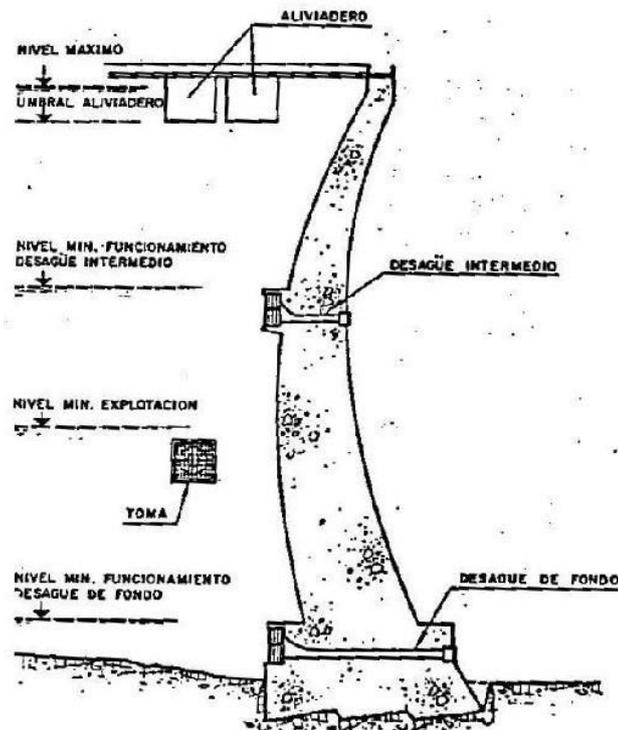


Figura 7. Instalaciones de órganos de desagüe típicos en presas de Hº.
Recuperado de <https://ingeoexpert.com/articulo/sistema-hidraulico-presas-consideraciones-generales/>

Respecto a la ubicación de las obras, la posición del umbral debe estar lo suficientemente alta como para prevenir interferencia debido a los depósitos de sedimento, pero al mismo tiempo debe estar lo suficientemente baja como para reducir el almacenamiento inactivo o muerto. No deben estar localizadas en puntos en el reservorio en el cual puedan acumularse algas o en los que los que pueda entrar basura indeseable.

A su vez, el diseño está influenciado por muchas condiciones relacionadas con los requerimientos de hidráulica, la adaptabilidad del sitio, la interrelación de las obras de salida y los procedimientos de construcción, además de aspectos topográficos y geológicos que deben atenderse.

En las presas de hormigón, se suelen utilizar conductos o tuberías que se encuentran dentro de la masa de hormigón. Las obras de toma y los dispositivos de salida deben estar anexados a los taludes aguas arriba y aguas abajo de la presa, respectivamente. Así mismo, un túnel de derivación utilizado durante la construcción de la presa puede ser convertido en una obra de salida permanente al ser provista de compuertas o conductos a través del canal.

El tipo de estructura de toma depende de la locación y función, y de los distintos accesorios, tales como pantallas para peces, rejas, etc., y de las plataformas operativas que deben ser previstas.

La conducción puede realizarse de forma a flujo libre en canales o a través de conductos cerrados. Esta última puede ser mediante túneles, cuando las condiciones de fundación y apoyo lo permiten o mediante conductos cerrados, de tipo *cut and cover conduit*, en caso contrario. Los conductos a presión deben diseñarse para resistir la presión hidrostática interna considerando la carga con la que se trabajaría con el reservorio en su capacidad máxima.

2.5.2 Obra de toma

La obra de toma es aquella estructura, dentro de los órganos de desagüe que presenta una presa, que permite derivar caudal para su uso posterior, generalmente para consumo, riego y generación de energía. Según Cuesta & Vallarino (2000), en los aprovechamientos hidroeléctricos, las mismas conectan el embalse con la central de generación, con los objetivos de:

- captar el caudal a turbinar
- evitar el ingreso de elementos que puedan perjudicar la operación de la planta.
- separar y extraer del caudal derivado los sedimentos que puedan afectar las turbinas.
- aislar la conducción del resto del embalse, para poder realizar tareas de reparación y mantenimiento.

Los elementos principales que conforman las obras de toma son los siguientes:

- Rejas: constituidas por una estructura de soporte sobre la que se encuentran pletinas de acero. Se encuentran sobre el paramento mojado y evitan el ingreso de material indeseado.
- Transición: desde la embocadura de la reja hasta la sección de conducción.
- Sección de compuertas: permiten o no el paso del agua. Son necesarias para realizar tareas de mantenimiento, preservando secciones secas.

El tipo de toma a implementar depende del tipo de presa con la que se encuentre según su constitución (presa de fábrica, materiales sueltos, etc.), y según su funcionamiento (presa de regulación o de derivación). En las presas de materiales sueltos las obras de toma son planteadas independientemente del cuerpo de la presa, debido al riesgo que implica la conducción de agua dentro de la misma, contrariamente a lo que sucede con las presas de fábrica, en donde en muchos casos la conducción es por tuberías forzadas que se encuentran atravesándola. Además, la obra de toma puede encontrarse formando parte de la presa, sobre su paramento mojado, o independiente de ésta. Dentro de este último grupo se encuentran las tomas laterales sobre los márgenes (Figura 8. Presa con toma lateral. CFE, 1991. y las torres dentro del mismo embalse.

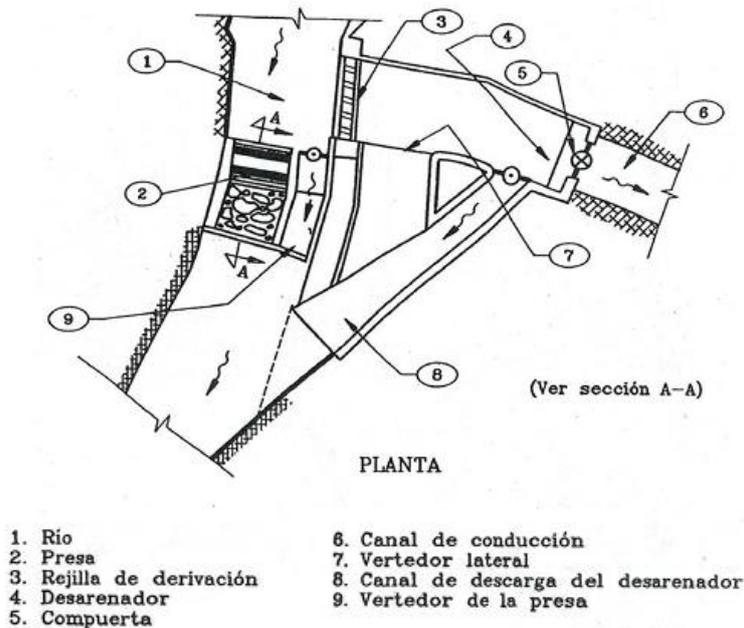


Figura 8. Presa con toma lateral. CFE, 1991.

Para las tomas situadas en el paramento de las presas, las mismas pueden tener un frente plano seguido de una transición hasta la sección de compuertas o una sección poligonal para aumentar el perímetro y la superficie de la reja.

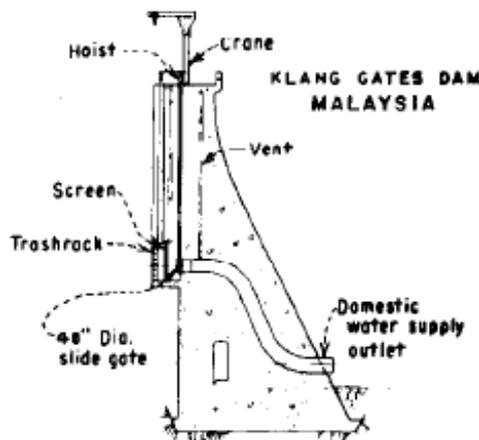


Figura 9. Presa de fábrica con toma sobre paramento mojado. (Bureau of Reclamation, 1987)

Rejas

La embocadura de la toma se dispone preferentemente de forma perpendicular al flujo para lograr un flujo de agua regular libre de remolinos/zonas muertas, cumpliendo su función de evitar el paso de elementos indeseados. Es por ello que también se limita la velocidad de entrada a través de las rejas. Se puede considerar una velocidad neta de 1 m/s, cubriendo la mayor parte de las situaciones de diseño.

El tamaño y tipo de rejas a utilizar se encuentra en función del tamaño de la conducción, el tipo de dispositivo de control, el uso posterior del agua, la necesidad de separar residuos pequeños del flujo de salida, la naturaleza de estos, entre otros (Bureau of Reclamation, 1987).

En el caso de las tomas para centrales hidroeléctricas, el espaciamiento de las rejas debe ser menor que la dimensión mínima de paso a través de las turbinas. En el caso de las turbinas Francis se consideran las dimensiones del rodete.

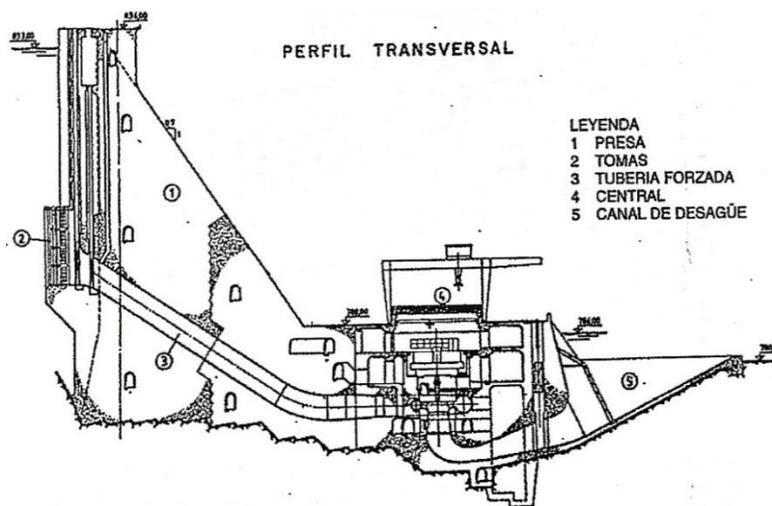


Figura 10. Elementos principales de un aprovechamiento hidroeléctrico. (Cuesta & Vallarino, 2000)

Transición

Luego de la reja, se reduce el área desde esa sección hasta la sección de compuertas o conducción, por lo que se requiere de una transición. La reducción generalmente es del orden del 70 - 80% de la sección original. A medida que disminuye la sección, aumenta la velocidad, llegando a tener velocidades cercanas a los 3-5 m/s. Si la toma se sitúa sobre el paramento paralelamente, se puede considerar una transición gradual entre la sección de entrada y la conducción; mientras que es frecuente realizar una transición brusca cuando la entrada se encuentra ubicada de forma vertical (Vallarino, 2000).

Sección de Compuertas

Las compuertas en las presas de regulación cumplen la función de aislar la conducción del embalse y poder vaciarla cuando sea requerido (mantenimiento o situaciones de emergencia). Generalmente el caudal es controlado por las turbinas en estas centrales, por lo que sólo son utilizadas las compuertas en las situaciones nombradas anteriormente.

En las tomas para centrales hidroeléctricas son utilizadas recurrentemente las compuertas de tipo stop log o ataguías, las cuales están compuestas por una placa metálica que se desliza lateralmente sobre un bastidor fijo. El accionamiento puede ser manual, neumático, eléctrico o hidráulico.

En la Figura 11. Diseño típico para obra de toma de media y alta carga según USBR. (Nigam, 1979) se observa la disposición típica para centrales con caídas medias y altas de estos tres elementos, rejas, compuertas y transición hacia la conducción. La transición que se presenta es de tipo *Bellmouth* o campana, la cual acompaña la contracción (vena contracta) producida por el agua al atravesar la sección.

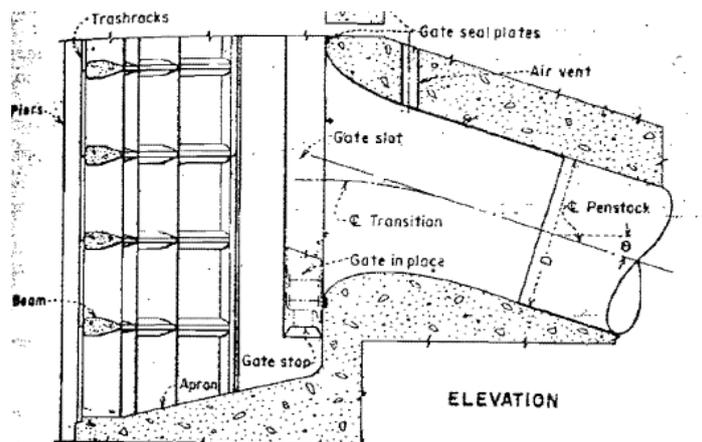


Figura 11. Diseño típico para obra de toma de media y alta carga según USBR. (Nigam, 1979)

2.5.3 Tuberías forzadas

Luego de haber ingresado por la entrada de la toma, el agua puede ser conducida hasta la central, en la totalidad del trayecto o parcialmente, mediante tuberías forzadas. En este caso, la conducción está sometida a presión, siendo creciente desde su inicio hasta la llegada a las turbinas. En algunas configuraciones, la conducción se realiza en primera instancia por medio de túneles para luego de la chimenea de equilibrio, llegar a la tubería en presión. En las tomas de derivación se suele conducir el agua hasta la cámara de carga a pelo libre, en donde pasa a la tubería forzada.

Las velocidades a través de estas tuberías son controladas, en el caso de las turbinas de reacción tales como las Francis y Kaplan, por la velocidad requerida a la entrada de la carcasa de estas. Mientras mayor sea la velocidad, mayores serán las pérdidas de energía que tengan lugar a través de la conducción y, por lo tanto, menor la potencia obtenible. Es por ello, que estas condiciones deben ser tenidas en cuenta en el momento de decidir el tamaño de las tuberías (Nigam, 1979).

Hormigón y acero son dos de los materiales que generalmente se utilizan para las tuberías. El primero para casos de aprovechamientos de baja carga, ya que no tolera importantes tensiones. Por lo tanto, es común que se utilicen tuberías de acero en aquellas conducciones de media y alta carga. Además, las tuberías de acero son ligeras, por lo que se facilita su instalación. Se vuelven más competitivas cuando de mayores diámetros se trate. Como inconveniente principal se encuentra a la corrosión que pueden sufrir, por lo que deben protegerse con revestimientos, protección catódica o utilizando aceros especiales.

Respecto a su instalación, las tuberías pueden encontrarse de forma aérea (apoyadas en silletas de acero u hormigón), enterradas (en una zanja cubierta o embebidas en

hormigón), empotradas en un macizo de hormigón (atravesando presa de fábrica), o subterráneas. En las presas de hormigón en las que las centrales se encuentran al pie de la presa, se suele optar por tomas sobre el paramento mojado de la presa y tuberías forzadas empotradas en el macizo hasta llegar a la casa de máquinas. Si esta última se encuentra aguas abajo de la presa, se opta por seguir alineaciones rectas, de forma aérea o subterránea, sobre plataformas previamente excavadas. (Cuesta & Vallarino, 2000)

Además, si el aprovechamiento cuenta con varias turbinas, se debe analizar la cantidad de tuberías a utilizar, ya que una tubería puede alimentar todas las turbinas, con una previa derivación (manifold) al llegar a la casa de máquinas, o bien, una tubería puede alimentar una única turbina. Para decidir la configuración es importante tener en cuenta tamaño de tubería y su factibilidad técnica y económica, transporte, costos y pérdidas de energía. (Nigam, 1979)

El diseño y la alineación de las tuberías depende del tipo de presa y de la ubicación de la sala de máquinas. Se tiene principalmente dos tipos de configuraciones, una en la que los ejes de las tuberías son perpendiculares al largo de la sala de máquinas (Figura 12. Conexión directa de las tuberías. (Nigam, 1979), mientras que en otra, la tubería se encuentra paralela a su largo como se muestra en la Figura 13. Conexión lateral de las tuberías. (Nigam, 1979), y en donde son necesarios accesorios tales como curvas y codos, con su consecuente pérdida de carga.

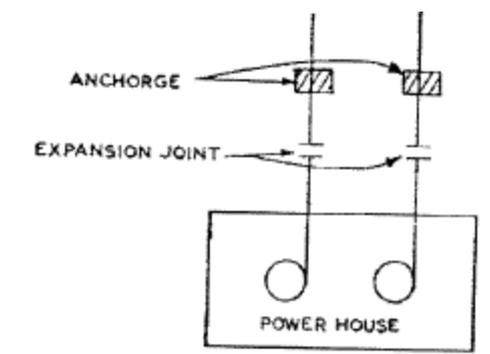


Figura 12. Conexión directa de las tuberías. (Nigam, 1979)

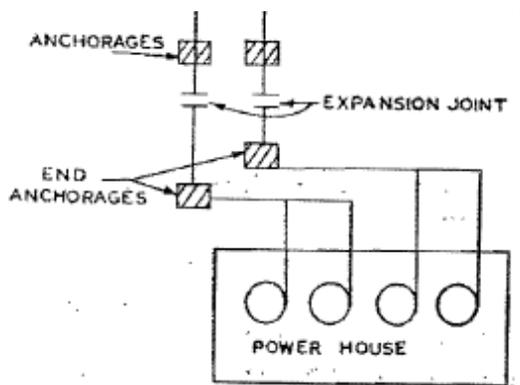


Figura 13. Conexión lateral de las tuberías. (Nigam, 1979)

Para cada caso en particular, se deben analizar las distintas variables que intervienen en la disposición de las tuberías forzadas y la sala de máquina, siendo la geografía y topografía unas de las principales limitantes.

2.6 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

2.6.1 Turbina hidráulica

La transformación de energía potencial y cinética a energía hidroeléctrica es posible gracias a las turbinas que se alojan en las centrales hidroeléctricas. Se define máquina a todo “transformador de energía” (Mataix, 1986). Por lo que una máquina hidráulica es aquella máquina de fluido en la que el fluido involucrado es agua que permanece incompresible, pudiendo considerar una densidad constante. Las turbinas son un tipo de turbomáquina hidráulica en las que el fluido transmite energía al eje de la máquina. En ellas, el órgano transmisor de energía, conocido como rodete, se mueve siempre de forma rotativa y el cambio de dirección y de valor absoluto de la velocidad son fundamentales.

En estas turbinas, la energía potencial del agua que se encuentra a desnivel es convertida en energía cinética al atravesar una conducción o un tramo del cauce del río, y para luego convertirse en energía mecánica al movilizar el rodete de la turbina. A través de un alternador conectado al eje de la turbina, la energía mecánica es transformada en energía eléctrica.

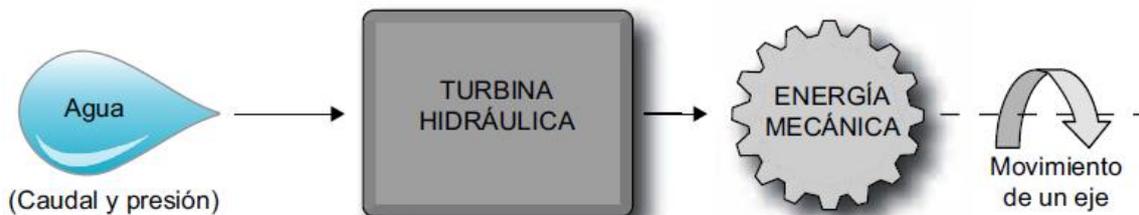


Figura 14. Esquema conceptual de una turbina hidráulica.

De manera general, las turbinas presentan componentes comunes. El órgano principal en donde se produce la transferencia de energía es el rotor y está compuesto por álabes que tienen diferentes configuraciones según el tipo de turbina. Respecto a los demás componentes de alimentación y descarga, varían según sean turbinas de reacción o de acción.

Se tienen dos tipos principales de turbinas: de reacción y de acción. En estas últimas, toda la energía disponible del flujo se convierte, mediante una boquilla que provee un chorro libre, en energía cinética antes de que el fluido entre en contacto con los álabes móviles. Se trabaja, por lo tanto, a presiones atmosféricas. Dentro de este grupo se encuentran las turbinas Pelton, además de otras utilizadas en pequeños aprovechamientos como lo son las Turgo y Michell-Banki. Mientras tanto, las turbinas de reacción trabajan tanto con la energía cinética con la que circula el flujo como con la energía estática del agua, debido a la diferencia de presión generada entre la entrada y salida del rotor de la turbina, dadas por la velocidad tangencial de los álabes del rodete y de la velocidad relativa del fluido con respecto al álabe.

Las turbinas de acción como las Pelton, cuentan con una tobera de alimentación, la cual provee del chorro libre de agua requerida por la rueda móvil prevista de álabes. Luego de ser aprovechada la energía cinética del fluido, el mismo cae sobre una conducción a presión atmosférica. Este tipo de turbinas son utilizadas principalmente en aprovechamientos con importantes alturas y bajos caudales. En la Figura 15. Esquema de una turbina Pelton. (Potter, Wiggert, & Ramadan, 2015) se observa un esquema con

una bifurcación, siendo necesarias dos barras de inyección, en las cuales se encuentra la tobera, para de esta forma, aprovechar de mejor manera la energía cinética.

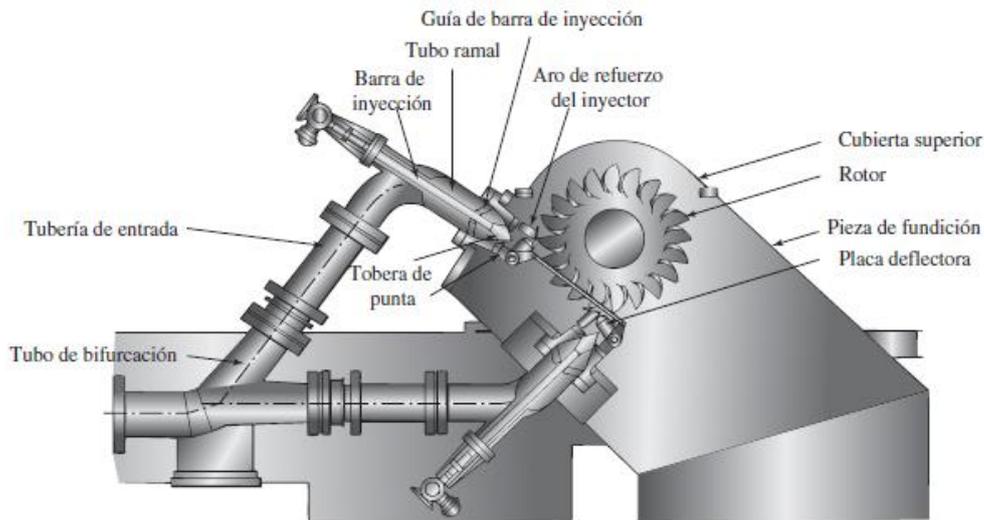


Figura 15. Esquema de una turbina Pelton. (Potter, Wiggert, & Ramadan, 2015)

Dentro de las turbinas de reacción se tiene a las Francis y Kaplan. La alimentación al rodete es realizada mediante un caracol o carcasa, la cual mantiene la velocidad constante a medida que se realiza la distribución del fluido. Previo a la entrada al rodete, el distribuidor regula el caudal requerido y la velocidad de giro necesaria. Luego, a la salida del rotor, se encuentra el tubo de desfogue, el cual permite un mejor rendimiento de la máquina. Estos elementos, junto con el rodete pueden observarse en el esquema de la Figura 16. Esquema de turbina Francis. 1. Carcasa, 2. Distribuidor, 3. Rodete, 4. Codo de tubo de aspiración, 5. Nivel inferior del salto, S. Sección de salida de la turbina. (Mataix, 1986) en donde se representa una turbina Francis de eje vertical.

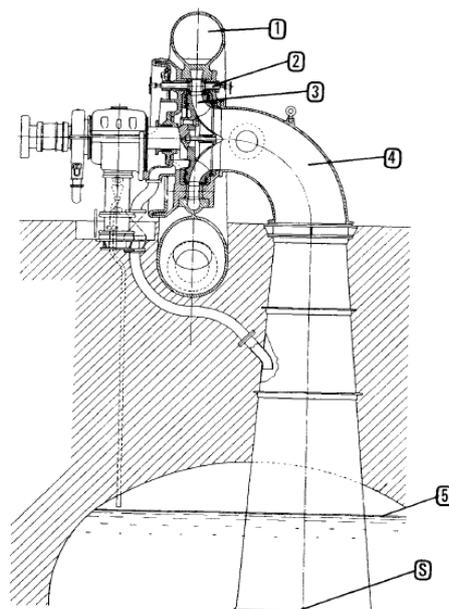


Figura 16. Esquema de turbina Francis. 1. Carcasa, 2. Distribuidor, 3. Rodete, 4. Codo de tubo de aspiración, 5. Nivel inferior del salto, S. Sección de salida de la turbina. (Mataix, 1986)

En la Figura 17. Esquema de detalle de turbina Francis. (Potter, Wiggert, & Ramadan, 2015) se pueden observar los álabes directores que se encuentran en el distribuidor de la turbina Francis. Estos le dan al fluido la dirección con la que deben entrar al rodete y regulan el caudal de ingreso al mismo, dependiendo de la generación de energía requerida. Se resalta la función de la carcasa o voluta en estas turbinas, la cual disminuye su sección a medida que el fluido ingresa al rodete para poder mantener la velocidad, y por lo tanto, la presión, constante. Una vez cedida la energía en el rodete, el fluido es descargado mediante el tubo de desfogue o aspiración. Este elemento va aumentando su sección a medida que se aleja del rotor. Esto se debe una vez atravesados los álabes las presiones son negativas, por lo que es necesario aumentarla hasta llegar a presión atmosférica, de forma de evitar succiones del agua que se encuentra aguas abajo.

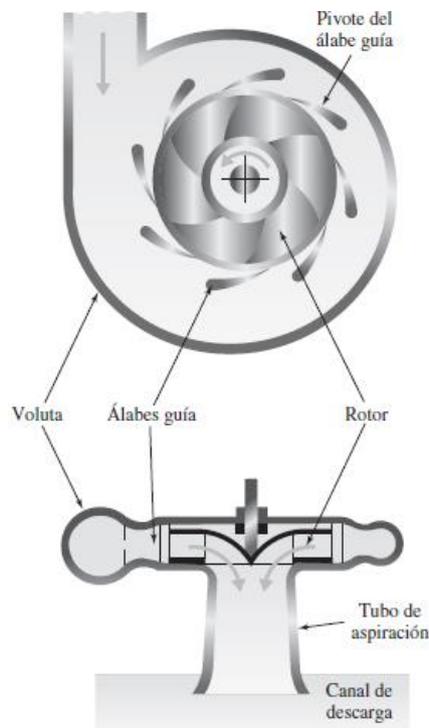


Figura 17. Esquema de detalle de turbina Francis. (Potter, Wiggert, & Ramadan, 2015)

Respecto a la selección de turbina para determinado aprovechamiento hidroeléctrico, se hace uso de un parámetro conocido como velocidad específica, el cual caracteriza a las turbomáquinas al relacionar caudal Q , altura H y velocidad de giro del rotor N . Mediante relaciones entre los coeficientes de funcionamiento adimensionales, se obtiene la velocidad de giro adimensional, siendo utilizada también de forma dimensional en la práctica.

Se tiene entonces a la velocidad específica N_s de forma adimensional, siendo γ el peso específico del fluido, y g la gravedad:

$$N_s = \frac{N \cdot P^{\frac{1}{2}}}{\gamma^{\frac{1}{2}} \cdot g^{\frac{3}{4}} \cdot H^{\frac{5}{4}}}$$

Ecuación 5. Velocidad específica adimensional

Mientras que de forma dimensional se la puede encontrar como:

$$n_s = \frac{N \cdot P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

Ecuación 6. Velocidad específica dimensional

Como se observa en la Figura 18. Velocidades específicas para diferentes turbinas. <https://www.civilexcel.com/2012/07/dimensionamiento-de-turbinas.html>, a partir de la potencia, altura disponible y velocidad de giro y, por lo tanto, velocidad específica, se pueden determinar los rangos de utilización de las distintas turbinas. Se aprecia que la turbina Francis, la cual es de interés principal, trabaja con alturas intermedias entre las turbinas Pelton y Kaplan y velocidades específicas de medias a bajas. Abarca una gran variedad de caudales, como se puede observar en la Figura 19 Rango de utilización de las distintas turbinas en función del caudal Q y altura H (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006). Estas turbinas presentan una gran versatilidad respecto al tipo de aprovechamiento en el que sean utilizadas, ya que pueden tratarse centrales de alta a baja carga y con caudales de lo más diversos.

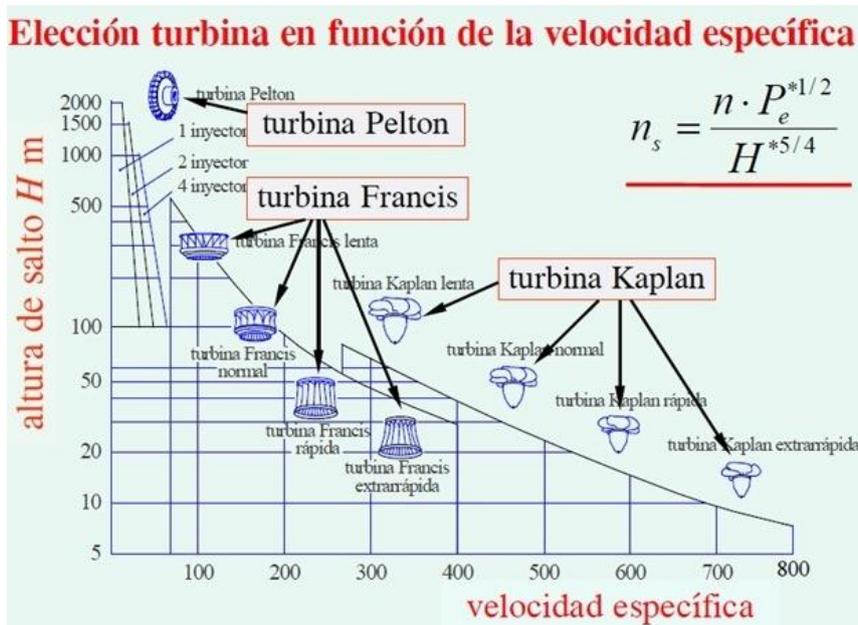


Figura 18. Velocidades específicas para diferentes turbinas. <https://www.civilexcel.com/2012/07/dimensionamiento-de-turbinas.html>

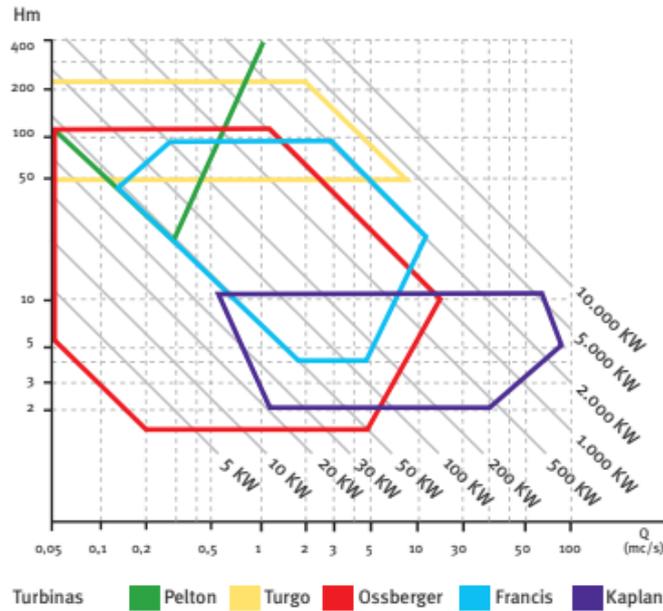


Figura 19 Rango de utilización de las distintas turbinas en función del caudal Q y altura H (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006)

Carga teórica y carga neta. Rendimientos

Respecto a la energía cedida por el fluido a los álabes de la turbina, se tiene diferencia entre el caso ideal y el real, debido a pérdidas hidráulicas de la máquina. Se determinan estas diferencias en función a lo enunciado principalmente en Polo Encinas (1975).

Idealmente, la energía transferida desde el fluido a la máquina está definida por la carga teórica H , que se obtiene mediante la ecuación de transferencia, y representa la energía transferida entre fluido y álabes del rodete. A su vez, se tiene la carga neta H_n , la cual se define como el gradiente de carga dinámica entre la entrada al caracol y la salida al tubo de desfogue.

Estas dos cargas están relacionadas por un rendimiento conocido como rendimiento hidráulico o manométrico η_h , en el que se hace visible la interrelación de ambas cargas.

$$\eta_h = \frac{H}{H_n}$$

Ecuación 7. Rendimiento Hidráulico

$$H < H_n$$

Por lo tanto, para poder obtener la carga teórica H se debe considerar una carga neta H_n a la entrada de la carcasa de la turbina mayor a la teórica, de forma que se consideren las pérdidas hidráulicas que tendrán lugar en la máquina. Si H_p representa las pérdidas mencionadas, se tendrá:

$$H_n = H + H_p$$

Ecuación 8. Carga neta

Además del rendimiento hidráulico, se encuentran otros tipos de rendimientos:

- Rendimiento volumétrico η_v , debido a las fugas de fluido que tengan lugar en las juntas de la máquina.
- Rendimiento mecánico η_m , debido a las pérdidas por rozamiento mecánico entre diferentes elementos de la turbina.
- Rendimiento global η , la cual engloba a los rendimientos nombrados anteriormente, y relaciona la potencia en la flecha de la turbina y la potencia cedida por el fluido.

Factores de pérdida de energía

Dentro de los factores de pérdidas de energía del fluido por el paso a través de la turbina, se encuentran:

- Pérdidas por fricción sobre las paredes de la máquina. Intervienen la rugosidad de los conductos y la viscosidad del fluido.
- Pérdidas por separación del fluido de los contornos de los álabes o por choques contra estos. Se producen, por lo tanto, turbulencias o vibraciones.
- Pérdidas por recirculación del fluido entre el rotor y la carcasa.
- Pérdidas por fugas entre las partes móviles y fijas de la turbina.

Fenómeno de cavitación

Es necesario tener en cuenta este fenómeno, el cual puede afectar la vida útil de las turbinas, y tiene lugar en ciertos sectores vulnerables de las mismas. Consiste en la formación de burbujas de vapor de agua en zonas donde se producen presiones negativas debido a velocidades muy altas. Estas burbujas implosionan al pasar a zonas de mayor presión y liberan una gran cantidad de energía, con lo que dañan la estructura de la turbina (álabes principalmente) al chocar con esta. Por lo tanto, la cavitación condiciona las velocidades ideales de trabajo y la instalación de las turbinas, en la cual se debe considerar la posición respecto al nivel de aguas abajo. Si se tiene una altura de velocidad constante, y si el desnivel entre el punto de menor presión en la turbina y el pelo de agua aguas abajo aumenta, la presión debe disminuir, para mantener la energía constante. De esta forma, si la presión del fluido llega a ser menor que la presión de vapor, se generará cavitación.

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p_{in}}{\rho} + gz = \text{Energía total por unidad de masa}$$

Ecuación 9. Ecuación de energía total por unidad de masa.

Si

$$p_{in} < p_{vapor}$$

se genera cavitación en el fluido.

Velocidad síncrona

Debido a que la mayoría de las turbinas están conectadas posteriormente a un generador eléctrico síncrono que alimenta a la red eléctrica, la energía producida debe

coincidir en frecuencia e intensidad con lo requerido por la red. El generador síncrono es una máquina de corriente alterna excitada por corriente directa, por lo que, a partir de una relación constante entre la frecuencia de la corriente y la velocidad de giro de la máquina, se obtiene el número de pares de polo del rotor.

2.7 DISEÑO HIDRÁULICO

2.7.1 Flujo a Presión en conductos de salida

Como se mencionó anteriormente, se trabaja con tuberías forzadas, por lo que se analiza el diseño hidráulico de tuberías a presión. Se considera que la sección trabaja a sección llena, y se aplica principalmente la ecuación de Bernouilli entre dos secciones para estudiar la conducción, haciéndose necesario determinar las pérdidas de carga a lo largo de la misma.

$$H_T = h_p + h_{v_2}$$

Ecuación 10. Carga Total

Donde H_T es la carga total necesaria para superar las pérdidas de carga en el trayecto hasta la descarga, h_p la sumatoria de pérdidas de carga del sistema y h_{v_2} altura de velocidad a la salida del sistema.

En la Figura 20. Pérdidas de carga en conductos a presión. se puede observar esquemáticamente la caída de la línea piezométrica desde la entrada a las rejillas, pasando por transiciones, contracciones, válvulas y cambios de dirección hasta llegar a la salida.

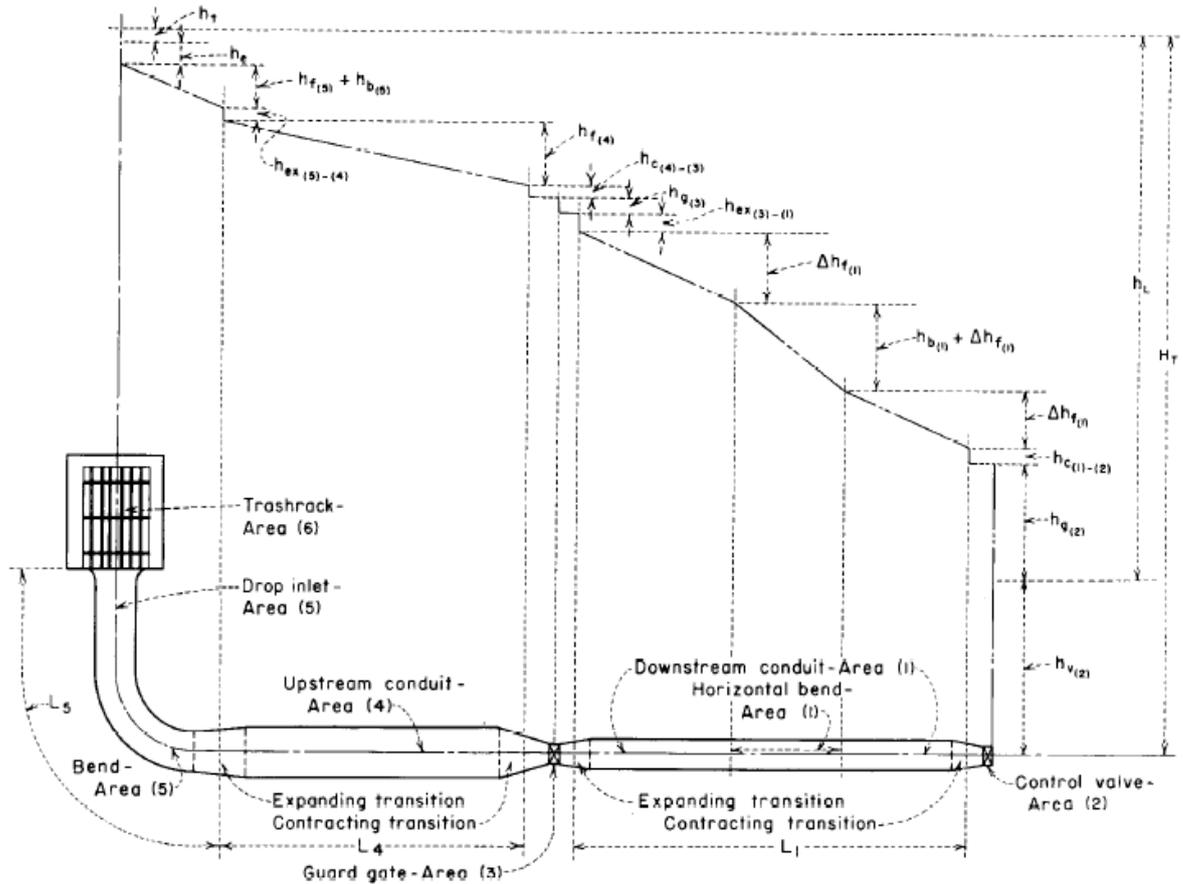


Figura 20. Pérdidas de carga en conductos a presión. (Burea of Small Dams)

Dentro de las pérdidas se encuentran las pérdidas por fricción y las pérdidas menores. Las primeras se deben a la fricción producida entre el fluido y la superficie de contacto, mientras que las últimas están dadas por distintos accesorios u obstáculos con los que se encuentra el agua a su paso tales como curvas, rejas, transiciones, contracciones/expansiones, válvulas, compuertas, etc. Las pérdidas se expresan en términos de pérdida de carga o caída de en la línea piezométrica ($z+p/\gamma$)

Se plantea Bernoulli entre dos puntos, a la entrada de la toma (punto 0), teniendo el punto de referencia sobre el embalse generado por la presa, y a la salida del tubo de descarga, aguas abajo de la presa (punto 2).

$$z_0 + \frac{v_0^2}{2.g} + \frac{p_0}{\gamma} = z_2 + \frac{v_2^2}{2.g} + \frac{p_2}{\gamma} + h_p + H_T$$

Ecuación 11. Ecuación de Bernoulli entre punto 0 y 2.

Donde z es el nivel respecto un plano de referencia en m, p la presión en ese punto en Pa, v la velocidad media del agua en m/s, γ el peso específico del agua, g la gravedad. El primer término representa la energía potencial en función del plano de referencia; la altura de presión, representada en el segundo término indica la energía potencial en presión, mientras que el último término, altura de velocidad, representa la energía cinética de la sección. (Cuesta & Vallarino, 2000). Además, el término h_p representa las pérdidas de energía a lo largo de la conducción, mientras que H_T representa la altura de carga utilizable por la turbina.

Si la presión a la que se encuentran ambos puntos nombrados anteriormente se trata de la presión atmosférica, el término de altura de presión se anula. Así también, si las velocidades de entrada y salida se consideran nula, la ecuación puede reescribirse de la siguiente manera:

$$(z_0 - z_2) = h_p + H_T$$

Si se considera que:

$$(z_0 - z_2) = H$$

Se puede despejar la altura utilizable por la turbina:

$$H_T = H - h_p$$

Ecuación 12. Altura utilizable por la turbina

Por lo tanto, la altura realmente aprovechable por la turbina es menor al desnivel entre los dos puntos debido a las pérdidas que tienen lugar en la conducción.

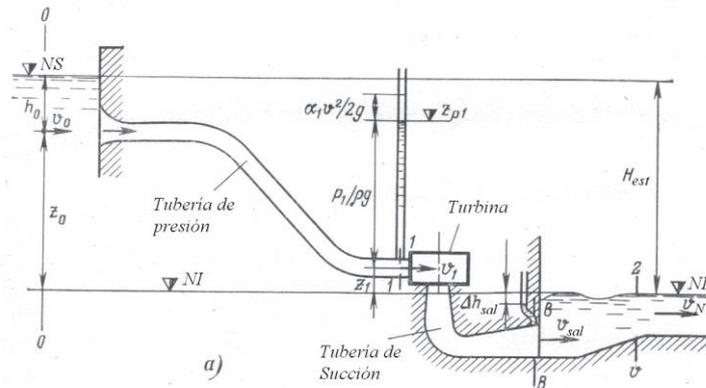


Figura 21. Instalación de una turbina. (Ortiz Flores, 2011)

De manera extendida, el término de las pérdidas totales puede desarrollarse como se muestra a continuación:

$$h_p = h_t + h_e + h_b + h_f + h_c + h_g + h_v$$

Ecuación 13. Pérdidas totales

En donde h_t representa a las pérdidas por rejillas, h_e las pérdidas por entrada, h_b aquellas debido a curvas y cambios de dirección, h_f por fricción, h_c por contracción del conducto, h_g debido a compuertas o válvulas, y h_v por pérdidas a la salida del conducto.

Pérdidas por fricción:

Para el flujo en grandes tuberías se utiliza generalmente la fórmula de Darcy-Weisbach para determinar la pérdida de energía por resistencia friccional en el conducto. También suele utilizarse la fórmula de Manning (modificada).

$$h = \frac{fL}{D} \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

Ecuación 14. Pérdidas por fricción

Donde *f*, factor de fricción, es un coeficiente adimensional, el cual varía con la rugosidad de la superficie del conducto y el número de Reynolds. Este último es función del diámetro de la tubería y de la velocidad, viscosidad y densidad del fluido que fluye a través de la tubería.

El valor de *f* se obtiene a partir del Ábaco de Moody, en el cual se expresa *f* como función del número de Reynolds y la rugosidad relativa.

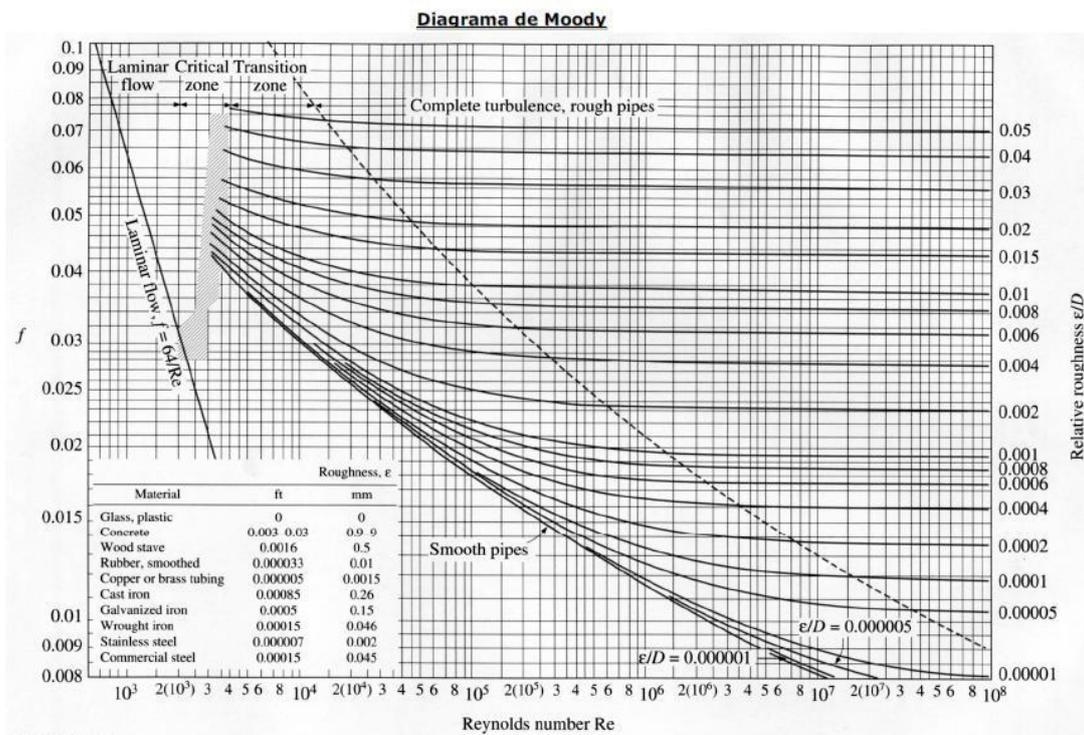


Figura 22. Diagrama de Moody

Pérdidas en rejás:

Las pérdidas a través de las rejás se calculan a partir de la fórmula de Kirschmer (Vallarino, 2000), considerando el espesor de las barras *t*, la separación entre las mismas *b*, el coeficiente de forma de la barra β , y el ángulo de la reja con la horizontal θ . A partir de esto se obtiene el coeficiente de pérdidas K_t , sin embargo, también es necesario obtener la velocidad a la que atraviesa la reja, suponiendo una velocidad de aproximación v_0 de 1m/s.

$$h_t = \beta \left(\frac{e}{d}\right)^{\frac{4}{3}} \operatorname{sen} \theta \frac{v_0^2}{2g}$$

Ecuación 15. Pérdidas en rejas. Fórmula de Kirschmer

Se define entonces:

$$K_t = \beta \left(\frac{S}{b_1}\right)^{\frac{4}{3}} \operatorname{sen} \theta$$

Ecuación 16. Coeficiente de pérdidas en rejas.

Por lo tanto

$$h_t = K_t \frac{V_t^2}{2g}$$

Ecuación 17. Pérdidas en rejas.

Características de algunas secciones de barras	β
Rectangulares con aristas vivas	2,42
Rectangulares con extremos de aguas arriba redondeado	1,83
Rectangulares con ambos extremos redondeados	1,67
Configuración hidrodinámica	0,76
Circulares	1,79

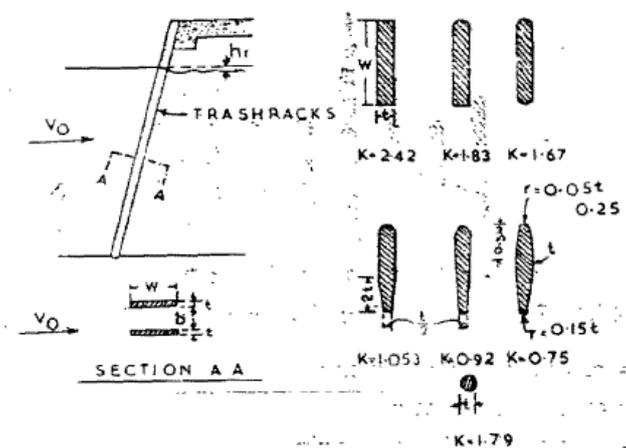


Figura 23. Coeficiente que toma en cuenta la forma de las barras. (Nigam, 1979)

Pérdidas en la entrada:

Para las pérdidas de entrada, se consideran similares a las que podrían darse en un orificio. Es por ello, que, de la ecuación del orificio, se arriba al coeficiente de pérdidas en la entrada del conducto.

$$Q = C. a \sqrt{2gH}$$

Siendo Q el caudal, C el coeficiente de descarga, a el área, H la carga de descarga, v la velocidad y g la gravedad.

$$h_e = \left(\frac{1}{C^2} - 1\right) \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 18. Pérdidas en la entrada con coeficiente de descarga

$$K_e = \left(\frac{1}{C^2} - 1\right)$$

Ecuación 19. Coeficiente de pérdidas en la entrada.

$$h_e = K_e \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 20. Pérdidas en la entrada con coeficiente K_e .

De manera tabulada también se puede encontrar a los coeficientes de descarga y sus coeficientes de pérdida asociados

	Discharge coefficient, C			Loss coefficient, A		
	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.
(a) Gate in thin wall - unsuppressed contraction	0.70	0.60	0.63	1.80	1.00	1.50
(b) Gate in thin wall - bottom and sides suppressed	.81	.68	.70	1.20	0.50	1.00
(c) Gate in thin wall - corners rounded	.95	.71	.82	1.00	.10	0.50
(d) Square-cornered entrances	.85	.77	.82	0.70	.40	.50
(e) Slightly rounded entrances	.92	.79	.90	.60	.18	.23
(f) Fully rounded entrances ($r/D \geq 0.15$)	.96	.88	.95	.27	.08	.10
(g) Circular bellmouth entrances	.98	.95	.98	.10	.04	.05
(h) Square bellmouth entrances	.97	.91	.93	.20	.07	.16
(i) Inward projecting entrances	.80	.72	.75	.93	.56	.80

Tabla 1. Coeficientes de descarga y pérdida para conductos de entrada. (Bureau of Reclamation, 1987)

Pérdidas en curvas y codos:

Las pérdidas de carga en curvas dependen del radio de curvatura, diámetro de tubería y el ángulo a través del cual gira la curva.

En la Figura 24. Coeficiente de pérdida en secciones circulares ($R_e = 10^6$) según Miller. a continuación se tienen coeficientes de pérdida en curvas K_b para aquellos codos en los que no hay cortes, en función de la relación entre el radio de curvatura y el tamaño de la tubería y el ángulo de curvatura.

$$h_c = K_c \left[\left(\frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) \right]$$

Ecuación 22. Pérdidas de carga debido a contracciones.

K_c varía desde 0,1 para contracciones graduales a 0,5 para aquellas abruptas. Para grandes ángulos de convergencia, el coeficiente de pérdidas puede ser asumido con una variación lineal hasta el máximo 0,5 para un ángulo de contracción recto. (Bureau of Reclamation, 1987)

Una contracción se considera gradual cuando el ángulo de convergencia es menor al obtenido a partir de la siguiente relación:

$$\tan \theta = \frac{1}{U}$$

Ecuación 23. Contracción gradual

siendo θ el ángulo de la superficie de la pared del conducto con respecto al eje del mismo, y U un parámetro definido como:

$$U = \frac{v}{\sqrt{gD}}$$

Cuando no se excede la condición anterior, puede considerarse un coeficiente de 0,1. Para mayor precisión en la determinación de este coeficiente, se puede utilizar la Tabla 2. Coeficiente de pérdida por reducción gradual de ángulo θ , según Kisieliev. (Sotelo, 1994)

θ	4 a 5°	7°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	60°	75°	80°	
K	0.060	0.005	0.16	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.35

Tabla 2. Coeficiente de pérdida por reducción gradual de ángulo θ , según Kisieliev. (Sotelo, 1994)

Se busca que tanto las contracciones como las expansiones sean graduales, de forma que se minimicen las pérdidas de carga y se evite la cavitación.

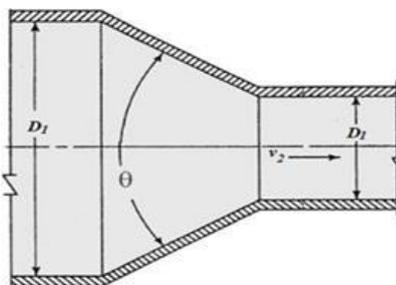


Figura 26 Ángulo de convergencia. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/journal/5722/572261762007/movil/>

Pérdidas en bifurcaciones

La bifurcación consiste en la división de la tubería, dada generalmente al alimentar a dos o más turbinas paralelas. Según el ángulo de bifurcación y la relación de caudales se determina el coeficiente de pérdidas en bifurcaciones K_d para cada uno de los flujos.

$$h_d = K_d \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 24. Pérdidas en bifurcaciones.

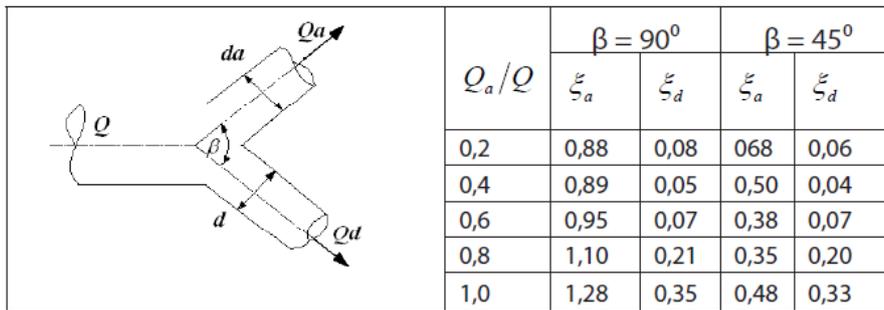


Figura 27. Coeficientes de pérdidas para bifurcaciones en Y simétricas con ángulo β . (Ortiz Flores, 2011)

Ángulo de desviación β	90°		45°	
	K_d ramal a	K_d ramal d	K_d ramal a	K_d ramal d
$Q_a/Q=0$	0.95	0.04	0.90	0.04
0.2	0.88	0.08	0.68	0.06
0.4	0.89	0.05	0.50	0.04
0.6	0.95	0.07	0.38	0.07
0.8	1.10	0.21	0.35	0.20
1.0	1.28	0.35	0.48	0.33

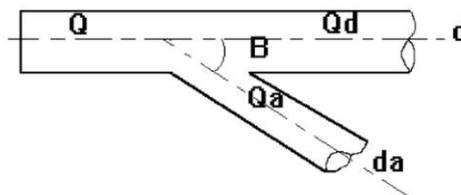


Figura 28. Coeficientes de pérdidas para bifurcaciones asimétricas con ángulo β . (Ortiz Flores, 2011)

Pérdidas por cruce

Miller (1990) plantea las siguientes gráficas de contorno para determinar los coeficientes de pérdidas menores ocurridas en el accesorio en cruz K_x . En la Figura 29. Coeficiente de pérdidas en cruce K_x para ramal perpendicular al de alimentación. (Miller, 1990), se muestran las curvas para las pérdidas que tienen lugar en los ramales perpendiculares al flujo, mientras que, en la segunda, (Figura 30. Coeficiente de pérdidas en cruce K_x para ramal alineado con el de alimentación. (Miller, 1990)), las pérdidas que se obtienen son las correspondientes al ramal que continúa en la misma dirección y sentido que el ramal de alimentación.

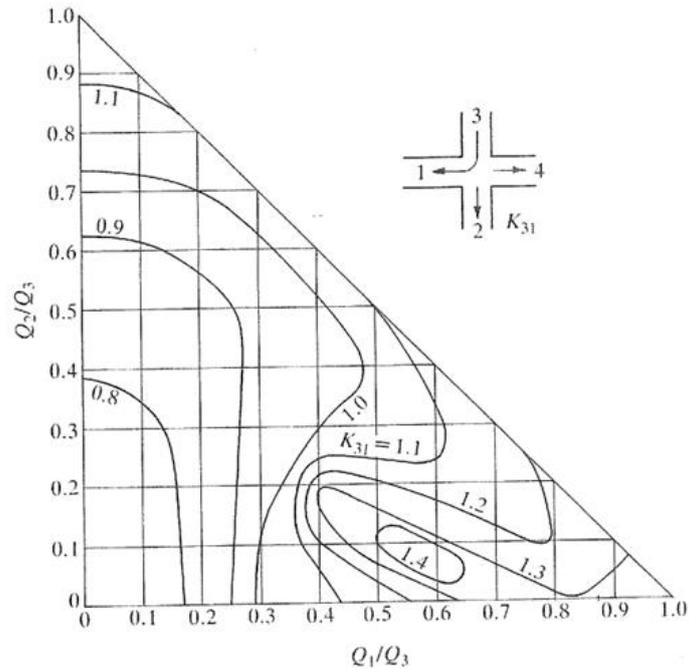


Figura 29. Coeficiente de pérdidas en cruce K_x para ramal perpendicular al de alimentación. (Miller, 1990)

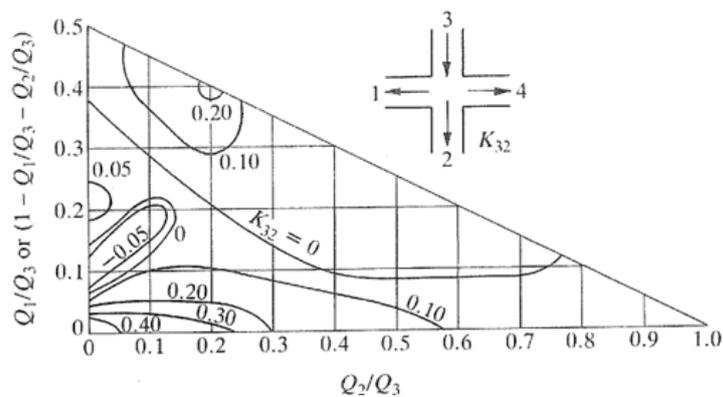


Figura 30. Coeficiente de pérdidas en cruce K_x para ramal alineado con el de alimentación. (Miller, 1990)

$$h_x = K_x \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 25. Pérdidas en cruces.

Pérdidas en válvulas y compuertas

Las válvulas y compuertas son dispositivos que se utilizan para regular el flujo del agua, pudiendo interrumpir total o parcialmente el paso del mismo.

Dentro de las válvulas de mayor uso en los aprovechamientos hidroeléctricos se pueden encontrar válvula esclusa, válvulas de compuerta, válvulas esféricas y válvulas mariposa. Sobre esta última se desarrollará principalmente, siendo la que se utiliza en caídas entre 30 y 200 m (Ortíz Flores, 2011).

La válvula mariposa consiste en un disco en forma de lente que gira sobre un eje central. A través de accionamiento mecánico, se puede operar fácilmente la válvula.

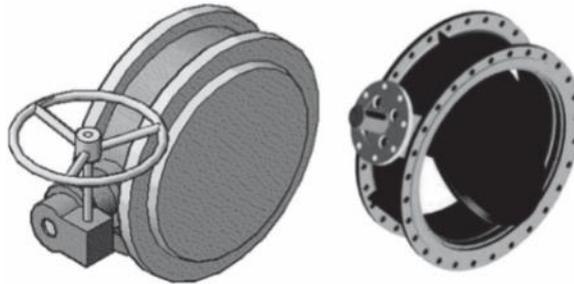


Figura 28. Válvula de mariposa. (Ortíz Flores, 2011)

Respecto a las pérdidas de carga en la válvula mariposa, se puede tomar 0,15 como valor promedio del coeficiente K_v cuando se encuentra en posición abierta. El rango de valores es de 0,1 a 0,5, dependiendo de la relación del ancho de la compuerta y del área de la sección.

$$h_v = K_v \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 26. Pérdidas de carga en válvulas y compuertas

2.8 TIPOS DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Se entiende por central al “edificio donde se aloja el equipo de generación y el conjunto de aparatos e instalaciones complementarias requeridas para el proceso de transformación de la energía hidráulica en energía eléctrica” (Cuesta & Vallarino, 2000).

Se pueden encontrar tantos tipos de centrales como factores condicionantes del emplazamiento como la topografía, geología, hidrología del sitio, factores ambientales, además de la viabilidad económica del proyecto. Se las clasifica acotadamente en función de la relación de la central con la superficie del terreno, pudiendo encontrar:

- Centrales de exterior: sus instalaciones y equipos se encuentran sobre la superficie del terreno, así como también los accesos a la central.
- Centrales subterráneas: se encuentra debajo del nivel del terreno.
- Centrales de pozo: es un tipo intermedio entre las dos anteriores. Los equipos generadores están en el fondo de un pozo, siendo su acceso por la superficie al aire libre.

Dentro de las centrales exteriores se encuentran distintas configuraciones, entre ellas del tipo presa-central, centrales de pie de presa, centrales separadas de la presa y casos especiales como los sistemas de combinado hidráulico (hydro-combine).

2.8.1 Presa-Central:

Este tipo de centrales son utilizadas principalmente en centrales de río de llanura con grandes caudales y saltos hasta de 40 m. Conforman una solución compacta, ya que la estructura de la presa es también la de la central hidroeléctrica. El caudal a turbinar generalmente ingresa por un túnel dentro de la misma presa de H^0 , y es conducida hasta la turbina. La conducción desde la toma hacia la turbina suele ser de H^0A^0 , así como también el caracol o carcasa de ingreso a la turbina (generalmente de reacción).

2.8.2 Centrales de pie de presa

En otros casos, se debe independizar a la central de la presa, por lo que la misma se instala en los pies de la presa. Puede estar localizada de manera transversal al cauce del río o en un margen del mismo. Esto puede estar condicionado por el tipo de material con el que esté construida la presa, considerando que las tomas de las presas de materiales sueltos en su mayoría no se encuentran en el cuerpo de la presa.

2.8.3 Centrales separadas de la presa

Principalmente en zonas de ríos con pendientes altas, se busca obtener un mayor salto ubicando la central aguas abajo de la presa y sobre el margen del río. Para ello se utilizan conductos que llevan el agua desde la toma en la presa hasta el lugar de emplazamiento de la central.

2.8.4 Tipos especiales: sistemas combinado hidráulico

En casos en los que los tipos de centrales convencionales no sean viables en el proyecto de estudio, se debe acudir a diseños poco convencionales de centrales. Uno de estos casos lo constituyen las centrales de tipo combinado hidráulico o *hydrocombine* con la central debajo del vertedero (salto esquí) de la presa. Este caso de central se encuentra dentro del cuerpo de la presa y se utiliza generalmente en cierres angostos, en los que no hay suficiente lugar para implantar la central a los laterales del vertedero o en el margen del río. También son utilizados cuando se imposibilita la instalación al pie de la presa debido al riesgo de inundación de la central, por lo que el flujo debe pasar por sobre la central, lo cual se logra instalándola debajo del vertedero. Esta disposición suele tener ventajas frente a otras al disminuir la longitud de los conductos necesarios y con ello, disminuir pérdidas de carga y costos de instalación de las tuberías (excavación, etc.). Se tiene un menor impacto visual en el sitio de implantación

Uno de estos casos es el de la presa de gravedad Ivaylovgrad en Bulgaria, la cual está en un valle angosto. La central se encuentra justo a pie de la presa, y su techo lo constituye el mismo vertedero salto esquí.

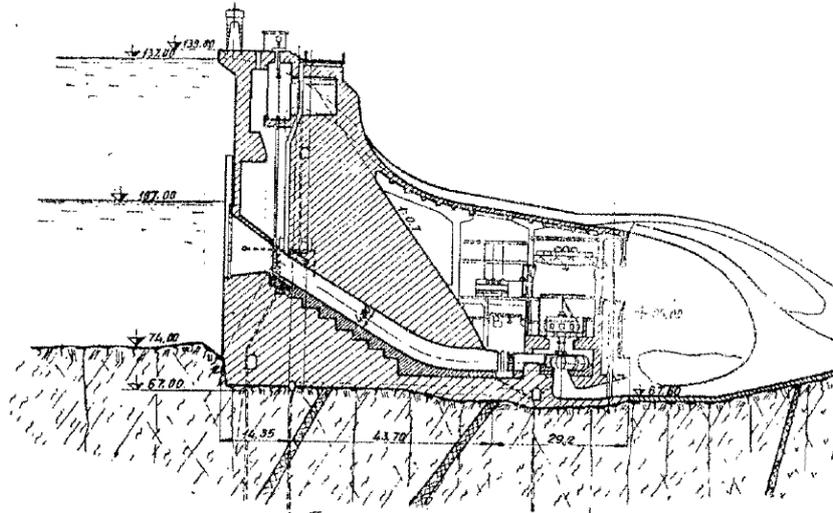


Figura 31. Sección de la presa Ivaylovgrad y su central bajo el vertedero.



Figura 32. Presa Ivaylovgrad. [Fotografía]. Recuperado de: https://en.wikipedia.org/wiki/Ivaylovgrad_Dam#/media/File:Ivaylovgrad-dam-wall.jpg

2.9 DISEÑO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA

2.9.1 Disposición general

Dentro de la central se pueden encontrar tres compartimentos diferentes: la sala de máquinas propiamente dicha, en la que se encuentran las turbinas, la sala de instalación y mantenimiento y la sala de control. Por lo tanto, el diseño de la central estará dado por las dimensiones de las tres anteriores. Mientras que la cota de implantación depende del nivel mínimo de la descarga con un grupo en operación, y de la altura de aspiración requerida para una operación segura de la turbina (cavitación).

Las dimensiones principales de la sala de máquinas dependen del tipo de equipo turbina-generador seleccionado para el proyecto, que a su vez depende de la carga disponible, la magnitud del caudal utilizado y la disposición física del proyecto que mejor se adapte a las condiciones particulares del sitio (Gulliver & Arndt, 1991). Por lo tanto, el tamaño de la carcasa de la turbina, dimensiones del tubo de aspiración y alternador, y de los elementos auxiliares que sean requeridos (pasarelas, puente grúa, etc.) son tomados en cuenta para el dimensionamiento de esta sala.

El espacio de instalación y mantenimiento para la instalación y mantenimiento de los generadores, rotores y transformadores debe tener las dimensiones suficientes para un rodete y espacio extra. Así mismo, la sala de control puede estar situada antes del sitio donde se encuentren instaladas las turbinas o separadas de ellas, de forma que no entren en contacto el agua y los tableros eléctricos de control (Nigam, 1979). En la Figura 33. Diseño de central hidroeléctrica con turbina Francis horizontal. (Nigam, 1979) se tiene una vista en corte y en planta de una central hidroeléctrica que cuenta con una turbina Francis de eje horizontal. Se identifican las tres zonas nombradas anteriormente y se observan elementos como el puente grúa y la ventilación forzada de la sala.

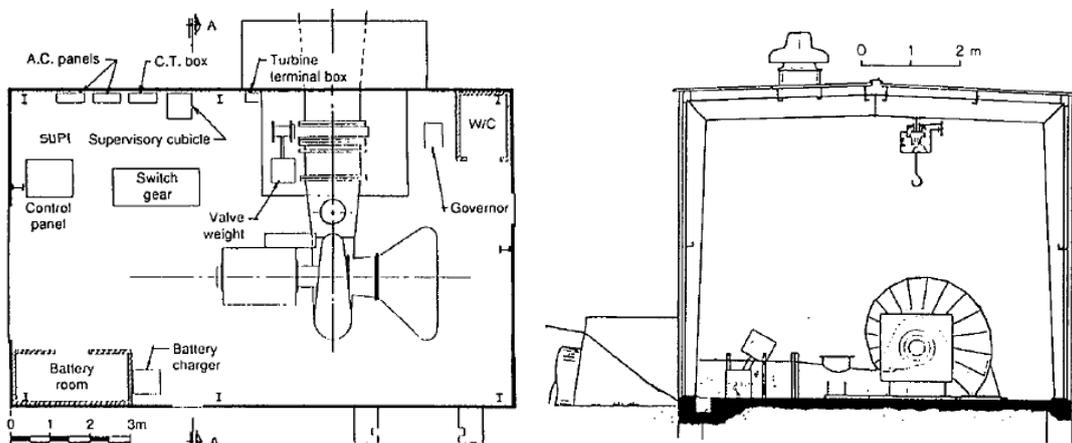


Figura 33. Diseño de central hidroeléctrica con turbina Francis horizontal. (Nigam, 1979)

Generalmente, los aprovechamientos hidroeléctricos de media a baja carga utilizan equipos de eje horizontal por ser su configuración más sencilla debido a que se encuentran todos sus elementos en un único nivel, a diferencia de aquellas centrales que tienen sus equipos de forma vertical, requiriendo de distintos niveles (Cuesta & Vallarino, 2000). La ubicación de los equipos suele ser con los ejes paralelos a la longitud de la central, por lo que esta dimensión depende del tamaño del alternador, tubo de desfogue y ancho de la carcasa Figura 34. Turbina Francis horizontal. [Imagen] Recuperado de: <https://www.hydroalp.com/es/turbinas-francis/>. Mientras que el ancho de la central depende del diámetro de la carcasa y espacio de paso necesario entre máquinas.

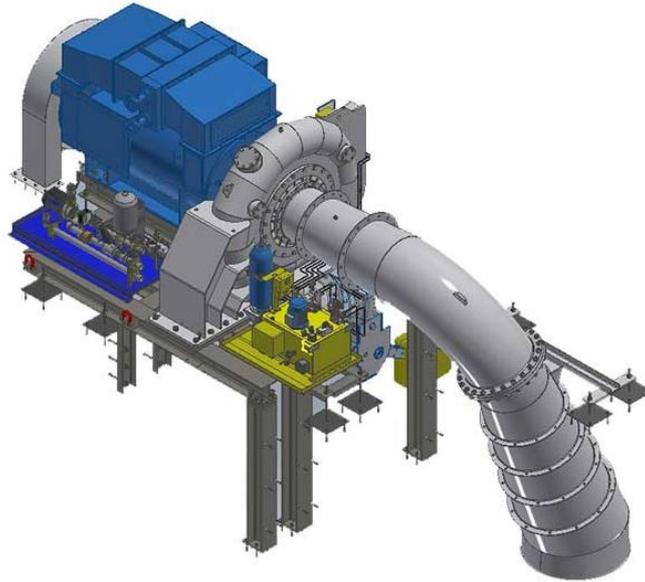


Figura 34. Turbina Francis horizontal. [Imagen] Recuperado de: <https://www.hydroalp.com/es/turbinas-francis/>

2.9.2 Elementos de la central

Alternador

Dentro del equipo electromecánico de la central hidroeléctrica se encuentra el alternador, máquina encargada de transformar la energía mecánica generada en la turbina a energía eléctrica. Al ser una máquina rotativa, requiere estar en constante movimiento, por lo que para su funcionamiento necesita de una máquina primaria.

En el caso de los generadores en las centrales hidroeléctricas, la máquina que le da impulso es la turbina. La turbina se encuentra acoplada al generador mediante un eje, de forma de transmitir la rotación. Sus elementos principales los conforman una parte móvil rotativa y una parte estática, el rotor y estator respectivamente. La transformación de energía ocurre por inducción electromagnética, en donde se produce un flujo magnético en el rotor, el cual gira alrededor de la bobina del estator, produciendo una corriente eléctrica.

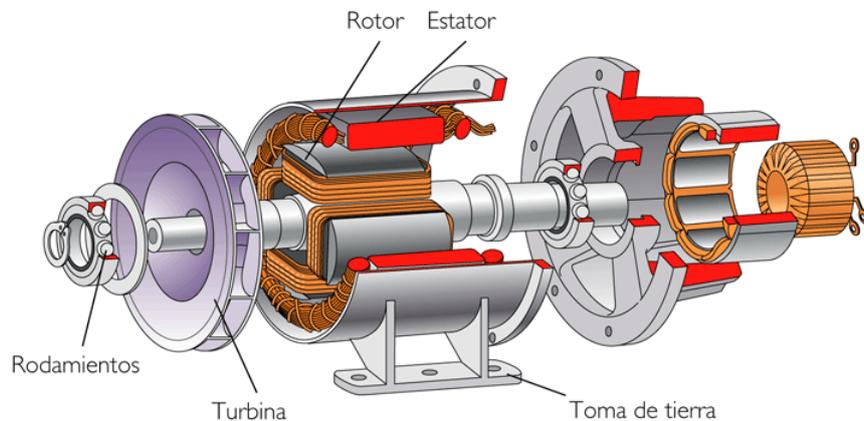


Figura 35. Esquema de conjunto turbina-alternador. [Imagen] Recuperado de: <http://tecnologiasdonpelayotercero.blogspot.com/2013/05/funcionamiento-de-un-sistema-turbina.html>

Tanto el rotor como el estator poseen un devanado de cobre. Por los devanados del rotor circula una corriente continua (excitatriz), que, al girar, genera un campo magnético. Se produce por inducción una fuerza electromotriz sobre las bobinas del estator, de forma que al aplicarse a un circuito exterior hace fluir una corriente eléctrica.

Los generadores utilizados habitualmente en los aprovechamientos hidroeléctricos son de tipo síncronos, “los cuales controlan la velocidad de giro, el voltaje y el desfase durante el proceso de arranque y sincronización de la máquina, y suministran la energía reactiva requerida después de la conexión a la red” (Cuesta & Vallarino, 2000).

Ataguía en la descarga

A la salida del tubo de aspiración se utilizan ataguías colocadas con una viga tenaza y accionadas por un monorriel o puente-grúa. De esta forma se evita que ingrese agua de aguas abajo al subir el nivel de esta.

Equipo de elevación

Se requiere de una grúa para poder realizar el montaje y desmontaje de los equipos. La misma debe tener alcance suficiente para llegar a los sitios de interés dentro de la central. La grúa puede ser de puente o de pórtico. El primer tipo está formado por “dos vigas paralelas que soportan unos carriles sobre los que se apoya y rueda una grúa que acciona un gancho colgado de un cable”. En el caso del segundo tipo, se trata de un “doble pórtico que rueda sobre carriles apoyados directamente sobre la superficie de la central, en el caso de centrales subterráneas.” Vallarino

Sistema de Ventilación

“La central debe ser ventilada para sustituir el aire viciado y evitar el aumento de temperatura debido al desprendimiento del calor de los equipos eléctricos.” Se utilizan, por lo tanto, “sistemas de ventilación forzada mediante ventiladores de impulsión o aspiración, y una red de conductos de chapa que dirija el aire fresco hacia las distintas dependencias de la central y extraiga el aire viciado conduciéndolo al exterior.” (Cuesta & Vallarino, 2000).

Sistema de control

Es necesario que las centrales cuenten con un sistema de control, de forma que estén automatizadas para poder funcionar sin la presencia continua de personal de operación. Se debe poder obtener y transmitir la información necesaria para la operación, teniendo acceso a distintos parámetros que caracterizan el estado del sistema. (Cuesta & Vallarino, 2000)

2.9.3 Restitución al río

Luego de pasar el agua por la turbina para la generación eléctrica, la misma debe ser restituida al cauce del río aguas abajo de la presa. Esto puede realizarse mediante la utilización de canales, túneles o tuberías. Por lo tanto, la conducción puede ser en presión o en lámina libre. En las centrales en las que se utilizan turbinas de reacción (Francis, Kaplan), se utilizan generalmente tuberías en presión hasta llegar al cauce del río.

A causa de las variaciones de caudal producidas al momento de restitución del agua al cauce del río, se generan modificaciones en el ecosistema aguas abajo, además de riesgos en la seguridad de las personas. Para controlarlo se pueden imponer

regulaciones respecto a la generación, con sus consecuentes repercusiones en la capacidad generada. Es por ello que en algunos casos se opta por la construcción de contradiques aguas abajo, de manera que el embalse generado lamina los caudales turbinados, parcial o totalmente. (García Alarcón, García Martín, & Sarasúa Moreno, 2011).

3 CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio a tratar puntualmente es la presa de La Herradura, en la provincia de Catamarca, la cual se encuentra en etapa de proyecto. Su ubicación es en la localidad de las Juntas, y se trata de una zona de quebradas, recorridas por ríos de régimen pluvial estival. Los objetivos que persigue la construcción de esta presa son los de generación hidroeléctrica, abastecimiento de agua potable y de riego, y turismo y recreación en último lugar.

Se realiza a continuación una recopilación sobre los aspectos más relevantes del proyecto respecto a descripción del área de estudio, ubicación de la presa, características de la cuenca y de la presa, contemplando el estudio de generación hidroeléctrica. Estos elementos fueron recuperados del Informe de Estudios Básicos y Prefactibilidad Presa La Herradura – Las Juntas (GCIS – Consorcio de Cooperación, 2021).

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El punto de emplazamiento del cierre a estudiar se ubica muy próximo aguas abajo de la localidad de Las Juntas. La localidad de Las Juntas es una villa turística situada en el Departamento Ambato, a 1.550 msnm y a 46 km de la capital provincial. Está ubicada en el departamento Ambato, Provincia de Catamarca a 1527msnm sobre el faldeo oriental de la Sierra de Ambato; es un valle intermontano de altura y está inmerso en lo que se conoce como “provincia de las sierras pampeanas”. Coordenadas geográficas: Latitud 28°5’8’ Oeste; Longitud 65°54’4’ Sur. Cuenta con alrededor de 900 habitantes residentes, pero en temporada estival el número asciende fuertemente debido a los turistas que se establecen en la Villa, principalmente en casas de veraneo.

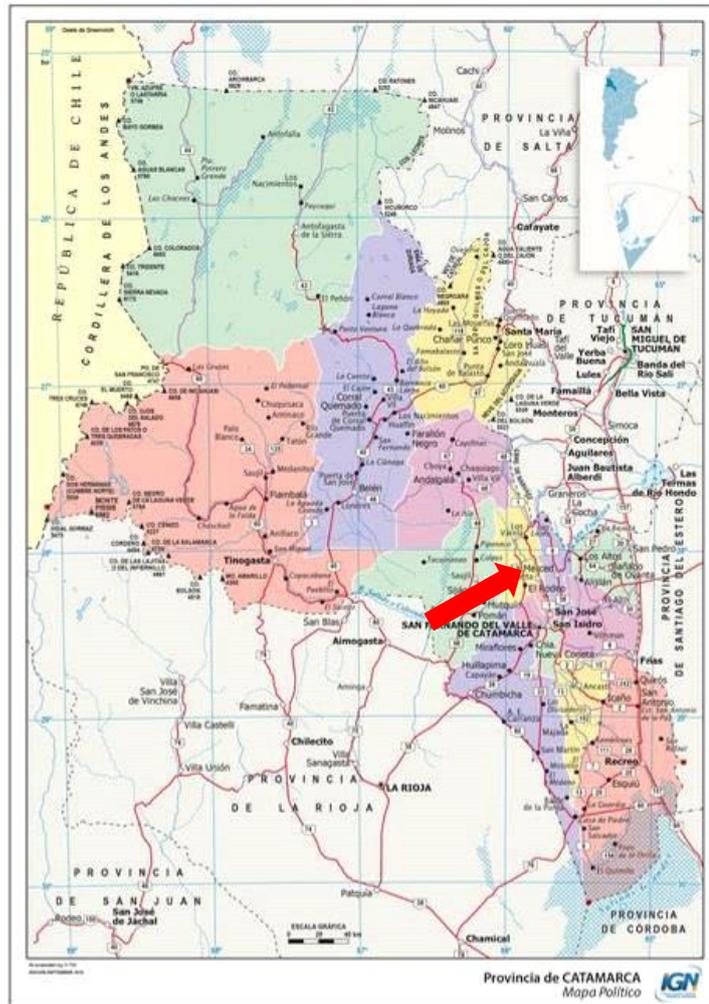


Figura 36. Localidad de Las Juntas Departamento de Ambato, Provincia de Catamarca <https://www.ign.gov.ar/images/MapasWeb/CATAMARCA/CATAMARCA-POLITICO-WEB.jpg>

El nombre Las Juntas proviene del hecho de que en esta localidad se encuentra la confluencia de tres ríos importantes: el Río Las Juntas, el Río Las Salvias y el Río Las Trancas. Los ríos de Las Juntas son conocidos ya que en ellos se suele practicar pesca y por el gran atractivo que sus cauces le dan a un paisaje ya de por sí imponente. Presenta un microclima templado y húmedo con temperaturas máximas en veranos mayores a 30°C y mínimas menores a los 10°C. La Figura 37 y la Figura 38 muestran el Río Las Trancas en la localidad de las Juntas.



Figura 37. Puente sobre Río Las Trancas, Las Juntas. [Fotografía]. Recuperado de: <https://twitter.com/CatamarcaGob/status/1364198331702906882/photo/3>



Figura 38. Zona aledaña al puente y vado sobre el Ríos Las Trancas. [Fotografía]

En la Figura 39 se observa una vista de la zona de Las Juntas

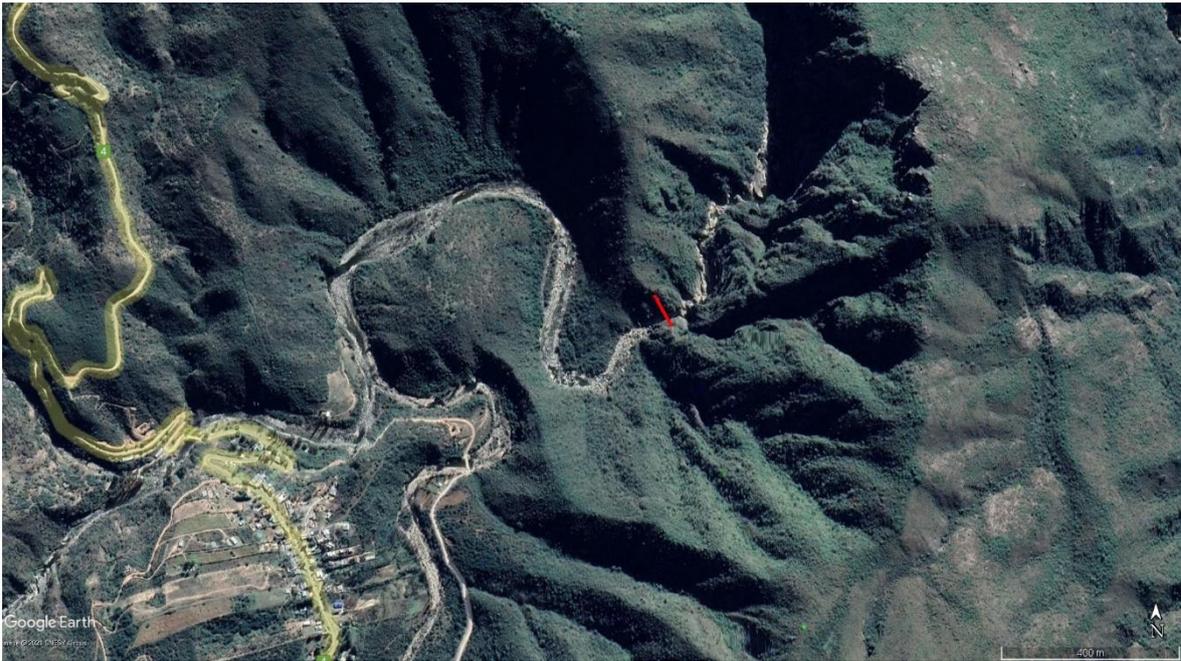


Figura 40. Ubicación de cierre. [Imagen satelital]

3.3 CUENCA

La cuenca del Río Las Juntas se desarrolla en el valle de Catamarca y forma parte de la cuenca alta del Río del Valle que, junto con el río Tala son las principales fuentes de agua, para las actividades que se desarrollan en el área productiva de la Región Central de la Provincia de Catamarca y la capital de esta. El área total de la cuenca es de 240 km² aproximadamente.

3.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO

3.4.1 Introducción

El cuerpo de la presa será una construcción de hormigón con una geometría clásica de la sección transversal correspondiente a una presa de gravedad

Los principales beneficios son:

- Generación de energía eléctrica
- Provisión de agua potable
- Provisión de agua para riego
- Turismo, recreación y pesca
- Control de avenidas
- Captación de sedimentos

3.4.2 Resumen de los Parámetros de La Presa

Durante la etapa de Estudios Básicos se definieron los siguientes parámetros básicos de la obra.

- Presa de hormigón de gravedad

Estudios de Obras de Captación, Conducción y Desagüe de una Presa.

- Altura máxima de la presa: 65,7 m (Cota de coronamiento 1443,70 m)
- Cota de Vertedero 1436,00m
- Ancho de vertedero: 70 m
- Cota de coronamiento 1443,70 m
- Descargador de fondo: 2 conductos de diámetro 500 mm
- Obra de toma a central: 1 conducto de diámetro 800 mm
- Turbinas Francis: 3 máquinas
- El talud aguas arriba de 0,14 H: 1V y un talud aguas abajo 0,80 H: 1 V.
- Ancho de coronamiento: 6,0 m

El material empleado en su construcción es el hormigón en masa de baja permeabilidad, para reducir la filtración de agua a través del cuerpo de la presa.

La evacuación de caudales se completa mediante una rampa y la disipación de energía con un dispositivo de diseño en salto esquí.

También se incorpora un sistema de descarga de fondo mediante tuberías de acero de diámetro 500 mm, espesor 9,5 mm y órganos de cierre constituidos por válvulas Howell Burger y compuerta.

Con respecto a la toma de agua para uso domiciliario (agua potable) y riego, se realizarla directamente desde el embalse con una obra específica (que puede ser sobre pontón u otra toma como galería filtrante o pozo, por las variaciones de nivel) con bomba sumergible. Esto, por la cercanía a los usos, acceso, provisión de energía y la facilidad de operación

Estos parámetros pueden ser ajustados durante la etapa de proyecto ejecutivo.

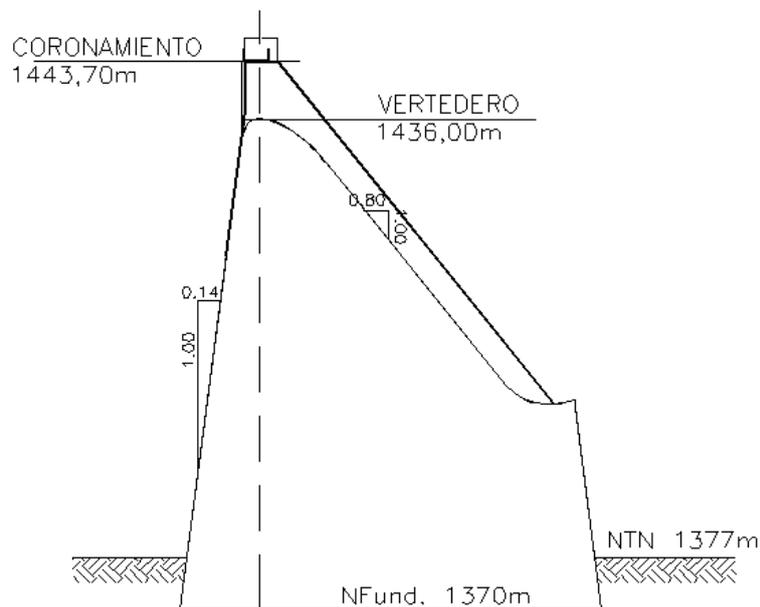


Figura 41 .Corte de la presa de acuerdo con los estudios preliminares

Se determinó que el emprendimiento multipropósito generaría con el equipo planteado y los rendimientos considerados lo indicado en la Tabla 3.

Tabla 3. Generación determinada en los Estudios Básicos. (GCIS - Consorcio de Cooperación, 2021)

Generación Media	
Rendimiento de la turbina	0.93
Rendimiento del generador	0.98
Rendimiento del transformador	0.99
	0.90
Periodo de turbinado (hs)	12
Potencia instalada (MW) *=	0.70
* cálculo preliminar Considerando 55m de carga	

Costo anual de la energía para 8000 hs		
(Valor Cammesa 16/06/21)	4025765.75	\$/año
	4.03	M\$/año

3.4.3 Caudales de la presa

De acuerdo con los Estudios Básicos se puede indicar los parámetros representativos de los caudales de la presa La Herradura.

Tabla 4. Parámetros de la presa La Herradura. (GCIS - Consorcio de Cooperación, 2021)

Determinación de Caudal Medio		
<u>En base a Q esp. s/ estación Las Juntas</u>		
Superficie de Cuenca	239.52	Km ²
Caudal esp. Medio	3.064	l/s/ Km ²
Q medio	0.734	m ³ /s
<u>Por Transposición por áreas con Pomancillo</u>		
Superficie de Cuenca	239.52	Km ²
Superficie de Cuenca	1500	Km ²
Caudal esp. Medio	4.5	m ³ /s

Estudios de Obras de Captación, Conducción y Desagüe de una Presa.

Q medio		0.719	m ³ /s
---------	--	--------------	-------------------

Además, en función de la locación del cierre de la presa se estableció la siguiente curva cota-volumen.

Tabla 5. Curva Cota – Volumen. (GCIS - Consorcio de Cooperación, 2021)

Cota msnm	Área m²	Volumen 1000m³
1380	1103.87	2.8
1390	3526.24	22.1
1400	17105.99	115.1
1410	53233.5	434.8
1420	104289.4	1229.9
1430	182597.1	2661.3
1440	282560.8	4955
1444	339859.8	6196.2

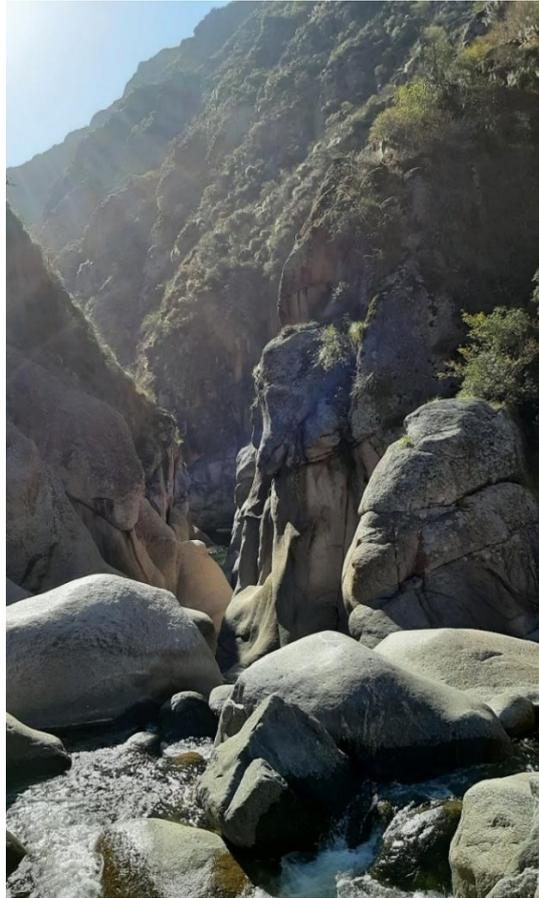


Figura 42. Cierre en sector de la presa. [Fotografía] (GCIS - Consorcio de Cooperación, 2021)



Figura 43. Vista del vaso desde sector del cierre de la presa. [Fotografía] (GCIS - Consorcio de Cooperación, 2021)



Figura 44. Vista del cauce sector de la presa. [Fotografía] (GCIS - Consorcio de Cooperación, 2021)

3.5 ESTUDIOS DE HIDROGENERACIÓN

Se describen las características principales del estudio de hidrogenación desarrollado en el informe de anteproyecto (GCIS, Consorcio de Cooperación; 2021).

Al tratarse de un proyecto multipropósito, a la hora de diseñar las obras de generación hidroeléctrica (Capacidad del Embalse y Potencia Instalada) y fijar las pautas hidrológicas y de seguridad en la operación del sistema se establecieron el siguiente orden de prioridades:

1. Generación de energía hidroeléctrica estacional regularizada
2. Complemento al Abastecimiento de agua de riego y potable,
3. Turismo y recreación.

La generación Hidroeléctrica se basa en aprovechar los caudales estacionales del río Las Juntas que se forma de la unión de los ríos Las Salvias y el Río Las Trancas. Los caudales son relativamente moderados y el salto lo provee la pendiente de la zona de sierras.

El desnivel total entre la cota que alcanzaría el embalse afectando un porcentaje aceptable de la infraestructura del pueblo, y el del nivel de restitución en el cierre alcanza un salto máximo de 55m. La Central se ubicaría al pie de presa.

A continuación, se presentan las variables asociadas a la configuración de generación hidroeléctrica para el proyecto.

3.5.1 Caudal

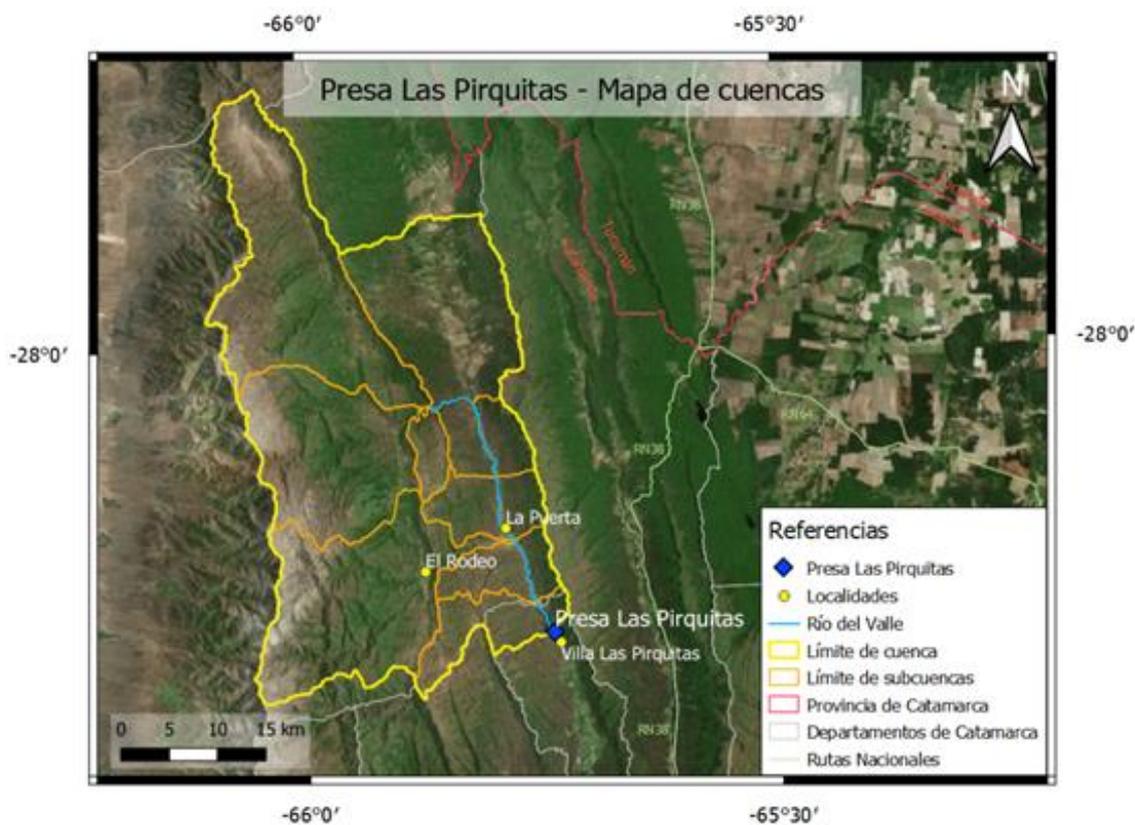
Para la determinación de esta variable en los estudios precedentes se emplearon los **registros medios diarios** de caudal a la salida del embalse Pirquitas para el periodo de 1972 a 2014. Debido a que los mismos se encuentran “laminados” por la función regulatoria del embalse fue necesario reconstruir la serie de caudales de ingreso. Considerando los dos niveles diarios registrados en el embalse y mediante la curva cota volumen de este, se reprodujo la serie que representa la variación de almacenamiento. Esta serie, junto a la serie de erogaciones por los descargadores de fondo y el vertedero permitió determinar la serie de caudales de ingreso al embalse. La serie así obtenida debe guardar relación con el caudal medio, de tal forma que la definición de la potencia instalada posea factor de uso que optimice la inversión y el aprovechamiento del recurso. Este valor se determinó mediante dos metodologías que arrojaron un valor semejante:

- 1) En base al caudal específico de la cuenca determinado a partir de registros en la Estación Las Juntas

<u>En base a Q esp. s/ estación Las Juntas</u>			
Superficie de Cuenca		239.52	km ²
Caudal esp. Medio		3.064	l/s/ km ²
Q medio		0.734	m ³ /s

- 2) Mediante transposición por áreas considerando la serie de caudales registrados en la estación Pomancillo

<u>Por Transposición por áreas con Pomancillo</u>			
Superficie de Cuenca		239.52	km ²
Superficie de Cuenca		1500	km ²
Caudal esp. Medio		4.5	m ³ /s
Q medio		0.719	m ³ /s



AREAS km ²	1421.34
PERIMETRO km	279.12
Longitud de Todos los Ríos de la Cuenca (km)	257
Longitud Máxima de Escurrimiento de la Cuenca Completa (km)	88.93

Figura 45. Cuenca Embalse Las Pirquitas (Fuente: Ing. Bacchiaga, 2021)

3.5.2 Salto hidráulico

El desnivel total entre la cota que alcanzaría el embalse afectando un porcentaje aceptable de la infraestructura del pueblo, y el del nivel de restitución en el cierre alcanza un salto máximo de **53m**. La Central se ubicaría al pie de presa.

3.5.3 Potencia instalada

Tras sucesivas simulaciones con diversos equipos de turbinado para la serie analizada se escogió como equipos preliminares, tres grupos para **0.333 m³/s** y una altura de **53m**. Esto permite turbinar con los tres equipos en paralelo un caudal total de 1m³/s. Con estos valores la potencia instalada total alcanza aproximadamente el valor de **0.50 MW**.

De la simulación se obtiene que la potencia media ponderada es **0.28 MW** y la energía anual que puede obtenerse **2.45 GWh/año**.

El Caudal Ecológico no fue considerado en esta etapa, en virtud de la operación propuesta (turbinado diario y continuo) la que asegura el sustento para la vida acuática y la vegetación ripariana.

Este esquema de operación preliminar no evidenció días sin volumen turbinable y sin reserva en el embalse. (GCIS, Consorcio de Cooperación; 2021).

En las siguientes imágenes se puedes observar tanto la simulación de generación (Figura 46. Simulación bianual de Generación.) como la simulación del embalse, con los volúmenes de ingreso y egreso y el balance del mismo (Figura 47. Simulación bianual del ingreso y vertido sobre el vertedero presa La Herradura. Ambas generaciones corresponden a un periodo bianual de análisis.

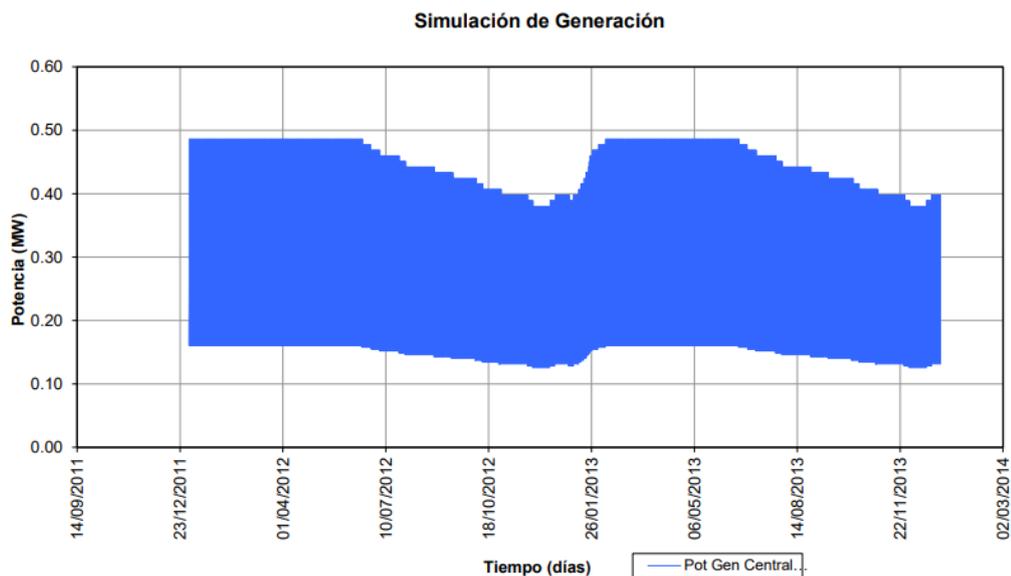


Figura 46. Simulación bianual de Generación. (GCIS - Consorcio de Cooperación, 2021)

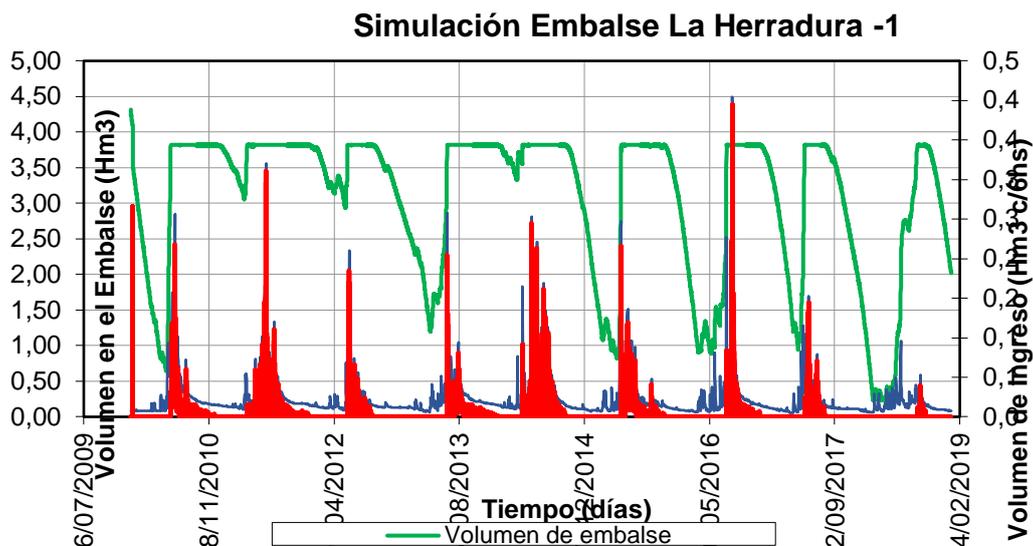


Figura 47. Simulación bianual del ingreso y vertido sobre el vertedero presa La Herradura. (GCIS - Consorcio de Cooperación, 2021)

3.6 UBICACIÓN DE SALA DE MÁQUINAS

Durante el primer periodo de la práctica supervisada, se trabajó en el análisis de alternativas de la ubicación de la casa de máquinas. Se tomó un plano base, con lo que se definieron sus dimensiones preliminares y se analizaron dos alternativas principales de ubicación de la misma, unas aguas abajo de la presa y otra en el mismo cuerpo, bajo el vertedero.

Se estudió la posibilidad de emplazar la central aguas abajo de la presa, es decir, con la estructura de la central independizada del cuerpo de la presa y localizada al margen del río. Se utiliza este tipo de central en zonas de ríos con pendientes altas, de forma de obtener un mayor salto aprovechable. Se requiere de un conducto que transporte el agua desde la toma en la presa hasta la central (Cuesta & Vallarino, 2000).

Para analizarse en el proyecto la central aguas abajo de la presa se utilizó el programa Autocad Civil 3D (versión 2021), lo que permitió trabajar con curvas de nivel e implantar superficies, de forma de generar un terraplén con sus consiguientes volúmenes de corte y relleno. A partir de las dimensiones preliminares para la sala de máquinas (15m x 10m), se trazó una superficie, con la cual se generó el terraplén de implantación de la sala de máquinas.

Las pendientes dadas a los taludes de relleno y corte fueron de 2H:1V, a una cota de fundación de 1388 msnm. Se observó (Figura 48. Terraplén a cota 1388 msnm. Taludes de corte y relleno. y Figura 49. Zonas de relleno y corte.) que es necesario un importante movimiento de suelo para dar estabilidad al talud, lo que conlleva a grandes volúmenes tanto de relleno como de corte principalmente. En las secciones de relleno, se estaría interviniendo sobre el cauce del río, modificando el mismo, mientras que los volúmenes de corte implican grandes secciones de la geografía. Esto se debe a que el cierre en donde se encuentra la presa es muy estrecho. A esto se le suman los costos en lo que respecta a conductos hidráulicos, a causa de la longitud de tubería requerida para conducir el agua desde la presa hasta la central, además de la infraestructura necesaria para el soporte de los mismos (apoyos), aumentando las tareas de excavación.

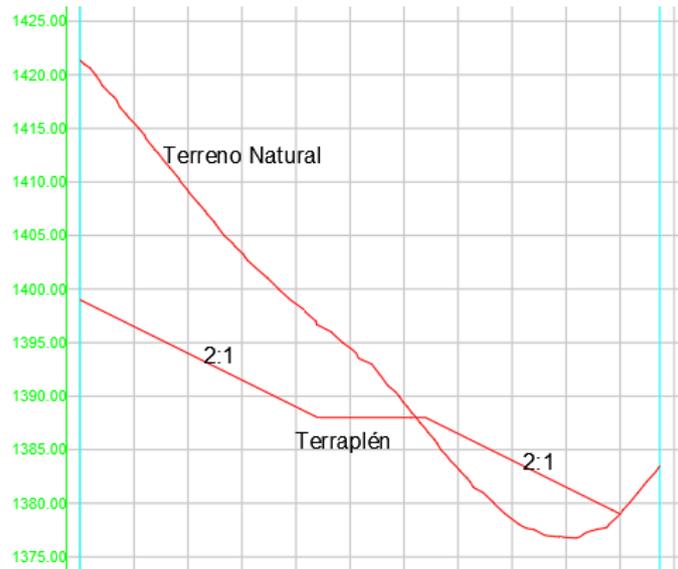


Figura 48. Terraplén a cota 1388 msnm. Taludes de corte y relleno.

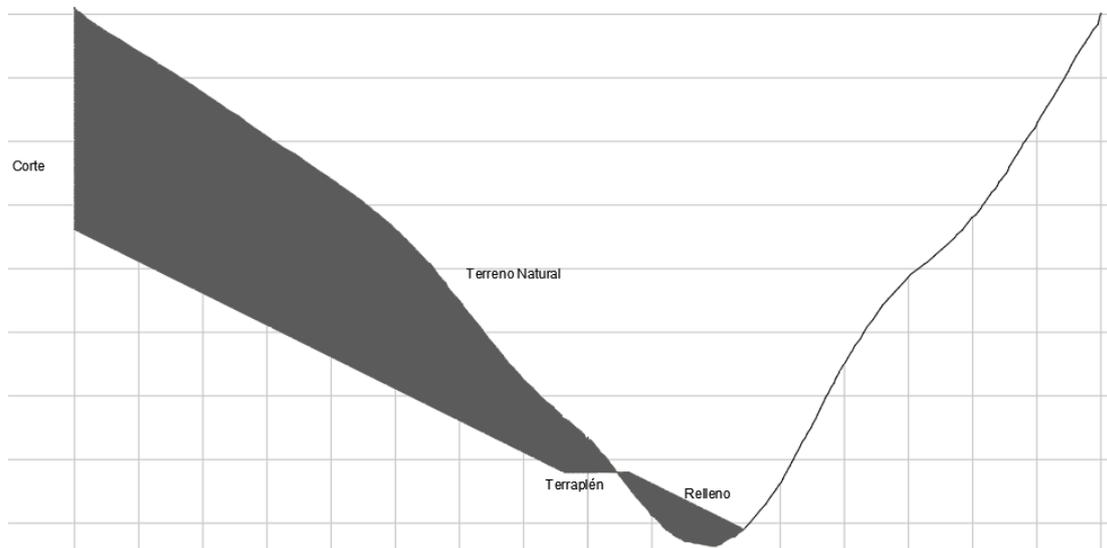


Figura 49. Zonas de relleno y corte.

Ante esta situación surge como alternativa emplazar la central dentro del cuerpo de la presa, debajo del vertedero. Este tipo de centrales es aplicado en gargantas cerradas, en donde el espacio disponible para ubicar la central y el vertedero es escaso. Si se toma este tipo de centrales, se recomienda emplazar la central debajo del salto esquí, de forma que el agua que pasa por el vertedero, sea liberada por encima de la sala de máquinas, sin riesgo de afectar la misma (Nigam, 1979). Esta alternativa constituye una disminución de los costos por implantación de la central aguas abajo (excavación/relleno/tuberías), así como de las pérdidas de carga por fricción que se dan a lo largo de la tubería, en detrimento del salto que se podría ganar aguas abajo.

Por lo analizado anteriormente es que se continuó con el desarrollo de la sala de máquinas dentro del cuerpo de la presa, debajo del salto esquí.

3.7 OBRA DE TOMA

La obra de toma está compuesta por rejas que evitan la introducción de material indeseado en la conducción, de dimensiones de 2,00m x 2,00m con planchuelas de 2" x 1/4" (Figura 50. Tipo de planchuela a utilizar para las rejas.) con una separación de 5 cm entre cada una. No se considera necesaria la instalación de un limpiarrejas debido a que este elemento es utilizado generalmente en tomas superficiales, por la incapacidad del embalse de retener elementos indeseados a esa altura de la toma (Vallarino, 2000).

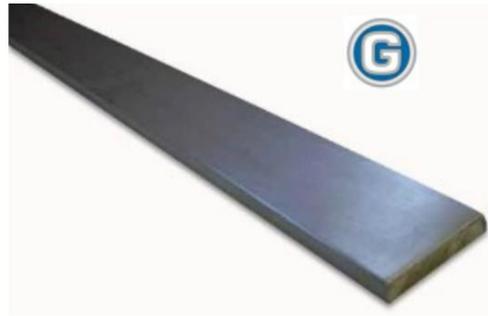


Figura 50. Tipo de planchuela a utilizar para las rejas. Recuperado de: <https://www.gramabi.com.ar>

Además, se incluye una compuerta de tipo stop log o compuerta ataguía para regular el paso del agua a través de la conducción y permitir realizar trabajos de mantenimiento en seco en las secciones aguas abajo. La compuerta está compuesta por un bastidor fijo y un tablero móvil. Se plantea la colocación de la misma de forma que quede montada en el muro y amarrada mediante anclajes de expansión o químicos (Figura 51. Compuerta stop log instalada montada en muro. [Imagen] Recuperada de: https://www.cmovalves.com/wp-content/uploads/2016/12/CATALOGO-SERIE-AT-Rev-00-_caracter%C3%ADsticas.pdf). El accionamiento se realiza mediante algún dispositivo, en este caso, un malacate ubicado en la parte superior de la presa, en el coronamiento de la misma.

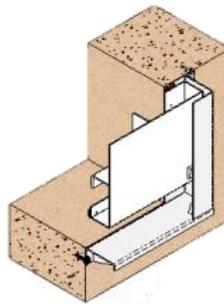


Figura 51. Compuerta stop log instalada montada en muro. [Imagen] Recuperada de: https://www.cmovalves.com/wp-content/uploads/2016/12/CATALOGO-SERIE-AT-Rev-00-_caracter%C3%ADsticas.pdf

El conjunto reja-compuerta se encuentra posicionado paralelamente a la cara aguas arriba de la presa, teniendo la misma pendiente, al estilo de la mostrada en la Figura 52.

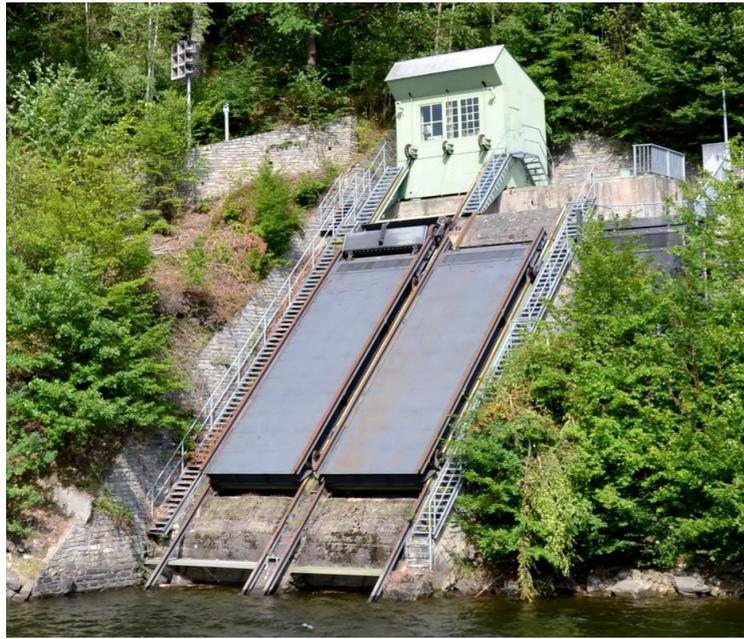


Figura 52. Compuertas stop log montadas sobre muro en obra de toma. [Fotografía]

Recuperado de:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/04/Dobra_Stausee_Dammmbalken.jpg

La configuración de la obra de toma es similar a la de (Figura 53. Toma de la central de Song Lou-lou. Donde A y B son grúas, C ranura para el almacenamiento de las ataguías, F rejas, G galerías de drenaje, H tubería de presión, I compuerta de vagón, J sala de control y K galería de cables.) en donde se cuenta con rejas y compuerta tipo ataguía en el paramento mojado de la presa.

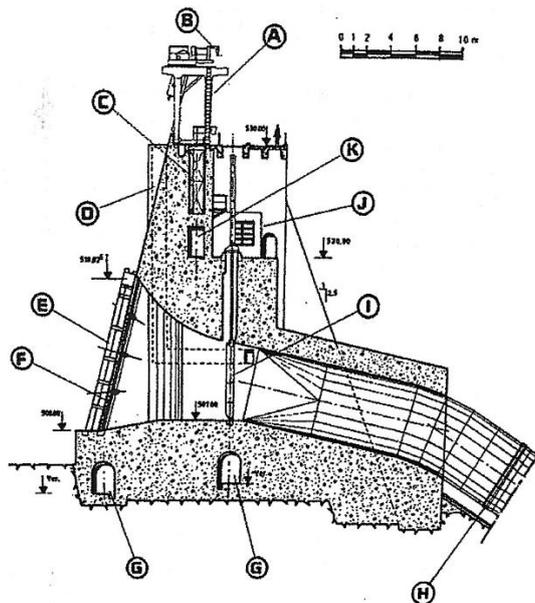


Figura 53. Toma de la central de Song Lou-lou. Donde A y B son grúas, C ranura para el almacenamiento de las ataguías, F rejas, G galerías de drenaje, H tubería de presión, I compuerta de vagón, J sala de control y K galería de cables. (Cuesta & Vallarino, 2000)

El tipo de transición seleccionado entre la embocadura y la conducción es el conocido como entrada circular acampanada (*circular bellmouth entrances*) (Figura 54. Transición del tipo entrada circular acampanada.), de forma de evitar una transición brusca y disminuir pérdidas.

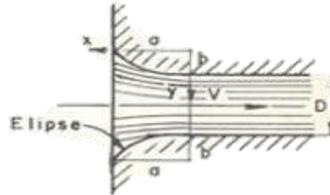


Figura 54. Transición del tipo entrada circular acampanada.

Luego, la conducción hasta la sala de máquinas es realizada mediante una tubería de acero DN 800 mm, la cual se encuentra dentro del cuerpo de la presa, recubierta por hormigón.

3.8 DISEÑO DE CASA DE MÁQUINAS

Para el diseño y dimensionamiento de la casa de máquinas se partió de un plano base, para luego ir acomodando las piezas que albergaría. Por ello, de manera simultánea a la generación del plano base, se generó la turbina, a partir del predimensionado realizado en el anteproyecto de la presa (GCIS - Consorcio de Cooperación; 2021) el cual fue realizado empleando las funciones de correlación obtenidas por el procedimiento de regresión publicado en la Revista Water Power and Dam Construction (1976), además de recomendaciones dadas por el Bureau of Reclamation (1976). Principalmente se requiere el diámetro de descarga, el cual se llama D_3 , y la velocidad específica N_s . Estos valores son obtenidos en base a los resultados de hidrogenación, los cuales se muestran a continuación:

- *Potencia media ponderada* = 0.3 MW
- *Energía anual* = $2.32 \frac{GWh}{año}$
- Número de unidades: 3 (tres)
- $Q_d = 0.333 \frac{m}{s}$
- $H_d = 51 m$
- *Potencia* = 148.44 KW = 200 CV = 197.60 HP (eficiencia 0.90)
- $N = 1500 rpm$

Luego, la velocidad específica se obtiene:

$$N_s = \frac{N P^{1/2}}{H_d^{5/4}}$$

Ecuación 27. Velocidad específica.

Donde N_s es la velocidad específica en $\text{rpm kW}^{0.5} \text{ m}^{-1.25}$, N velocidad angular o de rotación en rpm , P potencia de diseño de la turbina en kW , H_d carga de diseño de la turbina en m .

Cuando se trabaja con pequeñas turbinas, suele ser conveniente encontrar el valor de N_s a través de su relación con N_q debido a la incertidumbre en la eficiencia de estas pequeñas máquinas, donde:

$$N_q = \frac{N Q^{\frac{1}{2}}}{H_d^{\frac{3}{4}}} = \frac{\left(1500 \text{ rpm} \sqrt{\left(0.333 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}\right)}{(51 \text{ m})^{\frac{3}{4}}} = 45 \text{ rpm}$$

Y

$$N_s = 3.65 * N_q = 164 \text{ rpm}$$

Se toma N igual a 1500 rpm como velocidad de rotación síncrona luego de ajustar la velocidad de la turbina a la frecuencia de oscilación de la energía eléctrica.

Mientras que el diámetro de descarga D_3 se obtiene de la siguiente manera:

$$D_3 = 84.5 \phi \frac{\sqrt{H_d}}{N'}$$

Ecuación 28. Diámetro de descarga

Siendo $D_3 = 0.3 \text{ m}$

Teniendo los dos valores, se obtienen las dimensiones de rodete, carcasa y tubo de desfogue mediante las relaciones suministradas. Los valores fueron extraídos del informe de anteproyecto nombrado anteriormente.

Rodete de turbina Francis:

- $D_3 = D_1 = D_2 = 0,30 \text{ m}$ (Francis normal)
- $H_1 = 0,04 \text{ m}$
- $H_2 = 0,09 \text{ m}$

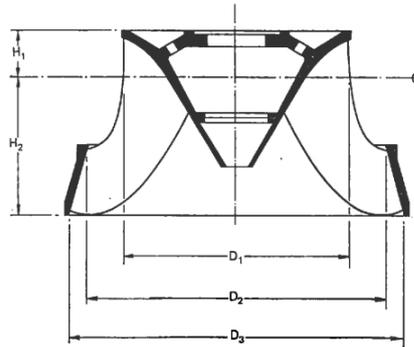


Figura 55. Dimensiones del rotor de Turbina Francis. (de Siervo & de Leva, 1976)

Caracol de turbina Francis:

Se considera que las siguientes condiciones verifican bajo las dimensiones obtenidas:

- Velocidad del agua a la entrada de la carcasa $V_e = 0.22(2 \cdot g \cdot H_d)^{0.5}$, y menor a $10.7 \frac{m}{s}$.
- Diámetro de entrada menor o igual que el de la tubería a presión.
- Velocidad tangencial en secciones sucesivas permanece constante.

- $\frac{A}{D_3} = 1,2 - \frac{19,56}{N_s} = 1,32$ entonces $A = 0,40 \text{ m}$
- $\frac{B}{D_3} = 1,1 + \frac{54,8}{N_s} = 1,43$ entonces $B = 0,43 \text{ m}$
- $\frac{C}{D_3} = 1,32 + \frac{49,25}{N_s} = 1,62$ entonces $C = 0,49 \text{ m}$
- $\frac{D}{D_3} = 1,50 + \frac{48,8}{N_s} = 1,80$ entonces $D = 0,54 \text{ m}$
- $\frac{E}{D_3} = 0,98 + \frac{63,60}{N_s} = 1,37$ entonces $E = 0,41 \text{ m}$
- $\frac{F}{D_3} = 1 + \frac{131,4}{N_s} = 1,80$ entonces $F = 0,54 \text{ m}$
- $\frac{G}{D_3} = 0,89 + \frac{96,5}{N_s} = 1,48$ entonces $G = 0,44 \text{ m}$
- $\frac{H}{D_3} = 0,79 + \frac{81,75}{N_s} = 1,28$ entonces $H = 0,39 \text{ m}$
- $\frac{I}{D_3} = 0,1 + 0,00065 \cdot N_s = 0,21$ entonces $I = 0,063 \text{ m}$
- $\frac{L}{D_3} = 0,88 + 0,00049 \cdot N_s = 0,96$ entonces $L = 0,30 \text{ m}$
- $\frac{M}{D_3} = 0,60 + 0,000015 \cdot N_s = 0,60$ entonces $M = 0,18 \text{ m}$

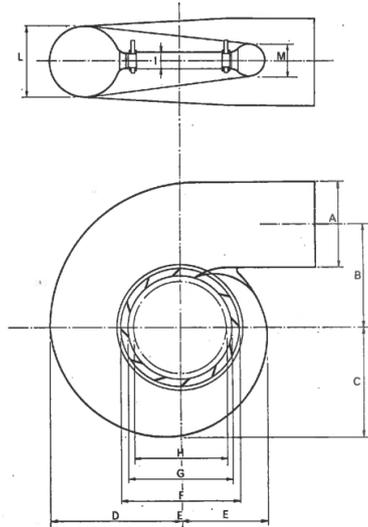


Figura 56. Dimensiones de la carcasa de Turbina Francis. (de Siervo & de Leva, 1976)

Tubo de desfogue de turbina Francis:

- $\frac{N}{D_3} = 1,54 + \frac{203,5}{N_s} = 2,78$ entonces $N = 0,834$
- $\frac{O}{D_3} = 0,83 + \frac{140,7}{N_s} = 1,69$ entonces $O = 0,51$
- $\frac{P}{D_3} = 1,37 - \frac{0,00056}{N_s} = 1,37$ entonces $P = 0,41$
- $\frac{Q}{D_3} = 0,58 + \frac{22,6}{N_s} = 0,72$ entonces $Q = 0,22$
- $\frac{R}{D_3} = 1,6 + \frac{0,0013}{N_s} = 1,6$ entonces $R = 0,48$
- $\frac{S}{D_3} = \frac{N_s}{-9,28+0,25 \cdot N_s} = 5,17$ entonces $S = 1,55$
- $\frac{T}{D_3} = 1,50 + 0,00019N_s = 1,50$ entonces $T = 0,45$
- $\frac{U}{D_3} = 0,51 + 0,0007 \cdot N_s = 0,615$ entonces $U = 0,18$
- $\frac{V}{D_3} = 1,10 + \frac{53,7}{N_s} = 1,43$ entonces $V = 0,43$
- $\frac{Z}{D_3} = 2,63 + \frac{33,8}{N_s} = 2,84$ entonces $Z = 0,85$

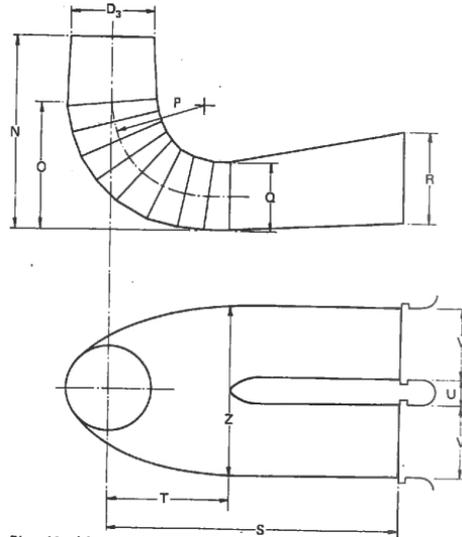


Figura 57. Dimensiones de tubo de desagüe de Turbina Francis. (de Siervo & de Leva, 1976)

Finalmente, dentro de la casa de máquinas se encuentran tres turbinas Francis de eje horizontal, con las siguientes dimensiones:

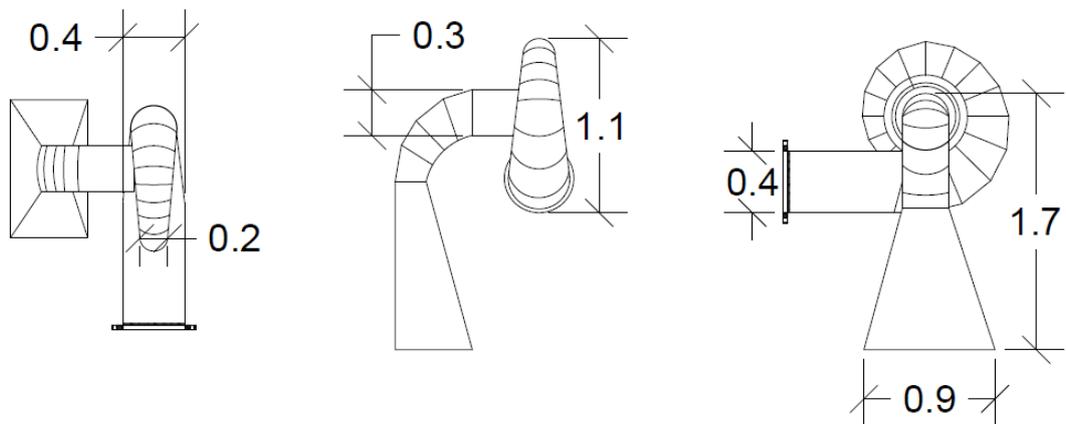


Figura 58. Dimensiones de Turbina Francis.

3.8.1 Manifold y dimensionamiento de la central

Una vez obtenidas las dimensiones de la turbina, se comenzó a plantear la disposición de las mismas dentro del plano base, y a definir el manifold, es decir, el diseño de las tuberías que alimentan a las turbinas al llegar la tubería principal a la casa de máquinas, la cual proviene de la obra de toma.

Para ello se probaron diferentes configuraciones, conservando la idea de que la tubería principal llega a la sala y se bifurca a 90° a cada lado de la misma. En primer lugar, se utilizaron Tee simples, de manera de evitar las piezas especiales. Sin embargo, luego

de observar que la sala de máquinas debía ser de menor ancho, ya que la presa es angosta por propias características geomorfológicas de la cerrada, se debió modificar el diseño, quedando una cruz en la bifurcación de la cañería principal. Se debieron considerar las limitaciones existentes respecto a las dimensiones de la presa, ya que en el cuerpo de la misma se ubicaría la sala de máquinas. El principal condicionante fue el ancho de la presa, así como también, la altura a la cual se encontraría.

Para el manifold se debieron generar las piezas y accesorios que conducen el agua desde la tubería principal hasta las turbinas. Muchas de estas piezas, tales como los carretes, codos y válvulas, fueron facilitadas por CEAS. SA, de su biblioteca de piezas. Luego los mismos fueron modificados según dimensiones del proyecto.

Se utilizaron carretes de acero de diámetro DN 800 y DN 400, con reducciones de DN 800 a 400, así como también codos a 90°, juntas de desarme, válvulas mariposa, entre otros. Las mismas se muestran en la Figura 59.

Estudios de Obras de Captación, Conducción y Desagüe de una Presa.

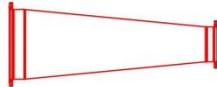
CARRETE A° DN 800mm L: 1000mm



CARRETE A° DN 800mm L: 500mm



REDUCCIÓN A° DN 800-400mm L: 2400mm



CARRETE A° DN 800mm L: 1000mm



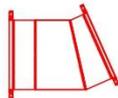
CARRETE A° DN 800mm L: 500mm



CARRETE A° DN 800mm L: 500mm



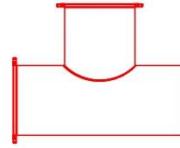
CODO 24° A° DN 800mm



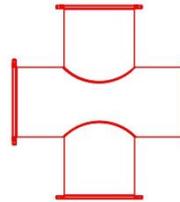
CODO 90° A° DN 800mm



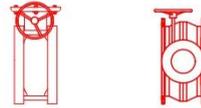
TEE SIMPLE A° DN 800mm



TEE DOBLE A° DN 800mm



VÁLVULA MARIPOSA A° DN 800mm



VISTA LATERAL

VISTA PLANTA

VÁLVULA MARIPOSA A° DN 400mm



VISTA LATERAL

VISTA PLANTA

JUNTA DE DESARME A° DN 800mm



JUNTA DE DESARME A° DN 400mm



Figura 59. Piezas utilizadas en el manifold de la central de la presa “La Herradura”

La configuración del manifold se fue estudiando y modificando en función de las condiciones del entorno y de la generación hidroeléctrica, así como también de criterios técnicos aportados por los ingenieros de la consultora. Finalmente se obtuvo lo que se muestra a continuación en la Figura 60. Vista en planta de la central de la presa “La Herradura”..

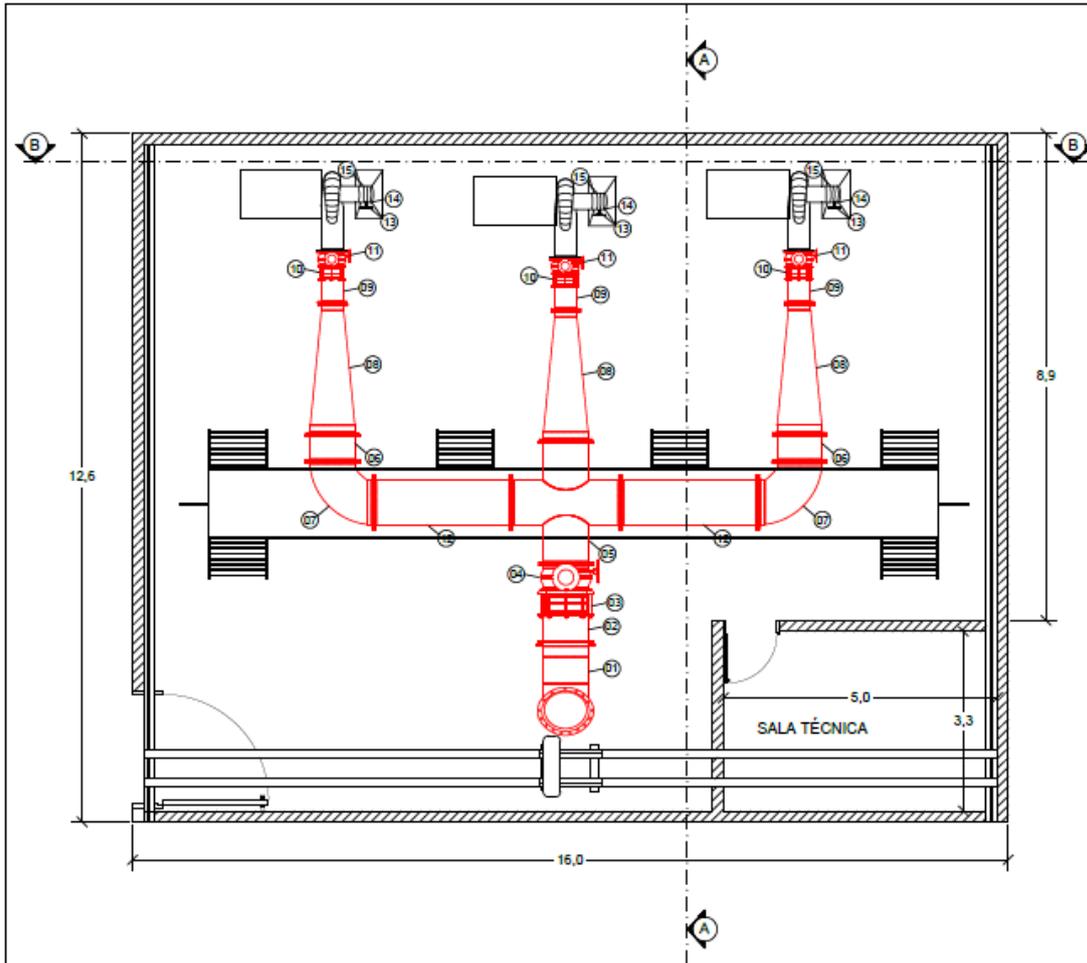


Figura 60. Vista en planta de la central de la presa “La Herradura”.

Número de pieza	Descripción	Cantidad
1	Codo especial 24 ° A° Br-Br, DN 800 mm	1
2	Carretel A° Br-Br, DN 800 mm L=500	1
3	Junta de Desmontaje A° Br-Br, DN 800 mm	1
4	Válvula Mariposa A° Br-Br, DN 800 mm	1
5	Cruz A° Br-Br, DN 800x800 mm	1
6	Caretel A° Br-Br, DN 800 mm L=500	2
7	Codo 90° A° Br-Br, DN 800 mm	2
8	Reducción excéntrica A° Br-Br, DN 800x400 mm	3
9	Carretel A° Br-Br, DN 400 mm L=500	3
10	Junta de Desmontaje A° Br-Br, DN 400 mm	3
11	Válvula Mariposa A° Br-Br, DN 400mm con actuador eléctrico	3
12	Carretel A° Br-Br, DN 800 mm L=2500	2
13	Junta de Desmontaje A° Br-Br, DN 200 mm	3
14	Válvula Mariposa A° Br-Br, DN 200mm	3
15	Reducción A° Br-Br, DN 300x200 mm	3

Tabla 6. Referencias de las piezas del manifold de la central de presa “La Herradura”.

Como complementos de la central, se consideraron necesarios algunos elementos como una pasarela que permitiera acceder a los distintos puntos de la sala, debido a que las tuberías se encuentran sobre el nivel del suelo, dificultando el paso. Adicionalmente, un puente grúa es requerido para la instalación y reparación del sistema de cañerías y accesorios. Una puerta blindada de 2 m de ancho se seleccionó como puerta principal, de forma que resista a la presión de agua, en caso de inundación del sector.

A continuación, en las Figura 62. Vista B-B de la sala de máquinas de la presa “La Herradura”. y Figura 61. Vista A-A de la sala de máquinas de la presa “La Herradura”. se muestran los cortes A-A y B-B respectivamente.

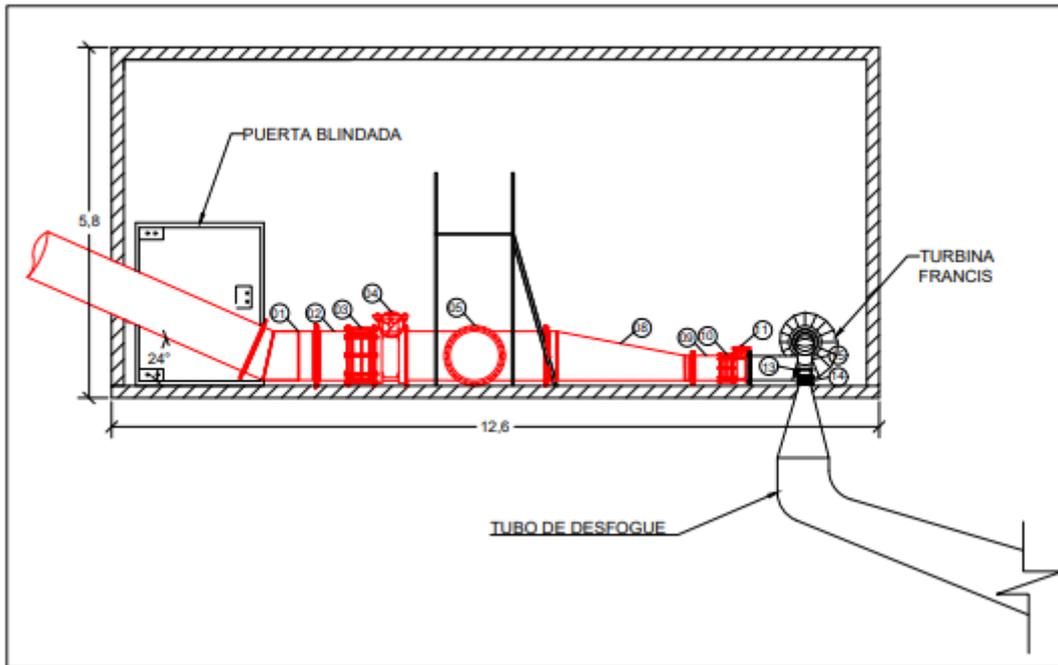


Figura 61. Vista A-A de la sala de máquinas de la presa “La Herradura”.

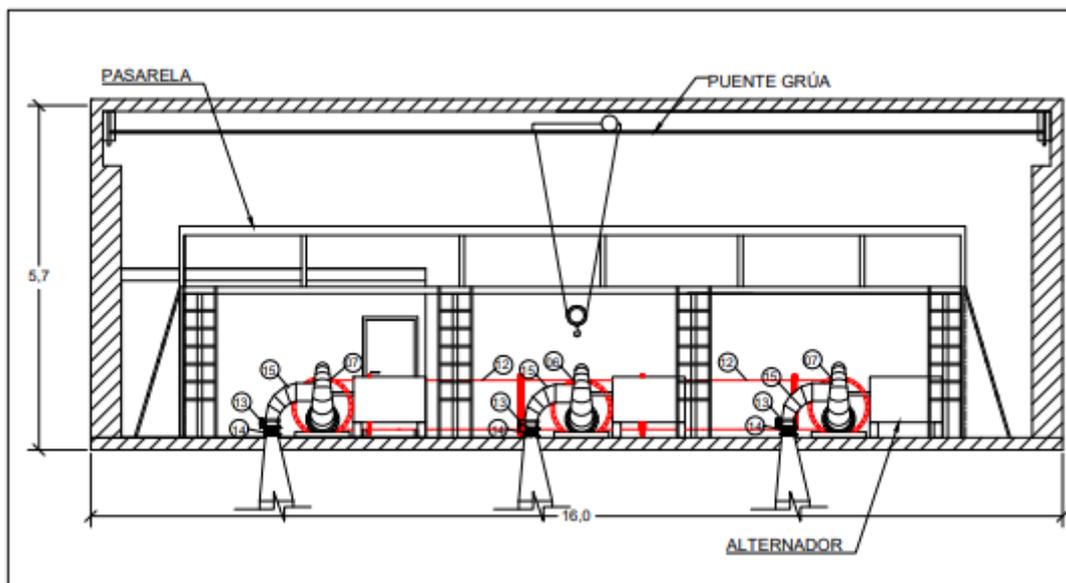


Figura 62. Vista B-B de la sala de máquinas de la presa “La Herradura”.

3.9 RESTITUCIÓN AL RÍO - CONTRADIQUE

Luego de ser turbinada, el agua pasa por el tubo de desfogue, el cual se prolonga hasta llegar a la salida de la presa. En este lugar se prevé la instalación de compuertas de tipo stop log o ataguías, de forma de evitar el ingreso del agua que se encuentra sobre el cauce del río aguas abajo de la presa en caso de necesitar retirar alguna de las turbinas.

Aguas abajo de la presa se encuentra un contradique, con el cual se busca generar un remanso al pie de la misma, obteniendo un nivel de agua determinado. Esto puede ser ventajoso para la hidrogenación, la cual suele verse restringida por condiciones que deben cumplirse, ya sea el caudal ecológico que se deba mantener o las fluctuaciones bruscas que podría experimentar el caudal del río debido al aumento del mismo por el agua erogada por la central (Vallarino, 2000). Con el contradique aguas abajo se evitan estas condicionantes. El nivel del pelo de agua generado por el contradique debe estar en función de las necesidades de la turbina para evitar el fenómeno de cavitación en la misma.

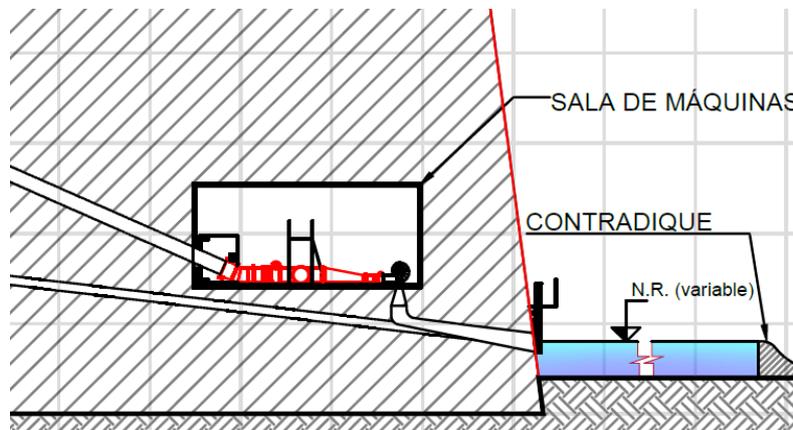


Figura 63. Restitución al cauce del río de agua turbinada. Presa "La Herradura".

3.10 PÉRDIDAS DE ENERGÍA

Para obtener la altura aprovechable por la turbina, se debieron considerar la altura existente entre el pelo de agua en el embalse y el producido aguas abajo de la presa, en el remanso, y las pérdidas producidas a lo largo del trayecto recorrido por el agua. Las pérdidas consideradas fueron las producidas por fricción y las pérdidas menores, debido a los accesorios y obstáculos que debe atravesar el agua en su camino. En primera instancia se planteó la ecuación de Bernoulli entre dos puntos (0 y 2), aguas arriba y aguas abajo de la presa, de forma de poder determinar la altura utilizada por la turbina (Figura 64. Esquema de energía a lo largo de obra de toma, conducción y restitución al cauce de río, en central hidroeléctrica. (Ortíz Flores, 2011)

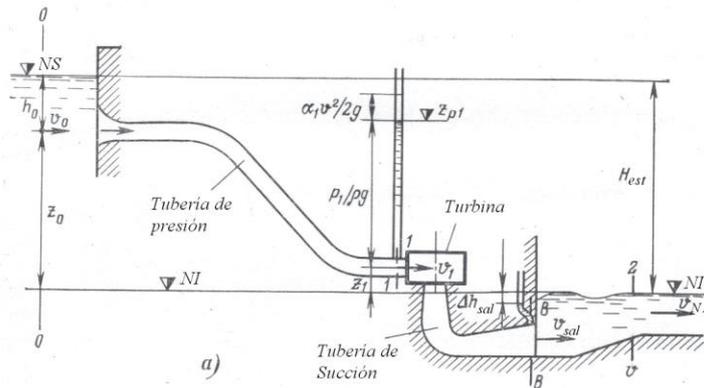


Figura 64. Esquema de energía a lo largo de obra de toma, conducción y restitución al cauce de río, en central hidroeléctrica. (Ortiz Flores, 2011).

Para el caso particular de la presa, esquemáticamente se tiene:

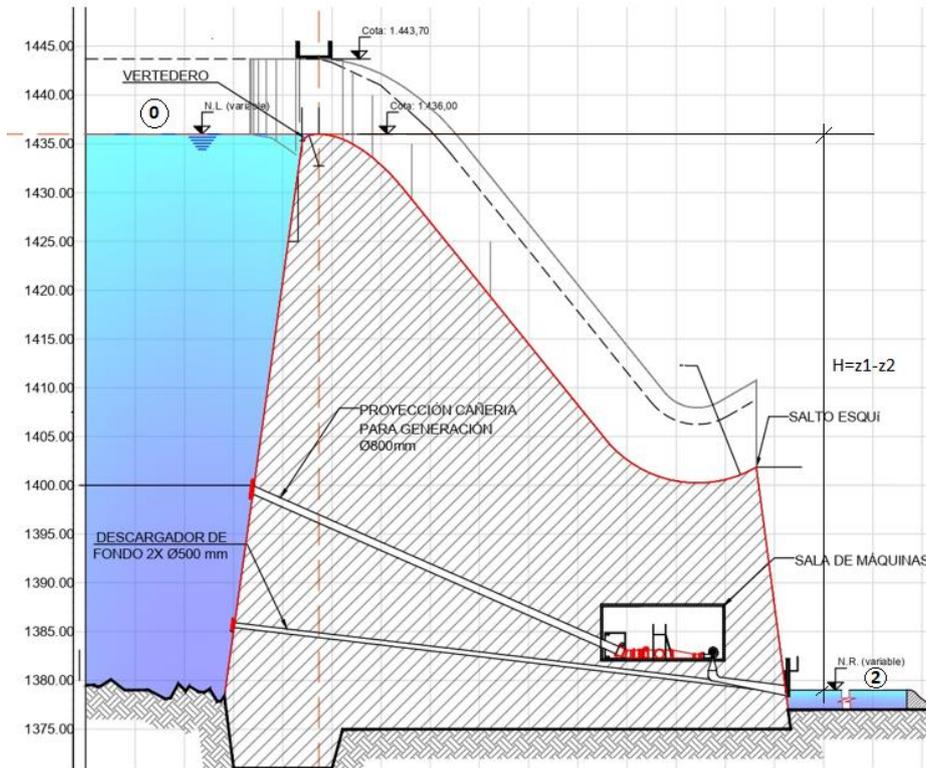


Figura 65. Esquema del aprovechamiento hidroeléctrico.

Se plantea la ecuación de Bernoulli (Ecuación 13.) entre el punto 0 y 2 (Figura 65. Esquema del aprovechamiento hidroeléctrico.) correspondiente al nivel aguas arriba y aguas abajo de la presa.

$$z_0 + \frac{v_0^2}{2.g} + \frac{p_0}{\gamma} = z_2 + \frac{v_2^2}{2.g} + \frac{p_2}{\gamma} + h_p + H_T$$

Ecuación 29. Ecuación de Bernoulli entre punto 0 y 2.

Donde z es el nivel respecto un plano de referencia, p la presión en ese punto, v la velocidad media del agua, γ el peso específico del agua, g la gravedad. El primer término representa la energía potencial en función del plano de referencia; la altura de presión, representada en el segundo término indica la energía potencial en presión, mientras que el último término, altura de velocidad, representa la energía cinética de la sección. (Cuesta & Vallarino, 2000). Además, el término h_p representa las pérdidas de energía a lo largo de la conducción, mientras que H_T representa la altura de carga utilizable por la turbina.

Se tiene que las presiones de ambos puntos son la misma, estando a presión atmosférica, por lo que ambos términos de la presión se cancelan. Además, se considera que las velocidades tanto a la entrada como a la salida son nulas. Por lo tanto, se tiene:

$$(z_0 - z_2) = h_p + H_T$$

Definiendo:

$$(z_0 - z_2) = H$$

Se reacomodan términos:

$$H_T = (z_0 - z_2) - h_p$$

Ecuación 12. Altura utilizable por la turbina

El término de pérdidas h_p representa las pérdidas por fricción h_f y las pérdidas menores h_m .

Se procedió a obtener a determinar el término h_p . Respecto a las pérdidas de carga por fricción h_f , se utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach, y se determinaron los coeficientes de pérdida de carga de cada elemento para las pérdidas menores h_m . Según el diseño seleccionado, la tubería se separa en diferentes ramales al llegar a la sala de máquinas, derivando el flujo a las respectivas turbinas. Es por ello que se analizará esta sección como tuberías en paralelo, en donde el caudal total Q se divide en las tuberías, por lo que son acumulables, mientras que las pérdidas de carga h_p que se producen son las mismas a lo largo de las distintas tuberías, contrario a lo que sucede con las tuberías en serie (Streeter V. L., 2000).

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Ecuación 30. Caudales en tuberías paralelas.

$$h_{p1} = h_{p2} = h_{p3}$$

Ecuación 31. Pérdidas de carga en tuberías paralelas.

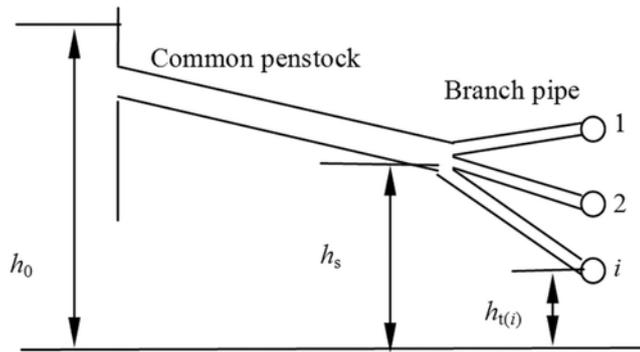


Figura 66. Esquema de pérdidas de energía en tuberías en paralelo. [Imagen]
 Recuperado de: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-rpg.2018.6123>

Las pérdidas de energía, una vez llegada la tubería a la central, se calculan para la situación más desfavorable, siendo esta la que involucra a los ramales que tienen un codo de 90°, ya que la división es perpendicular al ramal de alimentación. Se la enumera como 1 Figura 67. Esquema de sala de máquinas de Presa “La Herradura”. Ramal 1 y 2..

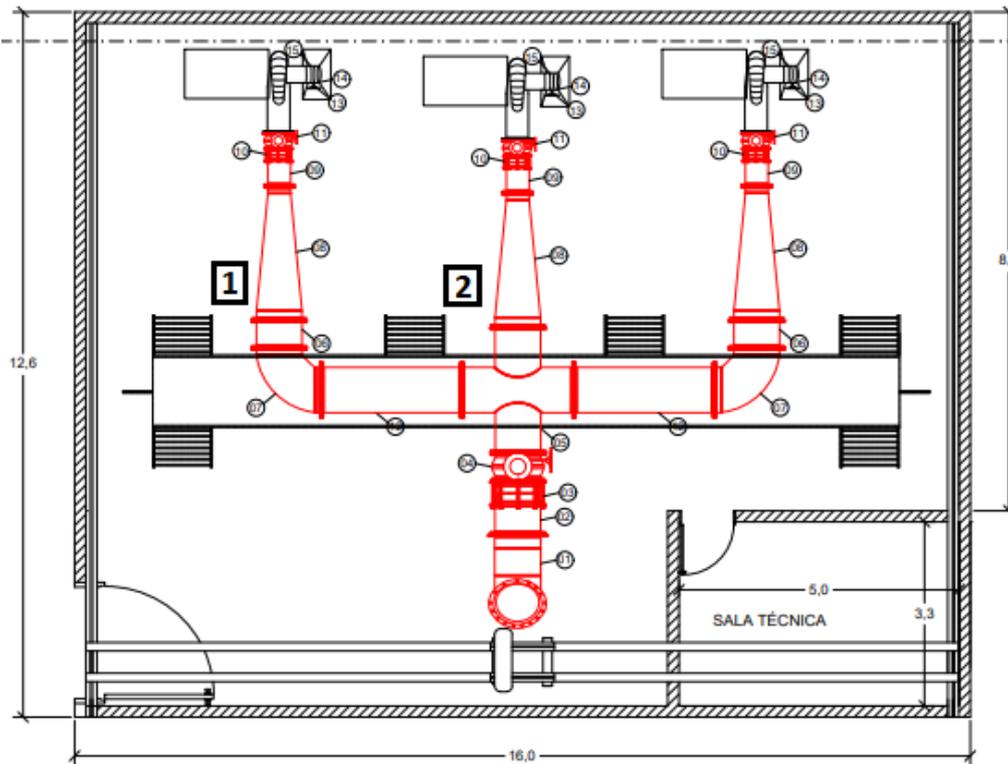


Figura 67. Esquema de sala de máquinas de Presa “La Herradura”. Ramal 1 y 2.

El análisis hidráulico de las pérdidas de carga fue realizado con el caudal de diseño $Q_1 = 1 \text{ m}^3/\text{s}$, y considerando que el mismo se divide en la trifurcación, llegando a cada turbina un caudal $Q_2 = 0,33 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se tiene como variables en el primer tramo del conducto de tubería circular DN 800 mm, desde la entrada en la obra de toma y hasta la trifurcación los valores de:

$$Q_1 = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_1 = 0,8 \text{ m}$$

$$A_1 = 0,5 \text{ m}^2$$

$$v_1 = 2 \text{ m/s}$$

Así mismo, luego de la división de caudales en tres tramos que tiene lugar en la sala de máquinas, y de la reducción DN 800x400 mm los valores que toman son los siguientes:

$$Q_2 = 0,33 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_2 = 0,4 \text{ m}$$

$$A_2 = 0,13 \text{ m}^2$$

$$v_2 = 2,65 \text{ m/s}$$

3.10.1 Pérdidas en rejas

En función de la Ecuación 15. Pérdidas en rejas. Fórmula de Kirschmer, se definen las variables necesarias para su cálculo:

$$h_t = \beta \left(\frac{s}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \text{sen } \theta \frac{v_0^2}{2g}$$

Ecuación 32. Pérdidas en rejas. Fórmula de Kirschmer

En donde coeficiente de forma de barra $\beta = 2,42$ (tomado de Figura 23. Coeficiente que toma en cuenta la forma de las barras. (Nigam, 1979), espesor de la barra $s = 0,0064 \text{ m}$, $b = 0,05 \text{ m}$ separación entre barras, ángulo de la reja con la horizontal $\theta = 83^\circ$, velocidad de aproximación $v_0 = 1 \text{ m/s}$.

Por lo tanto,

$$K_t = \beta \left(\frac{s}{b}\right)^{\frac{4}{3}} \text{sen } \theta = 2,42 \cdot \left(\frac{0,0064 \text{ m}}{0,05 \text{ m}}\right)^{\frac{4}{3}} \text{sen } 83^\circ = 0,15$$

Ecuación 33. Coeficiente de pérdidas en rejas.

Finalmente, las pérdidas de carga en reja:

$$h_t = K_t \frac{v_0^2}{2g} = 0,15 \cdot \frac{\left(1 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,0078 \text{ m}$$

Ecuación 34. Pérdidas en rejas

3.10.2 Pérdidas en entrada

Se toma entrada de tipo circular acampanada, considerando $K_e = 0,07$ como promedio de los valores máximo y mínimo para la entrada, según Tabla 1. Coeficientes de descarga y pérdida para conductos de entrada. (Bureau of Reclamation, 1987)

Por lo tanto, la pérdida de carga en la entrada:

$$h_e = K_e \frac{v^2}{2g} = 0,07 \cdot \frac{\left(2 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,01m$$

Ecuación 35. Pérdidas en la entrada con coeficiente K_e .

3.10.3 Pérdida en codo 24°

Se toma como K_c en el codo de ingreso de la tubería a la sala de máquinas según el gráfico de la Figura 25. Coeficientes de pérdida para distintos ángulos de curva según Miller. en donde para un ángulo de curvatura de 24°, se obtiene un valor de $K_{b1} = 0,08$

Finalmente, la pérdida de carga en el codo 24°:

$$h_b = K_{b24} \frac{v^2}{2g} = 0,08 \cdot \frac{\left(2 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,016 m$$

Ecuación 36. Pérdida de carga en curvas.

3.10.4 Pérdidas en válvula mariposa VM

Se puede tomar $K_{VM} = 0,15$ como valor promedio del coeficiente de pérdidas en válvula mariposa que se encuentra en posición abierta.

$$h_b = K_{VM} \frac{v^2}{2g} = 0,15 \cdot \frac{\left(2 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} = 0,03 m$$

3.10.1 Pérdidas en cruces

Se trata de una trifurcación, en la que el flujo ingresa por uno de los ramales y se divide en los tres restantes, como se muestra en la Figura 68.

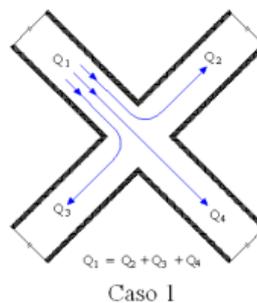


Figura 68. Cruce en tuberías.

Se analizan los coeficientes de pérdida según Miller (1990) en las gráficas de contorno, las cuales fueron desarrolladas para una trifurcación simétrica, es decir, con área constante. En la primera Figura 29. Coeficiente de pérdidas en cruce K_x para ramal

perpendicular al de alimentación. (Miller, 1990), se muestran las curvas para las pérdidas que tienen lugar en los ramales perpendiculares al flujo, mientras que en la segunda figura (Figura 30. Coeficiente de pérdidas en cruce K_x para ramal alineado con el de alimentación. (Miller, 1990)) las pérdidas que se obtienen son las correspondientes al ramal que continúa en la misma dirección y sentido que el ramal de alimentación.

Por lo tanto, los coeficientes obtenidos son de $K_1 = 0,95$ y $K_2 = 0,08$. El valor de K_1 es el que interesa en el caso analizado principalmente por esta razón. Se lo considera más desfavorable ya que su coeficiente de pérdida en el cruce K_x es mayor que el del tramo que sigue en mismo dirección y sentido que la alimentación. Además de las pérdidas en los codos y mayor longitud por recorrer.

$$h_x = K_x \frac{v^2}{2g} = 0,95 \cdot \frac{\left(\frac{2\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,19 \text{ m}$$

Ecuación 37. Pérdidas en cruces.

3.10.2 Pérdidas en codo 90°

Se considera como coeficiente de pérdida para el codo de 90° $K_{b90} = 0,19$, según la Figura 24. Coeficiente de pérdida en secciones circulares ($R_e = 10^6$) según Miller. en donde se determina una relación de $\frac{r}{d} = 1,44$ para un ángulo de curvatura de 90°.

$$h_b = K_b \frac{v^2}{2g} = 0,19 \cdot \frac{\left(2,65 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,068 \text{ m}$$

Ecuación 38. Pérdida de carga en curvas.

3.10.3 Pérdidas por contracción

Primero debe analizarse si se trata de una reducción gradual o brusca. Para ello se calcula el ángulo máximo de convergencia:

Una contracción se considera gradual cuando el ángulo de convergencia es menor al obtenido a partir de la siguiente relación:

$$\tan \alpha = \frac{1}{U}$$

Ecuación 39. Contracción gradual

siendo α el ángulo de la superficie de la pared del conducto con respecto al eje del mismo, y U un parámetro arbitrario definido como:

$$U = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Para contracciones,

Ecuación 40. Pérdidas de carga debido a contracciones.

K_c varía desde 0,1 para contracciones graduales a 0,5 para aquellas abruptas. Para grandes ángulos de convergencia, el coeficiente de pérdidas puede ser asumido con

una variación lineal hasta el máximo 0,5 para un ángulo de contracción recto. (Bureau of Reclamation, 1987). Una contracción se considera gradual cuando el ángulo de convergencia es menor al obtenido a partir de la siguiente relación: $\tan \theta = \frac{1}{U}$ Ecuación 41. Contracción gradual siendo α el ángulo de la superficie de la pared del conducto con respecto al eje del mismo, y U un parámetro arbitrario definido como: $U = \frac{V}{\sqrt{gD}}$

La velocidad V y el diámetro D son los valores promedio entre ambos tramos.

$$V = \frac{v_2 + v_1}{2} = 2,32 \text{ m/s}$$

$$D = \frac{D_2 + D_1}{2} = 0,6 \text{ m}$$

$$U = \frac{V}{\sqrt{gD}} = \frac{\left(2,32 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{\left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,6\text{m}\right)^{\frac{1}{2}}} = 0,96$$

$$\tan \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1}{U}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{1}{0,96}\right) = 46,3^\circ$$

Por lo tanto, $U = 0,96$ y $\theta = 46,3^\circ$

Para el caso de la reducción DN 800 x 400 se tiene un ángulo de convergencia de 11° , ya que se seleccionó una longitud de transición de 3 veces el diámetro de la tubería. Se trata entonces, de una convergencia gradual, con lo que se toma 0,16 como valor del coeficiente de pérdida K_c , según la Tabla 2. Coeficiente de pérdida por reducción gradual de ángulo θ , según Kisieliev. (Sotelo, 1994).

Las pérdidas de carga son aproximadamente:

$$h_c = K_c \left[\left(\frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) \right] = 0,16 \cdot \left[\left(\frac{\left(2,65 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) - \left(\frac{\left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) \right] = 0,025 \text{ m}$$

Ecuación 22. Pérdidas de carga debido a contracciones.

3.10.4 Pérdidas por fricción

Se toma como rugosidad de las tuberías $\varepsilon = 0,15 \text{ mm}$, y como viscosidad cinemática del agua a CNPT $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Como rugosidad relativa para D_1 se tiene

$$\varepsilon_{rel1} = \frac{\varepsilon}{D_1} = \frac{0,15 \text{ mm}}{800 \text{ mm}} = 0,0002$$

El número de Reynolds para la sección 1:

$$R_1 = \frac{v_1 \cdot D_1}{\nu} = \frac{2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,8 \text{ m}}{1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 1,6 \times 10^6$$

$$f_1 = 0,013$$

Para la sección 2 se tiene:

$$\varepsilon_{rel1} = \frac{\varepsilon}{D_2} = \frac{0,15mm}{400mm} = 0,0004$$

$$R_1 = \frac{v_2 \cdot D_2}{\nu} = \frac{2,65 \frac{m}{s} \cdot 0,4m}{1 \times 10^{-6} m^2/s} = 1,06 \times 10^6$$

$$f_2 = 0,016$$

Finalmente, se pueden escribir los valores como se muestran en la Tabla 7, en donde la sumatoria de todas las pérdidas da un valor de $h_p = 0,47m$, es decir, las pérdidas de carga a lo largo del conducto hasta llegar a la turbina son de medio metro. Según la diferencia entre el nivel aguas arriba y aguas abajo de la presa, los cuales son variables, y las pérdidas, que depende del caudal, se tendrá la altura aprovechable por la turbina.

Pérdidas	Manifold										Pérdidas	
	Reja	Entrada	Fricción	Codo 24°	VM	Trifurcación	Codo 90°	Fricción	Contracción	Fricción		
K	0,15	0,07		0,08	0,15	0,95	0,19		0,16			
L[m]			51,2					2,4		1,6		
V [m/s]	1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,7	2,3	0,2	2,7		
hp [m]	0,008	0,014	0,107	0,016	0,030	0,192	0,068	0,006	0,025	0,007		0,47

Tabla 7. Pérdidas de carga del caso de estudio.

3.11 DESCARGADORES DE FONDO

Los descargadores de fondo son elementos de desagüe en el sistema de la presa. Permiten llevar al embalse al nivel deseado, erogando caudal para obtener la cota de espera en caso de requerir laminar una crecida. En la presa "La Herradura" se proponen dos descargadores de fondo de A° DN 500 mm. La obra de toma posee un diseño similar al de la toma para la central, con rejas y compuerta del tipo stop log maniobrada mediante un malacate que se encuentra en el coronamiento de la presa. Los descargadores atraviesan el cuerpo de la presa y al llegar al paramento aguas debajo de la presa, se encuentran con una válvula mariposa de actuador eléctrico y nuevamente una compuerta de tipo stop log. En la Figura 69. Vista en corte de la presa, detalle de los descargadores de fondo. se puede observar un detalle de los descargadores de fondo a la salida de la presa.

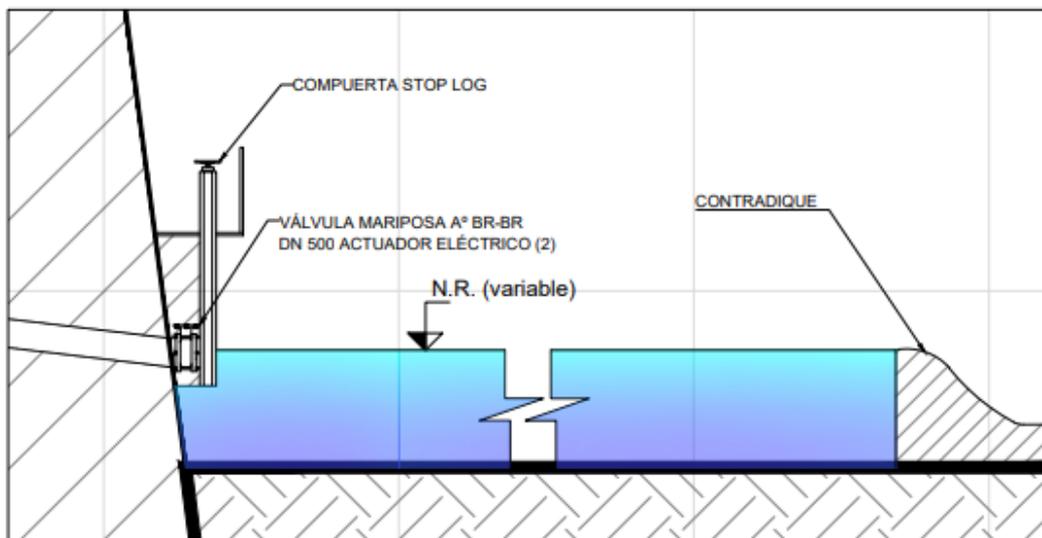


Figura 69. Vista en corte de la presa, detalle de los descargadores de fondo.

4 CONCLUSIONES

Luego del análisis de alternativas, al tratarse de un valle estrecho, la central se emplaza dentro del cuerpo de la presa, constituyendo una central del tipo hidrocombinado. De esta forma se evitan excavaciones en las márgenes del cauce, con sus consecuentes movimientos de suelo, de corte y relleno, y su mayor impacto visual. Así mismo, se logran disminuir las pérdidas de carga por fricción que tendrían lugar si el emplazamiento de la central se realizara aguas abajo de la presa, alejada de ella.

El diseño de la central quedó determinado por las dimensiones de los equipos que la componen y el manifold que debe albergarse en ella. Además, se contó con las limitaciones impuestas en el ancho máximo de la central por la cerrada en la que se encuentra la presa. Respecto al manifold, se debió seleccionar una pieza especial al producirse la división del flujo, ya que en este caso se tiene una trifurcación, siendo un ramal de alimentación y tres de división. Para ello se requiere una pieza en forma de cruz simétrica de DN 800 mm.

La restitución al río del caudal turbinado se realizará mediante tuberías de acero, las cuales se encuentran igualmente embebidas en el H⁰ de la presa. Luego desembocan aguas abajo de la presa, en donde un contradique genera un remanso. El mismo es beneficioso desde el punto de vista de generación y de los condicionantes ambientales, como se desarrolló previamente.

Las pérdidas de carga analizadas dan un valor de 0,5 m, el cual debe ser tenido en cuenta al estudiarse la altura de carga aprovechable por las turbinas. Estas fueron analizadas con el caudal de diseño de 1 m³/s. Pueden sufrir variaciones al cambiar los caudales con los que se trabaje.

Además de la obra de toma para la central hidroeléctrica, se definieron los descargadores de fondo. Estos consisten en dos tuberías de A° DN 500 mm, en su extremo aguas arriba cuenta con compuerta y rejas y en su extremo inferior aguas abajo poseen una válvula mariposa con accionador eléctrico y una compuerta. También descargan al remanso generado por el contradique.

Respecto a los elementos para el diseño es clave dentro de un proyecto de una central tener en cuenta todos los elementos necesarios que deberán instalarse en la misma para poder diseñar las obras civiles que contengan no sólo las turbinas sino todos los elementos que permitan su adecuada operación y mantenimiento.

En el caso planteado el tema de la cerrada y los niveles del río hicieron que fuera necesario plantear diferentes alturas para la central.

Un aprovechamiento como en el que se trabajó plantea desafíos muy diferentes en cuanto a la hidráulica y la topografía y espacios disponibles que hacen necesarios ajustes de implantación y recálculos como los que se plantearon en este caso.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bureau of Reclamation. (1987). *Desing of Small Dams*. Washington DC: U.S. Department of the Interior.
- Cuesta, D., & Vallarino, E. (2000). *Aprovechamientos hidroeléctricos*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- de Siervo, F., & de Leva, F. (1976). *Modern Trends in Selecting and Designing Francis Turbines*. WP&DC.
- García Alarcón, C. J., García Martín, T., & Sarasúa Moreno, J. I. (2011). *Saltos Hidroeléctricos: conceptos básicos y aplicaciones*. Madrid: Delta Publicaciones.
- GCIS - Consorcio de Cooperación. (2021). *ESTUDIOS BÁSICOS Y PREFACTIBILIDAD PRESA LA HERRADURA - LAS JUNTAS*.
- Gulliver, J. S., & Arndt, R. E. (1991). *Hydropower Engineering Handbook*. McGraw-Hill. Inc.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2006). *Minicentrales Hidroeléctricas*. Madrid: IDAE.
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo, S.A.
- Miller, D. (1990). *Internal Flow Systems*. Bedford: BHRA.
- Nigam, P. S. (1979). *Handbook of Hydroelectric Engineering*. Roorkee: Nem Chand and Bros. .
- Ortíz Flores, R. (2011). *Hidráulica, Generación de Energía*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Polo Encinas, M. (1975). *Turbomáquinas Hidráulicas*. Limusa.
- Potter, M. C., Wiggert, D., & Ramadan, B. (2015). *Mecánica de Fluidos*. Cengage Learnings.
- Sotelo, G. (1994). *Hidráulica General, Fundamentos*. D.F.: Limusa.

6 ANEXO