



Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

Aprovechamiento de salto de agua mediante turbina en poblado de Zimbabwe

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Autor: Rodrigo Ruano Pérez

Director: Manuel Moreno García

Madrid, junio de 2020

*Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto
presentado con el título*

Aprovechamiento de salto de agua mediante turbina en poblado de Zimbabwe

*en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI de la
Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2019/2020
es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado
con anterioridad a otros efectos.*

*El Proyecto no ha sido plagiado, ni total ni parcialmente y la
información tomada de otras fuentes se encuentra debidamente
referenciada en el presente documento.*

Fdo.: Rodrigo Ruano Pérez

Fecha: 23/8/2020



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Manuel Moreno García

Fecha: 26/8 /2020



AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1ª. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. **Rodrigo Ruano Pérez**

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **Aprovechamiento de salto de agua mediante turbina en poblado de Zimbabwe**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2ª. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3ª. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4ª. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5ª. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que

podieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6ª. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 23 de agosto de 2020.

ACEPTA

Fdo.: Rodrigo Ruano Pérez

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rodrigo R.P.', with a large, sweeping flourish above it.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por sus sacrificios inconmensurables en mi desarrollo personal, por ayudarme a vislumbrar lo sutil de la vida, a discernir entre lo baladí y lo esencial. Por ser el verdadero pilar emocional de cuyos cimientos brotan hoy mi futuro y entusiasmo.

A mi padre, por inculcarme el valor del trabajo, el aprendizaje y el compromiso. Por animarme a invertir cada recurso en formación y cultivo de la mente, por medio de la lectura y el estudio. Por desplegar las alternativas sobre la mesa y elegir con conciencia.

A mis profesores, por el tiempo, la paciencia y la pasión invertidos en sus enseñanzas, por su empatía y apoyo emocional, por transmitir con vehemencia los valores de nuestra Universidad, por su contribución a mi desarrollo no solo académico, sino también humano.

A mis compañeros y pareja, por hacer del camino un fin en sí mismo, no un medio. Por sus nobles y desinteresados consejos en la consecución de mis objetivos y mejora personal. Por ayudarme a comprender que los logros no son nunca individuales y no pueden serlo, si no es compartidos.

A Miren y Manuel, por impregnar a los voluntarios de su entusiasmo y compasión y conceder un profundo sentido de servicio y altruismo a nuestra nueva profesión.

A la Universidad, por la calidad humana de las personas que la constituyen, por hacer de sus paredes un verdadero hogar para el crecimiento y la reflexión, por su mejora y adaptación constantes en circunstancias de toda índole, por poner a disposición los mejores recursos y oportunidades para todos nosotros.

Entidades colaboradoras

Este proyecto ha sido realizado en el contexto de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, perteneciente a la Universidad Pontificia Comillas. Su desarrollo se ha llevado a cabo en colaboración con la organización no gubernamental Child Future Africa y la Fundación Ingenieros ICAI, ambas sin ánimo de lucro.



Motivación

El presente trabajo perseguirá poner en valor la calidad de la enseñanza técnica y humana de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI de la Universidad Pontificia Comillas, reflejando la relevancia de la ingeniería en el ámbito del desarrollo social y su compromiso con la protección y el crecimiento de los grupos sociales menos favorecidos.

Su origen es la síntesis de la formación académica y personal de cuatro años de estudios de ingeniería en dicha institución. Como autor del mismo, es mi propósito y deber dar prueba no solo de la excelencia técnica de esta escuela, sino de los valores inculcados sobre los que se sostiene la identidad de la misma.

Valores como la responsabilidad social, siendo deber de aquellos privilegiados que hemos recibido una formación extraordinaria el ponerla a disposición y servicio de la sociedad para su desarrollo y el favorecimiento de la igualdad. El altruismo, que pone en el punto de mira de la responsabilidad social a aquellos grupos e individuos que por sus circunstancias no disponen de los recursos para su desarrollo propio y de su entorno. El pensamiento crítico, fundando toda decisión y actuación en la conciencia y en los efectos que estas tienen en nuestro entorno.

Estos valores, entre otros, deberán estar y estarán presentes en el marco de toda acción emprendida en el ámbito técnico y serán los verdaderos ejes motrices que promuevan dichas acciones.

Resumen

Kazai es un pequeño poblado situado al Norte de Zimbabwe, a pocos kilómetros de la frontera con Mozambique. Antecedentes históricos y casi cuarenta años de dictadura reciente han provocado una de las más duras crisis económicas conocidas y han sumido a gran parte de la población en la pobreza y la lucha por el autoabastecimiento y la subsistencia.

En colaboración con la ONG Child Future Africa y la Fundación Ingenieros ICAI, este trabajo perseguirá contribuir al desarrollo de Kazai mediante la implementación de una pequeña instalación hidroeléctrica. Esta, además de servir de ejemplo para el abastecimiento eléctrico de núcleos aislados de población en otros territorios, permitirá reducir la mano de obra de tareas como el riego de cultivos, así como la iluminación de edificios destinados a la educación y la sanidad, imprescindibles en el crecimiento y la mejora de la comunidad.

El desarrollo de este proyecto se llevará a cabo desde la más absoluta integración con la cultura y factores de influencia del país de destino, siendo la contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la impulsión de las energías renovables en países en vías de desarrollo, dos pilares fundamentales del mismo.

Abstract

Kazai is a small village located in northern Zimbabwe a few kilometers from the border with Mozambique. Historical background and almost forty years of recent dictatorship have led to one of the most severe economic crisis ever known, pushing the majority of the population into poverty and fight for self-sufficiency and subsistence.

In collaboration with NGO Child Future Africa and Fundación Ingenieros ICAI, this project aims to contribute to Kazai's development by implementing a small hydroelectric power station. In addition to serving as an example for the management of electrical supply in other isolated communities and territories, it will involve a significant decrease in crop irrigation labours, as well as lighting of some important buildings intended for educational and health purposes. These are considered essential in Kazai's growth and life quality improvement.

This project will be carried out from the total respect and integration with the destination culture, regarding Sustainable Development Goals and promotion of renewable energies in developing countries as key pillars.



Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

Aprovechamiento de salto de agua mediante turbina en poblado de Zimbabwe

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Autor: Rodrigo Ruano Pérez

Director: Manuel Moreno García



Contenido

CONTEXTO DEL PROYECTO: ZIMBABUE.....	1
PLANO CONTEXTUAL	1
<i>Historia</i>	<i>1</i>
<i>Política</i>	<i>2</i>
<i>Economía</i>	<i>3</i>
Política fiscal.....	4
Relaciones comerciales	5
Infraestructuras relevantes	5
Sistema de divisas	7
<i>Demografía.....</i>	<i>7</i>
<i>Cultura.....</i>	<i>8</i>
PLANO FÍSICO.....	9
<i>Climatología</i>	<i>9</i>
<i>Geografía.....</i>	<i>10</i>
POBLADO DE KAZAI	10
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	12
PROPÓSITO FINAL	13
OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	14
INTRODUCCIÓN AL PROYECTO	15
ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	15
ORÍGENES DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS.....	17
TURBOMÁQUINAS Y CENTRALES HIDRÁULICAS	22
CICLO HIDROLÓGICO	26
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	28
CLASIFICACIÓN	31
<i>Según finalidad operativa</i>	<i>31</i>
Centrales de base	31
Centrales de punta	31
Centrales de reserva	31
Centrales de socorro	31
<i>Según fuente hídrica.....</i>	<i>32</i>
Centrales de agua embalsada	32
Centrales de agua fluente	35
<i>Según potencia instalada</i>	<i>35</i>
<i>Según salto hidráulico</i>	<i>37</i>
ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS	38
<i>Presa</i>	<i>38</i>

Presas de gravedad	40
Presas de contrafuertes	41
Presas de arco	41
Presas de bóveda	41
Presas de configuración mixta	42
Vertederos hidráulicos.....	42
Vertedero en canal.....	43
Túnel aliviadero.....	44
Vertedero de tulipa	44
Desagües de fondo	45
Sistemas de conducción.....	46
Tomas de agua	47
Canales, túneles y galerías	48
Tubería forzada	49
Tubo de aspiración.....	52
Depósito de compensación.....	53
Tuberías de aireación	53
Casa de máquinas	54
Turbina hidráulica	55
Generador eléctrico	55
Multiplicador de velocidad.....	55
Transformador eléctrico	56
CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	57
Salto hidráulico.....	58
Salto bruto	59
Salto neto	60
Caudal hidráulico.....	61
Potencia hidráulica.....	63
Pérdidas hidráulicas	63
Pérdidas primarias	64
Pérdidas secundarias	66
Pérdidas totales	68
Rendimiento de la instalación	68
MÁQUINAS HIDRÁULICAS	69
CLASIFICACIÓN	69
Efecto del flujo en álabes.....	71
Posición del eje motriz.....	71
Dirección del flujo.....	71
Modo de admisión.....	72
CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	73
Rodete	73
Distribuidor.....	75
Cámara espiral	76

<i>Tubo de aspiración</i>	76
<i>Inyector</i>	77
<i>Deflector</i>	78
<i>Eje motriz</i>	78
TIPOS DE TURBINAS	79
<i>Turbina Francis</i>	80
<i>Turbina Kaplan</i>	82
<i>Turbina Pelton</i>	83
<i>Turbina Michell-Banki</i>	86
<i>Turbina Turgo</i>	88
<i>Turbina Bulbo</i>	88
NÚMERO ESPECÍFICO DE REVOLUCIONES	90
ECUACIÓN DE LAS TURBOMÁQUINAS	92
TRIÁNGULOS DE VELOCIDADES	94
REGULACIÓN DE VELOCIDAD	97
PÉRDIDAS EN LA TURBINA	99
<i>Pérdidas hidráulicas</i>	99
<i>Pérdidas mecánicas</i>	99
<i>Pérdidas volumétricas</i>	100
FENÓMENOS DE CONDUCCIÓN HIDRÁULICA	102
GOLPE DE ARIETE	102
CAVITACIÓN	103
TRABAJO DE REFERENCIA	105
MICROCENTRAL DE PUCARÁ, CAJAMARCA (PERÚ)	105
MICROCENTRAL DE JINOTEGA (NICARAGUA)	107
VARIABLES DE DISEÑO	110
ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA	110
ESTIMACIÓN DEL SALTO BRUTO	114
CONDICIONES HIDROLÓGICAS	117
MECÁNICA DE SUELOS	123
DISEÑO CONCEPTUAL	129
<i>Obra de toma</i>	130
<i>Conducto de derivación</i>	131
<i>Desarenador</i>	132
<i>Cámara de carga</i>	133
<i>Tubería forzada</i>	134
<i>Casa de máquinas</i>	136
<i>Canal y depósito de descarga</i>	136

CÁLCULOS	137
PRESTACIONES	137
NÚMERO DE REVOLUCIONES	141
CARACTERÍSTICAS DE LA TURBINA.....	143
DIMENSIONAMIENTO DE CONDUCCIONES.....	145
<i>Conducto de derivación.....</i>	<i>146</i>
<i>Tubería forzada</i>	<i>148</i>
OBRA CIVIL.....	154
<i>Obra de toma</i>	<i>154</i>
<i>Desarenador</i>	<i>157</i>
<i>Cámara de carga</i>	<i>166</i>
<i>Casa de máquinas</i>	<i>169</i>
<i>Soportes de línea hidráulica</i>	<i>170</i>
<i>Soporte 1.....</i>	<i>174</i>
<i>Soporte 2.....</i>	<i>175</i>
<i>Condiciones de equilibrio.....</i>	<i>176</i>
PÉRDIDAS DE CARGA	180
<i>Pérdidas por conducción</i>	<i>180</i>
<i>Pérdidas primarias</i>	<i>180</i>
<i>Pérdidas secundarias</i>	<i>181</i>
<i>Pérdidas totales conducción</i>	<i>182</i>
<i>Pérdidas en desarenador y cámara.....</i>	<i>182</i>
<i>Rendimiento de la instalación</i>	<i>182</i>
METODOLOGÍA DE TRABAJO	184
INSTRUCCIÓN PERSONAL DE OBRA	184
ANÁLISIS Y RECONOCIMIENTO DE ÁREA DE TRABAJO	184
<i>Análisis topográfico.....</i>	<i>185</i>
<i>Análisis granulométrico.....</i>	<i>187</i>
<i>Medición y trazado de sistemas.....</i>	<i>189</i>
ADQUISICIÓN Y RECEPCIÓN DE MATERIAL	191
<i>Producto local.....</i>	<i>191</i>
<i>Producto importado</i>	<i>192</i>
PLAN DE EJECUCIÓN	192
PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.....	193
<i>Regulación de válvula de toma</i>	<i>193</i>
<i>Limpieza de desarenador y cámara.....</i>	<i>194</i>
<i>Mantenimiento general.....</i>	<i>194</i>
PROTOCOLOS DE SEGURIDAD	195
<i>Horarios.....</i>	<i>195</i>
<i>Alimentación e hidratación</i>	<i>195</i>

<i>Material de protección</i>	<i>195</i>
IMPACTO AMBIENTAL	197
VIABILIDAD ECONÓMICA.....	198
BIBLIOGRAFÍA GENERAL	200
REFERENCIAS	203
FUENTES DE ILUSTRACIONES	204
FUENTES DE TABLAS.....	208
FUENTES DE GRÁFICOS.....	209
ANEXO I: PLAN DE EJECUCIÓN DE OBRA	210
ANEXO II: PRESUPUESTO ECONÓMICO	214
ANEXO III: PLANOS.....	219

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1:</i> Billete de cien trillones de dólares zimbabuenses.	3
<i>Ilustración 2:</i> Red de carreteras principales y pasos fronterizos de interés comercial.....	6
<i>Ilustración 3:</i> Bandera de Zimbabue.	9
<i>Ilustración 4:</i> Ubicación de Kazai respecto de la capital.	10
<i>Ilustración 5:</i> Posiciones relativas de Kazai y la región de Dotito.	11
<i>Ilustración 6:</i> Escuela de Kazai, al Sur de la región.....	11
<i>Ilustración 7:</i> ODS perseguidos de manera directa.....	14
<i>Ilustración 8:</i> Sistema de elevación hidráulico para regadío.....	15
<i>Ilustración 9:</i> Rueda hidráulica y transmisión para tareas de molienda.	15
<i>Ilustración 10:</i> Rueda de eje vertical (izqda.) y de empuje superior (dcha.).....	16
<i>Ilustración 11:</i> Espiral de Arquímedes (izqda.) y noria de tiro (dcha.).	16
<i>Ilustración 12:</i> Eolípila.	18
<i>Ilustración 13:</i> Dibujo de máquina voladora de da Vinci.	18
<i>Ilustración 14:</i> Amplificación de fuerzas, Principio de Pascal.	19
<i>Ilustración 15:</i> Calle de vórtices de Von Kármán.....	21
<i>Ilustración 16:</i> Rodete de turbina Francis de grandes dimensiones.	23
<i>Ilustración 17:</i> Imágen del catálogo de la compañía Pelton Water Wheel, 1889.....	24
<i>Ilustración 18:</i> Rodete de turbina Kaplan.....	24
<i>Ilustración 19:</i> Construcción de central hidroeléctrica en Appleton, EEUU.....	25
<i>Ilustración 20:</i> Representación esquemática del ciclo hidrológico.....	26
<i>Ilustración 21:</i> Esquema general de transformación energética.	27
<i>Ilustración 22:</i> Representación de gráfico de cargas diario.	32
<i>Ilustración 23:</i> Central de agua embalsada, a pie de presa.....	33
<i>Ilustración 24:</i> Esquema de una central de bombeo.....	34
<i>Ilustración 25:</i> Central de agua fluyente.	35
<i>Ilustración 26:</i> Mapa de centrales hidroeléctricas de España, según potencia instalada.....	36
<i>Ilustración 27:</i> Esquema constructivo de una central de gran salto.	37
<i>Ilustración 28:</i> Representación en planta de una central hidráulica.	38
<i>Ilustración 29:</i> Representación de una presa.....	39
<i>Ilustración 30:</i> Vista de sección de presa de gravedad.	40
<i>Ilustración 31:</i> Vista de sección de presa de contrafuertes.	41
<i>Ilustración 32:</i> Vista de sección de presa de bóveda.	41
<i>Ilustración 33:</i> Diversas configuraciones de presas.	42
<i>Ilustración 34:</i> Representación en planta de presa con vertedero en canal.....	43
<i>Ilustración 35:</i> Fotografía de vertedero en canal.....	43

<i>Ilustración 36:</i> Esquema de sistema de túneles aliviaderos.....	44
<i>Ilustración 37:</i> Vertedero de tulipa.	44
<i>Ilustración 38:</i> Sistema de descarga de fondo.	45
<i>Ilustración 39:</i> Bocas de salida de sistema de desagüe de fondo.	45
<i>Ilustración 40:</i> Sistema de conducción por tubería forzada directa.	46
<i>Ilustración 41:</i> Representación en planta de central apartada con tomas laterales.	47
<i>Ilustración 42:</i> Distribución de sistemas de conducción básicos.	48
<i>Ilustración 43:</i> Secciones habituales en túneles y galerías.	49
<i>Ilustración 44:</i> Tuberías forzadas en superficie.....	50
<i>Ilustración 45:</i> Tubería forzada de microcentral sobre zanja.....	51
<i>Ilustración 46:</i> Esquema de turbina de reacción con tubo de aspiración difusor.....	52
<i>Ilustración 47:</i> Esquema de ubicación de chimeneas de equilibrio en la instalación.	53
<i>Ilustración 48:</i> Configuración habitual en central de gran potencia.....	54
<i>Ilustración 49:</i> Grupo de potencia para microcentral hidráulica.	56
<i>Ilustración 50:</i> Esquema de transporte eléctrico de central a consumo.	56
<i>Ilustración 51:</i> Salto natural de 40 m de altura.....	58
<i>Ilustración 52:</i> Salto bruto de 85 m de altura.....	59
<i>Ilustración 53:</i> Acotación esquemática de alturas y niveles.	60
<i>Ilustración 54:</i> Conducto cerrado de sección variable.	61
<i>Ilustración 55:</i> Molinete hidrométrico para medición de caudal.....	62
<i>Ilustración 56:</i> Principales tipos de válvulas.....	67
<i>Ilustración 57:</i> Clasificación de máquinas de fluido.	70
<i>Ilustración 58:</i> De izqda. a dcha., turbinas Pelton, Francis y Kaplan.	72
<i>Ilustración 59:</i> Rodetes de diferentes turbinas.	73
<i>Ilustración 60:</i> Representación de distribuidor Fink.	75
<i>Ilustración 61:</i> Cámara espiral de turbina Francis.....	76
<i>Ilustración 62:</i> Vista de sección de turbina Francis con tubo de aspiración troncocónico.	77
<i>Ilustración 63:</i> Vista de sección de inyector de turbina Pelton.....	77
<i>Ilustración 64:</i> Sistemas de sellado y engrase por gravedad (izqda.) y presión (dcha.).....	79
<i>Ilustración 65:</i> Rodete de turbina Francis.	81
<i>Ilustración 66:</i> Configuración de turbina Francis de eje vertical.....	82
<i>Ilustración 67:</i> Rodete de turbina Kaplan de cuatro palas.	83
<i>Ilustración 68:</i> Rodete de turbina Pelton.	84
<i>Ilustración 69:</i> Esquema de componentes de turbina Pelton.	85
<i>Ilustración 70:</i> Esquema de turbina de flujo transversal.....	86
<i>Ilustración 71:</i> Elementos de turbina Michell - Banki con tecnología Ossberger.	87
<i>Ilustración 72:</i> Rodete de turbina Turgo.	88

<i>Ilustración 73:</i> Grupo Bulbo.	89
<i>Ilustración 74:</i> Ubicación de los subíndices de referencia.	94
<i>Ilustración 75:</i> Triángulos de velocidades a la entrada y salida de turbina Francis.	95
<i>Ilustración 76:</i> Posibles triángulos de velocidades en turbina de reacción.	95
<i>Ilustración 77:</i> Esquema general de regulación de velocidad.	98
<i>Ilustración 78:</i> Recirculación del fluido en intersticios.	100
<i>Ilustración 79:</i> Esquema de potencias y pérdidas.	101
<i>Ilustración 80:</i> Deformación de tubería tras golpe de ariete.	102
<i>Ilustración 81:</i> Efecto de cavitación en palas de hélice.	104
<i>Ilustración 82:</i> Represa y tubería de presión, microcentral de Jinotega.	108
<i>Ilustración 83:</i> Presa vertedero, microcentral de Jinotega.	109
<i>Ilustración 84:</i> Equipo electromecánico, microcentral de Jinotega.	109
<i>Ilustración 85:</i> Villages de dos núcleos familiares en Kazai.	111
<i>Ilustración 86:</i> Topografía de la cuenca.	116
<i>Ilustración 87:</i> Volumen embalsado en función de cota de superficie.	122
<i>Ilustración 88:</i> Falla por capacidad de carga, teoría de Terzaghi.	126
<i>Ilustración 89:</i> Esquema de diseño conceptual.	130
<i>Ilustración 90:</i> Vista en sección de cámara de carga.	133
<i>Ilustración 91:</i> Dimensiones características de turbina Pelton.	144
<i>Ilustración 92:</i> Representación del sistema de derivación.	147
<i>Ilustración 93:</i> Representación de la obra de toma de la instalación.	154
<i>Ilustración 94:</i> Ubicación de la válvula reguladora en la instalación.	156
<i>Ilustración 95:</i> Representación constructiva del tanque desarenador diseñado.	165
<i>Ilustración 96:</i> Representación constructiva del depósito de carga.	166
<i>Ilustración 97:</i> Representación constructiva de sala de máquinas diseñada.	170
<i>Ilustración 98:</i> Disposición de anclajes de tubería forzada.	170
<i>Ilustración 99:</i> Diagrama de fuerzas en soporte fijo.	171
<i>Ilustración 100:</i> Diagrama de fuerzas en soporte libre.	172
<i>Ilustración 101:</i> Diagrama de fuerzas en soportes de tubería de presión.	173
<i>Ilustración 102:</i> Representación constructiva de soportes diseñados para tubería.	177
<i>Ilustración 103:</i> Cinta métrica de 100 m.	185
<i>Ilustración 104:</i> Distanciómetro láser.	186
<i>Ilustración 105:</i> Altimetro digital.	186
<i>Ilustración 106:</i> Tamices para análisis granulométrico.	189
<i>Ilustración 107:</i> Zona destinada al almacenamiento de materiales y equipos.	190
<i>Ilustración 108:</i> Representación de delineado de obra.	190

Índice de Tablas

<i>Tabla 1:</i> Impuestos según sistema tributario vigente.....	5
<i>Tabla 2:</i> Condiciones climatológicas medias anuales en Zimbabue.	9
<i>Tabla 3:</i> Resumen de contribuciones destacadas a la Mecánica de Fluidos.....	22
<i>Tabla 4:</i> Clasificación según intervalos de potencia instalada.	36
<i>Tabla 5:</i> Clasificación según intervalos de altura del salto.	37
<i>Tabla 6:</i> Rugosidad típica en materiales de tubería.....	65
<i>Tabla 7:</i> Coeficientes de pérdidas en distintos accesorios.....	67
<i>Tabla 8:</i> Clasificación de turbinas Francis según velocidad específica.....	80
<i>Tabla 9:</i> Características generales en turbinas de uso extendido.....	89
<i>Tabla 10:</i> Número específico de revoluciones para distintas turbinas.....	92
<i>Tabla 11:</i> Demanda mínima estimada en los próximos 5 años.	113
<i>Tabla 12:</i> Demanda actual a cubrir.	113
<i>Tabla 13:</i> Valores asociados a las cotas.	115
<i>Tabla 14:</i> Valores de factor K para diferentes turbinas.	117
<i>Tabla 15:</i> Datos hidrológicos del embalse.	118
<i>Tabla 16:</i> Excedentes de agua del embalse mensuales.	119
<i>Tabla 17:</i> Volumen mensual disponible para turbinar.....	121
<i>Tabla 18:</i> Características generales de suelo para zonas de grupo sialítico.	124
<i>Tabla 19:</i> Clasificación de partículas según tamaño.	125
<i>Tabla 20:</i> Factores de capacidad de carga de Terzaghi.....	127
<i>Tabla 21:</i> Características de materiales del suelo en zona de trabajo.....	128
<i>Tabla 22:</i> Perfil del terreno en trayectoria de tubería forzada.	135
<i>Tabla 23:</i> Características de la instalación.	140
<i>Tabla 24:</i> Diámetros de tubería normalizados y presiones de trabajo.	147
<i>Tabla 25:</i> Propiedades del PVC.	151
<i>Tabla 26:</i> Celeridades para tuberías de plástico.	153
<i>Tabla 27:</i> Características de principales sistemas de conducción.	153
<i>Tabla 28:</i> Características del bloque de obra.....	156
<i>Tabla 29:</i> Valores de la constante alpha.	157
<i>Tabla 30:</i> Velocidades de sedimentación según Arkhangelski.....	158
<i>Tabla 31:</i> Resultados dimensionales del tanque desarenador.	162
<i>Tabla 32:</i> Propiedades físicas del desarenador.....	165
<i>Tabla 33:</i> Datos de cálculo de soportes.	177
<i>Tabla 34:</i> Ejemplo de registro de medidas del ensayo granulométrico.....	188
<i>Tabla 35:</i> Medidas mínimas de protección.	196

Índice de Gráficos

<i>Gráfico 1:</i> Valores de eficiencia media por categorías de centrales eléctricas.....	30
<i>Gráfico 2:</i> Diagrama de Moody.	65
<i>Gráfico 3:</i> Rendimientos en turbinas para distintos regímenes de carga.	74
<i>Gráfico 4:</i> Diagrama de selección de turbinas caudal - altura.	80
<i>Gráfico 5:</i> Rendimientos de turbina Michell - Banki para 3 modos de admisión.....	87
<i>Gráfico 6:</i> Diagrama de velocidades específicas para diversas turbinas.....	90
<i>Gráfico 7:</i> Perfil del cauce aguas abajo.	114
<i>Gráfico 8:</i> Variación de costes de instalación según altura del salto.	116
<i>Gráfico 9:</i> Curva de demanda diaria.....	120
<i>Gráfico 10:</i> Volumen mensual disponible para generación.	121
<i>Gráfico 11:</i> Triángulo de clasificación de texturas de suelo.....	125
<i>Gráfico 12:</i> Factores de capacidad de carga de Terzaghi.....	127
<i>Gráfico 13:</i> Perfiles de terreno y conducto de derivación.	132
<i>Gráfico 14:</i> Perfil de terreno y trazo de la tubería.	135
<i>Gráfico 15:</i> Valores de caudal para diferentes alturas de salto.	139
<i>Gráfico 16:</i> Volumen disponible y demandado según altura de salto.	140
<i>Gráfico 17:</i> Modelos de regresión lineal para turbinas Pelton.	142
<i>Gráfico 18:</i> Trazo de tubería forzada sobre el terreno.....	149
<i>Gráfico 19:</i> Obtención gráfica de velocidad de sedimentación.	159
<i>Gráfico 20:</i> Variables de decantación de partículas en suspensión.....	161
<i>Gráfico 21:</i> Ejemplo de representación de datos del ensayo.	188
<i>Gráfico 22:</i> Distribución general de costes del proyecto.	198
<i>Gráfico 23:</i> Distribución de costes en material de obra del proyecto.	199

Nomenclatura

a	Celeridad de onda de presión / Cociente (L/b) desarenador.
A_i	Área de sección designada por i .
b	Ancho del elemento (álabe, rodete, depósito, etc.).
B	Ancho de cimentación o zapata.
c	Resistencia al corte del suelo o cohesión.
c_i	Velocidad absoluta del fluido en i .
C	Coeficiente de descarga de orificio sumergido.
d	Diámetro equivalente de partícula sedimentable.
d_0	Diámetro del chorro del inyector.
D	Diámetro de conducto o componente.
D_f	Profundidad de desplante (cimentación).
e	Espesor de la pared o sección.
E	Módulo de elasticidad del material.
f	Frecuencia eléctrica / Factor de fricción de Darcy.
$f.s.$	Factor de seguridad de diseño.
F_p	Fuerza sobre el conducto debida a presión hidrostática.
F_{tub}	Fuerza sobre el conducto debida al peso de la tubería y el fluido.
F_v	Fuerza sobre el conducto debida a variación de momento lineal.
F_x	Fuerzas sobre eje de referencia x .

F_z	Fuerzas sobre eje de referencia z .
g	Constante de aceleración gravitatoria.
h_f	Pérdidas hidráulicas primarias o de rozamiento de superficie.
h_r	Pérdidas hidráulicas por conducción.
h_s	Pérdidas hidráulicas secundarias o de rozamiento de forma.
h_v	Resalto hidráulico.
H	Altura o carga hidráulica neta.
H_b	Altura o carga hidráulica bruta.
H_s	Altura de aspiración de una turbina.
H_u	Energía intercambiada en el rodete de la turbina.
i	Inclinación de la pendiente.
k	<i>*Constante de diversos caracteres.</i>
k_c	Coeficiente de velocidad.
K	Coeficiente de pérdidas locales.
l	Longitud.
L	Longitud del elemento.
L_T	Longitud de transición del desarenador.
m_i	Masa del elemento designado por i .
M	Momento de fuerza.
n	Velocidad de giro de la turbina.

n_s	Número específico de revoluciones.
n_m	Coeficiente de rugosidad de Manning.
N_c, N_q, N_γ	Factores de capacidad de carga, teoría de Terzaghi.
p	Número de pares de polos del generador eléctrico.
p_i	Presión en el punto i del circuito hidráulico.
p_v	Presión de vapor del fluido a la temperatura de trabajo.
P	Potencia hidráulica.
P_a	Potencia instalada o de accionamiento.
q_{hid}	Carga uniformemente distribuida debido a peso del agua en conducción.
q_c	Capacidad de carga del suelo.
q_{tub}	Carga uniformemente distribuida debido a peso de la tubería.
Q	Caudal.
$Q_{ecológico}$	Caudal ecológico.
r_i	Radio del elemento designado por i .
Re	Número adimensional de Reynolds.
S	Superficie de la sección.
t_d	Tiempo de decantación de la partícula sedimentable.
t_r	Tiempo de retención en desarenador.
t_s	Tiempo de sedimentación de la partícula sedimentable.
u_i	Velocidad absoluta en punto i del rodete.

v	Velocidad.
v_s	Velocidad de diseño en tanque desarenador.
V	Volumen del elemento.
w	Velocidad de sedimentación de partícula sedimentable.
w_i	Velocidad relativa del fluido con respecto al rodete en i .
W_a	Empuje ascensional dinámico.
W_{sop}	Peso del soporte de la tubería de presión.
x	Posición sobre eje de referencia x . / Desfase o excentricidad.
y_f	Cota de tubería de presión sobre cámara de carga.
y_s	Profundidad de sumergencia.
z_i	Cota del punto i .
α	Constante dependiente de diámetro de partícula.
β	Ángulo de inclinación.
γ	Densidad del suelo.
ε	Rugosidad absoluta del material.
η_{grupo}	Rendimiento del grupo electromecánico.
η_t	Rendimiento de la instalación.
μ	Viscosidad dinámica a temperatura de trabajo. / Coef. de rozamiento.
π	Constante matemática Pi.
ρ	Peso específico del fluido o material.

σ	Tensión debida a esfuerzos.
σ_{adm}	Tensión admisible de trabajo.
σ_{inst}	Coeficiente de cavitación de la instalación.
σ_T	Coeficiente de cavitación de la turbina.
τ	Coeficiente de obstrucción de rodete.
φ_{int}	Ángulo de fricción interna de material granular.
ϕ	Coeficiente de velocidad periférica.

Contexto del proyecto: Zimbabwe

Zimbabwe es un país situado en el Sur del continente africano con una extensa y compleja historia y sumido en un absoluto desorden económico y político. A pesar de la abundancia de recursos naturales del territorio, factores históricos y sociales como la colonización, la explotación o la corrupción han derivado en una sociedad desprovista de recursos para su desarrollo autónomo, sustentada en gran medida en economías de subsistencia y con expectativas vitales pobres, incluyendo aspectos como la salud o la educación, entre muchos otros.

El presente trabajo tendrá por objetivo proyectarse desde la viabilidad de su implementación en este país, cuyas características serán analizadas a lo largo de las secciones posteriores. Dicho análisis será fundamental para conocer los factores de influencia y restricciones a las que estará sujeto el proyecto y permitirá acotar debidamente el espacio de trabajo.

Plano contextual

Llevar a cabo un proyecto en un país extranjero de cultura tan dispar a la europea conlleva una gran responsabilidad y un amplio conocimiento de la misma. Por destacar algunos aspectos, sin ignorar otros, será necesario profundizar en el sistema político y económico de Zimbabwe, conocer su historia, costumbres o creencias. Todo ello orientado al desarrollo del proyecto desde el más absoluto respeto y sintonía con la cultura de origen.

Historia

Zimbabwe fue colonia inglesa desde finales de siglo XIX hasta el año 1980, en el que fue declarada su independencia. Este territorio, antigua Rodesia del Sur, llegó a estar integrado en una misma federación, en 1953, con Rodesia del Norte (actual Zambia) y Nyasalandia (actual Malawi), hasta que en 1964 se concedió la independencia de Rodesia del Norte. En 1965 y como consecuencia de la descolonización impulsada por Naciones Unidas, la minoría blanca gobernante declaró su propia independencia, desatándose una guerra civil entre estos y la mayoría negra. En 1970 se declara la República de Rodesia, no reconocida por Reino Unido ni tampoco Naciones Unidas, continuando el conflicto civil entre la cada vez más reducida población colonizadora británica y el creciente movimiento nacionalista negro, hasta la declaración y reconocimiento de la independencia en 1980 y la proclamación de Robert Mugabe como Jefe del Estado.

La dictadura de Robert Mugabe es el acontecimiento base al que responden las circunstancias actuales de Zimbabwe. En primera instancia, las políticas adoptadas por el Jefe del Estado apuntaban a una convivencia pacífica con los blancos, protegiendo sus propiedades y derechos. Sin embargo, la abrumadora victoria de su partido político Unión Nacional de Zimbabwe - Fuerza Patriótica (ZANU - PF), en 1985, otorgó a Mugabe poder absoluto sobre el Estado y sus directivas modificaron su rumbo.

En 1987 se reformó la Constitución y comenzaron las controversias en la gestión del Gobierno y en las medidas emprendidas. Se eliminaron aquellas leyes que protegían a la población blanca, las propiedades de esta fueron expropiadas y redistribuidas entre la población negra, siendo adjudicadas a funcionarios del Estado. Aparecen numerosas evidencias de casos de corrupción y manipulación de elecciones.

Durante la primera década del siglo XXI, la crisis económica se torna radical. El Índice de Desarrollo Humano (IDH) elaborado por Naciones Unidas declara Zimbabwe como uno de los países con peor calidad de vida y expectativa de desarrollo. En 2008 se registran las mayores tasas de inflación de la historia, únicamente comparables a las de Venezuela, alcanzándose equivalencias en las divisas de varios miles de millones de dólares zimbabueses con respecto a la unidad del dólar estadounidense.

En 2017, las presiones sobre el Gobierno de Robert Mugabe (93 años) y su intento de delegar el poder en su mujer, Grace Mugabe, derivaron en un Golpe de Estado y en la proclamación de república liderada por el actual presidente, Emmerson Mnangagwa. Robert Mugabe se convierte en el gobernador más longevo de la historia y deja atrás un arduo legado para la sociedad zimbabuense.

Política

La República de Zimbabwe es de carácter democrático. El Presidente reúne el poder ejecutivo, especialmente desde la abolición de la figura del Primer Ministro en 2013 y ostenta el cargo en legislaturas de 5 años de duración. El poder legislativo está sustentado en la bicameralidad, el Congreso cuenta con 270 escaños sometidos a elección popular, de los cuales 60 están reservados para mujeres y el Senado, compuesto por 80 escaños. El sufragio es universal para todos los mayores de 18 años.

Desde noviembre de 2017, Zimbabwe es una república liderada por Emmerson Mnangagwa. Este fue Vicepresidente y, sobre todo, mano derecha de Mugabe durante la dictadura. Sin embargo, fue expulsado del Gobierno por el mismo Mugabe y acusado de deslealtad, en un intento por perpetuar el régimen dejando el mando en manos de su mujer, Grace Mugabe. Mnangagwa es conocido popularmente como 'cocodrilo', pues se le atribuye una gran astucia política y capacidad de supervivencia, debida en parte a un carácter y formación militar. Fue reelegido presidente en julio de 2018.

La política promovida por Emmerson Mnangagwa ha sido principalmente de apertura, estableciendo programas para estabilizar el desastre económico y fomentar el comercio y las inversiones extranjeras. La llegada del nuevo gobierno ha supuesto mejoras como la reapertura de centros de enseñanza y hospitales, el reabastecimiento de suministros o la estabilización de la epidemia por cólera. También se ha producido una significativa reducción de la violación de los derechos humanos. Además, el IDH del país pasó de catalogarlo entre los países de Desarrollo Humano Bajo a Desarrollo Humano Medio, en 2019.

Sin embargo, el Gobierno de Zimbabwe aún se enfrenta a un complejo reto político. Reformas paralizadas, popularidad creciente de la oposición (Movimiento por el Cambio Democrático, MDC), gran escasez de liquidez monetaria, revueltas civiles por falta de suministro eléctrico y combustibles e incremento de los precios, división del partido gobernante ZANU - FP por simpatizantes de Robert Mugabe. En la actualidad, la intervención de entidades como la Unión Europea en la reestructuración política y el impulso de la economía es un factor de suma importancia en la superación de la crisis y el desarrollo de Zimbabwe

Economía

La economía de Zimbabwe fue de las más ricas y robustas del continente hasta su independencia, cuando comenzó a deteriorarse, especialmente a partir de la década de los noventa. En 2008 las tasas de inflación alcanzaban récords mundiales y la tasa de desempleo superaba el 90%. La inexistencia de suministros y los niveles de pobreza eran realmente alarmantes. Un ejemplo ilustrativo de la situación económica del país durante este periodo fue la impresión de los famosos billetes de dólar zimbabuense por valor de cien trillones.

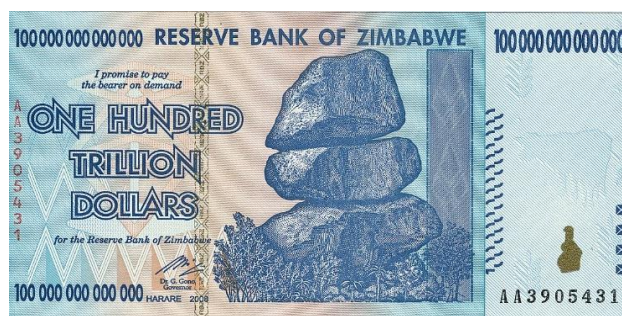


Ilustración 1: Billeto de cien trillones de dólares zimbabuenses. [1]

En los últimos años la economía ha ido estabilizándose progresivamente, si bien la crisis aún permanece y afecta fuertemente a la gran mayoría de la población. Las instituciones más relevantes en la gestión económica de Zimbabwe son:

- **Banco de la reserva de Zimbabwe.** Responsable de las políticas monetarias y productor único de dinero.
- **Ministerio de Finanzas y Desarrollo Económico.** Desarrollo de estrategias y reformas económicas. Cooperación con entidades como el Fondo Monetario Internacional.
- **Ministerio de Comercio, Industria y Desarrollo Empresarial.** Políticas para impulsar la industria y el comercio, tanto interior como exterior.
- **Ministerio de Energía.** Lleva a cabo la planificación energética del país.
- **Ministerio de Asuntos Exteriores y Comercio Internacional.** Favorece las relaciones internacionales, promueve la participación del país en convenios multilaterales, establece acuerdos comerciales, etc.

La agricultura es la principal actividad económica del país y ocupa a aproximadamente el 70% de la población. Los principales cultivos son el tabaco, el maíz, el azúcar, el trigo y el algodón y en gran medida son destinados a la exportación. La minería es, con carácter creciente, el segundo gran pilar económico del sector primario y el que mayor interés de explotación genera internacionalmente. Zimbabwe posee de entre las mayores reservas de materiales de gran valor como el platino, el diamante, el oro, el cromo o el níquel y supone la principal fuente de exportación.

En cuanto al sector secundario, la industria se ha visto muy afectada como consecuencia de la descapitalización. La inflación desmedida y la ausencia de liquidez han supuesto el cierre o abandono de fábricas y la dificultad para importar bienes de producción, siendo ello tanto causa como consecuencia del deterioro del sector energético. Actualmente, el país continúa atravesando serios problemas de suministro eléctrico. Aproximadamente un 60% de la generación es de energía térmica de carbón y la restante es principalmente hidroeléctrica. La central del lago Kariba es la más relevante y suministra energía tanto a Zambia como a Zimbabwe.

Dentro del sector terciario, el turismo es el más desarrollado y que mayor riqueza aporta, siendo la principal atracción las cataratas Victoria, así como también parques y reservas naturales. El transporte y las infraestructuras asociadas cuentan con poco mantenimiento y desarrollo y dificultan en muchos casos el tráfico transfronterizo. El sector de las telecomunicaciones cubre el acceso a la red de telefonía móvil de casi la totalidad de la población, no sin embargo el acceso a internet, que se encuentra bastante limitado.

Política fiscal

Conocer la política fiscal del país es un aspecto fundamental en la planificación del proyecto. En mercados de tan elevado desequilibrio y descontrol es muy probable que el desconocimiento del modelo económico y las obligaciones tributarias acarreen malentendidos o transacciones confusas. La principal fuente de ingresos de la Administración es debida a impuestos sobre la renta, cuyas tasas se aplican en función de esta, desde el 0% hasta máximos del 40%. El Impuesto sobre Sociedades es del 24%, al cual se añade un 3% sobre este para ayudas contra el virus del SIDA, haciendo un porcentaje efectivo del 24,72%. En cuanto al IVA, el impuesto es del 14,50%. Con el fin de proteger la industria local, el Gobierno de Zimbabwe establece impuestos especiales y tasas aduaneras específicas para los diferentes tipos de productos, por lo que será de importancia conocer los porcentajes asociados a los productos adquiridos. Por ejemplo, sobre cada tipo de mineral o cultivo se imponen regalías, así como impuestos sobre los diferentes bienes importados.

Es importante apuntar que, además de los impuestos específicos sobre los bienes, algunos de estos requieren licencias de importación, entre ellos la maquinaria industrial. Para la obtención de estas licencias se seguirán detalladamente los pasos indicados en las guías de importación ofrecidas por la Oficina Nacional de Desarrollo del Comercio de Zimbabwe. Además, el Gobierno ofrece exenciones fiscales o incentivos para inversores extranjeros en áreas como “nuevas tecnologías limpias”, por lo que deberá igualmente considerarse en la planificación.

RESUMEN DE IMPUESTOS SEGÚN SISTEMA TRIBUTARIO DE ZIMBABWE

TIPO DE IMPUESTO	TIPO DE GRAVAMEN
Impuesto sobre la Renta de Personas Físicas	0 – 40 % (depende de renta)
Impuesto sobre Sociedades	24 % (+3% SIDA)
Impuesto sobre el Valor Añadido	14,50 %
Impuestos Especiales	(Depende del bien o servicio)
Tasas aduaneras	(Depende del bien importado)

Tabla 1: Impuestos según sistema tributario vigente. [T¹]

Relaciones comerciales

El nuevo Gobierno ha retomado su disposición para establecer nuevas alianzas estratégicas y acuerdos comerciales que permitan estimular la economía del país con inversiones extranjeras. Modificó en 2018 la ley sobre la restricción de dichas inversiones, que limitaba en gran medida los sectores en que estas podían realizarse. Actualmente, el platino y los diamantes, fuente de enorme riqueza del país, son los únicos dos sectores en los cuales las inversiones no están permitidas con carácter internacional.

Las relaciones comerciales con otros países, desde la perspectiva del proyecto, serán importantes para conocer las rutas comerciales habituales y la complejidad para la importación de determinados bienes. El mayor proveedor es Sudáfrica, con aproximadamente un 40% de todas las importaciones del país. En Asia, Singapur y China importan más de mil quinientos millones de dólares anuales en bienes, seguidos de India Y Japón. Otros países con peso comercial son Mauricio, Reino Unido, Zambia, Mozambique o Emiratos Árabes Unidos.

Infraestructuras relevantes

Un aspecto comercial fundamental es la ubicación geográfica. Zimbabwe se encuentra situado al Sur del continente africano y no dispone de salida al mar, por lo que el comercio marino se ve dificultado significativamente al tener que atravesar varias fronteras. Los cuatro países colindantes con Zimbabwe son Zambia (Norte), Mozambique (Este), Sudáfrica (Sur) y Botswana (Oeste) y supone un enclave comercial estratégico debido al tránsito, especialmente entre los territorios Norte y Sur de África. Además, la frontera de Zimbabwe se encuentra delineada de forma natural y en toda su longitud por el río Zambeze, con Zambia y con el río Limpopo, con Sudáfrica.

La red de carreteras es bastante extensa, muy superior a la de otros países próximos, sin embargo, el mantenimiento es muy pobre y en muchos casos requieren rehabilitación. La mayoría de carreteras principales se disponen de forma radial a partir de las ciudades principales o interconectan estas, siendo la primera la capital, Harare y posteriormente y en orden demográfico decreciente: Bulawayo, Chitungwiza, Mutare, Gweru y Kwekwe.

En cuanto a los pasos fronterizos, existe al menos uno de carácter principalmente comercial con cada uno de los países colindantes. Estos suelen estar además muy congestionados, debido al gran volumen concentrado.

- **Zimbabue - Zambia.** El paso principal es el de Chirindu, que conecta en línea prácticamente recta las capitales, Harare y Lusaka, por lo que el tránsito es muy elevado. Existen pasos secundarios más alejados en Kariba y Cataratas Victoria, destinados mayoritariamente al turismo y el transporte de personas.
- **Zimbabue - Mozambique.** El paso principal es el de Forbes, en la periferia de la ciudad de Mutare. Más al norte existe otro paso en Nyampanda, menos transitado.
- **Zimbabue - Sudáfrica.** El de Beitbridge es el único paso fronterizo existente y es el que mayor volumen de tráfico soporta de todo Zimbabue, debido al amplio intercambio comercial entre ambos países. Su conexión es directa con algunas de las principales ciudades de Sudáfrica, entre ellas Pretoria, Johannesburgo o Bloemfontein.
- **Zimbabue - Botswana.** El paso de Plumtree es el más importante, se encuentra próximo a la segunda mayor ciudad de Zimbabue, Bulawayo y conecta esta con la capital de Botswana, Gaborone. Otros pasos no están destinados a fines comerciales.



Ilustración 2: Red de carreteras principales y pasos fronterizos de interés comercial. [12]

En cuanto al tráfico aéreo, Zimbabwe dispone de 3 aeropuertos principales:

- **Cataratas Victoria.** Este aeropuerto está destinado principalmente al tráfico turístico y únicamente existe conexión con ciudades próximas como Harare o Johannesburgo.
- **Bulawayo.** Vuelos principalmente nacionales e internacionales con Sudáfrica.
- **Harare.** Es el foco del tráfico aéreo del país y el más relevante en el ámbito comercial. Posee conexión directa con algunas capitales africanas, especialmente con Johannesburgo, Lusaka, Nairobi y Addis Abeba. La conexión intercontinental fundamental es la del aeropuerto internacional de Dubai.

La red ferroviaria de Zimbabwe está gestionada por la empresa estatal de ferrocarriles National Railways of Zimbabwe. Es de las redes más amplias del Sur del continente africano, detrás de Sudáfrica, país que posee una de las mayores redes de ferrocarril del mundo. Estas están conectadas a las de países vecinos y suponen una infraestructura clave en el comercio.

Sistema de divisas

Zimbabwe atraviesa aún una larga crisis monetaria debida a la escasez de divisas y a las hiperinflaciones históricas. Hace una década, en plena cumbre de la crisis económica, la pérdida absoluta de valor del dólar zimbabuense supuso su desaparición tras convertirse en la moneda más devaluada del mundo. A partir de 2009, el dólar estadounidense y el rand sudafricano se convierten en las monedas oficiales.

A finales de 2014 comienza la emisión de los llamados bonos 'ZIM' o 'zólares', billetes con una supuesta paridad respecto al dólar estadounidense y que han estado en circulación hasta recientemente. Al poco de tiempo de emitirse, los habitantes de Zimbabwe dedujeron que estos bonos no eran canjeables y perdían su valor por momentos. Por supuesto, no eran aceptados como medio de pago para las importaciones y en la mayoría de comercios eran rechazados o se inflaban los precios para su admisión. La población confiaba únicamente en el dólar estadounidense y tendía a guardarlo como medio para asegurar su capital, lo cual solo agravaba la situación.

A partir de mediados de 2019, el Gobierno reintrodujo el dólar de Zimbabwe (Z\$ ó ZWD) nuevamente y declaró su carácter oficial. A pesar de que el dólar estadounidense aún es aceptado en determinados comercios, se aconseja el uso de dólares zimbabuenses en cualquier caso y siempre en efectivo. El cambio aproximado equivale a: **1 USD = 362 ZWD**.

Demografía

La población actual de Zimbabwe es de 14,8 millones de habitantes, de la cual aproximadamente un 99% es de descendencia africana. La elevada tasa de natalidad, que supera los 3,5 hijos por mujer y la reducida esperanza de vida, alrededor de los 62 años, hacen de la población de Zimbabwe una especialmente joven, cuya edad media poblacional no alcanza los 20 años.

El SIDA es una de las principales causas de muerte en Zimbabwe y es uno de los países con mayor número de población afectada por este virus. Se estima que 1,5 millones de personas viven infectadas por el SIDA, sin embargo, este es un foco de atención del nuevo gobierno y la inversión internacional y las políticas fiscales han supuesto una enorme mejora en los últimos años gracias a la implementación de programas que llegan cada vez a más personas.

Solo un tercio de la población de Zimbabwe habita en áreas urbanas, lo que supone que más de 9 millones de personas lo hacen en zonas rurales, en pequeños poblados o en comunidades formadas por pequeños núcleos dispersos. Por lo general, gran parte de esta fracción de la población no goza de las infraestructuras mínimas para el abastecimiento de agua, electricidad, medios sanitarios, etc. por lo que sus economías son de subsistencia y la agricultura es la principal ocupación.

Puesto que la mayor parte de la población pertenece a la etnia shona, su lengua es la más empleada entre los nativos. Sin embargo, con la entrada del dólar estadounidense y el pasado colonial británico, el inglés es lengua oficial en Zimbabwe y se encuentra muy extendida, especialmente en el ámbito del comercio. La segunda etnia con más presencia es la ndebele (10 - 14%), cuya lengua también es hablada por parte de la población.

Cultura

Por insólito que parezca, Zimbabwe posee una de las mayores tasas de alfabetización del continente africano, alcanzando un porcentaje de la población de en torno al 90%, por encima incluso de Sudáfrica

En Zimbabwe, la religión es un factor de peso en la sociedad y existen diferentes creencias. Aproximadamente la mitad de la población posee creencias mixtas, incluyendo cristianismo y creencias indígenas como el animismo. El animismo está muy extendido en África y atribuye conciencia y alma a los seres inertes y elementos de la naturaleza. El resto de la población es cristiana, animista o musulmana (en torno al 1%).

Las familias suelen ser bastante numerosas, debido principalmente a la elevada tasa de natalidad. La mujer es considerada, en muchos casos, la figura más importante en la estructura familiar y los ancianos y ancianas reciben un enorme respeto y atención familiar, pues la longevidad es sinónimo de sabiduría y jerarquía.

Algunos aspectos culturales significativos de Zimbabwe son, por ejemplo, la poligamia. Si bien no es una costumbre mayoritaria, en algunas zonas rurales particularmente, aún tiene presencia. La homosexualidad no está socialmente aceptada e incluso prohibida por el Código Penal.

La bandera de Zimbabwe (*Ilustración 3*) está compuesta por bandas de color rojo, que simbolizan la sangre derramada durante la lucha por la independencia; amarillo, debido a la riqueza mineral del territorio; verde, por la riqueza agrícola y negro, representando la mayoría de la población negra.



Ilustración 3: Bandera de Zimbabwe. [13]

Plano físico

Si bien el plano contextual es importante para conocer los factores culturales de influencia en el proyecto y analizar la viabilidad de este desde la perspectiva de la integración social, el plano físico responde a las condiciones materiales sobre las que se desarrollará este.

Los factores físicos tendrán influencia en los diseños, los materiales y equipos, las prestaciones logradas, etc.

Climatología

Zimbabwe posee un clima subtropical seco con dos estaciones principales:

- Periodo cálido y húmedo, entre noviembre y marzo.
- Periodo seco, entre abril y octubre.

Las temperaturas se mantienen relativamente constantes a lo largo del año, entre los 6 °C y los 29 °C, si bien son ligeramente superiores en los meses de verano. Las condiciones e intervalos climatológicos del Norte de Zimbabwe se recogen en la *Tabla 2*. Se puede observar que la media de precipitaciones anuales es de aproximadamente 800 mm, el doble que en ciudades del interior de la Península Ibérica, como Madrid. Llevar a cabo la obra en los meses de julio y agosto, evitando las altas temperaturas y las lluvias, facilitará la mano de obra y mejorará las condiciones de trabajo del personal.

ÉPOCA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
HUMEDAD REL. [%]	72,5	72,4	72,8	66,4	58,9	58,2	56,1	49	43,5	48,1	59,4	72
NUBOSIDAD [% tiempo]	74	66	47	25	10	7	6	7	10	24	49	70
PRECIPITACIONES [mm]	190	165	95	35	7	1	1	1	5	35	85	170
SOL [h]	13,2	13	12,4	11,8	11,5	11	11,3	11,5	11,8	12,5	12,8	13,2
TEMPERATURA [°C]	26/16	26/16	26/15	25/13	24/9	22/7	22/7	24/9	28/12	29/15	28/16	26/16
VIENTO [km/h]	11,3	11,4	12	12	11,7	12,5	13,3	14,5	16,5	16,7	14,6	12,2

Tabla 2: Condiciones climatológicas medias anuales en Zimbabwe. [T¹]

Geografía

A lo largo del proyecto se emplearán herramientas apropiadas para el conocimiento geográfico del lugar de trabajo. Se analizarán los datos en detalle en secciones posteriores, según corresponda. Algunos aspectos importantes a considerar:

- Ubicación del espacio de trabajo.
- Ubicación de lugares más significativos: presa, embalse, poblados, puntos de suministro eléctrico y otros lugares de interés.
- Posición relativa y enlace con puntos de aprovisionamiento: ciudades, pueblos, etc.
- Información topográfica del terreno.
- Información acerca de características del suelo.

Poblado de Kazai

La aldea de Kazai, donde se desarrollará el proyecto, se encuentra ubicada al Norte del país, en la provincia de Mashonlandia Central (delineada en rojo en la *Ilustración 4*), una de las ocho divisiones administrativas del territorio. A 150 km al Sur de la aldea se localiza Harare, la capital. Esta zona se caracteriza por amplias extensiones de terreno llano sobre las que se disponen reducidas comunidades locales formadas por núcleos dispersos de población.

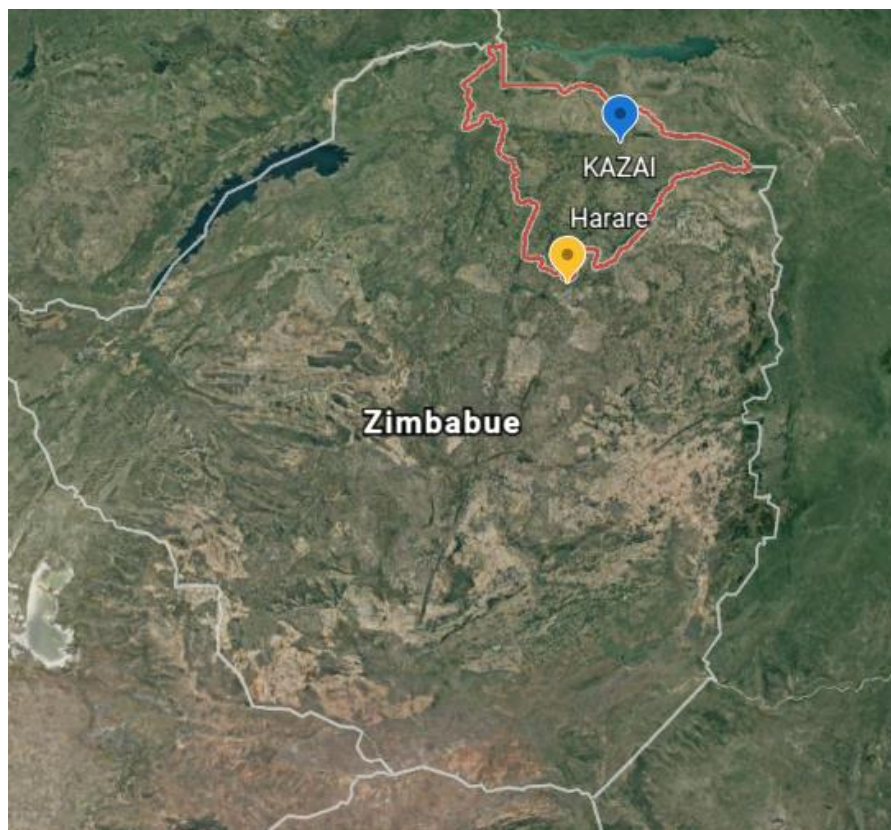


Ilustración 4: Ubicación de Kazai respecto de la capital. [14]

El nivel y calidad de las infraestructuras de la zona son mínimos, la accesibilidad del transporte es muy limitado, el agua, procedente de pozos, se encuentra a distancias considerables en algunos casos y el suministro de energía eléctrica es prácticamente inexistente. La economía es principalmente de subsistencia, por lo que el aislamiento de la comunidad es notable y las prácticas más extendidas buscan satisfacer las necesidades más básicas de los núcleos familiares, siendo la agricultura la actividad principal.

La región más próxima para el abastecimiento de suministros es la de Dotito, situada a unos 5 km de distancia del área de trabajo. Como se observa en la *Ilustración 5*, las infraestructuras para el transporte son pobres y escasas, con caminos de tierra estrechos y conexiones poco directas. Los campos de cultivo cubren una gran parte del terreno.

En la mitad izquierda de dicha ilustración se observa también la región de Kazai, donde la población se encuentra muy dispersa sobre el territorio, formando pequeñas colonias.

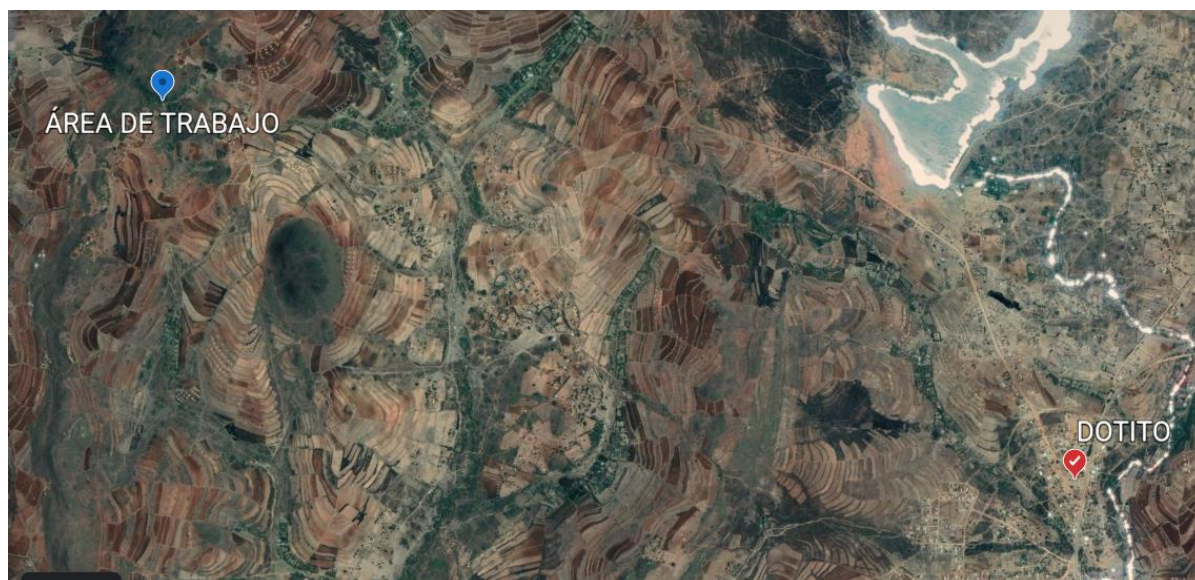


Ilustración 5: Posiciones relativas de Kazai y la región de Dotito. [I⁵]



Ilustración 6: Escuela de Kazai, al Sur de la región. [I⁶]

Descripción del proyecto

El proyecto se desarrollará como contribución a la labor de la ONG Child Future Africa, establecida en Zimbabue y dedicada a la implementación de recursos en comunidades con gran limitación de medios para la satisfacción de sus necesidades básicas, entre las que cabe destacar la educación, la salud e higiene, el abastecimiento de agua y suministros o la generación de energía eléctrica.

La aldea de Kazai dispone de un embalse cuya capacidad varía a lo largo del año, siendo máxima en los meses cálidos y húmedos de verano, entre diciembre y marzo y mínima o nula en los meses secos de invierno. Dicho embalse consta de una presa que se encuentra deteriorada y cuya pobreza de los materiales y técnicas de construcción han derivado en filtraciones del agua embalsada en su asiento y, por tanto, en una continua pérdida del volumen total de esta. El proyecto global comprenderá de dos partes, cada una de las cuales será desarrollada por un alumno. Ambos deberán proyectarse de forma paralela y consonante, debido a su interdependencia, así como atender a criterios y metodologías comunes.

- **Diseño y reparación de una presa existente y sin funcionamiento.** Proyecto realizado por Antonio García del Valle. Tal y como enuncia su título, consistirá en la reconstrucción o reparación de la presa mencionada anteriormente y que en la actualidad se considera inhabilitada. (En adelante, **Proyecto Presa**).
- **Aprovechamiento de salto de agua mediante turbina.** Proyecto realizado por Rodrigo Ruano Pérez. Como elemento adicional a la renovación del sistema de retención del agua embalsada, se diseñará y llevará a cabo una instalación hidroeléctrica de dimensiones reducidas con el fin de suministrar energía eléctrica a los emplazamientos y sistemas que lo requieran (colegio, hospital, sistemas de irrigación, etc.) (En adelante, **Proyecto Turbina**).

Para llevar a cabo el proyecto deberán tenerse en cuenta múltiples factores, algunos de los cuales ya han sido mencionados previamente. Además de un profundo conocimiento del entorno y las circunstancias de trabajo, se analizarán las tecnologías existentes, así como su implementación en otros proyectos que hayan sido desarrollados en condiciones equivalentes. Algunos aspectos relevantes sobre los que deberán fundamentarse los criterios y decisiones adoptadas son los siguientes:

- **Sencillez:** los diferentes sistemas y componentes deben facilitar la instalación y manipulación por personal poco cualificado. Se tomará como premisa que, dadas las condiciones de desarrollo del proyecto y funcionamiento futuro, simplicidad y robustez serán indicadores de fiabilidad y durabilidad.

- **Coste:** la adquisición de material, gastos de porte, mano de obra, aranceles y demás gastos que serán reflejados en el presupuesto del presente trabajo deberán ajustarse a la más estricta necesidad, con previsión de posibles contingencias que puedan ocasionar desviaciones con respecto a la disponibilidad económica de la ONG y los fondos previstos para cada proyecto.
- **Mantenimiento:** tras la puesta en marcha, la instalación deberá funcionar de forma autónoma o bien ser manipulable por miembros de la comunidad local. Se valorará tanto la instrucción de miembros locales para las aspectos fundamentales de mantenimiento de los sistemas como la implementación de dispositivos para el análisis y manipulación remotos.
- **Disponibilidad:** se entiende por disponibilidad a la capacidad de disponer del material en el lugar de trabajo y en los intervalos temporales establecidos en la planificación, considerando las restricciones logísticas y la escasez de infraestructuras.

El ámbito, las condiciones y los factores de influencia que intervienen en el desarrollo del proyecto implican no buscar soluciones excesivamente complejas o basadas en la innovación tecnológica. Por el contrario, se trata de optimizar un recurso de manera que este pueda ser utilizado y disfrutado con el mayor rendimiento y durante el mayor tiempo posibles en condiciones poco favorables y habituales.

Propósito final

En todo proyecto es fundamental interiorizar las causas por las que se pretende llevar a cabo, así como el resultado que se espera de este. Ser consciente de la motivación y el porqué de su realización será el primer paso para definir el alcance y disponer de cimientos sólidos sobre los que fundamentar todas las decisiones y acciones emprendidas.

La ingeniería, así como cualquier otra profesión, adquiere su verdadero potencial cuando resulta en una creación de valor social y repercute positivamente en la vida y el bienestar de las personas. Este trabajo, si bien pretende reflejar las capacidades técnicas desarrolladas a lo largo de un periodo de formación académica, posee un propósito último basado en los siguientes fines:

- **Abastecer de electricidad al poblado de Kazai, en Zimbabue.** El fin último va más allá de la demostración teórica, pues la verdadera esencia es que el esfuerzo y la dedicación resulten en el beneficio y el bienestar de una reducida comunidad social extraordinariamente desafortunada por sus condiciones vitales. Toda acción irá, por tanto, encaminada a que el disfrute de este bien se realice de manera prioritaria (atendiendo a las necesidades más urgentes), equitativa (tratando de que su beneficio llegue a tantos como sea posible) y sostenible (de modo que no sea un recurso puntual, sino que favorezca el desarrollo y la autonomía del poblado).

- **Exender la práctica de las pequeñas instalaciones como fuente de recursos.** En la actualidad, la electricidad es uno de los bienes sobre los que más depende el desarrollo. Si bien en nuestro entorno se da por hecho y dificulta la tarea de hacer consciente su imprescindibilidad, en zonas especialmente rurales, incluso en países desarrollados, su carencia es una barrera frente a la subsistencia y el progreso. Con este trabajo se pretenderá demostrar que las pequeñas instalaciones hidráulicas (también eólicas, solares, etc.) son una solución excelente para impulsar la autonomía de pequeñas poblaciones inaccesibles desde la perspectiva económica o logística para su suministro eléctrico.
- **Aportar evidencia práctica de los estudios, criterios y cálculos realizados.** El proyecto se llevará a cabo en la zona y bajo las condiciones expuestas a lo largo de todo el trabajo. La documentación realizada a lo largo de todo el proceso, así como los análisis y mediciones tras la puesta en funcionamiento de la instalación permitirán conocer el grado de fidelidad y precisión con que se ha proyectado esta. El aprendizaje y fruto del trabajo serán por partida doble, pues además de las conclusiones extraídas del marco teórico, se obtendrá una importante retroalimentación del propio desarrollo del proyecto.

Objetivos de Desarrollo Sostenible

Un factor fundamental del proyecto consistirá en alinear las decisiones y acciones emprendidas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, aprobados por la Organización de las Naciones Unidas en 2015. Con ello, se perseguirá expresar la finalidad social y contribución del proyecto al cumplimiento de dichos objetivos. En particular, serán dos los ODS sobre los que se trabajará de manera directa:

- **ODS 1: Fin de la pobreza.** Aportando recursos y fomentando el desarrollo y la autonomía de una población.
- **ODS 7: Energía asequible y no contaminante.** La instalación será autosostenible y no generará ningún tipo de impacto medioambiental.

Indirectamente o en menor medida, el proyecto también incidirá en otros ODS, pues la generación de energía estará destinada, entre otros ámbitos, a mejorar la calidad de vida de las personas (3), a reducir las desigualdades sociales (10) o a realizar un consumo que no contribuya al cambio climático (13) y respete los ecosistemas (15).



Ilustración 7: ODS perseguidos de manera directa. [17]

Introducción al proyecto

Antecedentes históricos

El ser humano, desde sus orígenes, ha demostrado su interés y afán por el aprovechamiento de los recursos naturales, no solo como medio de subsistencia, sino como fuente de desarrollo y evolución. En concreto, la transición del nomadismo al sedentarismo dio lugar al establecimiento de los primeros asentamientos en las proximidades de los cauces y reservas hidráulicas, pues el hombre tomó conciencia temprana del enorme potencial albergado por el agua.

La primera invención que supone un aprovechamiento de la energía del agua se atribuye al ingeniero griego Filón de Bizancio en el siglo III a.C. La conocida rueda hidráulica o noria se empleó en un principio para la elevación constante del agua de ríos a una altura superior del cauce y su distribución por medio de gravedad por canales para el regadío.



Ilustración 8: Sistema de elevación hidráulico para regadío. [18]

El uso de la rueda hidráulica se extendió en el Imperio Romano y la cultura egipcia, dando lugar a usos innovadores basados en el mismo principio. En el siglo I a.C se vincula la aparición de la *rota aquaria* o rueda hidráulica de eje horizontal y empuje inferior al arquitecto romano Marco Vitruvio Polión, permitiendo llevar a cabo la liberación del hombre de tareas que previamente requerían esfuerzos humanos muy elevados o resultaban inviables, como la molienda de grano.

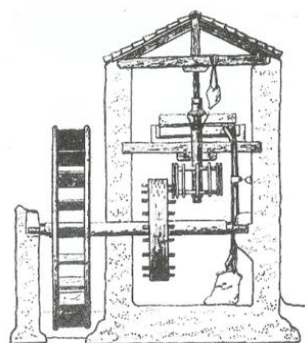


Ilustración 9: Rueda hidráulica y transmisión para tareas de molienda. [18]

Posteriormente, surgen también las ruedas de eje vertical, cuya principal ventaja es que carecen de mecanismos de transmisión por su acoplamiento directo entre la rueda y el útil, así como otras variantes de la rueda hidráulica como la de empuje superior, empleada en desniveles y terrenos irregulares.

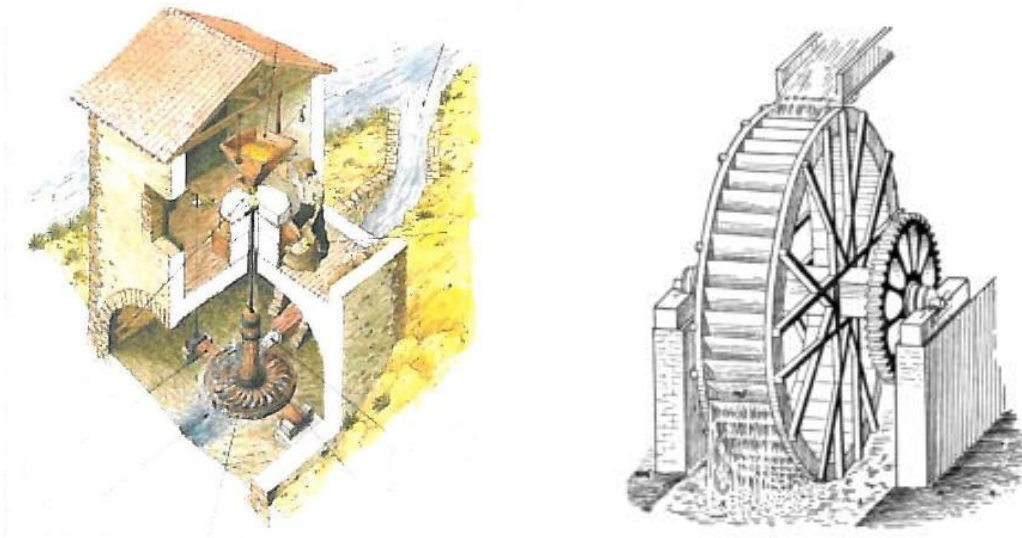


Ilustración 10: Rueda de eje vertical (izqda.) y de empuje superior (dcha.). [18]

Bajo el principio físico inverso, aparecen máquinas destinadas al bombeo, especialmente de agua, pero también de semillas, cereales y otros materiales. De entre estas, el *tornillo* o *espiral de Arquímedes*, invento atribuido al científico multidisciplinar de origen griego en el siglo III a.C. cuyo nombre porta, es el más notable y reconocido por su multitud de usos y perpetuación en la historia, hasta la actualidad. Al igual que este y con objeto de extraer agua de pozos o salvar desniveles, la *noria de tiro* aporta la energía al agua por medio del esfuerzo de animales domésticos.

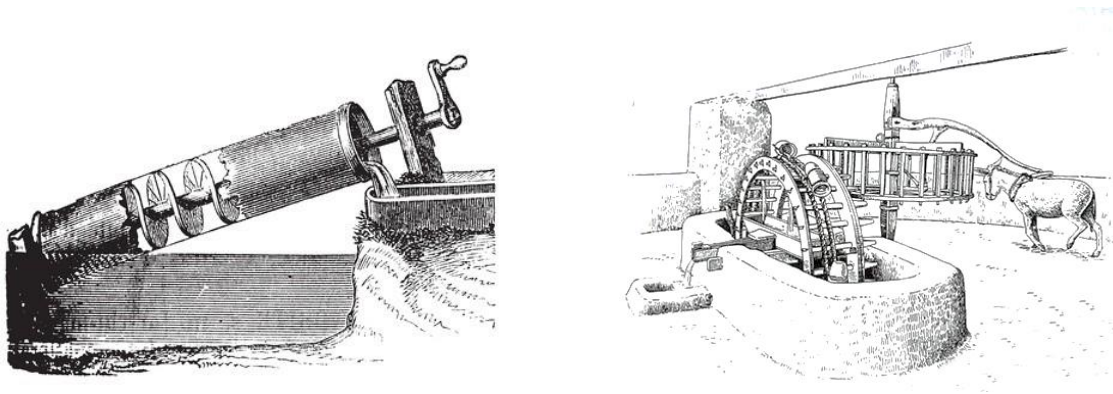


Ilustración 11: Espiral de Arquímedes (izqda.) y noria de tiro (dcha.). [18]

Sin embargo, es en la Edad Media cuando comienza a extenderse el uso de las máquinas hidráulicas. La cultura árabe y los pueblos medievales adoptan estas para labores de forja, aserrado, tejido, extracción minera, molienda, etc. La canalización energética del agua a la realización de las diferentes prácticas y oficios comienza a arrojar luz sobre la trayectoria evolutiva de esta tecnología y su importancia en el crecimiento de las civilizaciones. [1] [2]

El progreso del conocimiento, la experiencia, el origen del estudio de ciencias como la Mecánica de Fluidos o la especialización serán factores que influirán en una modernización exponencial de las tecnologías asociadas a la hidráulica. Sin embargo, estos avances, así como la aparición de teorías, bases experimentales y demostraciones matemáticas, estarán fundamentados en los mismos principios de sus orígenes, siglos de historia atrás.

Orígenes de la Mecánica de Fluidos

La Mecánica de Fluidos es la ciencia responsable del estudio de la cinemática y la dinámica de los fluidos, los cuales son sustancias en estado líquido o gaseoso. A su vez, esta posee múltiples ramas en función del estado del fluido, las condiciones en que se encuentra, las fuerzas que intervienen, el ámbito de interés de estudio, etc. Algunas de estas, que posteriormente se subdividen en áreas de estudio cada vez más concretas y especializadas, son la Aerodinámica, la Dinámica de Gases, la Hidrostática o la Hidrodinámica.

Esta ciencia continúa siendo objeto de estudio, pues el comportamiento de los fluidos y los fenómenos asociados a su movimiento y la acción de fuerzas son enormemente impredecibles y dependientes de otros factores. A lo largo del presente trabajo se verá que los teoremas y ecuaciones que rigen el análisis están sujetos a múltiples supuestos y condiciones y que no responden a muchos escenarios o se consideran inabordables desde la perspectiva analítica.

Resulta complicado atribuir los orígenes del estudio de la Mecánica de Fluidos a un periodo concreto de la historia o a una cultura de la misma. De forma mayor o menormente consciente, el ser humano ha hecho uso y provecho de esta desde acciones tan simples como emplear la corriente de un río para transportarse a sí mismo sobre un tronco flotante. Existen evidencias arqueológicas datadas de hace más de 7000 años que apuntan a que ciertas civilizaciones de Mesopotamia, nombre que recibe en dicha época la región de Oriente Próximo situada entre los ríos Tigris y Éufrates y que en la actualidad comprende parte de Irak y Siria, llevaron a cabo ingeniosos sistemas para la retención y acumulación de agua como medio para atender las necesidades agrícolas. Este conocimiento fue heredado posteriormente por la cultura egipcia, la cual llevó a cabo asombrosas obras hidráulicas para el control y aprovechamiento del potencial del río Nilo.

Sin embargo, es en los últimos siglos a.C., en la época griega, cuando aparecen las primeras contribuciones analíticas a la Mecánica de Fluidos. Algunos físicos de renombre como Tales de Mileto (s. VII - VI a.C.) y su importante contribución a la geometría (ciencia de amplia aplicación en el estudio de los fluidos); Arquímedes de Siracusa (s. III a.C.) y su famoso principio sobre el empuje vertical de los cuerpos sumergidos por acción de un fluido o Herón de Alejandría,

inventor de la *eolípila*, considerada la primera máquina de vapor y accionada como consecuencia de la ley de acción-reacción por agua en estado gaseoso. [3]

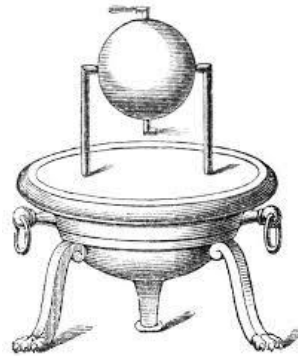


Ilustración 12: Eolípila. [19]

Debido al contexto histórico, la caída del Imperio Romano y las invasiones bárbaras de los pueblos del Norte europeo, quienes no valoraban la sabiduría y el conocimiento como recursos para el crecimiento de las civilizaciones, llevando a cabo la destrucción de grandes bibliotecas y documentos que contenían los hasta entonces logros científicos, las ciencias entraron en una etapa de decadencia e inmovilismo.

Fue a la llegada del Renacimiento, cuando el arte y la cultura volvieron a florecer y la sabiduría de las culturas antiguas comenzó a recuperarse progresivamente. Grandes personalidades de esta época realizaron contribuciones fundamentales al campo de la ciencia y a la Mecánica de Fluidos. Sin duda, la figura más relevante del escenario fue Leonardo da Vinci (1452 - 1519), polímata de origen italiano que describe los principios de sustentación aerodinámica, obtiene las primeras ecuaciones para flujo unidimensional y demuestra experimentalmente el origen de vórtices y torbellinos en zonas de separación de flujos, entre otras. Fue el formulador del principio de continuidad de la hidráulica. [4] [5] [6]



Ilustración 13: Dibujo de máquina voladora de da Vinci. [110]

Simón Stevin (1548 - 1620), ingeniero y matemático holandés, realizó importantes aportaciones al campo de la hidrostática. Demostró que la fuerza ejercida por un fluido sobre la base de un recipiente o la superficie de un objeto sumergido no depende de la forma de ninguno de ambos ni de la cantidad de fluido que lo rodea, sino que es el peso de la columna fluida entre la cara del objeto o la base y la superficie libre. Esto es lo que se conoce como la *Paradoja Hidrostática*. También contribuyó a la definición de la estabilidad en términos de flotación, aspecto muy relevante en el ámbito naval. [6]

Si bien sus aportaciones al campo de la hidráulica no son un dato característico, Galileo Galilei (1564 - 1642) es considerado el fundador del método científico. Su planteamiento del estudio de la teoría con la experimentación como elementos inseparables de la investigación ha tenido una extraordinaria influencia en la ciencia moderna. La Mecánica de Fluidos ha sido y es estudiada desde un enfoque con gran peso experimental y muchas de las hipótesis que en la actualidad se dan por válidas son el resultado de la aplicación de las bases de este planteamiento. [7]

Evangelista Torricelli (1608 - 1647), físico y matemático italiano, es reconocido por ser autor del famoso teorema que expresa la velocidad de salida de un fluido líquido a través de un orificio en el lateral del recipiente que lo contiene. Este establece que dicha magnitud es únicamente dependiente de la aceleración de la gravedad y de la diferencia de cotas entre el orificio y la superficie libre. El *Teorema de Torricelli* es uno de los muchos legados de la ciencia moderna que son de aplicación en la actualidad. [6]

El polímata francés Blaise Pascal (1623 - 1662) fue una de las figuras más notables en el ámbito de la hidrostática. El reconocido *Principio de Pascal* enuncia que la presión ejercida sobre un fluido incompresible y en equilibrio posee la misma magnitud en todos los puntos y direcciones del fluido. Este principio representa la base de funcionamiento de maquinaria hidráulica que requiera elevadas fuerzas de salida a partir de la aplicación de esfuerzos reducidos, como prensas, frenos, gatos o elevadores. En la *Ilustración 7* se observa que, a igualdad de presiones en todo el volumen fluido, la fuerza requerida para elevar los pesos es inferior a la que estos ejercen en oposición, debido a la diferencia de áreas de los émbolos.

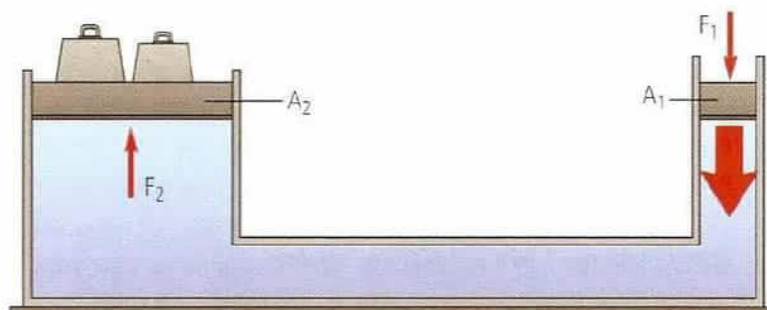


Ilustración 14: Amplificación de fuerzas, Principio de Pascal. [11]

Las contribuciones del físico y matemático inglés, Isaac Newton (1642 - 1727) a la ciencia son prácticamente innumerables. Además de autor de las *Leyes del Movimiento* o *Leyes de Newton* y la *Ley de Gravitación Universal*, promulgó la *Ley de Viscosidad de Newton*, la cual establece una relación entre los esfuerzos cortantes resultantes de un flujo con la viscosidad característica del fluido y su gradiente de velocidad.

Daniel Bernoulli (1700 - 1782), físico y matemático suizo, dio lugar a uno de los principios fundamentales del estudio de la hidrodinámica, el *Principio* o *Ecuación de Bernoulli*, el cual describe el comportamiento de un fluido en una línea o circuito de flujo a partir de su balance energético. Este principio se deduce a partir del *Principio de Conservación de la Energía* y existen variaciones en su planteamiento según las características del fluido y las simplificaciones asumidas.

Las aportaciones del físico y matemático suizo Leonhard Euler (1707 - 1783) al campo de las matemáticas y la mecánica han sido de las más importantes en los últimos siglos. Además de fórmulas y notaciones matemáticas, contribuciones a la descripción de deformaciones elásticas en sólidos o el movimiento tridimensional de sólidos rígidos, fue el descubridor de las leyes que rigen el movimiento de los fluidos ideales, conocidas como *Ecuaciones de Euler*. Estas comprenden la continuidad o conservación de la masa del fluido, el balance de la cantidad de movimiento y el estado del fluido. Euler fue también autor de la ecuación que describe el comportamiento de las turbomáquinas y que será tratada a lo largo de este trabajo. [8]

En adelante, la historia deja atrás la Edad Moderna con acontecimientos como la Declaración de Independencia de los EEUU o la Revolución Francesa, dando paso a la actual Edad Contemporánea. La ciencia y la industria toman un gran protagonismo en el panorama y los avances continúan de la mano de los grandes autores y arquitectos la Mecánica de Fluidos.

El hidráulico francés Henry Darcy (1803 - 1858) estudió el flujo de fluido a través de medios permeables y realizó una importante contribución al cálculo de las pérdidas de carga hidráulica debidas a fricción. La *Ecuación de Darcy-Weisbach* recibe el nombre en su honor, junto con el del ingeniero alemán Julius Weisbach, quienes promulgaron esta expresión de uso extendido en la actualidad. [9]

Jean Léonard Marie Poiseuille (1797 - 1869) fue médico francés que llevó a cabo amplios estudios en el campo de la Mecánica de Fluidos aplicada a la circulación sanguínea. Su mayor aportación fue la divulgación de la *Ley de Poiseuille*, que ha permitido describir los flujos laminares a través de tuberías cilíndricas.

En la segunda década del siglo XIX tiene lugar la que probablemente sea la mayor aportación histórica a la Mecánica de Fluidos. El ingeniero francés Claude Louis Marie Henri Navier (1785 - 1836), además de una relevante contribución a la Resistencia de Materiales, deduce por primera vez las conocidas como *Ecuaciones de Navier-Stokes*, que basándose en la idealización de los fluidos de Euler, incluye la influencia de las fuerzas intermoleculares debidas a la viscosidad en dichas ecuaciones. El físico irlandés Gabriel George Stokes (1819 - 1903) llegó a las mismas expresiones siguiendo métodos alternativos de deducción y aportando sus hipótesis

que dieron lugar a las ecuaciones definitivas regidoras del movimiento de los fluidos newtonianos, empleadas en la actualidad. [3] [6]

El ingeniero naval inglés William Froude (1810 - 1879) ha sido un gran influyente de la evolución de dicha industria gracias a sus estudios y contribuciones sobre factores que intervienen en la resistencia hidrodinámica experimentada por las embarcaciones, su estabilidad o velocidad. En sus múltiples experimentos, demuestra empíricamente la validez del denominado *Número de Froude*, el cual permite caracterizar estados de flujo en canales abiertos y evaluar su influencia sobre el movimiento de un objeto en la superficie. [10]

Osborne Reynolds (1842 - 1912), ingeniero irlandés, es muy reconocido en la Mecánica de Fluidos por sus estudios en materia de navegación y en el comportamiento de las máquinas hidráulicas. Sin embargo, su mayor contribución a la hidrodinámica es sin duda la definición del parámetro que permite identificar la ocurrencia de los dos tipos de flujos, el laminar y el turbulento, el *Número de Reynolds*. [10]

John William Strutt, conocido también como lord Rayleigh (1842 - 1919) fue un ingeniero británico cuyas investigaciones en el ámbito del análisis dimensional han tenido una gran importancia, desarrollando métodos propios que permiten determinar los parámetros adimensionales que caracterizan un proceso. Posteriormente, esto será de utilidad en los estudios de semejanza y en la construcción de modelos y prototipos.

La *Teoría de la Capa Límite* supone otro gran hito en la Mecánica de Fluidos y es gracias a su descubridor, el físico alemán Ludwig Prandtl (1875 - 1953), que esta ciencia accede a nuevas dimensiones y posibilidades de estudio. Prandtl establece, y así se ha demostrado, que los flujos de fluidos de baja viscosidad se dividen en dos capas en las inmediaciones de una superficie sólida: una capa viscosa de espesor reducido sobre dicha superficie y otra de mayor espesor en la región más alejada. Realizó también importantes contribuciones a los principios de sustentación y teoría de alas, flujo supersónico y turbulencia. [5]

Theodore von Kármán (1881 - 1963) fue físico húngaro que dedicó gran parte de su trayectoria profesional al desarrollo de cohetes y helicópteros. Fue el descubridor de los patrones de remolinos originados tras el paso de un sólido sumergido en un fluido como consecuencia del desprendimiento de la capa límite, conocido como *Calle de Vórtices de Von Kármán*. Estos vórtices poseen una influencia dinámica sobre el sólido, pudiendo aparecer fuerzas laterales por la distribución de las presiones e incluso vibraciones, que en caso de igualar las frecuencias del sólido o sistema sumergido podrían dar lugar a fenómenos de resonancia.



Ilustración 15: Calle de vórtices de Von Kármán. [1²]

Los autores que han dado forma a la Mecánica de Fluidos, tal y como se conoce en la actualidad, así como las contribuciones de cada uno de ellos, son innumerables y escapan del objeto del presente trabajo. Ilustres científicos de los diferentes campos, no mencionados anteriormente, como Henri Pitot (1695 - 1771), Jean le Rond D'Alembert (1717 - 1783), Joseph-Louis Lagrange (1736 - 1813), Pierre-Simon Laplace (1749 - 1827), Robert Manning (1816 - 1897), Henri-Émile Bazin (1829 - 1917), Geoffrey Ingram Taylor (1886 - 1975) o Moritz Weber (1871 - 1951) han realizado importantes aportaciones a lo largo de los últimos siglos y sus nombres resuenan a día de hoy en el estudio de la Mecánica de Fluidos y sus diversas especialidades.

AUTOR	SIGLO	CONTRIBUCIÓN DESTACADA A LA MECÁNICA DE FLUIDOS
Tales de Mileto	VII - VI a.C	Búsqueda de explicación del Universo a través de la física y las matemáticas. Teoremas geométricos
Arquímedes de Siracusa	III a.C	Principio de Arquímedes
Herón de Alejandría	I d.C	Invento de la eolípila
Leonardo da Vinci	XV - XVII d.C	Principio de continuidad de la hidráulica, flujo unidimensional. Principios de sustentación
Simón Stevin	XVI - XVII d.C	Paradoja hidrostática. Estabilidad en términos de flotación
Galileo Galilei	XVI - XVII d.C	Método científico
Evangelista Torricelli	XVII d.C	Teorema de Torricelli
Blaise Pascal	XVII d.C	Principio de Pascal
Isaac Newton	XVII - XVIII d.C	Ley de viscosidad de Newton
Henri Pitot	XVIII d.C	Invento tubo de Pitot. Estudio de máquinas hidráulicas
Daniel Bernoulli	XVIII d.C	Ecuación de Bernoulli
Leonhard Euler	XVIII d.C	Ecuaciones de Euler (fluidos ideales). Ecuación turbomáquinas
Jean le Rond D'Alembert	XVIII d.C	Paradoja de d'Alembert
Joseph-Louis Lagrange	XVIII - XIX d.C	Formulación lagrangiana de descripción de flujo
Pierre-Simon Laplace	XVIII - XIX d.C	Ley de Laplace
Robert Manning	XIX d.C	Fórmula de Manning
Henry Darcy	XIX d.C	Ecuación de Darcy-Weisbach
Julius Weisbach	XIX d.C	Ecuación de Darcy-Weisbach
Jean Léonard M. Poiseuille	XIX d.C	Ley de Poiseuille
Claude L. M. Henri Navier	XIX d.C	Ecuación de Navier-Stokes (fluido viscoso)
Gabriel George Stokes	XIX d.C	Ecuación de Navier-Stokes (fluido viscoso)
William Froude	XIX d.C	Número de Froude
Osborne Reynolds	XIX d.C	Número de Reynolds
John W. Strutt Rayleigh	XIX - XX d.C	Análisis dimensional
Ludwig Prandtl	XIX - XX d.C	Teoría de la Capa Límite
Theodore von Kármán	XIX - XX d.C	Calle de Vórtices de von Kármán
Henri-Émile Bazin	XIX - XX d.C	Fórmula de Bazin
Geoffrey Ingram Taylor	XIX - XX d.C	Número de Taylor. Estudio estadístico de la turbulencia
Moritz Weber	XIX - XX d.C	Número de Weber

Tabla 3: Resumen de contribuciones destacadas a la Mecánica de Fluidos. [T¹]

Turbomáquinas y centrales hidráulicas

Las turbomáquinas son un género de las máquinas de fluido, las cuales engloban todas aquellas máquinas que realicen un intercambio de energía entre un órgano mecánico y un fluido. Concretamente, las hidráulicas se caracterizan por una continuidad en el flujo y una variación de densidad del fluido despreciable. En posteriores secciones, se realizará una clasificación de las máquinas de fluido y se detallarán las características específicas de cada una de ellas.

Tal y como se expuso al comienzo del trabajo, las máquinas hidráulicas han sido utilizadas desde la antigüedad para llevar a cabo tareas impracticables por el ser humano o que requerían esfuerzos muy elevados. El conocimiento o intuición de los principios de la mecánica como único medio para la generación y transmisión de potencia suponía que estas debían instalarse, en cualquier caso, cerca de los cauces de los ríos, para así poder transmitir su energía a los útiles de trabajo mediante mecanismos.

No fue hasta finales de siglo XVIII que los descubrimientos y avances con respecto a la electricidad comenzaron a arrojar luz sobre los nuevos horizontes y aprovechamientos de la hidráulica, tal y como se conocen en la actualidad. La Revolución Industrial condujo numerosas investigaciones en este ámbito y comienzan a sentarse las leyes de la electricidad y el magnetismo de la mano de ilustres personajes como Charles Coulomb (1736 - 1806), Alessandro Volta (1745 - 1827), André-Marie Ampère (1775 - 1836), Hans Christian Oersted (1777 - 1851), Georg Simon Ohm (1789 - 1854) o Michael Faraday (1791 - 1867). [11]

En el año 1827 el ingeniero francés Benoît Fourneyron inventa la primera turbina hidráulica de características constructivas semejantes a las actuales, llegando a construir más de un centenar de estas en diferentes países y alcanzando regímenes de operación y rendimientos muy avanzados. Se implementan las turbinas en la industria productora.

En 1837 surge la turbina de flujo axial de Henschel y, en 1849, el ingeniero británico James B. Francis desarrolla uno de los modelos de turbina más empleado en la actualidad, la turbina Francis. Aparece también en el año 1889 la turbina de acción Pelton, invento del estadounidense Lester Allen Pelton como respuesta al aprovechamiento de la energía de aguas a grandes alturas proyectada sobre los álabes a través de un inyector. Por el contrario, para maximizar el aprovechamiento de los pequeños saltos, Viktor Kaplan desarrolla la turbina Kaplan en 1912, también de uso muy extendido en la actualidad. En su trabajo, Kaplan estudia también la implementación de álabes rotativos u orientables para adaptar el rendimiento a las condiciones de funcionamiento. Esta es actualmente una característica muy particular de las turbinas Kaplan.

En los años siguientes, aparecen también otra serie de turbinas y se construyen también bajo características constructivas y usos específicos, dotándolas de reversibilidad para operaciones de turbinado y bombeo o analizando su diseño para los caudales o saltos de funcionamiento. Algunas de ellas son las turbinas Turgo (1914), Michell-Banki (1918), Dériaz (1950) y Bulbo (1970). [1]

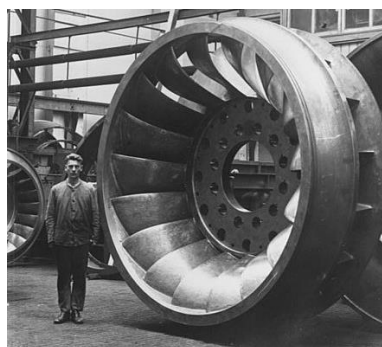


Ilustración 16: Rodete de turbina Francis de grandes dimensiones. [13]

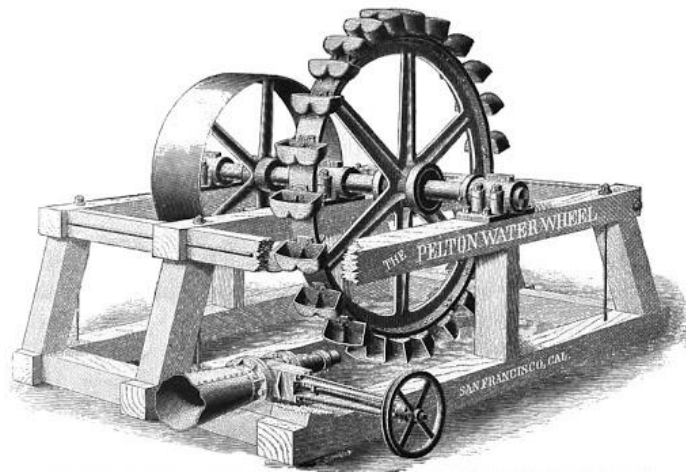


Ilustración 17: Imágen del catálogo de la compañía Pelton Water Wheel, 1889. [1¹⁴]



Ilustración 18: Rodete de turbina Kaplan. [1¹⁵]

En 1880, un año después del descubrimiento de la lámpara incandescente por Thomas Alva Edison, se construye la primera central hidroeléctrica de la historia en el condado de Northumberland de Gran Bretaña. Poco después, en 1882, se lleva a cabo la que por muchos autores es considerada la primera de estas en el río Fox, a la altura de la ciudad de Appleton (Wisconsin, EEUU) para proporcionar suministro eléctrico a una fábrica papelera. Esta era conocida como Vulcan Street Plant y fue desarrollada por la compañía Appleton Edison Electric Light Company. En menos de cinco años ya se había contabilizado la construcción de más de medio centenar de centrales hidroeléctricas en EEUU y para principios de siglo XX, el perfeccionamiento del generador eléctrico y el descubrimiento de la corriente alterna supusieron que más del 40% de la energía eléctrica fuese generada en centrales hidroeléctricas.

La corriente alterna supuso una revolución en la distribución de electricidad. Hasta entonces, el intento de transportar corriente continua a largas distancias se había convertido en un hecho inviable debido a las enormes pérdidas involucradas, hasta el punto de que únicamente las fábricas situadas próximas a las centrales podían recibir suministro. En el año 1895, la central hidroeléctrica de las cataratas del río Niágara se constituye como la primera en distribuir la corriente alterna, a 40 kilómetros de distancia.

En España, a finales de siglo XIX también comenzó la construcción de dichas centrales. A principios de la década del siglo siguiente, España llegó a convertirse en uno de los países con mayores infraestructuras eléctricas e instalaciones hidráulicas. Si bien esta energía fue perdiendo su predominio con los años, sigue suponiendo un peso importante en la generación eléctrica del país.

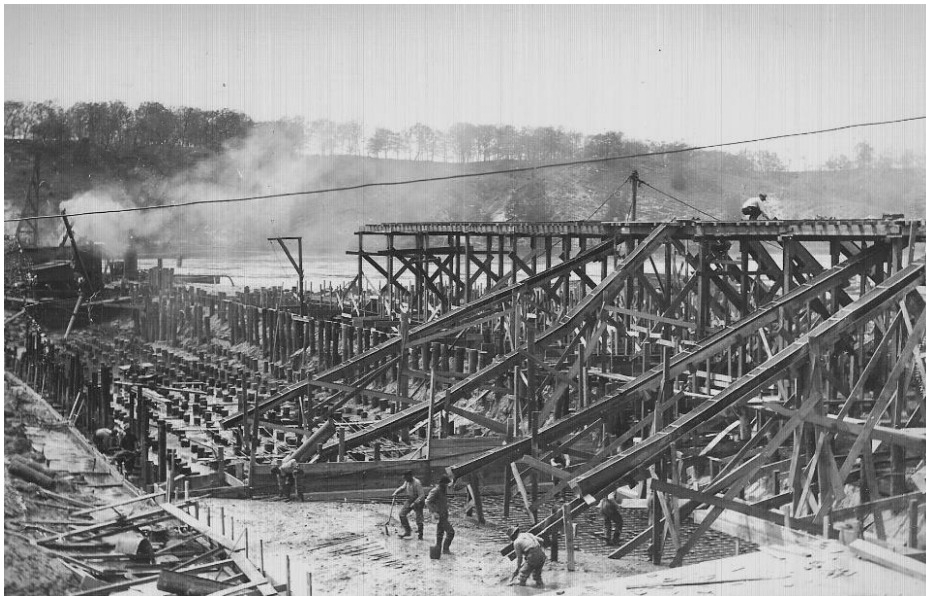


Ilustración 19: Construcción de central hidroeléctrica en Appleton, EEUU. [1¹⁶]

Ciclo hidrológico

Para comprender los principios que permiten extraer la energía del agua y transformarla en electricidad es necesario conocer algunos aspectos fundamentales de la hidrología.

En primera instancia, podría decirse que el Sol es el motor del ciclo hidrológico, sin el cual el propio concepto carecería de sentido. Las grandes masas de agua de la Tierra, en determinadas condiciones atmosféricas de presión, temperatura, etc. son calentadas por la radiación solar, provocando el fenómeno de evaporación y transformando el agua a estado gaseoso. El vapor de agua o aire húmedo viaja con el movimiento de las corrientes y se condensa en zonas de bajas temperaturas en forma de nubes. Cuando la condensación es suficiente para que las partículas de agua de las nubes adquieran cierto volumen y no se evaporen antes, estas caen en forma de precipitación. Como bien se sabe, las condiciones atmosféricas presentes influyen en que dicha precipitación se produzca en forma líquida (lluvia) o sólida (nieve y granizo).

Al alcanzar la superficie, el agua experimenta diferentes escenarios:

- Se deposita nuevamente sobre las masas de agua: océanos, lagos, etc.
- Se filtra por gravedad y capilaridad a través de la capa más superficial de la tierra, humedeciéndola y abasteciendo a la vegetación.
- Percola hasta el nivel freático y se acumula en acuíferos y reservas subterráneas.
- Se acumula en forma de hielos y glaciares en zonas de bajas temperaturas.
- Por escorrentía, el agua que cae sobre la superficie terrestre discurre hacia los cauces de ríos o reservas de agua superficial.

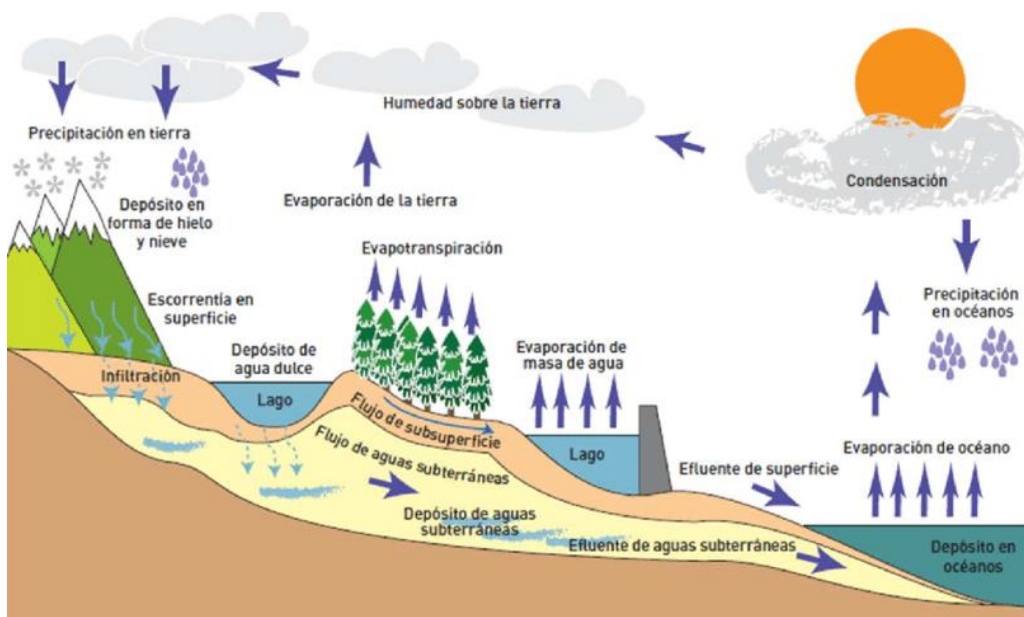


Ilustración 20: Representación esquemática del ciclo hidrológico. [1¹⁷]

Los dos últimos escenarios son aquellos de mayor interés desde la perspectiva de la generación hidroeléctrica. El agua procedente de los ríos, originados a partir de las nieves y hielos de las elevaciones del terreno, puede acumularse de manera artificial en embalses, obstruyendo su cauce por medio de presas o diques. El agua embalsada posee una característica fundamental para la finalidad que se pretende lograr, energía potencial.

Para comprender la necesidad del ciclo hidrológico en la generación de electricidad, a continuación se detallan las transformaciones que sufre dicha energía potencial hasta que alcanza una forma aprovechable:

1. **Energía potencial.** El agua procedente de los ríos es retenida y acumulada en embalses mediante presas, dando lugar a lo que se conoce como salto. El salto es la diferencia de cotas originada como consecuencia de dicha acumulación a un nivel considerado constante y otro inferior. La energía aprovechable es directamente proporcional a la altura del salto, por tanto es un parámetro de interés en el diseño de centrales hidráulicas.
2. **Energía cinética.** La energía potencial es transformada en energía de movimiento asociada a un caudal de agua, que es conducido artificialmente a través de tuberías descendentes hasta su entrada en la turbina o turbinas hidráulicas.
3. **Energía mecánica.** Cuando el caudal alcanza la turbina, acciona su movimiento y la energía cinética es convertida en energía mecánica de rotación.
4. **Energía eléctrica.** La turbina, acoplada mecánicamente al eje de un generador eléctrico, hace girar el rotor del mismo, produciendo una corriente eléctrica que es transformada para su transporte y distribución a las ubicaciones de suministro.

Si bien existen otras formas de energía asociadas al proceso de generación, estas no son consideradas a priori, pues generalmente son formas secundarias no deseadas que influyen negativamente en el proceso.

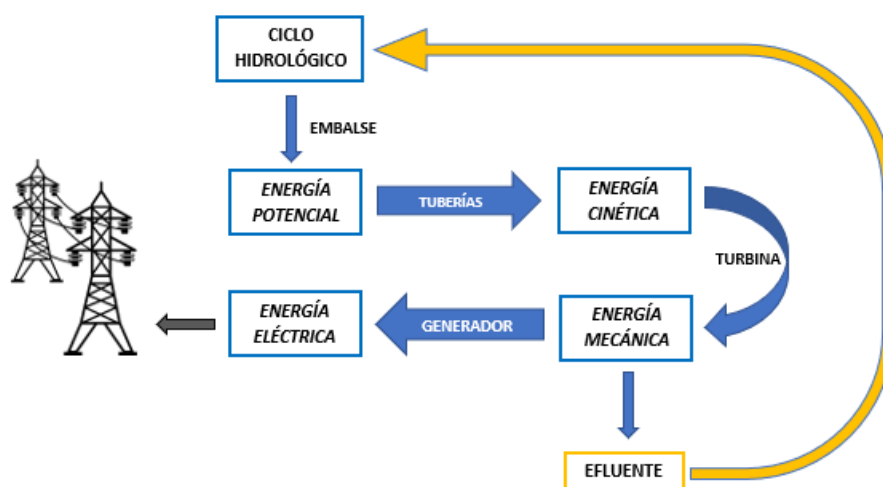


Ilustración 21: Esquema general de transformación energética. [18]

Centrales hidroeléctricas

Se denomina central hidroeléctrica o central hidráulica a toda instalación destinada a aprovechar la energía contenida en el agua para generar electricidad. Estas representan una categoría de las genéricas centrales eléctricas, las cuales emplean otros recursos para lograr el mismo fin. Algunos ejemplos alternativos de centrales de producción eléctrica son:

- **Centrales térmicas:** las materias primas empleadas son combustibles obtenidos directamente de compuestos naturales o como resultado del tratamiento de estos. Los combustibles fósiles se emplean en formas sólidas, como el carbón; líquidas, obtenidas por medio de la refinación del petróleo, como el fuelóleo o el gasóleo y gaseosas, como el gas natural. Estos compuestos poseen elevadas capacidades energéticas y a pesar de encontrarse en clara decadencia por su carácter contaminante, aún representan el recurso principal en la generación eléctrica mundial. Existen reservas limitadas de estos compuestos en la naturaleza, por lo que es una fuente de energía no renovable.
- **Centrales nucleares:** con principios de funcionamiento muy similares a las centrales térmicas, sustituyen los combustibles fósiles por combustibles nucleares como el uranio. El fenómeno de fisión nuclear llevado a cabo en los reactores de estas centrales libera grandes cantidades de energía, que es aprovechada para el calentamiento de agua, obtención de vapor y posterior turbinado. Si bien estas centrales no depositan contaminantes directamente sobre el medio ambiente, generan residuos radiactivos inaprovechables y de elevada persistencia que tienden a depositarse en cementerios nucleares subterráneos.
- **Centrales geotérmicas:** la Tierra posee un elevado contenido en calor procedente de las capas profundas de la superficie. Las centrales geotérmicas se construyen en ubicaciones en las que es posible extraer una mayor energía calorífica debido a gradientes de temperatura superiores a los habituales, por lo que su implementación se encuentra muy limitada. En estas zonas existen reservas o pozos geotérmicos, depósitos naturales de vapor que son perforados desde la superficie para su extracción y conducción hasta los sistemas habituales de generación eléctrica. Se considera una fuente de energía renovable, puesto que gran parte del agua es reconducida y devuelta a la reserva con el fin de mantener la presión y el volumen del vapor.
- **Centrales solares:** las radiaciones solares poseen un elevado potencial energético aprovechable. Las centrales termosolares emplean campos de espejos direccionales para concentrar las radiaciones en una caldera y calentar un fluido térmico. Según la función de la central, dicho fluido transfiere su energía calorífica al agua para su calentamiento parcial o para su evaporación y consiguiente generación eléctrica. Las centrales o parques fotovoltaicos transforman la energía de radiación solar directamente en electricidad gracias a placas de células fotovoltaicas. La energía solar es una fuente renovable cuyo principal inconveniente es su dependencia de la radiación solar y de su amplia variabilidad.

- **Centrales eólicas:** los parques eólicos disponen de grandes aerogeneradores diseñados para aprovechar la energía cinética de las corrientes de aire y transformar esta en energía eléctrica. Cuando el viento adquiere una determinada velocidad, el rotor, situado a una altura elevada, se orienta para aprovechar la máxima energía cinética posible, así como las palas, también orientables, en función de la velocidad del viento. El giro de la turbina eólica acciona el generador eléctrico por medio de una multiplicadora, produciendo corriente y transfiriéndola a la red. La energía eólica es renovable, sin embargo, al igual que la solar, es altamente dependiente de las variables condiciones de la fuente.
- **Centrales mareomotrices:** estas centrales aprovechan el fenómeno de las mareas para la generación eléctrica. Existen diferentes categorías, en función del modo en que la instalación aprovecha la energía. Clásicamente, durante las mareas altas, el agua se acumula en un embalse, cuya presa cierra sus compuertas al alcanzar esta su máxima altura. Al bajar las mareas a su nivel mínimo, la diferencia de cotas da lugar a un salto hidráulico que es aprovechado mediante turbinas. En algunos casos se contruyen con capacidad reversible, aprovechando el salto de las mareas en ambos sentidos. Otros formatos bombean agua a un depósito de alta presión gracias a la acción de las olas, que provocan un desplazamiento vertical constante en el dispositivo de bombeo. Esta es inyectada posteriormente en turbinas de acción. También existen instalaciones cuyo movimiento vertical de las olas desplaza el aire en una cavidad para provocar el giro de una turbina.

Existen otras modalidades en la generación eléctrica, sin embargo, se trata de tecnologías poco avanzadas o que poseen rendimientos no rentables. En la actualidad, los esfuerzos mayoritarios persiguen reducir al mínimo los combustibles fósiles y desarrollar energías limpias y sostenibles que permitan atender a la creciente demanda.

De entre las categorías mencionadas, la energía hidroeléctrica representa, con diferencia, la mayor fuente renovable mundial. Aproximadamente un 26,5% de la generación eléctrica mundial se realiza a través de fuentes renovables. De este, más de un 60% es energía hidroeléctrica. Este dato es un indicador de lo desarrollada que se encuentra esta tecnología en la actualidad y de su elevado crecimiento, debido principalmente a:

- ✓ **Energía limpia.** La operación de estas instalaciones no emite contaminantes y aunque la construcción de embalses posee cierto impacto ambiental, este trata de minimizarse conservando los caudales ecológicos y manteniendo unas condiciones adecuadas del agua embalsada.
- ✓ **Rentabilidad.** A pesar de que la inversión inicial es, generalmente, superior a otro tipo de centrales, los costes de explotación y mantenimiento son relativamente bajos.
- ✓ **Potencial explotable.** Existe un enorme volumen de recursos hídricos sin explotar, se estima que más de un 70% del potencial hidroeléctrico mundial aún puede ser

aprovechado. Ello advierte de la gran capacidad de crecimiento del sector, puesto que aún existen millones de personas que no gozan de suministro eléctrico.

- ✓ **Eficiencia.** Las centrales hidroeléctricas han demostrado ser las más eficientes de entre todas las instalaciones con una amplia diferencia y especialmente con respecto a otras fuentes renovables. También lo son desde la perspectiva de la acumulación de energía y equilibrado del sistema eléctrico.

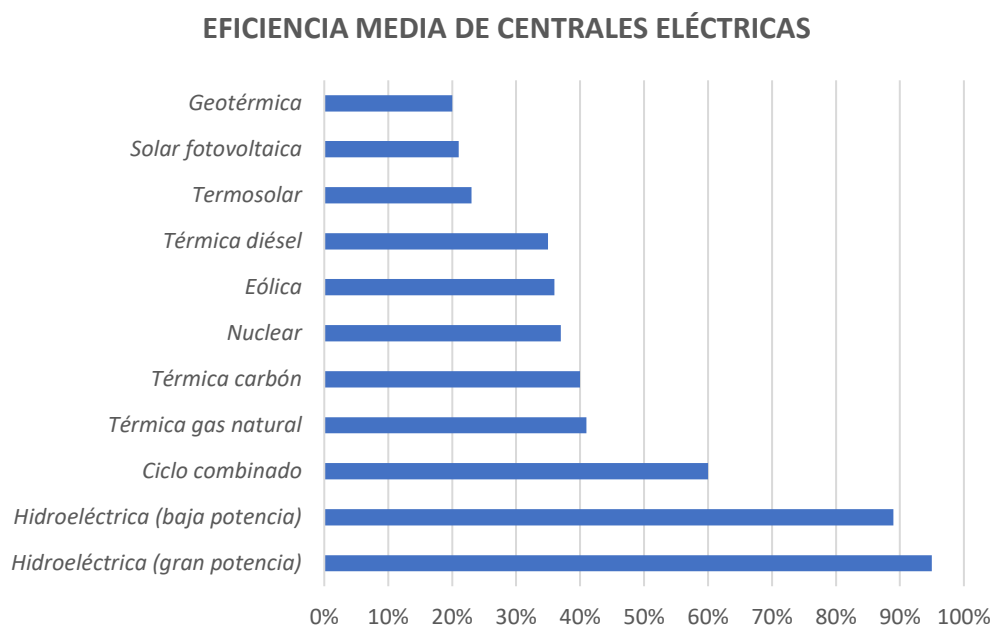


Gráfico 1: Valores de eficiencia media por categorías de centrales eléctricas. [G¹]

- ✓ **Versatilidad.** El desarrollo de esta tecnología ha dado lugar a multitud de alternativas para adaptar las centrales a las diferentes condiciones naturales, la magnitud y variabilidad de la demanda eléctrica, etc. y posee una extensa variedad de técnicas y productos que hacen que su proyección sea verdaderamente versátil.
- ✓ **Acumulable.** Una de las grandes ventajas de la energía hidroeléctrica es, a diferencia de otras como la solar o la eólica, cuya única capacidad de almacenamiento energético es por medio de baterías, su capacidad para ser acumulada. Los embalses, así como las tecnologías de bombeo, que serán presentadas en posteriores secciones, son formas de almacenamiento energético más eficientes que las técnicas de acumulación eléctrica. Esto repercute directamente en la atención de los picos de demanda y en el equilibrado de los sistemas eléctricos.
- ✓ **Reutilizable.** El recurso empleado no se consume ni se altera, es devuelto a su medio natural y gracias al ciclo hidrológico este puede ser utilizado de nuevo.

Clasificación

Toda instalación hidroeléctrica ha sido proyectada con el mismo fin: aprovechar la energía contenida en el agua para su transformación en electricidad y posterior distribución. Sin embargo, existen multitud de factores que permiten clasificar las centrales en función de su servicio prestado, su posición respecto al recurso hidráulico, sus prestaciones y otras características propias de estas.

Las diferentes clasificaciones presentadas a continuación no son excluyentes, es decir, las cualidades mencionadas pueden darse de forma simultánea y dar lugar a combinaciones particulares de los diferentes tipos de centrales.

Según finalidad operativa

Como se exponía anteriormente, la energía hidráulica es fácilmente acumulable y esto le otorga capacidad para ser explotada según las necesidades de suministro. Según el servicio prestado, las instalaciones pueden concebirse según las siguientes categorías, que son asignadas no únicamente a las hidráulicas, sino a toda central eléctrica.

Centrales de base

Son aquellas responsables de la mayor parte del suministro y operan de forma permanente. Dado que atienden a los niveles principales de demanda, son de gran potencia y deben disponer de los recursos ininterrumpidamente. Por ello, estas suelen ser hidráulicas, nucleares o térmicas.

Centrales de punta

Las centrales de punta no operan en régimen permanente, sino que lo hacen de forma periódica en los intervalos de mayor consumo eléctrico. Generalmente, trabajan a diario durante las horas punta y ello exige una elevada capacidad de respuesta. Las centrales que, por sus características, permiten una rápida puesta en servicio, son las hidroeléctricas y las térmicas.

Centrales de reserva

Se proyectan con el fin de cubrir la demanda no atendida por la escasez de materias primas en centrales de base o cuando estas no se encuentran operativas por motivos de avería o mantenimiento. Nuevamente, las centrales hidráulicas y las térmicas de turbinas de gas son las que permiten disponer de reservas y, simultáneamente, ponerse en operación con rapidez.

Centrales de socorro

Las centrales de socorro poseen la misma finalidad que las centrales de reserva, servir de asistencia a la demanda cuando, por ciertos motivos, las centrales principales no pueden atenderla. Sin embargo, estas se caracterizan por ser de reducidas dimensiones y transportables, en barcos, ferrocarriles o camiones al lugar de asistencia. Suelen funcionar con motores diésel.

Esta clasificación arroja información acerca de la creciente importancia de la energía hidráulica en la planificación energética de los países, pues es, con diferencia, la fuente limpia y sostenible con mayor flexibilidad para afrontar la gran mayoría de los escenarios de demanda.

Estos escenarios se representan mediante los denominados gráficos de cargas. En la *Ilustración 22*, el eje de abscisas representa los intervalos horarios de un día y el eje de ordenadas la potencia consumida, en kW. Puesto que la potencia es energía por unidad de tiempo, el área rayada bajo la curva de potencia representa la energía total consumida. La potencia media es el consumo medio diario del grupo o población al que corresponde dicho gráfico y es el suministrado principalmente por las centrales de base. Los picos de demanda, que tienen lugar en las horas punta, son principalmente cubiertos por centrales de punta.

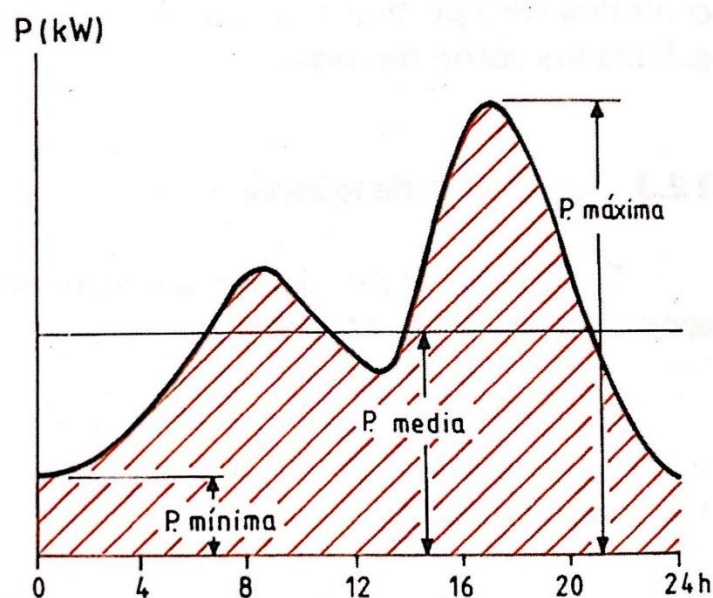


Ilustración 22: Representación de gráfico de cargas diario. [19]

Según fuente hídrica

La posición de la central con respecto al recurso hidráulico determina dos categorías fundamentales de las mismas, pues la energía puede extraerse tanto de los cauces de los ríos como de los embalses o pantanos, situados a una cierta altura.

Centrales de agua embalsada

Los embalses son obras civiles llevadas a cabo mediante estructuras denominadas presas o diques, construidas sobre los cauces de los ríos con el fin de obstruir el flujo hidráulico y acumular el agua. Los embalses son repuestos continuamente por los afluentes que desembocan en el mismo y por la escorrentía de las lluvias. Además, para evitar interrumpir la corriente fluvial y

minimizar el impacto ambiental, las presas mantienen en todo momento el denominado caudal ecológico, se esté produciendo o no energía eléctrica

La acumulación del agua en el vaso hace crecer la superficie libre de esta, que se mantiene artificialmente a un nivel constante, lo que permite generar una diferencia de cotas con respecto a niveles inferiores del terreno y aprovechar la energía potencial o de altura del agua.

La ventaja fundamental de las centrales de agua embalsada es que permiten un control absoluto del caudal y disponen de reserva para atender a picos de la demanda o para sustituir a otras centrales que no se encuentren operativas

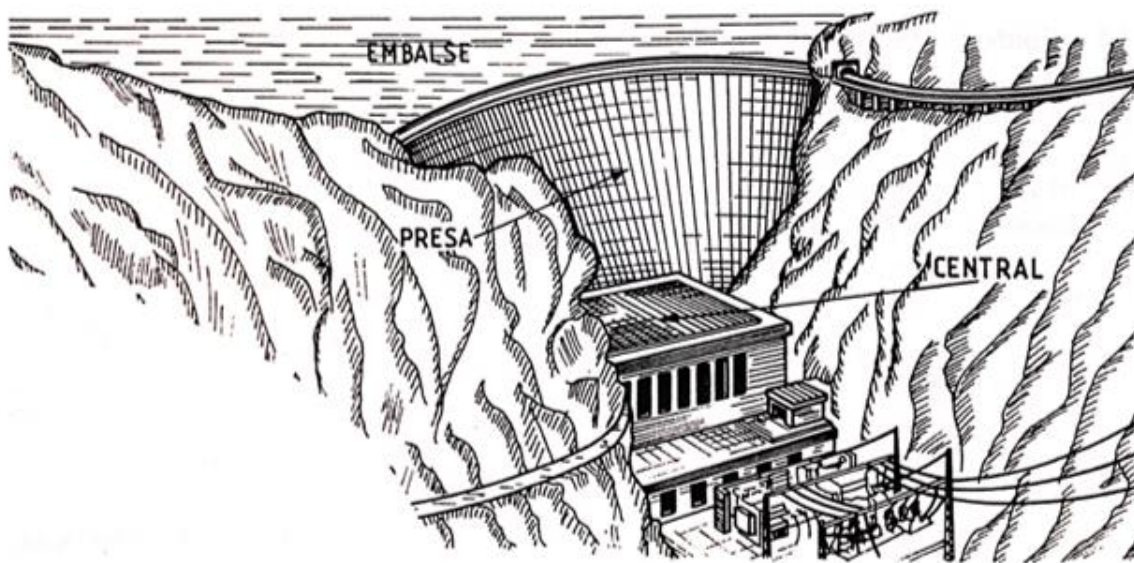


Ilustración 23: Central de agua embalsada, a pie de presa. [19]

En adición, las centrales de agua embalsada se dividen a su vez en dos subcategorías. Por una parte, las centrales de regulación son aquellas que disponen de una reserva gracias a la reposición natural de los afluentes y la lluvia. Su servicio depende del volumen de agua embalsada y el caudal debe regularse de forma adecuada para la producción, teniendo en cuenta además las tasas de reposición natural.

Por otra parte, las centrales de bombeo son la forma más eficiente y rentable de acumular energía de forma artificial, sin depender de las variaciones e irregularidades del ciclo hidrológico. Estas centrales hidroeléctricas poseen la particularidad de estar constituidas por dos embalses, situados en cotas diferentes. En las horas valle o de baja demanda, generalmente por las noches, cuando además el coste energético en el mercado se reduce, se emplea la energía excedente en otras centrales o grupos de la propia central para elevar el agua al embalse superior mediante bombeo. El agua acumulada en el embalse superior es conducida aguas abajo a la central en las horas pico para generar energía eléctrica, que tras ser turbinada es vertida nuevamente al embalse inferior, cubriendo un ciclo completo.

Las centrales de bombeo pueden proyectarse según diferentes configuraciones:

- **Central de bombeo + central de generación.** Las centrales se encuentran divididas, las de bombeo cuentan con los grupos motores y bombas hidráulicas y las de generación con alternadores y turbinas hidráulicas.
- **Grupos cuaternarios.** Ambas centrales se combinan, sin embargo, los grupos siguen siendo independientes: motores y bombas para operaciones de bombeo, alternadores y turbinas para operaciones de generación.
- **Grupos ternarios.** El grupo motor y el alternador se integran en una única máquina reversible, capaz de funcionar como motora y generadora. Las bombas y turbinas hidráulicas permanecen independientes.
- **Grupos binarios.** Se dota de reversibilidad tanto a las máquinas eléctricas como a las hidráulicas. En las horas de demanda el generador eléctrico funciona como alternador y la máquina motriz como turbina. En las horas valle, los mismos dispositivos funcionan como motor eléctrico y bomba centrífuga, respectivamente.

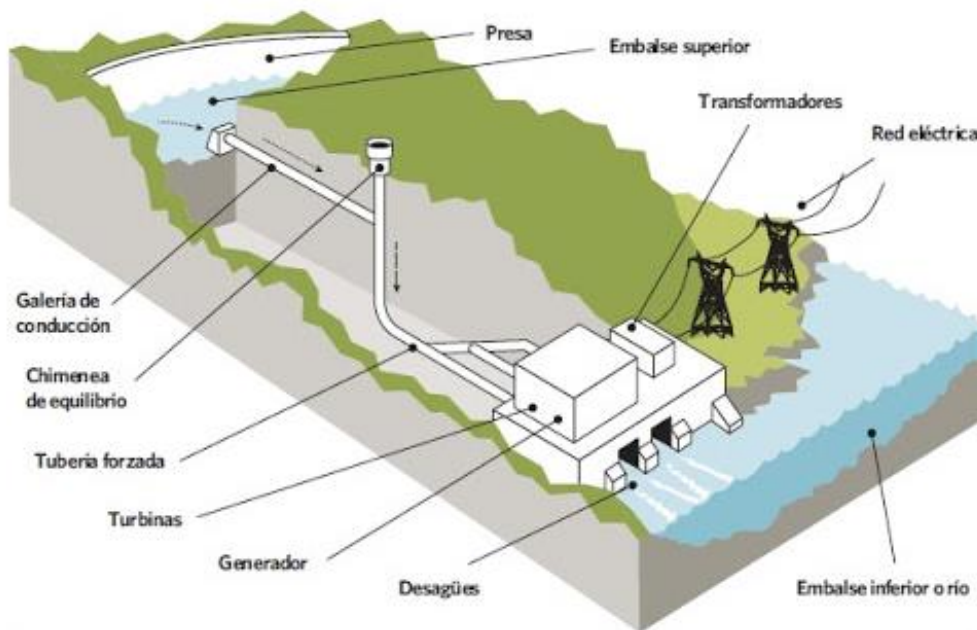


Ilustración 24: Esquema de una central de bombeo. [120]

En la *Ilustración 24* puede observarse la chimenea de equilibrio, un elemento constructivo vertical abierto a la atmósfera cuyo objetivo es equilibrar las presiones en el circuito de conducción. En este caso, se trata de una central de bombeo de grupos binarios.

España dispone de la mayor central de bombeo de Europa, denominada la Muela II.

Centrales de agua fluente

En estas, la presa no obstruye el cauce con el fin de originar un embalse, sino que se construye sobre el mismo reduciendo la sección de paso para mantener un desnivel constante en la corriente. El caudal es turbinado sobre el propio cauce del río o desviado de este por canales y tuberías que lo conducen hasta la central.

Estas instalaciones están concebidas para generar electricidad en el instante, pues no disponen de reservas para atender a variaciones de la demanda y además poseen una fuerte dependencia de las estaciones. Mientras que en temporadas de aguas altas, de abundantes precipitaciones, el caudal es suficiente e incluso contiene excedente, durante el tiempo de bajas aguas los caudales se reducen considerablemente, llegando en algunos casos a ser incompatibles con la generación.

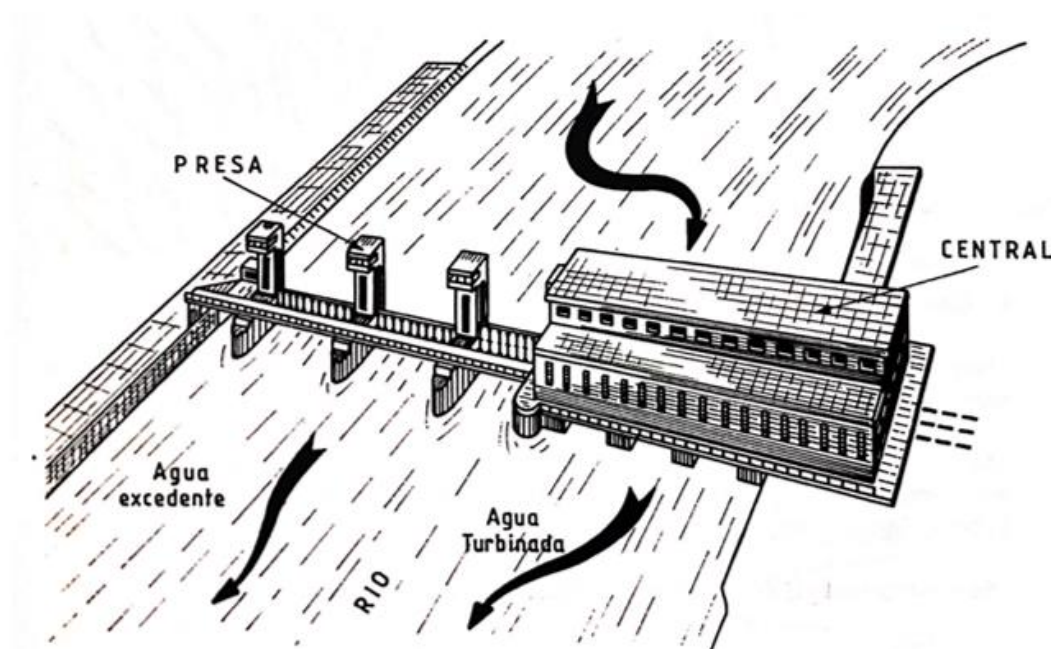


Ilustración 25: Central de agua fluente. [1⁹]

Según potencia instalada

La potencia instalada define la cantidad de energía que la central es capaz de producir en un intervalo determinado de tiempo y está estrechamente vinculada a las dimensiones de esta. Las centrales de gran potencia son obras grandes y costosas, que se proyectan para abastecer los niveles base de demanda, funcionando de forma prácticamente permanente.

Generalmente, la potencia instalada se encuentra limitada por las condiciones naturales (caudales, desniveles, clima, etc.), sin embargo, la ingeniería detrás de la obra es un factor fundamental que también influye en las prestaciones de la central.

SEGÚN LA POTENCIA ELÉCTRICA INSTALADA

CATEGORÍA	POTENCIA [kW]
Microcentrales	P.E. ≤ 99
Minicentrales	$100 \leq P.E. \leq 999$
Media potencia	$1000 \leq P.E. \leq 9999$
Gran potencia	P.E. ≥ 10.000

Tabla 4: Clasificación según intervalos de potencia instalada. [T²]

En algunas referencias se puede encontrar una categoría inferior denominada pico centrales hidráulicas, cuya potencia instalada es inferior a 10 kW. Estas, junto con las microcentrales, han demostrado ser excelentes alternativas para el abastecimiento en zonas rurales y de montaña, donde la escasez de recursos o la inaccesibilidad de líneas de suministro eléctrico obligan a muchos hogares a recurrir a medios que en cualquiera de los casos son fungibles, costosos y/o contaminantes.

En España, por ejemplo, existen algunas centrales hidroeléctricas de gran potencia, como Aldeadávila, Alcántara o Villarino, instaladas en ríos de gran caudal. Sin embargo, las centrales de media y baja potencia son esenciales para el abastecimiento de localidades más reducidas, así como para la disposición de reserva energética.

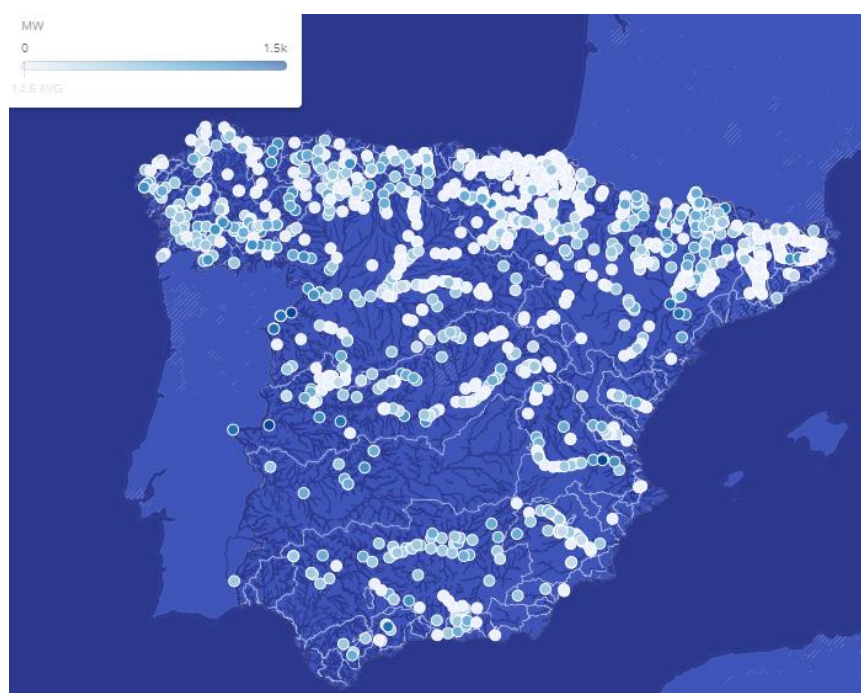


Ilustración 26: Mapa de centrales hidroeléctricas de España, según potencia instalada. [I²¹]

Según salto hidráulico

El salto hidráulico es un parámetro que se analizará en detalle en posteriores secciones, relacionado con la diferencia de cotas entre la superficie del agua captada y un nivel inferior de descarga. Es un aspecto fundamental del diseño de instalaciones hidráulicas y su magnitud influye proporcionalmente en la potencia generada. Además, condiciona en buena medida las tecnologías empleadas y el diseño de la instalación.

Por lo general, los grandes saltos hidráulicos conllevan caudales más reducidos y se dan en terrenos montañosos o con grandes desniveles. Por el contrario, los saltos de pequeña altura tienen lugar en valles amplios con caudales muy superiores.

SEGÚN LA ALTURA DEL SALTO HIDRÁULICO

CATEGORÍA	ALTURA [m]
Pequeña altura	$H_b \leq 14,99$
Media altura	$15 \leq H_b \leq 49,99$
Gran altura	$H_b \geq 50$

Tabla 5: Clasificación según intervalos de altura del salto. [T²]

Los grandes saltos pueden alcanzar, en algunos casos, cifras tan sorprendentes como los 1883 m de la central de Bieudron, en los Alpes suizos.

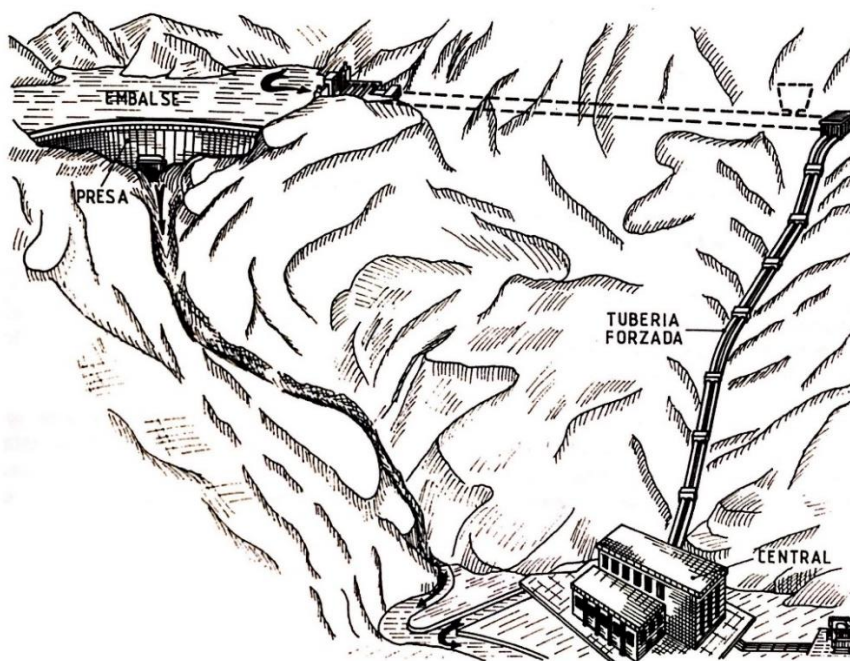


Ilustración 27: Esquema constructivo de una central de gran salto. [19]

Elementos constructivos

El análisis previo aporta información acerca de la gran diversidad de diseños y formas de aprovechamiento posibles que se emplean en la actualidad. En esta sección, se detallarán los elementos constructivos fundamentales de las centrales hidroeléctricas, ya sean estos comunes a todas las categorías o únicamente asociadas a algunas de las mismas.

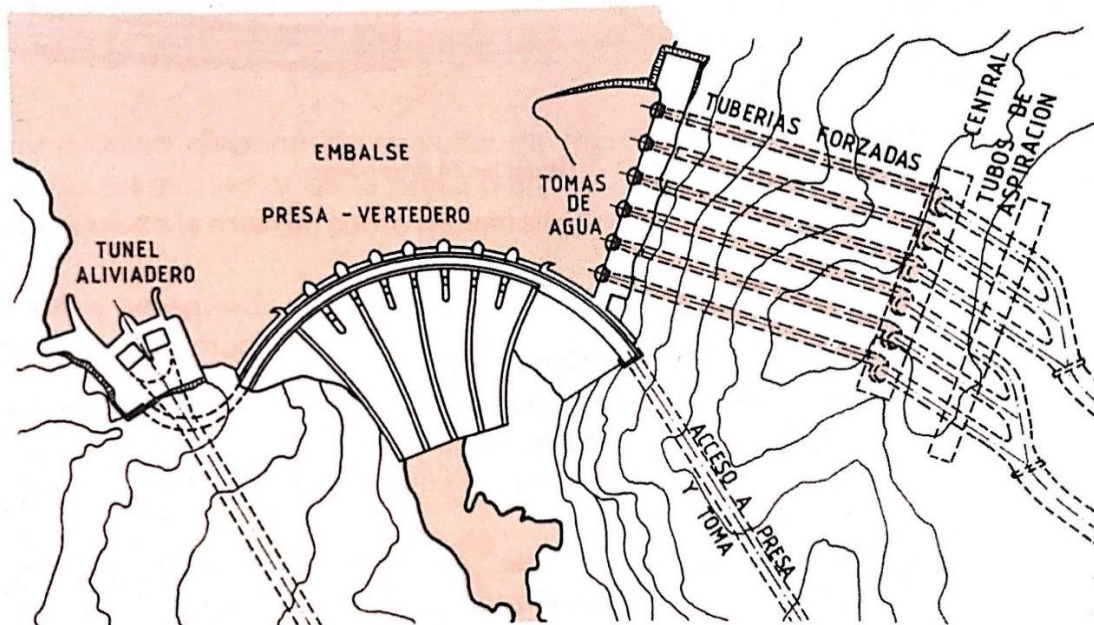


Ilustración 28: Representación en planta de una central hidráulica. [19]

Presa

La presa es la obra destinada a la contención, de forma que su construcción se lleva a cabo sobre el cauce del río para obstruirlo. Posee una función doble:

- ✓ Generar un desnivel o salto hidráulico en el cauce del río, como consecuencia de la acumulación de agua en el embalse. Este desnivel será el que permita aprovechar la energía del agua debida a su altura.
- ✓ Almacenar agua para disponer de una reserva de energía o bien para distribuirla directamente según otros usos (abastecimiento urbano e industrial, sistemas de regadío, etc.)

Las presas son construcciones de elevada exigencia estructural que requieren un riguroso análisis del terreno y de las condiciones a las que estarán expuestas, entre otras, las elevadas fuerzas de presión provocadas por el agua embalsada. Si bien este es objeto de estudio del Proyecto Presa, deberán conocerse sus partes y características básicas.

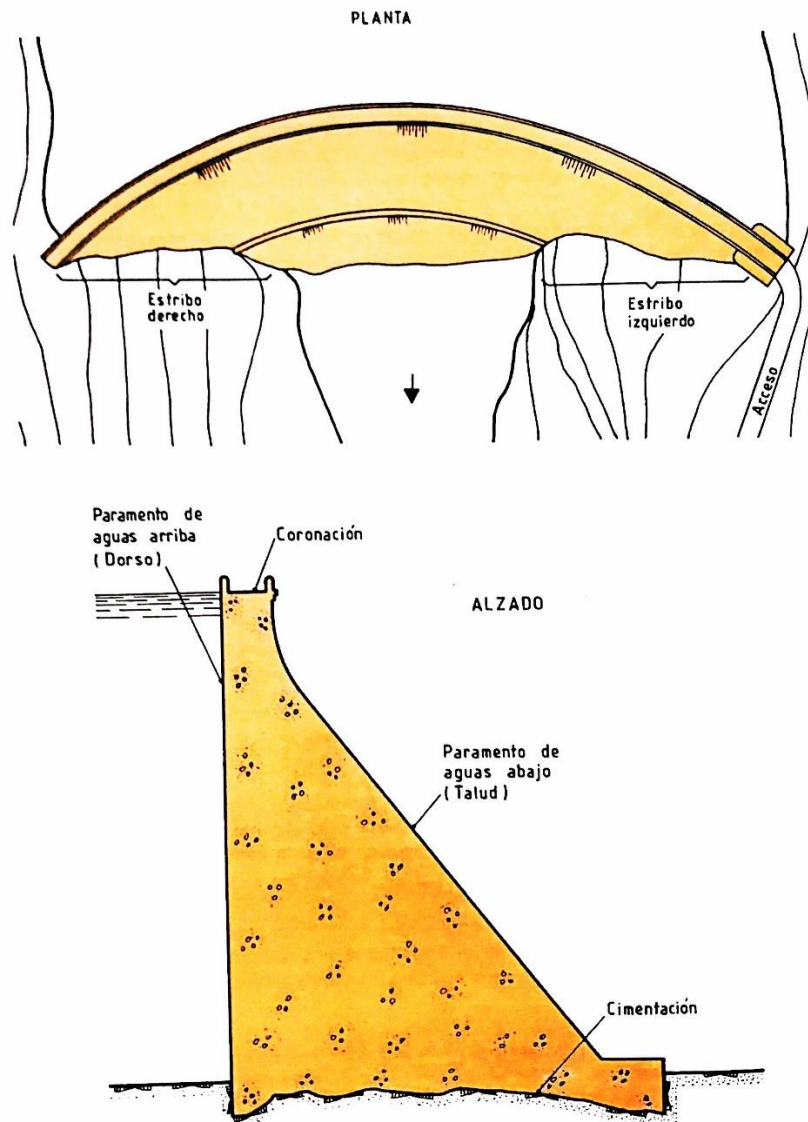


Ilustración 29: Representación de una presa. [19]

Presentan los siguientes elementos o partes comunes:

- **Cimentación:** es la base de la obra, sobre la que descansa la mayor parte de esta. Es fundamental que esta se asiente sobre un terreno resistente, capaz de soportar el peso de la presa y que presente un área suficiente para evitar el deslizamiento debido a la fuerza del embalse. La profundidad y la composición del suelo en la cimentación deben asegurar la impermeabilidad. La presa cuyo embalse alimentará la instalación del presente proyecto presenta problemas en su cimentación, pues no impide la filtración del agua a través del terreno.
- **Estribos:** son los extremos laterales de la presa, cuya sección se reduce progresivamente con el contorno del valle hasta cerrarlo. En muchas ocasiones, los estribos se construyen sobre terrenos rocosos

- **Coronación:** es la parte más alta de la presa donde, generalmente, se encuentra habilitada para el tránsito de personal de mantenimiento o, en algunos casos, forma parte de una calzada para la circulación de vehículos.
- **Paramentos:** superficies transversales a la corriente fluvial de posición vertical o ligeramente inclinadas. El paramento de aguas arriba o dorso es aquel en contacto directo con el agua del embalse y recibe toda la presión de este. El paramento de aguas abajo, también denominado talud, es la superficie opuesta y con frecuencia se encuentra inclinada para aumentar la sección de la base y reforzar la estructura.
- **Aliviadero:** abertura en la parte superior de la estructura, cerca de la coronación, por la cual rebosa el agua excedentaria cuando el embalse alcanza la capacidad máxima de diseño.
- **Compuertas:** dispositivos mecánicos implementados sobre la presa destinados a regular el caudal que la atraviesa.
- **Tomas:** estructuras hidráulicas instaladas sobre la presa o independientes a esta empleadas para captar el agua del embalse y conducirla hacia las tuberías y sistemas de distribución que la transportan a la central o a las ubicaciones de abastecimiento.

Adicionalmente, las presas pueden clasificarse en función de diversas características, como los materiales empleados, los servicios adicionales al almacenamiento hidráulico, etc. Sin embargo, puesto que la gran mayoría de las presas en la actualidad se construyen de hormigón, en ocasiones armado, se clasificarán en función de su configuración estructural:

Presas de gravedad

Las presas de gravedad son construidas sobre el terreno de forma que todas las fuerzas que tienden a volcar o deslizar la estructura son compensadas por las reacciones y fuerzas de rozamiento asociadas al peso de esta. Es habitual que la sección de una presa de gravedad aumente gradualmente conforme se aproxima a la base, dando lugar a perfiles triangulares.

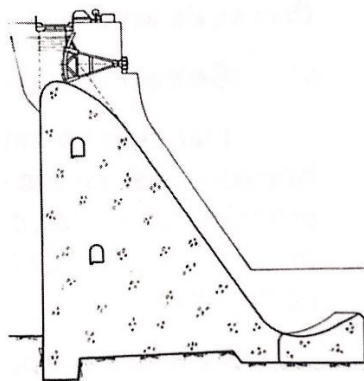


Ilustración 30: Vista de sección de presa de gravedad. [19]

Presas de contrafuertes

Estas presas se conciben de forma muy similar a las de gravedad, pues contrarrestan las fuerzas hidrostáticas por las meras reacciones de su peso. Sin embargo, su sección no es constante, sino que su talud está configurado por contrafuertes o refuerzos que reducen la cantidad de material empleado y el peso total de la estructura. Por ello, este tipo de presas también se denominan aligeradas.

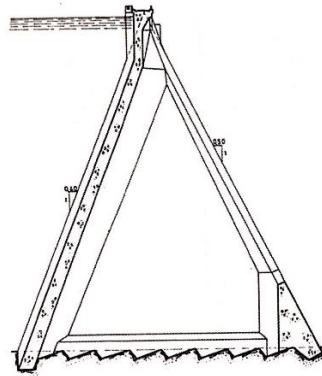


Ilustración 31: Vista de sección de presa de contrafuertes. [1¹⁹]

Presas de arco

Siguiendo el mismo principio arquitectónico del arco de construcción para la sustentación de estructuras verticales, las presas de arco reciben el empuje horizontal por la presión hidrostática y la transmiten hasta los apoyos laterales. Suelen ubicarse en pasos estrechos y profundos y requiere de apoyos asentados sobre materiales sólidos y resistentes que soporten las cargas recibidas, habitualmente muros rocosos.

Presas de bóveda

Las presas de bóveda están configuradas por arcos tanto horizontales como verticales, por lo que también se conocen como presas de doble curvatura.

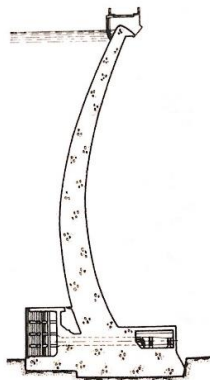


Ilustración 32: Vista de sección de presa de bóveda. [1¹⁹]

Presas de configuración mixta

Muchas presas combinan varias características de las mencionadas anteriormente. Por ejemplo, presas de arco o bóveda asentadas por gravedad, o bien con contrafuertes. También existen, aunque son poco habituales, las presas de arcos múltiples, formadas por bóvedas sucesivas que ejercen de contrafuertes.

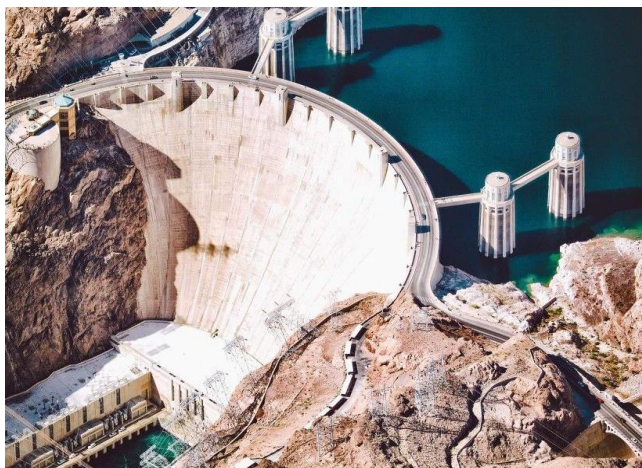


Ilustración 33: Diversas configuraciones de presas. [122]

Vertederos hidráulicos

Un vertedero hidráulico es una estructura construida cerca de la presa cuya finalidad es permitir que rebose el agua excedente cuando la capacidad del embalse alcanza un determinado valor. Tal y como se ha descrito previamente, las propias presas incorporan aliviaderos cerca de su coronamiento con el mismo fin, sin embargo, los vertederos sirven para aumentar la capacidad de evacuación o para favorecer esta con estructuras proyectadas para ello.

De entre las diferentes categorías que existen, los vertederos pueden estar abiertos a la superficie, atravesar la presa por conductos o incluso desviar el agua del embalse hacia otros lugares. A continuación, se presentan los más extendidos.

Vertedero en canal

Se disponen a la altura del coronamiento, habitualmente en los laterales de la presa, próximos a los estribos. Cuando la capacidad del embalse supera el nivel de diseño, el agua rebosa por un canal abierto a la superficie que la conduce aguas abajo, pudiendo regularse el caudal mediante compuertas, en caso de existir estas. Es de uso frecuente en presas de gravedad, arco y, especialmente, de bóveda.

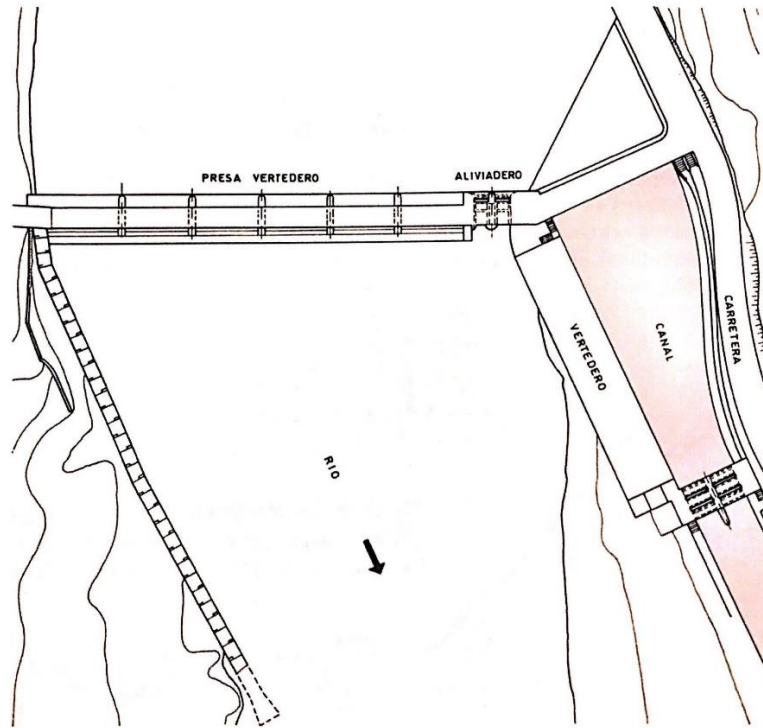


Ilustración 34: Representación en planta de presa con vertedero en canal. [19]



Ilustración 35: Fotografía de vertedero en canal. [23]

Túnel aliviadero

El agua excedente entra por unas tomas en la superficie y es conducida por túneles de construcción independiente a la presa para su posterior descarga aguas abajo. Al igual que en los vertederos de canal, el caudal desalojado puede regularse mediante válvulas o compuertas. Esto también permite aislar los conductos para llevar a cabo tareas de inspección y mantenimiento.

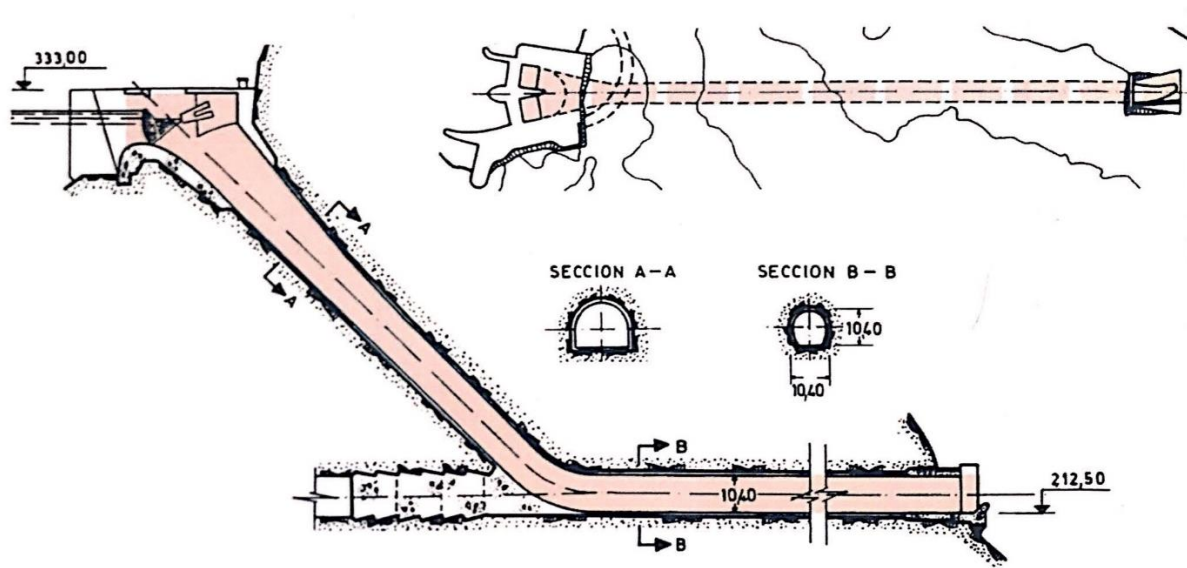


Ilustración 36: Esquema de sistema de túneles aliviaderos. [1¹⁹]

Vertedero de tulipa

El vertedero de tulipa o sumidero es otro sistema hidráulico alternativo que permite que el agua rebose sobre un orificio abierto a la superficie, a modo de desagüe, atravesando esta los paramentos por un conducto cerrado y descargándola aguas abajo o en ubicaciones fuera del cauce natural del río.

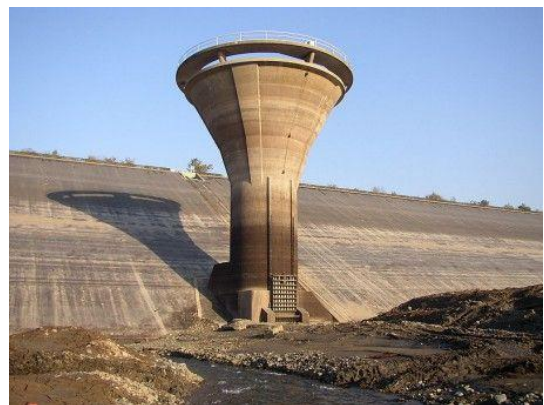


Ilustración 37: Vertedero de tulipa. [1²⁴]

Desagües de fondo

Los desagües o descargas de fondo son sistemas que conectan el embalse con aguas abajo y que disponen de válvulas para la regulación del caudal atravesado. Una de sus principales funciones es la de mantener el caudal ecológico, evitando así obstruir por completo el cauce del río y generar un excesivo impacto ambiental. También se emplean como medida de seguridad para el vaciado parcial o total del embalse.

Disponen en su embocadura de rejillas para impedir la entrada de sólidos y cuerpos extraños en suspensión, cuyo paso pudiera obstruir o dañar la instalación. En esta misma ubicación se disponen ataguías o compuertas para cerrar el paso por completo y facilitar las tareas de mantenimiento. En la zona de cimentación de la presa, a la salida de los conductos, se construyen los denominados cuencos de amortiguación, de modo que el chorro se proyecte sobre agua y no provoque erosión en el terreno.

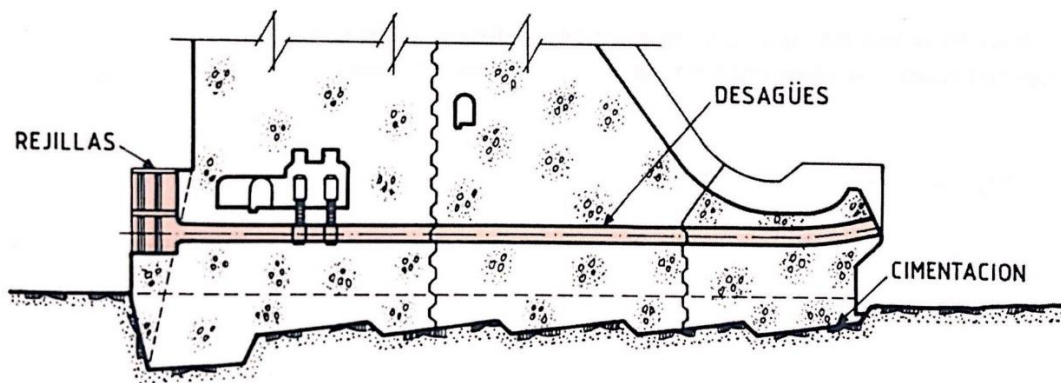


Ilustración 38: Sistema de descarga de fondo. [1⁹]



Ilustración 39: Bocas de salida de sistema de desagüe de fondo. [2⁵]

Sistemas de conducción

Con el fin de conducir aguas abajo los diferentes caudales, toda instalación hidráulica consta de sistemas para la captación, distribución y proyección de estos. En la sección anterior, se han analizado los procedimientos de evacuación de aguas excedentes. El objeto de estudio de los sistemas de conducción será conocer cómo se realizan las conexiones entre el embalse y las bridas de entrada de las turbinas, así como las características constructivas que permiten aprovechar al máximo la energía hidráulica.

Según las características de la central, existen tres técnicas habituales para el suministro de estas:

- Las tomas se ubican directamente sobre el dorso de la presa y se conduce el caudal o caudales directamente a través de tuberías forzadas. Esta es la técnica habitual en centrales a pie de presa, donde la conducción se realiza a distancias cortas.
- Las tomas se ubican en las laderas del embalse y conducen el agua hasta un depósito de carga, desde donde parten las tuberías forzadas hacia la central. Este procedimiento es frecuente en centrales que, por motivos de espacio, no pueden construirse a pie de presa, o bien es una característica de diseño para el aprovechamiento de grandes saltos. Se puede observar una representación de este sistema de conducción en la *Ilustración 27*.
- Cuando las distancias entre el embalse y la central son muy elevadas, la conducción se realiza en dos tramos. En primer lugar, las tomas se encuentran en las laderas del valle o en torres de toma, situadas sobre el embalse. El caudal captado circula por un primer tramo de tuberías de poca inclinación adaptadas al terreno, denominadas galerías de presión. Posteriormente, se transfiere el caudal o caudales a tuberías forzadas, donde se eleva la presión del fluido hasta su entrada en la central.

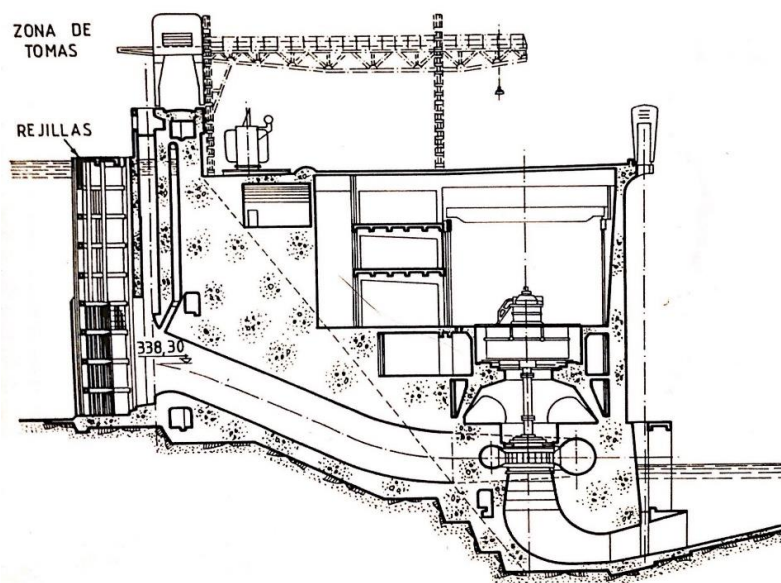


Ilustración 40: Sistema de conducción por tubería forzada directa. [19]

Tomas de agua

Las tomas son los elementos de obra destinados a captar el agua para su transporte hasta la central. Suelen situarse a cierta altura sobre el fondo del embalse para evitar la acumulación de sedimentos y su entrada a los sistemas de conducción. Si las tomas no se encuentran sobre la propia presa, sino que desvían el caudal hacia un depósito de carga, estas se sitúan más próximas a la superficie. Además, se cubren mediante rejillas para evitar el paso de sólidos en suspensión que pudieran dañar los equipos y ocasionar grandes costes de reparación y pérdidas por inhabilitación temporal de la central. De manera orientativa, la separación entre barras de las rejillas serán de:

- 20 - 30 mm para turbinas de baja potencia
- 50 - 150 mm para turbinas de gran potencia

Las rejillas requieren limpieza periódica para no dificultar la captación de las tomas.

Adicionalmente, si el área de captación se caracteriza por corrientes o movimientos del agua que arrastran partículas sólidas, deberá instalarse un desarenador con el fin de reducir la velocidad del flujo y favorecer la sedimentación de dichas partículas. Este también debe vaciarse y limpiarse con cierta frecuencia.

Una variante alternativa de las tomas son las torres de toma, estructuras construidas sobre el propio embalse, que pueden emerger o no por encima de la superficie, dotadas de todos los sistemas necesarios para la captación y filtración del agua y la regulación del caudal.

Mientras que en la *Ilustración 40* se pueden observar las tomas directamente sobre el paramento de aguas arriba, con la central a pie de presa, en la *Ilustración 41* se muestra un esquema de central cuyas tomas se sitúan en un lateral del embalse, conduciendo los caudales a través de las tuberías forzadas hacia la central.

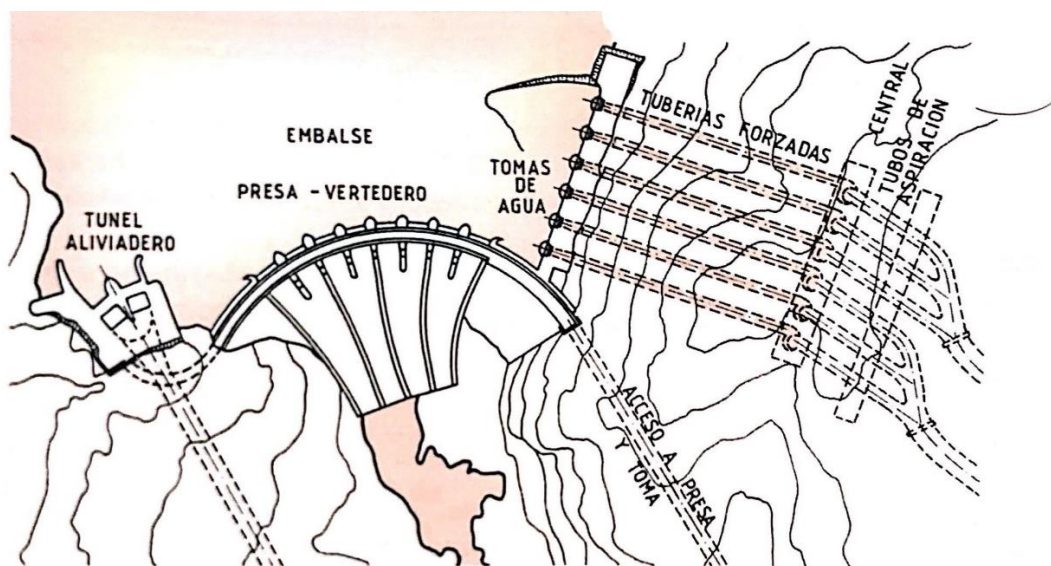


Ilustración 41: Representación en planta de central apartada con tomas laterales. [19]

Canales, túneles y galerías

Se hace referencia a toda estructura hidráulica destinada a la conducción de los caudales de la central. En primera instancia, pueden distinguirse los conductos abiertos y cerrados.

Un conducto abierto es aquel cuya superficie libre del fluido en circulación se encuentra en contacto con la atmósfera. Se dice que trabaja en régimen libre pues, al estar sometido a presión atmosférica, su desplazamiento depende del efecto de la gravedad. Es necesaria una ligera inclinación descendente a lo largo de todo el conducto para permitir el movimiento del fluido. Estos se denominan, por lo general, canales.

Los canales habituales son los de derivación, contruidos con el fin de transferir el agua del embalse desde las tomas hasta las cámaras de carga. Se proyectan con pendientes muy reducidas, del orden de 1 : 1000, con el fin de lograr flujos lentos y minimizar las pérdidas de carga. Las secciones de los canales suelen ser rectangulares o trapezoidales.

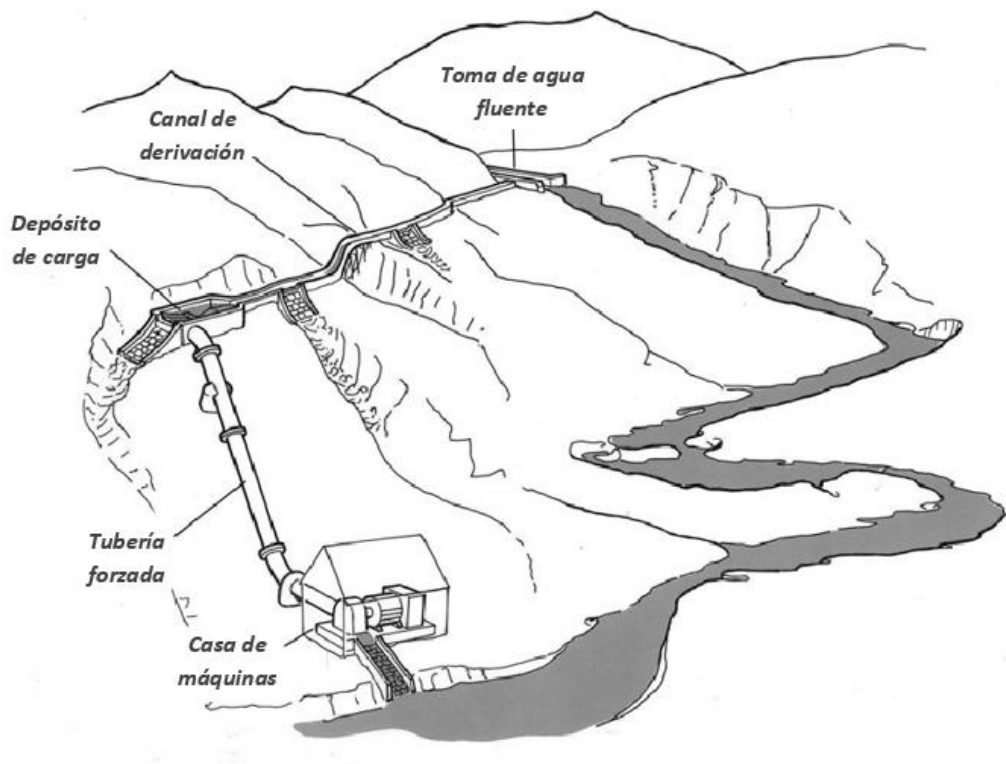


Ilustración 42: Distribución de sistemas de conducción básicos. [126]

El conducto cerrado es aquel que rodea físicamente al fluido en toda la superficie del flujo, estando este en contacto permanente con las paredes del conducto. En este caso, el desplazamiento del fluido no es consecuencia de la gravedad, sino de la propia presión de este, por lo que se dice que los conductos cerrados trabajan en régimen forzado y el movimiento no depende de las pendientes del sistema de conducción.

De entre los diferentes tipos de conductos cerrados, se distinguen tuberías, túneles y galerías, hallándose sus diferencias en la geometría de la sección, las dimensiones y la función desempeñada, principalmente.

Los túneles y galerías son estructuras subterráneas de mayores dimensiones que cumplen la misma función que los canales, a excepción de que el régimen de trabajo es forzado. Se construyen, generalmente, de hormigón en masa o armado y sus secciones difieren en ambos casos, según la *Ilustración 43*.

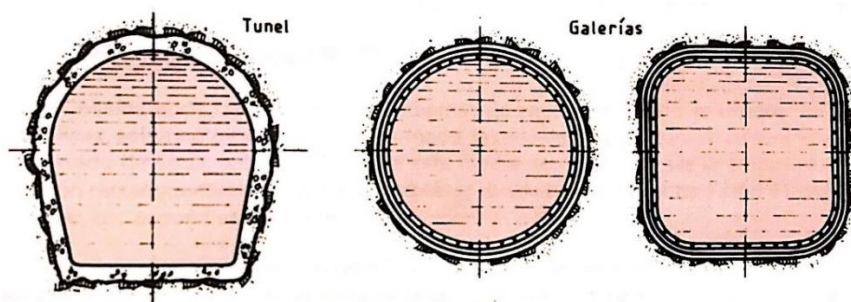


Ilustración 43: Secciones habituales en túneles y galerías. [19]

Por otra parte, las tuberías son conductos cerrados de dimensiones variables y sección circular, por lo general, aunque existen variantes en la geometría y en la convergencia o divergencia de estas, generando secciones variables a lo largo del conducto. Los materiales empleados en su fabricación son muy diversos, siendo los más comunes el hormigón y el acero, para conducciones grandes y materiales poliméricos o composites para diámetros menores.

Las tuberías más representativas en una instalación hidroeléctrica son la tubería forzada y la tubería de aspiración, las cuales serán expuestas a continuación.

Tubería forzada

La tubería forzada es el conducto que desemboca directamente en la brida de entrada de la turbina y recibe esta designación debido a las elevadas presiones que soporta y el régimen en el que trabaja. La entrada de la tubería, tal y como se expuso al comienzo de la sección, pueden ser las propias tomas instaladas sobre la presa o el lateral del embalse, una cámara de carga o un canal de derivación. Desde estas y en función del número de turbinas de la central, parten un mismo número de tuberías forzadas o bien existen bifurcaciones, de forma que de una única tubería colectora alimenta a varios grupos de potencia.

En grandes instalaciones, el acero es el material más común en la fabricación de estos conductos y se llevan a cabo exhaustivos procesos de verificación técnica para asegurar la inexistencia de defectos que pudieran debilitar la estructura y provocar su colapso frente a las grandes presiones. Sin embargo, en microcentrales y picocentrales, es habitual el empleo de materiales

poliméricos como el policloruro de vinilo (PVC) o resinas de poliéster con refuerzos de fibra de vidrio.

Cuando se trata de de centrales de pequeños saltos, en los que las variaciones de presión en el conducto no son muy elevadas, el diámetro y espesor de la tubería forzada suelen ser constantes. Sin embargo, en centrales de salto de gran altura, es habitual que el diámetro interno de la tubería disminuya conforme desciende y el espesor aumente en el mismo sentido. Esta técnica permite contrarrestar los esfuerzos crecientes sobre el conducto en el sentido del flujo y aumentar la componente cinética de la energía asociada a este.

Además, como características fundamentales en el diseño de tuberías forzadas, las superficies internas deben presentar una baja rugosidad y las variaciones direccionales deben proyectarse con gran suavidad, todo ello con el fin de minimizar las pérdidas hidráulicas por rozamientos internos y aparición de vórtices en el flujo.

Sobre la instalación de las tuberías forzadas, esta puede realizarse de tres maneras diferentes y dependerá de las necesidades, condiciones y características del diseño:

- **En superficie:** las tuberías se encuentran al aire libre sobre dos tipos de apoyos. Por una parte, anclajes fijos de hormigón y, por otro, apoyos libres que permiten el desplazamiento de la tubería por acción de las tensiones internas o las variaciones de temperatura.



Ilustración 44: Tuberías forzadas en superficie. [127]

- **Subterráneas:** las tuberías quedan enterradas en zanjas, disponiendo igualmente de apoyos que permitan al conducto absorber las deformaciones del terreno debido a la humedad y el agua sin dañarse. Este procedimiento es habitual en centrales situadas en terrenos rocosos, así como en centrales de pequeño tamaño que requieran menor mantenimiento o mimetismo con el entorno.



Ilustración 45: Tubería forzada de microcentral sobre zanja. [128]

- **Sobre presa:** la tubería forzada no es un elemento independiente, sino que consiste en una abertura practicada en el interior de la presa que atraviesa ambos paramentos. Se da cuando la central se encuentra a pie de presa y puede observarse esquemáticamente en la *Ilustración 40*.

Algunos dispositivos adicionales que deben incorporar las tuberías forzadas y sus correspondientes funciones, son los siguientes:

- **Válvulas de desagüe.** Instaladas en cotas inferiores de conductos de derivación o tuberías forzadas. En el segundo caso, generalmente cerca de la entrada de la turbina. Permiten vaciar por completo las tuberías para tareas de mantenimiento.
- **Válvulas de flotador.** Instaladas en cotas superiores de conductos de derivación o tuberías forzadas. Permiten el paso del aire en ambas direcciones, favoreciendo la evacuación de burbujas de aire durante el llenado y evitando depresiones en el vaciado de la tubería.

Debe tenerse en cuenta que, en muchos casos, las grandes conducciones hidráulicas representan un elevado porcentaje total del presupuesto para el desarrollo de instalaciones hidroeléctricas. Esto requerirá establecer un compromiso entre las prestaciones perseguidas y los costes asumibles del proyecto, valorando positivamente aquellas alternativas que aporten sencillez, robustez y durabilidad.

Tubo de aspiración

El tubo de aspiración es un elemento de conducción hidráulica característico de las turbinas de reacción. Es el responsable de la evacuación del agua turbinada, cuya energía ha sido mayoritariamente extraída y de su descarga aguas abajo, por lo que su instalación tiene lugar en la brida de salida de la turbina. Posee las siguientes funciones fundamentales, que determinan su diseño:

- 1) Transferencia del flujo turbinado al cauce del río, aguas abajo.
- 2) Recuperación de altura estática de aspiración.
- 3) Recuperación de altura dinámica o energía cinética del fluido.

Si bien el primer aspecto resulta intuitivo y de fácil comprensión, no siendo necesarios criterios avanzados en el diseño del conducto de aspiración, los otros dos requieren de cierto conocimiento acerca del comportamiento del fluido y los fenómenos asociados, siendo estos importantes condicionantes en el diseño.

Conceptualmente, cuando el fluido de alto nivel energético atraviesa la turbina, la mayor parte de dicha energía es transferida en forma de energía mecánica al rodete y de este al alternador, transformándose en energía eléctrica. La energía total asociada al fluido consta de dos componentes: una estática, relacionada con la energía de presión y de altura y otra dinámica, vinculada a la velocidad del flujo. La instalación del tubo de aspiración permite que el fluido recupere parte de su energía de cota y que la turbina trabaje con un mayor salto de presión, evitando así problemas de cavitación. Además, origina un efecto difusor que succiona el fluido y recupera también una parte de su energía dinámica.

Para lograr tales fines, es necesario que exista un conducto cerrado a la salida de la turbina (2), cuya sección sea creciente para favorecer el efecto difusor (3). Es por ello que los tubos de aspiración se conciben con geometría troncocónica o con secciones no circulares de dimensiones crecientes, logrando así ambos efectos perseguidos.

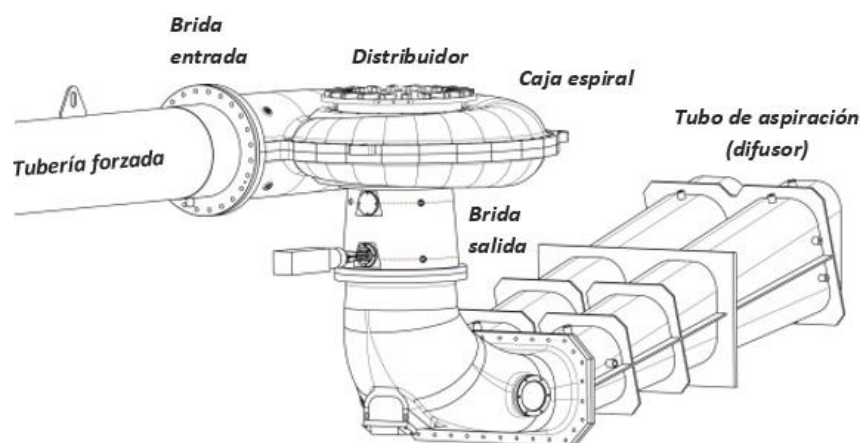


Ilustración 46: Esquema de turbina de reacción con tubo de aspiración difusor. [129]

Depósito de compensación

También denominado chimenea de equilibrio, consiste en una tubería vertical conectada a un depósito abierto a la atmósfera cuyo objetivo es paliar el efecto de las sobrepresiones sobre las conducciones hidráulicas de la instalación. Se ubican en aquellos puntos del circuito en los que son previsibles variaciones bruscas de la presión, que puedan dar lugar al fenómeno del golpe de ariete, el cual será analizado en mayor detalle en secciones posteriores.

La chimenea de equilibrio funciona como tubo piezométrico, variando el nivel del fluido según la presión del circuito en el punto de conexión. De este modo, su capacidad de compensación puede equipararse a la de un muelle o una válvula, absorbiendo parte de la energía del fluido cuando esta supera los niveles deseados según las condiciones de diseño y transformándola en energía potencial.

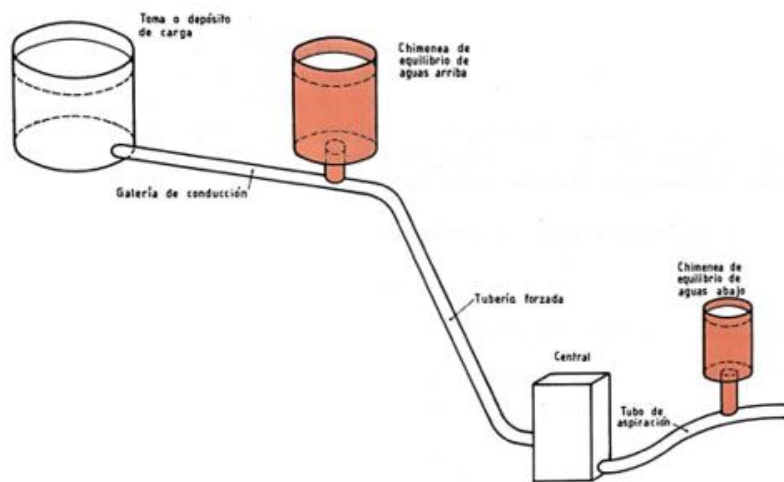


Ilustración 47: Esquema de ubicación de chimeneas de equilibrio en la instalación. [1⁹]

Tuberías de aireación

Las conducciones hidráulicas de una instalación están sometidas a frecuentes y, en ocasiones, elevadas variaciones de presión, pudiendo dar lugar a sobrepresiones o subpresiones. En conductos más susceptibles de dichas variaciones, como desagües de fondo o tuberías forzadas, se sitúa, en la parte superior de la embocadura de estos, una tubería con salida a la atmósfera. Al vaciarse el conducto, la depresión generada provoca la succión de aire por la tubería, evitando así una caída excesiva de presión y su consecuente efecto de cavitación.

Estos elementos tienen la misma función que las válvulas de aireación o de flotador presentadas en el apartado de tuberías forzadas. Sin embargo, si bien estas últimas son empleadas en conducciones independientes, las tuberías de aireación adquieren protagonismo en tuberías forzadas practicadas sobre la presa.

Casa de máquinas

Se denomina casa o sala de máquinas al emplazamiento en el cual se instalan los grupos de potencia, principalmente las turbinas hidráulicas y los generadores eléctricos. A esta construcción llegan las tuberías forzadas, entregando los caudales a las turbinas y provocando el giro de los rodets. Estos últimos se encuentran acoplados mecánicamente al rotor de un alternador, cuyo giro en el seno de un campo magnético induce las corrientes eléctricas en el estator.

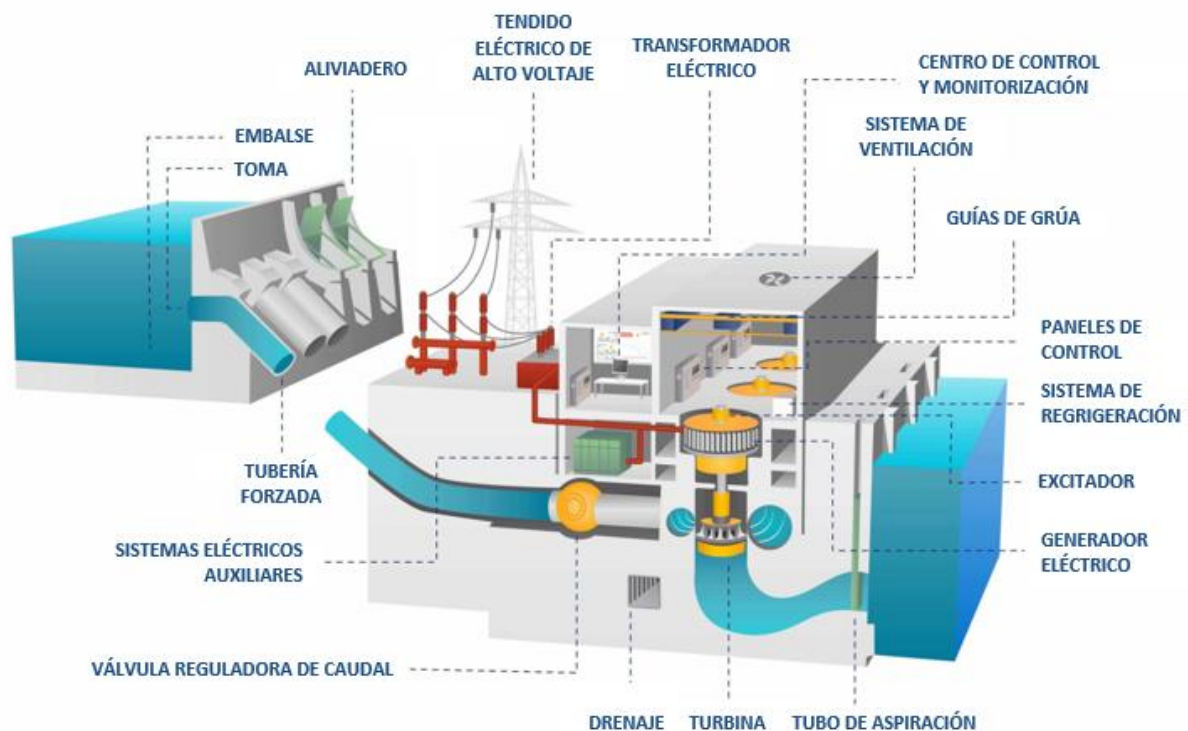


Ilustración 48: Configuración habitual en central de gran potencia. [130]

Las configuraciones de la casa de máquinas son muy diversas y dependen en gran medida de la potencia instalada, la altura del salto hidráulico y otros parámetros fundamentales que condicionan el diseño de la instalación y las tecnologías empleadas.

Si bien cuanto mayor es una central, mayor es el número de componentes y sistemas que incorpora, existen cuatro principales que son comunes a toda instalación y a través de los cuales se puede comprender con facilidad el proceso de generación eléctrica y suministro. Se trata de la turbina hidráulica, el generador eléctrico, la caja de cambios o multiplicador de velocidad y el transformador eléctrico. Los componentes secundarios o específicos de cada tipo de instalación serán debidamente tratados en posteriores secciones.

Turbina hidráulica

La turbina es la máquina hidráulica encargada de absorber la energía del agua y transformarla en energía mecánica de rotación. El avance tecnológico ha dado lugar a una gran variedad de categorías y características de diseño para adaptarlas a prácticamente cualquier escenario, habiéndose convertido en una de las máquinas mecánicas más eficientes y versátiles.

En el apartado de *Máquinas hidráulicas* se analizará en detalle su clasificación, así como los elementos constructivos que las componen y sus parámetros de diseño.

Generador eléctrico

El generador eléctrico o alternador es el dispositivo electromecánico que recibe en su eje motriz la potencia mecánica del rodete de la turbina y lleva a cabo su transformación en forma de energía eléctrica. Al girar su rotor en el seno de un campo magnético variable, se induce una corriente alterna a la tensión nominal del alternador.

Dado que en una instalación hidroeléctrica la velocidad de giro del rotor debe ser constante y estar sincronizada con la frecuencia de la red, los generadores empleados son máquinas síncronas, al igual que en la mayor parte de la industria de generación eléctrica.

Multiplicador de velocidad

El multiplicador de velocidad es un dispositivo mecánico sencillo que consta de una caja de desarrollos para transformar la velocidad de giro del eje del generador con respecto a la de la turbina. La velocidad de giro del rodete será característico del régimen de trabajo de cada modelo de turbina, sin embargo, el generador eléctrico debe trabajar a una velocidad específica, generalmente superior, para suministrar la corriente a la frecuencia de la red.

Existen variantes en la transmisión y el acoplamiento mecánico entre turbina y generador. En la *Ilustración 49* puede observarse un grupo de baja potencia con sistema de transmisión directa y multiplicadora de velocidad, sin embargo, existen diferentes formas de transmitir la potencia al eje del alternador en el régimen de revoluciones requerido:

- **Acoplamiento directo.** Si la turbina está diseñada para trabajar al régimen de revoluciones necesario. Es habitual en grupos que se fabrican integrados.
- **Transmisión por correa.** El eje de la turbina y el del alternador disponen de ruedas de polea con la relación de diámetros necesaria para convertir la velocidad de giro del rodete en la velocidad de trabajo del alternador.
- **Transmisión por multiplicadora.** Entre el eje de la turbina y el del alternador se instala una caja de cambios mediante ruedas dentadas que poseen la relación de transmisión necesaria para convertir la velocidad de giro.

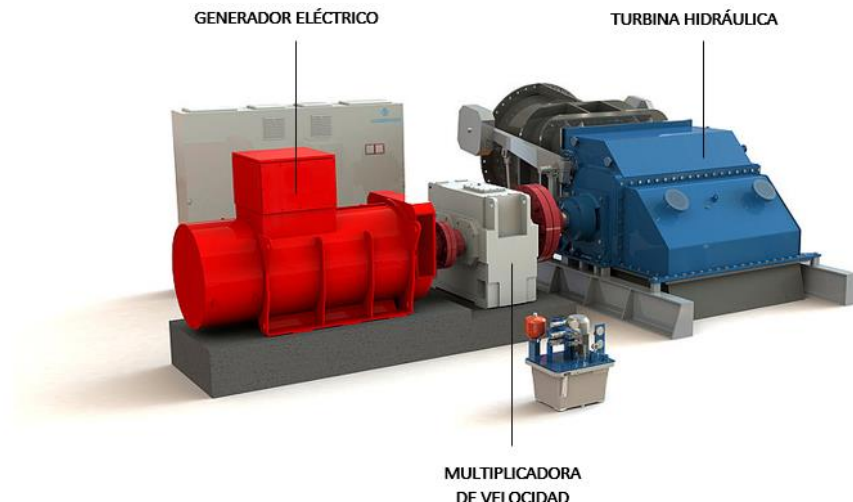


Ilustración 49: Grupo de potencia para microcentral hidráulica. [131]

Transformador eléctrico

El transformador es el componente eléctrico responsable de elevar la tensión de la corriente generada por el alternador, manteniendo la potencia. El objetivo fundamental de su instalación es reducir las pérdidas por efecto Joule en las líneas de transporte, al reducir la corriente en el circuito. Dichas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente y suponen una conversión inútil de la energía eléctrica en calor, disipado en los conductores. Dada la relación inversa entre voltaje e intensidad de corriente en la expresión de la potencia eléctrica desarrollada, cuanto más se incremente la tensión, menor será la corriente en circulación y, por tanto, también las pérdidas. Esto también repercute positivamente en la economía, pues menores corrientes requieren menor sección del conductor.

Constructivamente, el transformador es un elemento simple que consta de un núcleo de material ferromagnético formado por láminas superpuestas y dos devanados o bobinas conductoras con distinto número de espiras, según la relación de transformación deseada.

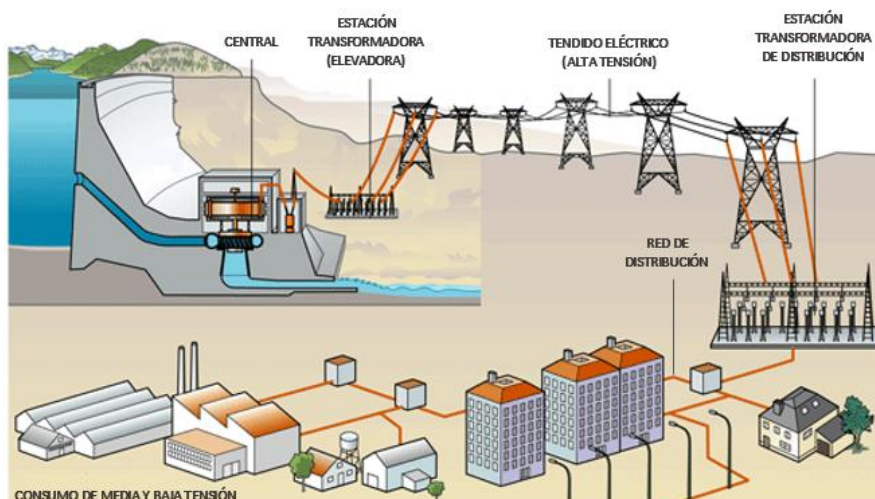


Ilustración 50: Esquema de transporte eléctrico de central a consumo. [132]

Conceptos fundamentales

A lo largo de esta sección se analizarán los conceptos más relevantes considerados en el diseño de centrales hidroeléctricas. Al proyectar una instalación, es de vital importancia conocer las condiciones de contorno a las que estará sujeta con el fin de optimizar los siguientes criterios:

- ✓ **Prestaciones.** Los factores naturales como el relieve del terreno o los caudales de agua que fluyen por los ríos son determinantes categóricos de las prestaciones alcanzables en el funcionamiento de la instalación.
- ✓ **Tecnología.** En tanto que las condiciones de contorno acotan el espacio de trabajo y limitan las prestaciones, también determinan las tecnologías y técnicas viables en la proyección de los diferentes sistemas. Analizar las alternativas existentes y emplear metodologías adaptadas a dichas condiciones resultará en beneficios de eficiencia y fiabilidad.
- ✓ **Economía.** El entorno físico y el contexto son factores de influencia en la economía del proyecto. Emplear criterios adecuados de diseño y selección en base a estos factores será determinante en la optimización de recursos.
- ✓ **Impacto.** Una barrera fundamental en la consecución de los objetivos perseguidos es la alteración mínima de los ecosistemas y poblaciones locales. Lejos de extraer el máximo potencial de la naturaleza sin reparar en los efectos, conocer los condicionantes permitirá llevar a cabo un aprovechamiento equilibrado y sostenible.
- ✓ **Viabilidad.** Tan importante es conocer los factores condicionantes como el alcance perseguido y los recursos disponibles para ello. De no ser así, es posible que exista incompatibilidad entre ambos, de forma que los factores no permitan la consecución de los objetivos o que los recursos y capacidades sean insuficientes para lograrlos. Por ilustrar esta explicación, es inútil imponer condiciones propias como las dimensiones y capacidad de la instalación sin antes estudiar si los factores naturales de la ubicación elegida son compatibles con estas.

Con el fin de extrapolar estos criterios al marco del presente trabajo, los conceptos que se analizarán a continuación precederán a cualquier imposición propia, por lo que no se establecerán alcances técnicos previos, sino que se buscará optimizar los beneficios a partir de los factores existentes y de los recursos disponibles.

De esta manera, a priori no existirá un valor de potencia instalada definida o un intervalo de emplazamientos suministrados, sino que ambos tratarán de maximizarse una vez todos los parámetros hayan sido determinados. Puesto que parte de la información requerida será inaccesible y estará sujeta a mediciones in situ, se trabajará con intervalos admisibles y variables.

Salto hidráulico

Se define el *salto hidráulico* o simplemente *salto*, como la diferencia de cotas entre un nivel constante de agua y otro inferior. Un salto puede formarse de manera natural, como en el caso de las cataratas, en las que el agua cae desde un nivel superior a un nivel inferior, ambos considerados constantes. Sin embargo, desde el punto de vista del aprovechamiento hidráulico, los saltos son generados de forma artificial.

De forma intuitiva, se identifica una mayor altura de salto con una mayor energía asociada al fluido, lo cual es totalmente cierto. El agua almacenada en un embalse o derivada hacia un depósito de carga posee una determinada energía potencial, que crece proporcionalmente con la altura. Siendo esta transformada en energía cinética y de presión en su conducción por la tubería forzada, cuanto mayor es la energía potencial disponible, mayor energía se podrá aportar al fluido para producir trabajo mecánico en el eje de la turbina.

Al analizar el concepto de potencia instalada, se verá que la potencia que es capaz de generar la turbina en su eje es proporcional a la magnitud del salto, con ciertos matices. Además de ser un evidente parámetro fundamental en el dimensionamiento de instalaciones y equipos, es un discriminante de las tecnologías aplicables pues, por lo general, los grandes saltos suelen implicar caudales reducidos y los pequeños saltos, grandes caudales. Esto último exige el uso de tecnologías diferentes con el fin de maximizar el aprovechamiento energético y la eficiencia de la instalación. La unidad de medida del salto es el metro.

El verdadero interés del salto hidráulico como parámetro de diseño reside en su distinción en dos categorías del mismo: salto bruto y salto neto. Otras variantes serán analizadas en el apartado de *Máquinas hidráulicas*, pues son propias de estas.

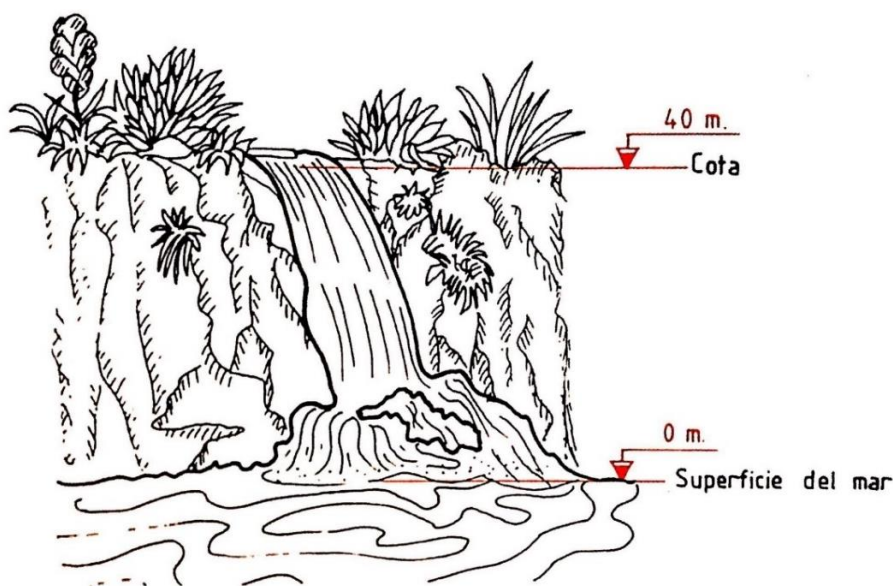


Ilustración 51: Salto natural de 40 m de altura. [19]

Salto bruto

Se denomina *salto bruto* (H_b) a la diferencia de cotas entre el nivel de la superficie libre del agua embalsada y el de la corriente donde se produce la descarga del caudal turbinado. En la *Ilustración 52*, a partir de las cotas de superficie del embalse y el canal o corriente de descarga, se calcula la altura del salto bruto como sigue:

$$H_b = 684 - 599 = 85 \text{ m}$$

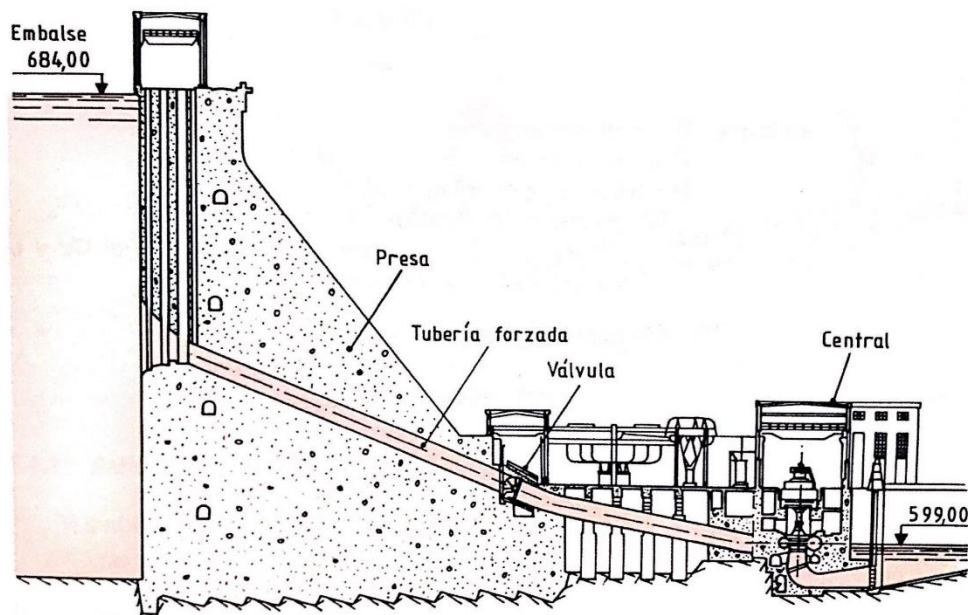


Ilustración 52: Salto bruto de 85 m de altura. [19]

En adelante, el nivel superior se designará mediante la letra **A** y el nivel inferior, el cual será tomado con frecuencia como origen de cotas, mediante la letra **Z**. Así, en la *Ilustración 52*, el nivel A estará situado en una cota de 684 m y el nivel Z en una cota de 599 m.

Idealmente, el salto bruto representa la altura que podría aprovecharse si la interacción del fluido con la tubería de presión y demás elementos de conducción hasta la entrada de la turbina fuese perfecta, es decir, no conllevase pérdidas por fricción, cambios en el régimen del flujo o aparición de vórtices en las variaciones direccionales de los conductos. Dado que esto no es físicamente posible, el salto bruto no es el foco de interés en la perspectiva del diseñador, puesto que no expresa la verdadera energía de altura aprovechable para la generación.

Si bien este parámetro no será empleado para el cálculo de la instalación, será de suma importancia para obtener una primera aproximación de las características de esta y descartar múltiples alternativas. Para determinar el salto bruto, será necesario conocer la topografía y la altura superficial del embalse, principalmente.

Salto neto

El *salto neto* o *salto útil* (H) representa la altura disponible a la entrada de la turbina. A efectos de cálculo, la altura neta puede obtenerse restando a la altura bruta las pérdidas hidráulicas entre el nivel A, previamente definido y el nivel E, el cual estará referido a la cota de entrada de la turbina.

$$H = H_b - \text{pérdidas}_{A \rightarrow E}$$

En la práctica, estas pérdidas se reducen a las de la tubería forzada. Entonces, resulta evidente que cuanto más se reduzcan las pérdidas en dicha tubería, mayor será la altura puesta a disposición de la turbina y, por tanto, mayor potencia podrá generar. Cabe destacar que, en el caso ideal en que las pérdidas fuesen nulas, se tendría una igualdad entre el salto útil y el salto bruto, por lo que la totalidad de la energía de altura podría ser aprovechada en la turbina. Sin embargo, tal y como se exponía en el apartado anterior, la interacción perfecta entre flujo y conducto no es un hecho físicamente posible.

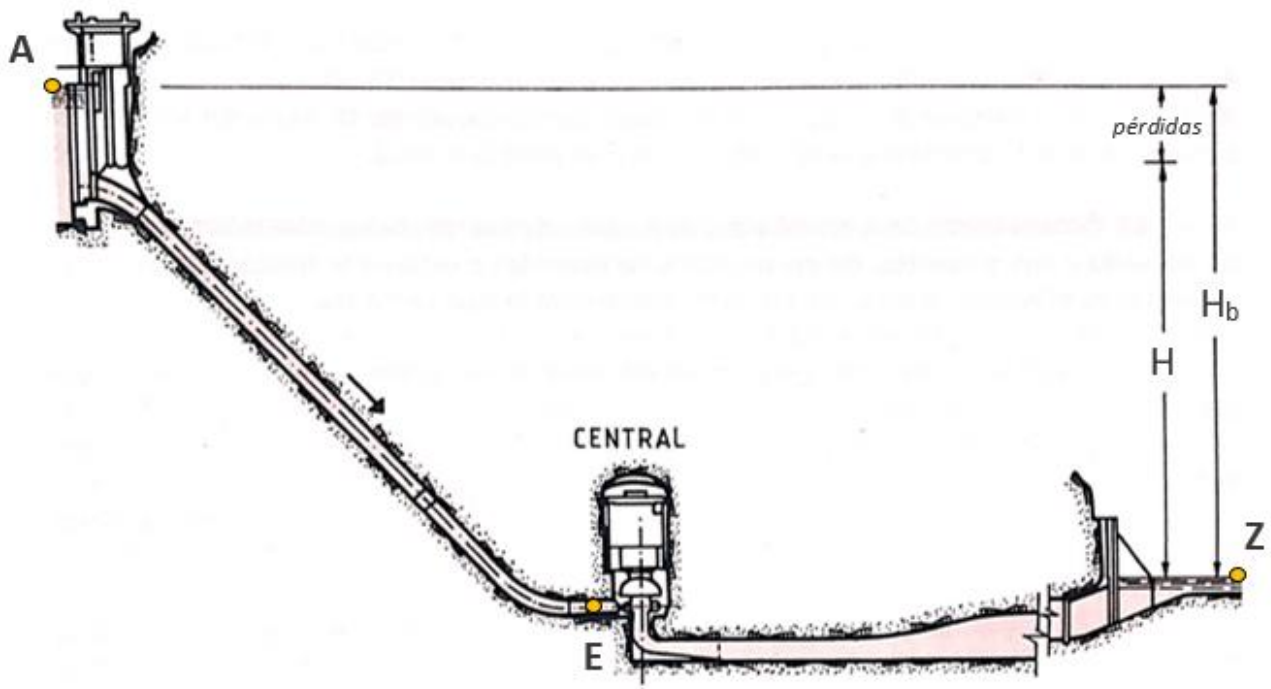


Ilustración 53: Acotación esquemática de alturas y niveles. [19]

La Ilustración 53 es muestra de que la única magnitud geodésica es la del salto bruto. Tanto la altura neta como las pérdidas se obtienen del cálculo analítico. Sin embargo, el uso de alturas en los cálculos simplifica mucho los procedimientos e ilustra los resultados.

Caudal hidráulico

El caudal (Q) es la magnitud que cuantifica el fluido que atraviesa una sección (S) de un conducto abierto o cerrado en una determinada unidad de tiempo (t). La unidad de medida habitual del caudal es el metro cúbico entre segundo y suele expresarse como sigue:

$$Q = S \cdot v \quad [m^3/s] \quad (\text{Ec. 1})$$

donde v es la velocidad del flujo en el conducto. Una forma alternativa de interpretar el caudal es el volumen de fluido que atraviesa una determinada sección del conducto en un segundo.

Entonces, un determinado caudal es captado en las tomas de agua y conducido hasta la tubería forzada. Es importante notar que, de no ser constante la sección de la tubería, puesto que esta es cerrada y se cumple la *ley de continuidad*, el caudal permanecerá constante en todo momento, por lo que un decremento de la sección conllevará un aumento proporcional de la velocidad del fluido y viceversa.

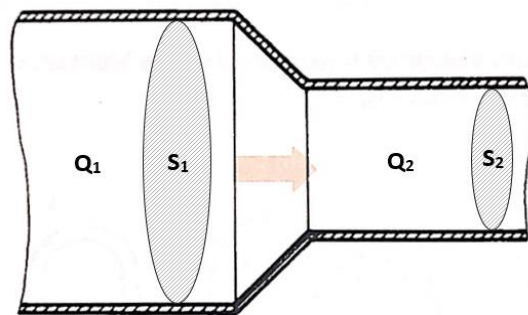


Ilustración 54: Conducto cerrado de sección variable. [19]

La *ley de continuidad* establece:

Caudal permanece constante: $Q_1 = Q_2$

equivalente a: $S_1 v_1 = S_2 v_2$

de donde se deduce: $\frac{S_1}{S_2} = \frac{v_2}{v_1}$

Por tanto, existe una relación inversa entre los cambios de sección y de velocidad. Desde la perspectiva del estudio hidráulico este aspecto es muy relevante, pues supone una herramienta para controlar la componente cinética de la energía de un fluido.

En una instalación hidráulica existen tantos caudales diferentes como conductos posee esta, sin embargo, se hará mayor referencia al concepto de *caudal instalado*. Este se define como el caudal total que es transferido a las turbinas en condiciones normales de operación y, al igual que se vio en la descripción del salto hidráulico, también es proporcional a la potencia.

Al proyectar una central, se debe considerar que existe un caudal óptimo al cual debe funcionar esta para hacerlo de la mejor manera posible. Dicho caudal se encuentra comprendido en un intervalo delimitado por:

- **Caudal máximo.** Trabajar con un caudal excesivo resulta en efectos negativos, tanto para la propia instalación y sus beneficiarios como para el medio ambiente. Un funcionamiento prolongado de las turbinas en condiciones alejadas del régimen nominal supone una considerable pérdida de rendimiento y, de no haber sido dimensionada correctamente, la instalación puede acarrear sobrecostes en su desarrollo. También es necesario considerar, por motivos medioambientales, la conservación del *caudal ecológico*, por lo que no es viable desviar una cantidad mayor del caudal denominado *máximo turbinable*.

$$Q_{\text{máx. turbinable}} = Q_{\text{máx.}} - Q_{\text{ecológico}}$$

- **Caudal mínimo.** Trabajar con un caudal inferior al nominal también repercute en la pérdida de rendimiento de las turbinas y conlleva además considerables pérdidas económicas por desaprovechamiento de caudal turbinable.

Se recuerda que el caudal puede ser regulado en centrales de agua embalsada o bien extraído directamente como derivación del cauce de un río. En ambos casos, deben considerarse tasas de reposición y variaciones hidrológicas para determinar la disponibilidad.

La operación de medición de un caudal se denomina *aforo* y existen diversas técnicas para ello, empleando herramientas como el molinete hidrométrico, *tubos de Pitot* o de *Venturi*. La medición del caudal será un aspecto fundamental para la proyección del presente trabajo, si bien deberá partirse de estimaciones que serán verificadas posteriormente.

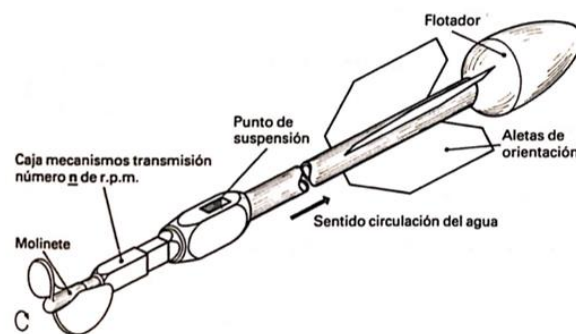


Ilustración 55: Molinete hidrométrico para medición de caudal. [19]

Potencia hidráulica

El concepto de potencia hace referencia a la capacidad de un sistema para llevar a cabo un trabajo con mayor o menor rapidez. Dicho sistema puede producir un elevado trabajo y caracterizarse por una baja potencia, si este lo realiza con lentitud. Se encuentra muy extendido en los sistemas mecánicos y eléctricos, sin embargo, al tratarse el agua del recurso energético que produce el trabajo, se define el concepto de *potencia hidráulica* (P).

Como se mencionó en secciones anteriores, la potencia hidráulica es proporcional a la altura del salto y también al caudal. De esta forma, se define según la siguiente expresión:

$$P = \rho Q g H \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

ρ es la densidad del fluido, en $[kg/m^3]$

g es la aceleración de la gravedad, en $[m/s^2]$

Además, puesto que H es el salto neto, la potencia hidráulica estará referida a la entrada de la turbina. En caso de que la potencia se calculase a partir del salto bruto, se hablaría de *potencial* o *potencial teórico*, pues no representa un valor de potencia desarrollable, sino una magnitud ideal. En la Ec. 2, la potencia obtenida tiene por unidad el vatio $[W]$, aunque por lo general se traduce el resultado a kilovatios $[kW]$.

En resumen, la potencia hidráulica P a la entrada de la turbina es la capacidad que posee el fluido para generar una determinada cantidad de energía o trabajo en una unidad de tiempo, siendo proporcional a la altura del salto y al caudal transferido. Puesto que g y ρ serán considerados constantes, la potencia será función de los anteriores.

$$P = f(Q, H)$$

Pérdidas hidráulicas

La transformación de cualquier forma de energía en otra distinta conlleva siempre transformaciones secundarias no deseadas en energía térmica, por mínimas que sean. Además, la conducción de agua por los diferentes sistemas de una instalación supone pérdidas sobre el total de la energía utilizable, denominándose en conjunto *pérdidas hidráulicas*.

En una central hidroeléctrica, la degradación energética es un factor continuo que tiene lugar de diferentes maneras y en diferentes ubicaciones. En esta sección, se tratarán debidamente aquellas correspondientes a los sistemas genéricos de la instalación, dejándose otras más específicas para su tratamiento en el capítulo de *Máquinas hidráulicas*.

Pérdidas primarias

Denominadas también *pérdidas por rozamiento de superficie*, se dan como consecuencia de la fricción del fluido con las superficies internas del conducto que lo contiene. Tienen lugar en todo el recorrido de la instalación, desde la captación hasta la descarga. El método de cálculo para las pérdidas primarias se realizará a partir de la *ecuación de Darcy-Weisbach* (Ec. 3), válida para cualquier régimen de flujo.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

h_f es la pérdida de carga primaria, en [m]

f es el *factor de fricción de Darcy*, adimensional

L es la longitud del tramo del conducto, en [m]

D es el diámetro del conducto, en [m]

v es la velocidad media del flujo, en [m/s]

En particular, el factor de fricción f incorpora el efecto del régimen del flujo.

En régimen laminar:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 4})$$

En régimen turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

donde:

Re es el número adimensional de Reynolds

ε es la rugosidad absoluta de la superficie interna de la tubería, en [mm]

ε/D es la rugosidad relativa, con D el diámetro interno del conducto.

La Ec. 5, conocida como *ecuación de Colebrook*, requiere conocer previamente las condiciones del flujo o realizar un proceso iterativo en conjunto con las ecuaciones de balance energético. Como alternativa, puede emplearse el *diagrama de Moody* (Gráfico 2).

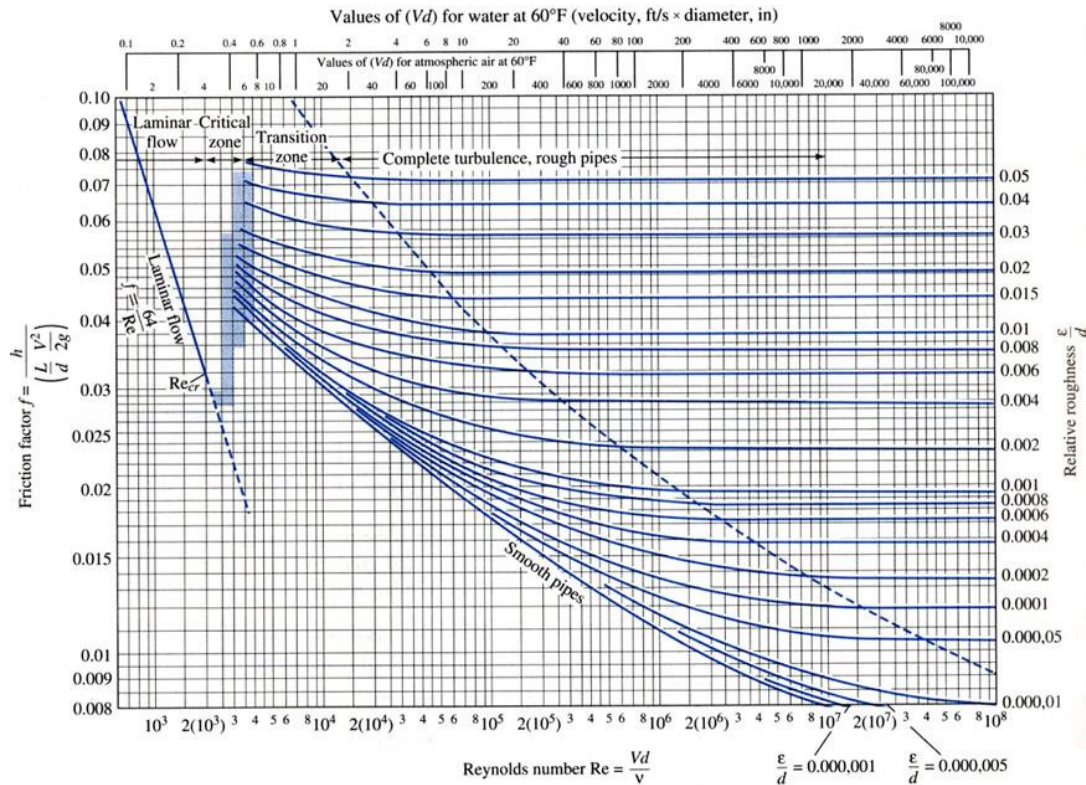


Gráfico 2: Diagrama de Moody. [G²]

VALORES TÍPICOS DE RUGOSIDAD ϵ

MATERIAL	RUGOSIDAD ϵ [mm]
Plásticos (PE, PVC)	0.0015
Resina de poliéster con refuerzos de fibra	0.01
Cobre y latón	0.0015
Hormigón	0.3 - 3
Acero comercial soldado (nuevo)	0.03 - 0.1
Acero ligeramente oxidado	0.4
Acero muy oxidado	0.5 - 3
Fundición centrifugada	0.003

Tabla 6: Rugosidad típica en materiales de tubería. [T³]

La selección del material de la tubería, siendo los más habituales los presentados en la *Tabla 6*, deben atender a criterios de resistencia mecánica, coste y prestaciones hidráulicas, siendo estas últimas las que permiten minimizar las pérdidas por conducción. En centrales de gran potencia es frecuente el empleo del acero, el hormigón o combinación de ambos, sin embargo, materiales como el PE o PVC toman protagonismo en centrales menores.

Pérdidas secundarias

Las *pérdidas secundarias* (h_s) son conocidas también como *pérdidas de forma* y tienen lugar como consecuencia de cambios de dirección en la conducción del flujo, variaciones de sección o en su paso por diferentes dispositivos. Todo ello da lugar a una degradación de la energía por la aparición de turbulencias, concretamente de la altura cinética, pudiéndose expresar las pérdidas de forma como una fracción de esta.

$$h_s = K \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde K es el coeficiente adimensional de carácter empírico que establece la proporción de pérdidas con respecto a la altura cinética y se asigna a cada tipo de singularidad. A diferencia de las pérdidas primarias, las secundarias no se producen de forma continua en todo punto del circuito hidráulico, sino que tienen lugar en ubicaciones específicas de este.

El coeficiente K se presenta en la *Tabla 7* para cada singularidad asociada.

COEFICIENTE K DE PÉRDIDAS SECUNDARIAS

ACCESORIO/DISPOSITIVO		K
Codo a 45°	Radio corto	0.4
	Radio normal	0.3
	Radio grande	0.2
Codo a 90°	Radio corto	0.4
	Radio normal	0.7
	Radio grande	0.9
Forma 'T'	Flujo en línea recta	0.1
	Flujo en ángulo (empalme)	1.5
	Flujo en salida bilateral	1.8
Ampliación	Brusca	0.2
	Gradual	0.3
Reducción sección	Brusca	0.35
	Gradual	0.25
Bifurcación		0.1
Confluencia		0.4
Entrada tubería		0.5
Entrada abocinada		0.1
Reentrada		1.0
Rejilla entrada		0.8
Salida tubería		1.0

Válvula de compuerta	Totalmente abierta	0.2
	Abierta 3/4	1.15
	Abierta 1/2	5.6
	Abierta 1/4	24.0
Válvula de mariposa abierta		0.24
Válvula esférica abierta		10.0
Válvula de seguridad abierta		2.5
Válvula en ángulo recto		5.0

Tabla 7: Coeficientes de pérdidas en distintos accesorios. [T⁴]

Además de los valores previamente tabulados, es recomendable seguir las indicaciones del fabricante del accesorio o dispositivo para tomar el valor K obtenido experimentalmente y calcular las pérdidas con la mayor precisión.

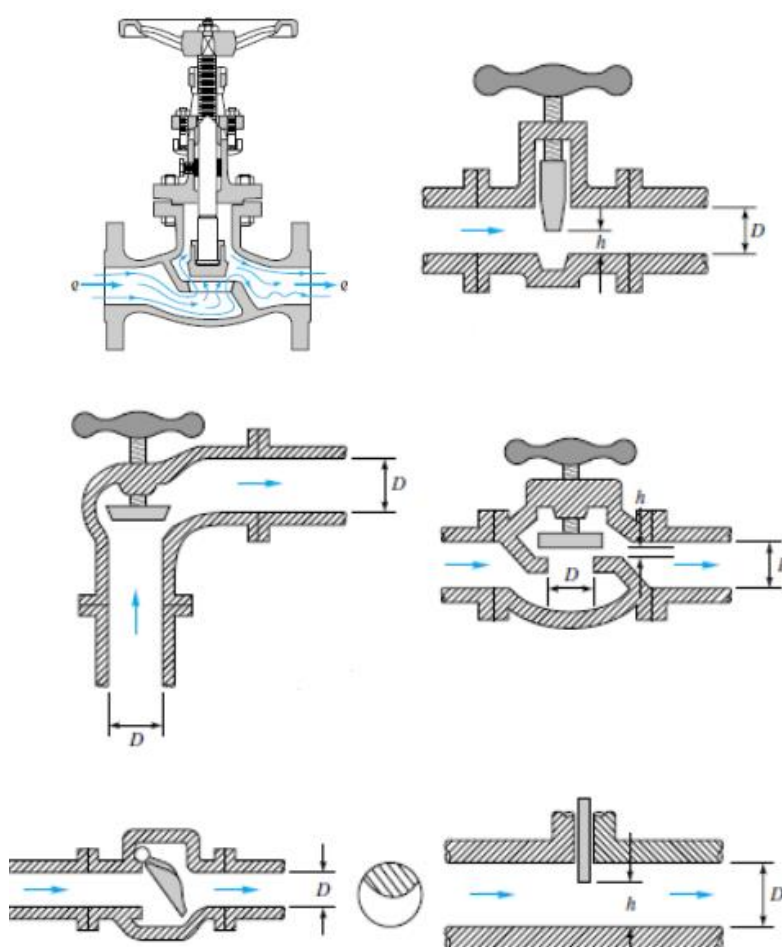


Ilustración 56: Principales tipos de válvulas. [19]

Pérdidas totales

Las *pérdidas hidráulicas totales en la instalación* (h_{ti}) se definen como la suma de las pérdidas primarias más las pérdidas secundarias. En este término no se incluyen aquellas producidas en la turbina y sus diferentes elementos (distribuidor, rodete, etc.).

$$h_{ti} = h_f + h_s \quad (\text{Ec. 7})$$

Rendimiento de la instalación

Al comienzo de la sección de *Salto hidráulico* se establecía una diferencia entre el denominado salto bruto y el salto útil o aprovechable. Dicha diferencia era el resultado de unas pérdidas en la conducción del fluido que provocaban un descenso en su contenido energético.

Se denomina *rendimiento de la instalación* (η_t) al cociente entre la energía útil generada por la instalación y la disponible, previamente a la explotación del recurso. La diferencia entre ambas representa las pérdidas totales durante todos los procesos de conducción, regulación, turbinado, etc. Existen tres formas de pérdidas en la instalación:

- Pérdidas hidráulicas (h_h)
- Pérdidas mecánicas (h_m)
- Pérdidas volumétricas (h_v)

Las primeras, analizadas en la sección anterior, tienen lugar en todo punto de la instalación. Sin embargo, las dos últimas se presentan concretamente en los grupos de potencia y, por tanto, tanto estas como las pérdidas hidráulicas en turbinas, serán debidamente tratadas en las correspondientes secciones.

De esta manera, pueden definirse las pérdidas totales en una central hidroeléctrica como:

$$h_T = h_h + h_m + h_v \quad (\text{Ec. 8})$$

De la Ec. 2, si a la potencia disponible a la entrada de la turbina se sustraen todas las pérdidas en procesos posteriores, se obtiene la *potencia instalada* o *potencia de accionamiento* (P_a), que es aquella verdaderamente generada por la central.

El rendimiento de la instalación expresa en valor porcentual la cantidad de energía que es aprovechada (o no disipada) con respecto a la que es puesta a disposición. Esto es de suma importancia, especialmente en términos económicos, pues refleja la calidad con que la instalación aprovecha los recursos y minimiza las pérdidas inútiles.

$$\eta_t = \frac{P_a}{P} \quad (\text{Ec. 9})$$

Integrando la ecuación anterior con la Ec. 2, se obtiene que la potencia instalada en una central hidroeléctrica es el resultado de:

$$P_a = \rho Q g H \eta_t \quad (\text{Ec. 10})$$

Máquinas hidráulicas

A lo largo de las secciones previas se han analizado los distintos elementos que constituyen las centrales hidroeléctricas, permitiendo ubicar cada uno de ellos, conocer su función y conocer las tecnologías y técnicas empleadas en la actualidad.

En el presente capítulo se entrará en detalle en el análisis del dispositivo principal de las centrales hidráulicas, la turbina. Para ello, se realizará una clasificación de las máquinas hidráulicas que permita distinguirlas en función de sus usos, características constructivas, prestaciones, etc. Este análisis será de gran utilidad para establecer criterios de selección que fundamenten las fases de diseño posteriores.

Clasificación

Se define como máquina de fluido a toda aquella cuya función consiste en llevar a cabo un intercambio energético con un fluido. La clasificación de estas es muy extensa y la gran mayoría no son objeto de estudio en este trabajo, sin embargo, su mención permitirá alcanzar un entendimiento profundo acerca de las peculiaridades de la turbina hidráulica.

En primera instancia, existen dos grandes categorías:

- **Máquina de desplazamiento positivo o volumétrica.** Son aquellas máquinas de fluido cuyo desplazamiento es realizado mediante la variación de volumen de una o varias cámaras, de forma que el fluido se encuentra confinado en cantidades discretas. Ejemplos habituales de máquinas volumétricas son los motores de combustión, los compresores de aire, las bombas de engranajes o el corazón humano.
- **Turbomáquinas.** El flujo de fluido atraviesa la máquina en régimen continuo y la variación se produce sobre el momento cinético del fluido. Algunas turbomáquinas son las turbinas de gas o vapor, turbinas hidráulicas, ventiladores, bombas rotodinámicas, turbocompresores, etc.

Tanto máquinas volumétricas como turbomáquinas pueden clasificarse a su vez según la variación de densidad del fluido, dando lugar a:

- **Máquinas hidráulicas.** Al intercambiar energía con el fluido, la densidad de este permanece constante o la variación es considerada despreciable. Las turbomáquinas hidráulicas son de las más extendidas en la industria y comprenden principalmente las turbinas de las centrales hidroeléctricas, bombas y ventiladores.
- **Máquinas térmicas.** Por el contrario, las máquinas térmicas conllevan una variación en la densidad del fluido, por ello se conocen también como máquinas de flujo compresible. Además, la denominación de térmicas hace referencia a que la energía térmica del fluido, generalmente gaseoso, forma parte del proceso de generación, debido a su expansión con el aumento de la temperatura. Son turbomáquinas térmicas las turbinas de las centrales térmicas, los turbosoplantes o los turbocompresores.

Hasta ahora se ha visto que una máquina de fluido recibe diferentes designaciones según su manera de interactuar con el fluido. En cuanto a la capacidad para absorber o transmitir energía al fluido, los siguientes dos grupos toman también como referencia a este:

- **Máquinas generadoras.** Cuando la máquina aporta energía al fluido para provocar un desplazamiento, se trata de una máquina generadora. El objetivo perseguido es el inverso al del presente proyecto, pues el agua no es la fuente de energía, sino el objeto sobre el que aplicar trabajo. Por ejemplo, bombas, ventiladores, compresores, sopladoras, etc.
- **Máquinas motora.** Desde la perspectiva del fluido, una máquina motora toma la energía de este para transformarla en otra forma, generalmente mecánica. Corresponden a este tipo de máquinas los motores y turbinas.

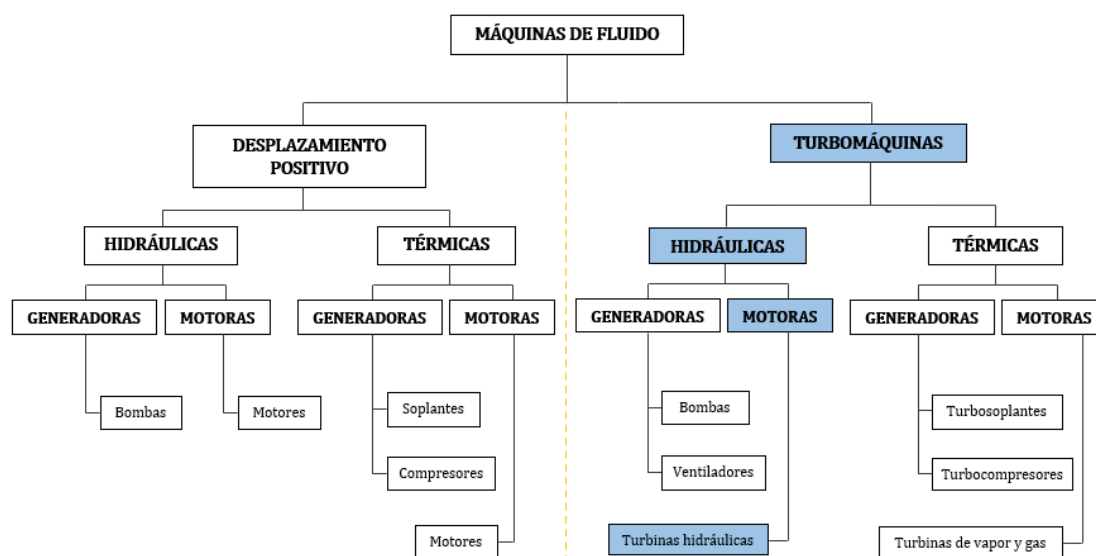


Ilustración 57: Clasificación de máquinas de fluido. [18]

Efecto del flujo en álabes

Dentro de las turbomáquinas hidráulicas, una de las más representativas distinciones es el modo en que el flujo de fluido ejerce la fuerza sobre los álabes de la turbina y provoca el giro del rodete. Los dos efectos que dan lugar a esta clasificación son:

- **Turbinas de acción.** El agua incide sobre los álabes de forma que el rodete gira en la misma dirección y sentido de incidencia. La energía de presión es transformada en energía cinética antes de proyectar el chorro, de forma que la presión a la entrada y la salida del rodete es la misma. Esto implica que las turbinas de acción sean mayormente empleadas en grandes saltos, pues permiten alcanzar elevadas velocidades. La más extendida es, sin duda, la turbina Pelton, seguida de los modelos Turgo y Mitchell-Banki.
- **Turbinas de reacción.** En estas turbinas, el fluido experimenta grandes cambios en su presión, velocidad y dirección, entre la entrada y la salida del rodete. A diferencia de las turbinas de acción, la causa del giro no es la proyección directa de un chorro, sino que el flujo entra deslizándose por los álabes, de manera que la dirección de rotación no coincide con la de entrada del agua y el giro se produce por efecto de reacción. Las más importantes en la industria hidráulica son las turbinas Francis y Kaplan. Aunque menos extendidas, también lo son las Dériaz y Hélice.

Posición del eje motriz

La clasificación de las turbomáquinas según la posición de su eje es una cuestión sencilla. Las dos configuraciones posibles son con eje en posición horizontal o vertical, siendo la primera la más habitual, especialmente en centrales de menor potencia y la segunda prácticamente reservada para centrales de gran potencia, en las que los grupos poseen dimensiones considerables y soportan elevados esfuerzos.

Dirección del flujo

Según la dirección de incidencia del agua sobre los álabes de la turbina, se establecen las siguientes categorías:

- **Flujo axial.** Son aquellas turbinas en las que la dirección del flujo es paralela al eje motriz. Las turbinas de flujo axial son generalmente empleadas en instalaciones con grandes caudales y pequeños saltos. Son de flujo axial las turbinas Kaplan y Hélice.
- **Flujo radial.** Se hace referencia a turbinas cuyo flujo se desplaza radialmente por el rodete, con respecto al eje. Si la proyección del fluido tiene lugar desde el radio exterior al radio interior, será centrípeta. Sin embargo, si el sentido es el opuesto, se denominará centrífuga. El movimiento del fluido en la dirección del eje motriz se

encuentra restringido, por lo que este sucederá idealmente en un único plano transversal al rodete. Algunas turbinas Francis o Dériaz son de flujo radial.

- **Flujo diagonal.** Se denominan también mixtas o de flujo radial-axial por combinar las características de las dos anteriores. El flujo incide radialmente sobre el rodete y conforme se aproxima a la salida adquiere la dirección paralela al eje de giro. La mayoría de las turbinas Francis y Dériaz son de flujo diagonal.
- **Flujo tangencial.** La incidencia del chorro de agua sobre los álabes se produce en sentido tangencial al eje, a la altura de la periferia del rodete. El modelo de turbina de flujo tangencial más conocido es la Pelton.

Modo de admisión

Las turbinas hidráulicas pueden clasificarse también según el área de periferia del rodete en contacto con el flujo:

- **Admisión parcial.** El chorro de agua se proyecta puntualmente sobre la periferia del rodete, bien sea en un único punto o en varios. Este método se emplea para aprovechar la energía cinética del fluido, perdiendo relevancia su energía de presión. Son características de esta categoría las turbinas Pelton.
- **Admisión total.** El intercambio energético se realiza en toda la periferia del rodete, pues el fluido está en contacto en la totalidad de la misma. Las turbinas Francis o Kaplan, entre otras, son de admisión total.

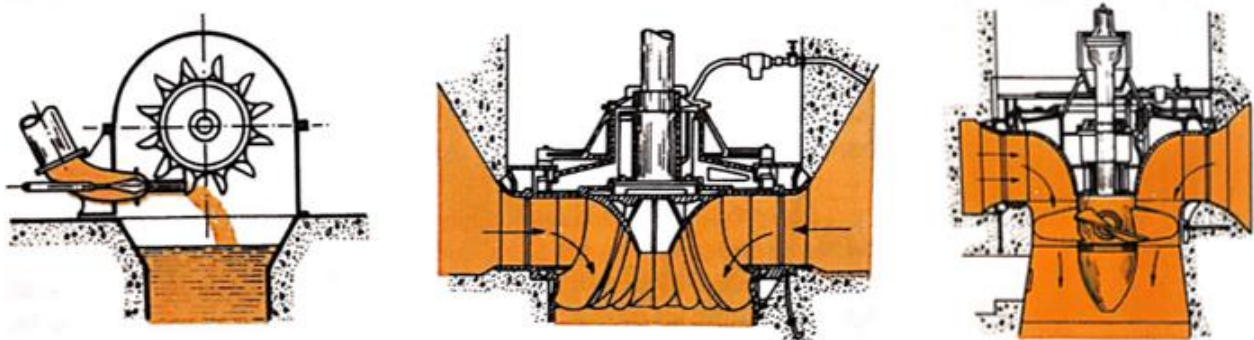


Ilustración 58: De izqda. a dcha., turbinas Pelton, Francis y Kaplan. [133]

La *Ilustración 58* permite observar con claridad las variantes que existen en cuanto al modo de admisión, representando el naranja el fluido, la posición del eje motriz o la dirección del flujo, en los diferentes modelos de turbina de uso más extendido.

Características constructivas

En el estudio de las turbomáquinas hidráulicas motoras no es conveniente realizar un análisis exhaustivo de los elementos constructivos, pues las turbinas poseen características propias muy heterogéneas entre sí y ello supondría abarcar excesivos aspectos teóricos, concretos de cada modelo, lo cual escapa del objeto del presente trabajo.

Por el contrario, se optará por definir los distintos elementos, comunes o no, que permitan comprender la naturaleza básica del funcionamiento de una turbina. Así, al analizar los distintos tipos en posteriores secciones, la referencia a los elementos partirá de un mejor entendimiento sobre su función y criterios de diseño.

Rodete

El rodete o rotor de la turbina es el componente principal y de mayor relevancia desde la perspectiva del diseño y el aprovechamiento energético. Consiste en un cuerpo aproximadamente cónico o bien un conjunto de discos que incorporan, en ambos casos, un sistema de palas o cucharas denominadas álabes. La función de los álabes es recibir la energía del flujo de agua y provocar el giro del rodete, como consecuencia de su unión rígida con el eje motriz.

El rodete debe estar diseñado atendiendo a criterios de resistencia mecánica, invulnerabilidad frente a la corrosión, favorecer la transferencia y evacuación del flujo, optimizar la orientación de los álabes para maximizar el rendimiento, minimizar las pérdidas hidráulicas, etc. En muchas ocasiones, los álabes son orientables, como en la mayoría de las turbinas Kaplan o Dériaz. Con esto se consigue ampliar el rango de escenarios de funcionamiento de la instalación según diferentes condiciones, dando lugar a mayor versatilidad y rendimiento.



Ilustración 59: Rodetes de diferentes turbinas. [1³⁴]

Generalmente, los rodetes se fabrican en acero, fundición o aluminio y se tratan debidamente para prevenir la aparición de óxido y prolongar su vida útil.

El diseño de los álabes es un aspecto crítico que determina el rendimiento de la turbina bajo unas condiciones de carga. Con el avance tecnológico, los álabes orientables han dotado a algunas turbinas de la capacidad de mantener elevados rendimientos operando a distintas cargas. Para ilustrar este hecho, el *Gráfico 3* representa el rendimiento de diferentes tipos de turbina (ordenadas) frente a la relación del caudal de trabajo con respecto al nominal (abscisas). Las curvas correspondientes a las turbinas de Hélice, denominadas *curvas en gancho*, alcanzan un rendimiento óptimo al aproximarse al caudal de diseño, decreciendo notablemente para regímenes de carga distintos. Las correspondientes a las turbinas Francis muestran rendimientos elevados para intervalos algo mayores de variación de carga, sin embargo, caen rápidamente a medida que el caudal se reduce. Por último, las turbinas Kaplan, de álabes orientables, alcanzan rendimientos próximos al 90% operando a baja carga y los mantiene prácticamente constantes para todo su rango de funcionamiento. Es por esto que las curvas de rendimiento de las turbinas Kaplan se denominan también *curvas planas* y se debe a que las variaciones de carga son afrontadas con una reorientación adecuada de los álabes. Las turbinas Pelton presentan curvas similares a las Kaplan, con rendimientos excelentes en diferentes regímenes de carga.

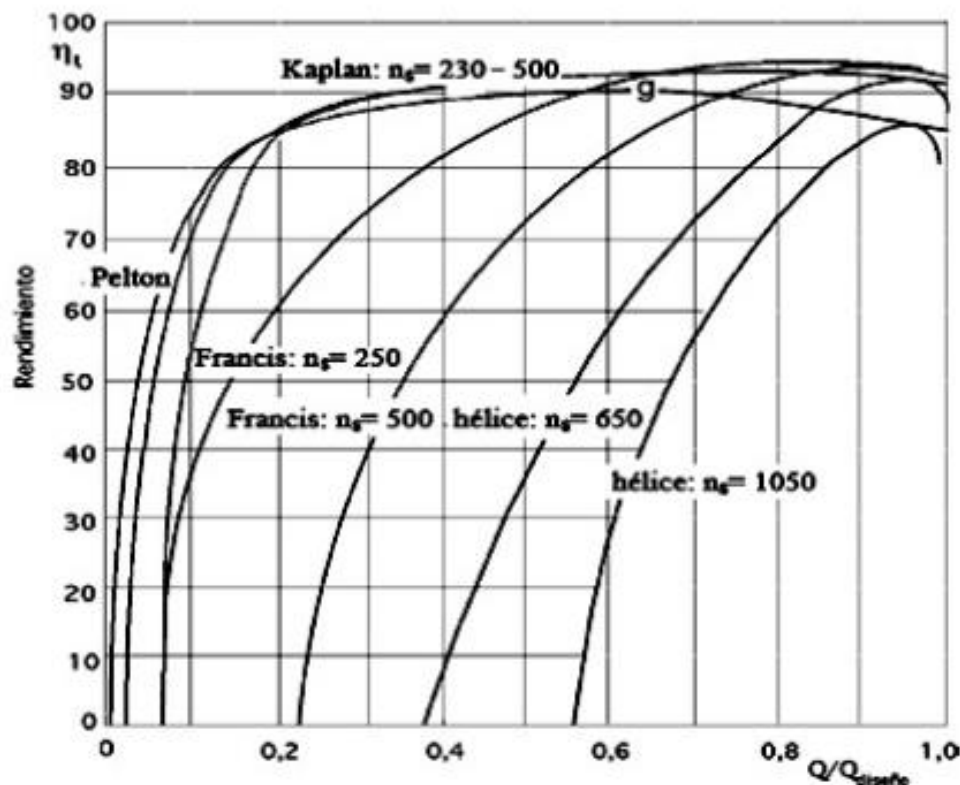


Gráfico 3: Rendimientos en turbinas para distintos regímenes de carga. [G³]

Distribuidor

El distribuidor es un dispositivo al que se hace referencia en todo tipo de turbinas, tanto de acción como de reacción, sin embargo, es en las segundas donde la complejidad y precisión de su diseño le otorga verdadero protagonismo.

Conocido también como *distribuidor Fink*, consta de un sistema de palas directrices distribuidas uniformemente sobre un anillo giratorio a la entrada del rodete que permite regular la entrada del flujo mediante su apertura y cierre. Su función es triple:

- ✓ **Regulación de caudal.** El control sobre el flujo permite regular la carga de la turbina y, por tanto, la potencia suministrada por esta.
- ✓ **Optimización del campo de velocidades.** Las paletas directrices orientan el flujo según convenga a la entrada del rodete. La modificación del ángulo de entrada y el módulo de la velocidad son aspectos fundamentales en el diseño y permiten además favorecer la entrada sin choque directo con los álabes y pérdida de carga.
- ✓ **Cierre progresivo.** El cierre del distribuidor es una buena manera de anular la carga sin golpe de ariete o evitar el embalamiento, pues su accionamiento, mediante servomotores, se realiza de manera progresiva.

Como se vio al presentar la Ec. 10, la potencia suministrada es función del caudal. Universalmente, los álabes orientables y la implementación de un distribuidor son los dos métodos empleados para regular el caudal y por tanto la potencia sobre la propia turbina. Todas las turbinas Francis y algunas turbinas Kaplan incorporan distribuidor, lo que supone una importante mejora en su rendimiento en diferentes condiciones de trabajo. Además, las turbinas Kaplan, al disponer de álabes orientables, disponen de dos herramientas de control de caudal, razón principal de sus excelentes curvas de rendimiento.

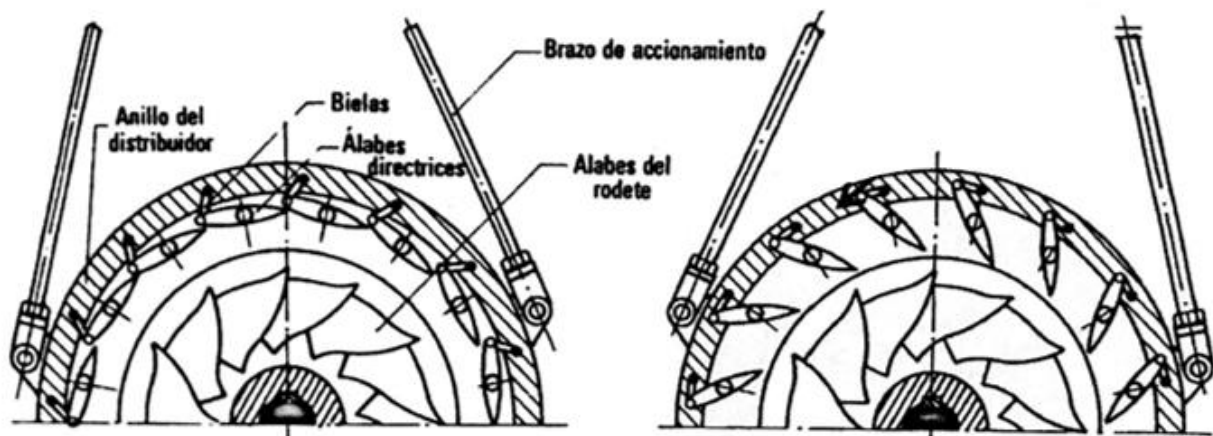


Ilustración 60: Representación de distribuidor Fink. [135]

Cámara espiral

La cámara o caja espiral es un elemento propio de las turbinas de reacción. Se trata de un conjunto de virolas o tramos de tubería soldados formando una espiral, comúnmente conocido como caracol o voluta. Su configuración es tal que la sección del conducto se reduce progresivamente, siendo la entrada la de mayor diámetro, acoplada a la tubería forzada y la de salida la de menor diámetro, desembocando en el distribuidor o antedistribuidor. En este último caso, antes de entrar en el distribuidor, el flujo es direccionado a través de una corona de álabes fijos con dicho nombre.

La cámara espiral posee dos funciones principales:

- ✓ Distribuir el caudal por toda la periferia del rodete, en muchas ocasiones dirigiéndolo con ayuda del antedistribuidor.
- ✓ Convertir parte de la energía de presión en energía cinética mediante el efecto tobera del conducto de sección decreciente.

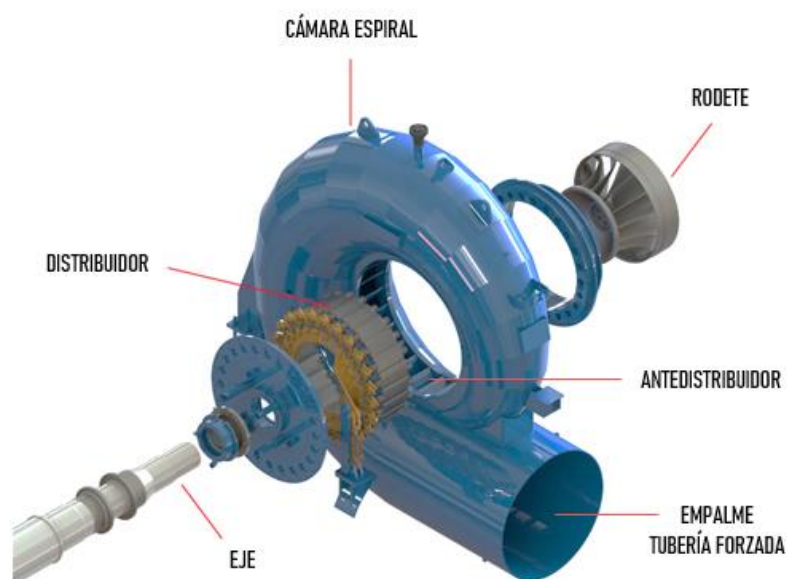


Ilustración 61: Cámara espiral de turbina Francis. [136]

Tubo de aspiración

Este elemento se presentó como parte de los *Sistemas de conducción* de una instalación hidroeléctrica, sin embargo, es habitual tratarlo como componente adicional de una turbina, pues además de tener un efecto inmediato en el comportamiento de esta, puede hallarse instalado de serie. Las funciones del tubo de aspiración no serán mencionadas en este apartado por haber sido expuestas en detalle con anterioridad.

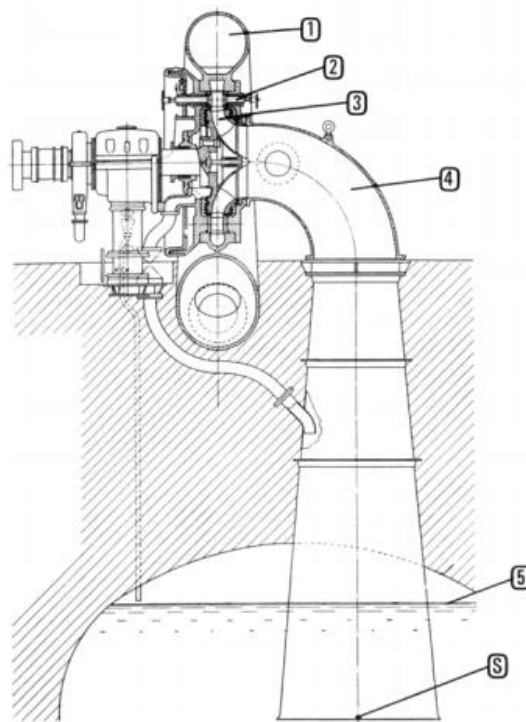


Ilustración 62: Vista de sección de turbina Francis con tubo de aspiración troncocónico. [135]

Inyector

Los inyectores son dispositivos propios de las turbinas de acción, especialmente las de tipo Pelton. Los conductos de distribución procedentes de la tubería forzada concluyen en una boquilla tobera de salida circular que proyectan un chorro de agua a gran velocidad sobre el rodete de la turbina para provocar su rotación. Los inyectores transforman las elevadas energías de presión en energía cinética mediante la reducción de su sección de salida y descarga a presión atmosférica. Además de la boquilla, constan de una aguja formada por un vástago y una cabeza esférico-cónica que regula la apertura del orificio de salida y, por tanto, el caudal.

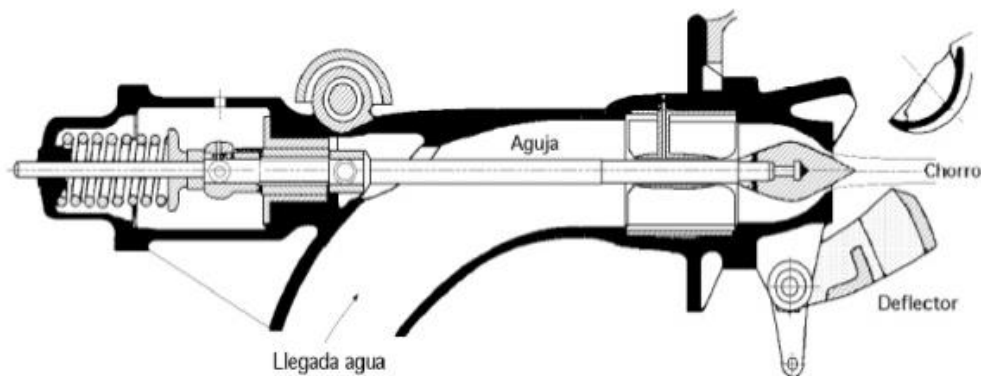


Ilustración 63: Vista de sección de inyector de turbina Pelton. [137]

Deflector

En cualquier instalación hidráulica, una obstrucción instantánea o rápida del caudal resulta frecuentemente en variaciones bruscas de presión en los sistemas de distribución y la tubería forzada, como consecuencia de la súbita disipación de la componente cinética de la energía que se transforma inevitablemente en energía de presión, en su mayoría. Estas variaciones originan sobrepresiones y subpresiones en diferentes ubicaciones del circuito hidráulico y pueden provocar daños considerables en los equipos.

Sin embargo, es frecuente que la interrupción del caudal deba realizarse de forma instantánea por motivos de generación. Para ello, los deflectores son elementos mecánicos instalados a la salida del inyector que ejercen de pantalla y obstruyen el chorro proyectado de forma prácticamente inmediata, permitiendo así el cierre progresivo de la aguja y evitando efectos indeseados en los sistemas de conducción. El accionamiento electromecánico de los deflectores, al igual que otros dispositivos de control de caudal, se realiza a través de sistemas de regulación de velocidad, que serán analizados en posteriores secciones.

En la *Ilustración 63* puede observarse la posición del deflector con respecto al inyector, así como su eje de rotación que permite regular el grado de apertura.

Eje motriz

El eje es el elemento responsable de transmitir la potencia mecánica del rodete al rotor del alternador. Casi en su totalidad, los ejes se fabrican en acero y requieren de elevadas prestaciones mecánicas y precisión en tolerancias. Además del propio eje, existen una serie de sistemas destinados a cumplir las siguientes funciones:

- ✓ **Sellado.** El eje es el elemento que necesariamente atraviesa la cámara de turbinado, ya sea una carcasa o una caja espira, por tanto, presenta un intersticio que favorece las fugas hidráulicas. Los sistemas de sellado son los responsables de maximizar la estanqueidad sin realizar contactos tan firmes que incrementen en exceso las pérdidas mecánicas por fricción. Las tecnologías actuales ofrecen cierres mecánicos, juntas de contacto y juntas para rodamientos que optimizan esta función y sustituyen progresivamente a otras técnicas como los cierres laberínticos y prensaestopas.
- ✓ **Centrado.** La alineación de los elementos rotatorios con respecto al eje de giro es uno de los aspectos fundamentales que influyen en el rendimiento, la fiabilidad y la longevidad de la instalación. Para ello, el eje se dispone sobre cojinetes y rodamientos guía de precisión, que transforman el deslizamiento relativo de rotación en un giro de rodadura que minimiza las pérdidas y aumenta la vida útil de los equipos. El número de cojinetes es variable y depende de las dimensiones del grupo. Además, sus características dependerán de la configuración de este, pues las turbinas de eje vertical, además de cojinetes guía, requieren cojinetes de empuje capaces de soportar las cargas axiales debidas al peso del conjunto.

- ✓ **Refrigeración.** La elevada eficiencia que presentan las turbinas hidráulicas en la actualidad son una prueba de las escasas pérdidas que producen durante su operación. Además de los aspectos mencionados anteriormente, la correcta refrigeración de los cojinetes, así como su lubricación, que en muchas ocasiones se realiza de manera simultánea mediante aceites lubricantes, favorecen el rendimiento y la durabilidad.

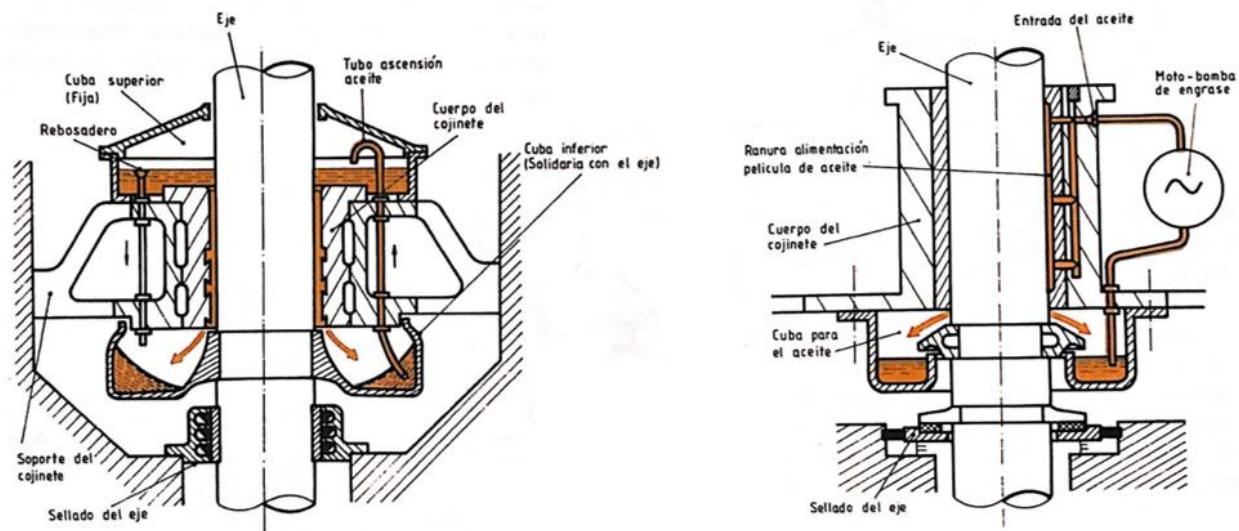


Ilustración 64: Sistemas de sellado y engrase por gravedad (izqda.) y presión (dcha.). [133]

Tipos de turbinas

Existe una gran variedad de modelos de turbinas hidráulicas en el mercado y resulta imprescindible conocer las características que las distinguen, así como los criterios empleados en la industria para su selección.

Para introducir la presente sección, se hará referencia al *Gráfico 4*. Este diagrama es de uso extendido y puede encontrarse con ligeras variaciones según el fabricante, siendo en todos los casos una herramienta rápida para descartar y/o seleccionar modelos generales de turbina. En este se representa el caudal en el eje de abscisas, la altura neta en el eje de ordenadas y la potencia instalada, con trazos discontinuos diagonales. El conocimiento previo de dos de estas condiciones permite conocer, de forma aproximada, la tercera variable necesaria para lograrlas. Para dichas condiciones se recomienda, de manera general, el tipo de turbina asociada que se deduce del diagrama. Así, por ejemplo, una primera selección en condiciones de gran salto y pequeño caudal llevaría al diseñador a valorar la turbina Pelton como primera opción. O bien, en caso de tratarse de una central de pequeña potencia o microcentral, el modelo sugerido sería el de flujo cruzado o tipo Michell-Banki.

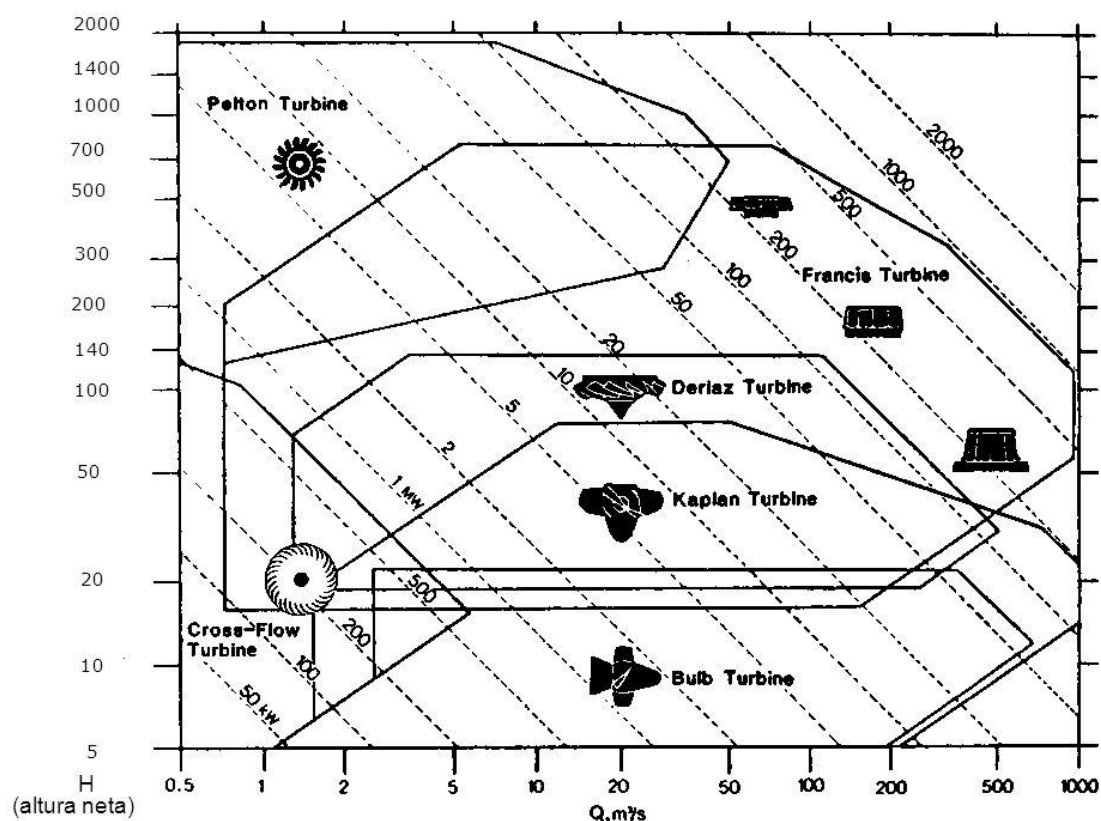


Gráfico 4: Diagrama de selección de turbinas caudal - altura. [G³]

A continuación se presentarán los principales tipos de turbinas hidráulicas, detallándose sus características constructivas particulares y usos principales. Algunos modelos que han quedado obsoletos con el tiempo o que por diversos motivos han sido descartados de antemano por factores condicionantes del proyecto serán obviados o mencionados someramente.

Turbina Francis

Las turbinas Francis son turbinas de reacción, admisión total y, por lo general, de flujo diagonal. Su uso está muy extendido debido a la versatilidad que ofrecen los diversos modelos para operar en amplios rangos de caudal y altura, para los que se clasifican en tres grupos, presentados en la *Tabla 8*.

TURBINAS FRANCIS SEGÚN ALTURA DEL SALTO

CATEGORÍA	SALTO [m]
Turbina Lenta	$H_b \geq 200$
Turbina Normal	$20 < H_b < 200$
Turbina Rápida/Extrarrápida	$H_b \leq 20$

Tabla 8: Clasificación de turbinas Francis según velocidad específica. [T⁵]

Tal y como se vio en el *Gráfico 3*, las turbinas Francis presentan excelentes rendimientos para cargas por encima del 60%. Al alcanzar valores próximos de diseño, el rendimiento de turbinas de gran potencia puede llegar al 95%.

Su configuración más habitual es de eje vertical, especialmente en centrales de gran potencia, mientras que las de eje horizontal se encuentran reservadas para centrales de baja potencia. Como una de sus principales ventajas es el amplio intervalo de operación, generalmente para saltos de entre 20 y 200 m de altura y caudales desde 2 a 200 m³/s.

Constructivamente, las turbinas Francis poseen una cámara espiral a la salida de la tubería forzada que distribuye el caudal por toda la periferia del rodete y transforma parte de la energía de presión en energía cinética. El distribuidor, a la salida de la cámara, regula la carga de la turbina y direcciona el flujo hacia la entrada del rodete en el sentido radial, saliendo el agua en el sentido del eje motriz por el tubo de aspiración. Por su parte, el rodete consta de una única pieza con un núcleo interior sobre el que se disponen los álabes curvados, fijados exteriormente mediante una llanta. Los denominados anillos intersticiales se colocan a presión en los extremos del rodete y aseguran el cierre hidráulico de la cámara de turbinado.



Ilustración 65: Rodete de turbina Francis. [138]

Una característica particular de las turbinas Francis es que, con frecuencia, se instalan por debajo del nivel del agua en el punto de descarga (nivel Z), por lo que se dice que están llenas, al existir siempre una columna de agua entre el nivel del embalse y el de salida. El motivo de esta configuración será explicado en posteriores secciones, al tratar los diferentes fenómenos resultantes de la conducción hidráulica.

Las *turbinas Dériaz* son, en esencia, turbinas Francis de álabes orientables.

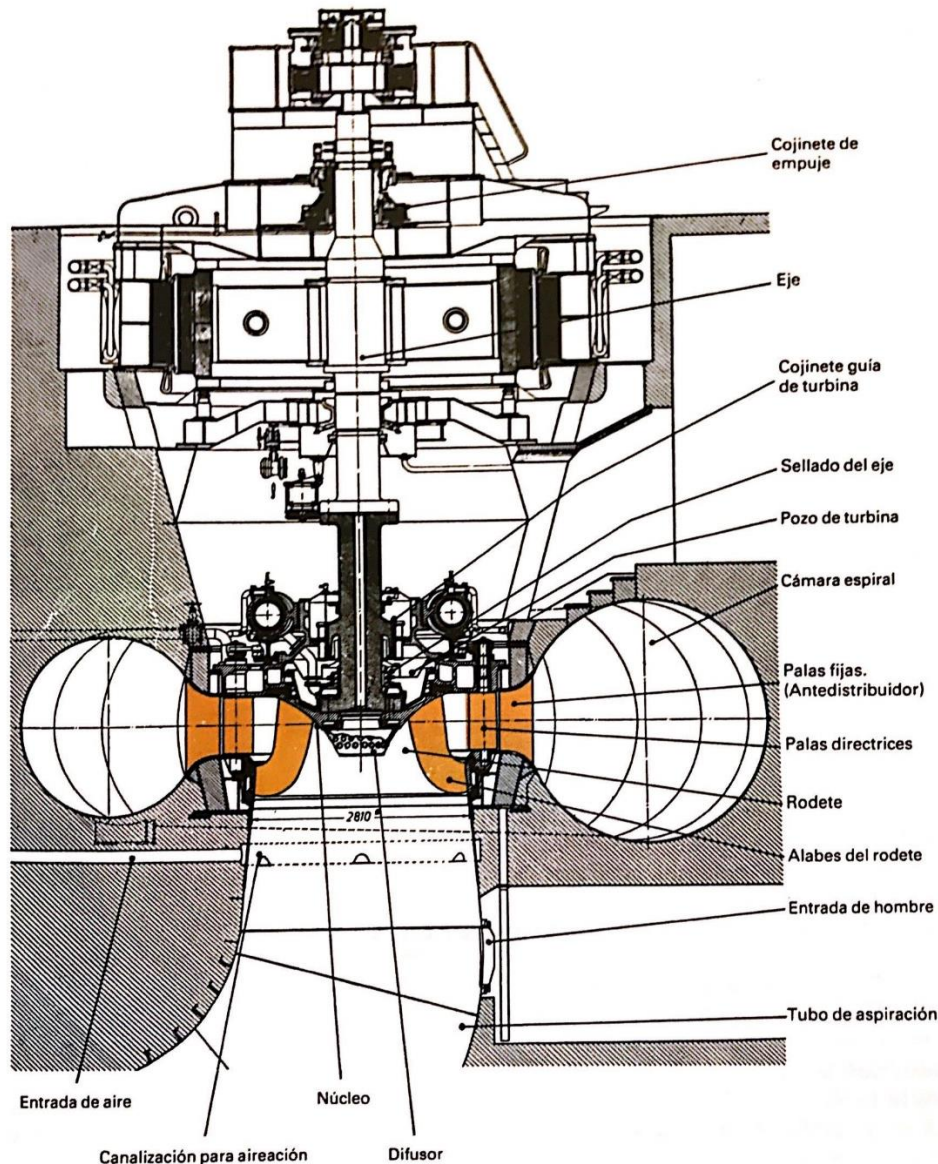


Ilustración 66: Configuración de turbina Francis de eje vertical. [133]

Turbina Kaplan

Son turbinas de reacción, admisión total y flujo axial. Al igual que las Francis, se encuentran tanto de eje vertical como horizontal, siendo el primero el más habitual y ambos modelos poseen principios de funcionamiento análogos.

Se emplean para saltos de altura reducida, inferior a 50 m y para grandes caudales, habitualmente superiores a 15 m³/s. Como se vio anteriormente, la combinación del distribuidor y los álabes orientables otorgan a las turbinas Kaplan elevados rendimientos para una gran variedad de condiciones de carga. Cabe destacar que las turbinas Kaplan son una variante de las clásicas *turbinas de Hélice*, nombre que reciben cuando los álabes se encuentran sólidamente unidos al cuerpo del rodete y no están dotados de libertad de rotación.

El rodete es el elemento que presenta mayor disimilitud con respecto al modelo previamente presentado, por estar compuesto de varias piezas y poseer una mayor complejidad mecánica. Morfológicamente similar a la hélice de un barco, dispone de entre 2 a 8 palas repartidas uniformemente alrededor del perímetro circular del cuerpo, instaladas sobre ejes rotatorios y accionados estos últimos por un servomotor. La orientación de las palas, así como la apertura del distribuidor (en caso de disponer de él), se controla de forma automática mediante un sistema regulador de velocidad que monitoriza la carga de la turbina durante su operación.



Ilustración 67: Rodete de turbina Kaplan de cuatro palas. [139]

Turbina Pelton

Se trata de turbinas de acción, admisión parcial y flujo tangencial cuya potencia es generada por la proyección de uno o varios chorros de agua a gran velocidad sobre las cucharas del rodete por medio de inyectoros. Se conocen también como turbinas de presión por encontrarse el flujo en todo momento a la misma presión sobre el rodete.

Su uso principal se realiza en instalaciones de grandes saltos, con alturas superiores a los 200 m y bajos caudales, en torno a los 10 m³/s. Presentan excelentes rendimientos, incluso con variaciones considerables de carga (hasta un 25% con respecto al caudal máximo) , presentando curvas similares a las turbinas Kaplan.

En cuanto a la posición del eje, dada la sencillez constructiva y la versatilidad de la admisión parcial, se pueden configurar con eje horizontal, vertical o incluso disponiendo varios rodetes sobre un mismo eje.

El principio de funcionamiento difiere notablemente respecto del de otras turbinas. La tubería forzada desemboca en una cámara de distribución que conduce el agua hasta los inyectores. Como se vio anteriormente, la sección del flujo se reduce en estos mediante una boquilla y válvula de aguja, lo que provoca una fuerte transformación de la presión del fluido en velocidad. El chorro es proyectado sobre las cucharas del rodete de forma perpendicular al radio del mismo, con respecto al punto de impacto. Por su parte, el rodete consta de dos elementos:

- **Rueda motriz.** Es el elemento circular unido rígidamente al eje por su diámetro interior, cuya periferia alberga las cucharas.
- **Cucharas.** También denominadas cangilones o álabes, pueden ser elementos independientes de la rueda para su fácil sustitución o formar parte de un mismo conjunto soldado, mecanizado o forjado. Deben disponer de una elevada resistencia mecánica, superficies pulidas para minimizar las pérdidas, una geometría que facilite la evacuación del chorro sin impactar sobre cucharas contiguas, disminuyendo la eficiencia y aberturas que permitan la proyección del chorro sobre las cucharas siguientes en el punto de máximo aprovechamiento.



Ilustración 68: Rodete de turbina Pelton. [140]

La *Ilustración 68* muestra la forma en doble u de las cucharas, con un filo intermedio que divide el chorro en dos partes y facilita su evacuación lateral por las superficies inclinadas. En el perímetro exterior, se practican aberturas que dan paso al chorro hacia la siguiente cuchara cuando la trayectoria de este es tangencial a su radio.

Como sistemas para la regulación de velocidad, los dispositivos medidores controlan diferentes elementos característicos, además de los comunes a otras turbinas como las válvulas de las tuberías de presión:

- **Aguja del inyector.** Se desplaza axialmente por el interior del inyector, regulando la apertura de la boquilla. El cierre se realiza de manera progresiva para evitar variaciones bruscas de presión y golpe de ariete.
- **Deflector.** Ejerce de pantalla física entre el inyector y el rodete para cortar total o parcialmente el chorro de forma inmediata, permitiendo el cierre gradual de la aguja.
- **Sistema hidráulico de frenado.** Circuito de agua derivado de la cámara de distribución que proyecta un chorro sobre las cucharas en sentido opuesto al giro del rodete, facilitando su rápido frenado.

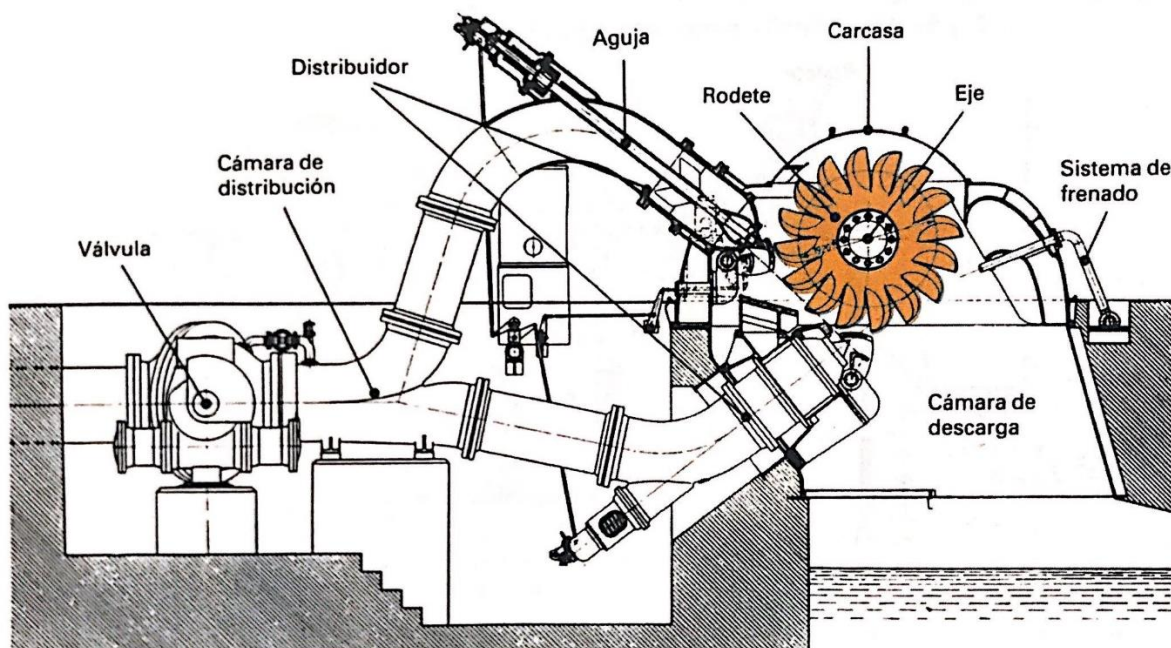


Ilustración 69: Esquema de componentes de turbina Pelton. [133]

Como característica adicional, la turbina Pelton no dispone de tubo de aspiración, pues el agua cae directamente sobre una galería o cámara de descarga a su salida de las cucharas. Frecuentemente, el fondo de la cámara se cubre con una capa de agua de pocos milímetros de espesor para evitar su deterioro con la constante proyección de agua.

Turbina Michell-Banki

Conocida mayormente como turbina de flujo transversal, esta turbina de acción es la más extendida en pequeños aprovechamientos hidráulicos por su sencillez, eficiencia y coste de instalación. Presenta buen rendimiento para amplios rangos de carga, siendo el máximo para pequeña generación de entre el 70 y el 80%, según autores y fabricantes.

Como turbina de acción y admisión parcial, presenta diferencias considerables respecto del modelo Pelton. El inyector se configura como una tubería de sección transitoria desde la entrada circular en la desembocadura de la tubería forzada y la boca de salida rectangular. El agua, que atraviesa el rodete en toda su longitud o parcialmente, fluye a través de los álabes y se proyecta nuevamente sobre la parte inferior de la rueda, entregando así la energía en dos etapas. Es por esto que también se denominan *turbinas de doble acción*. De forma orientativa, la transferencia de energía se realiza en un 70% durante la primera etapa y en un 30% durante la segunda.

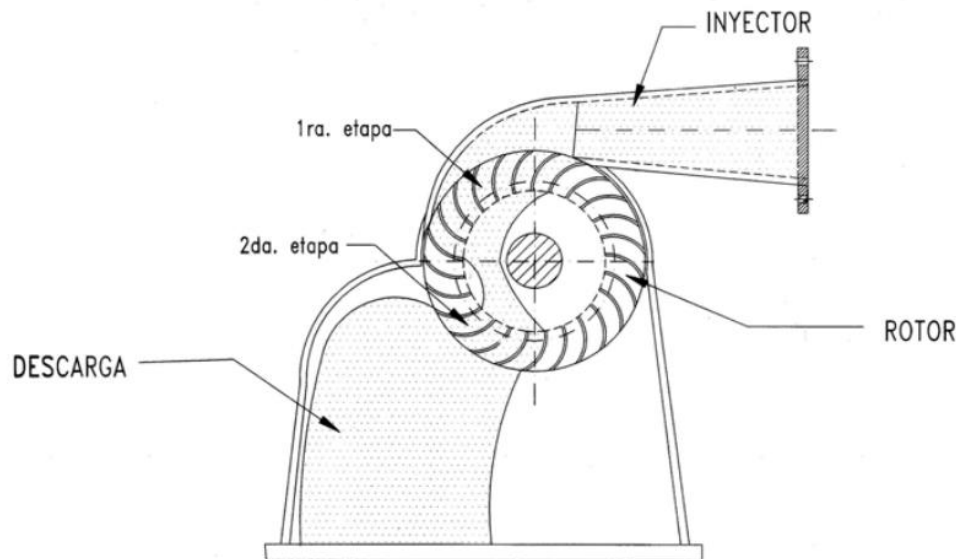


Ilustración 70: Esquema de turbina de flujo transversal. [141]

La tecnología desarrollada por la compañía Ossberger es la más extendida. La admisión de agua se puede realizar a través de varios compartimentos, inyectando agua en la totalidad del rodete o por sectores. Esto permite trabajar con cargas muy variables y obtener curvas de rendimiento muy planas, como las mostradas en el *Gráfico 5* para cada modo de admisión de la máquina.

Constructivamente no dispone de elementos particulares o complejos, por lo que la sencillez y robustez son dos virtudes destacables. El rodete se compone de álabes alargados fijados a dos discos en los extremos y reforzados con varios discos intermedios que se sueldan debidamente para aportar rigidez al conjunto.

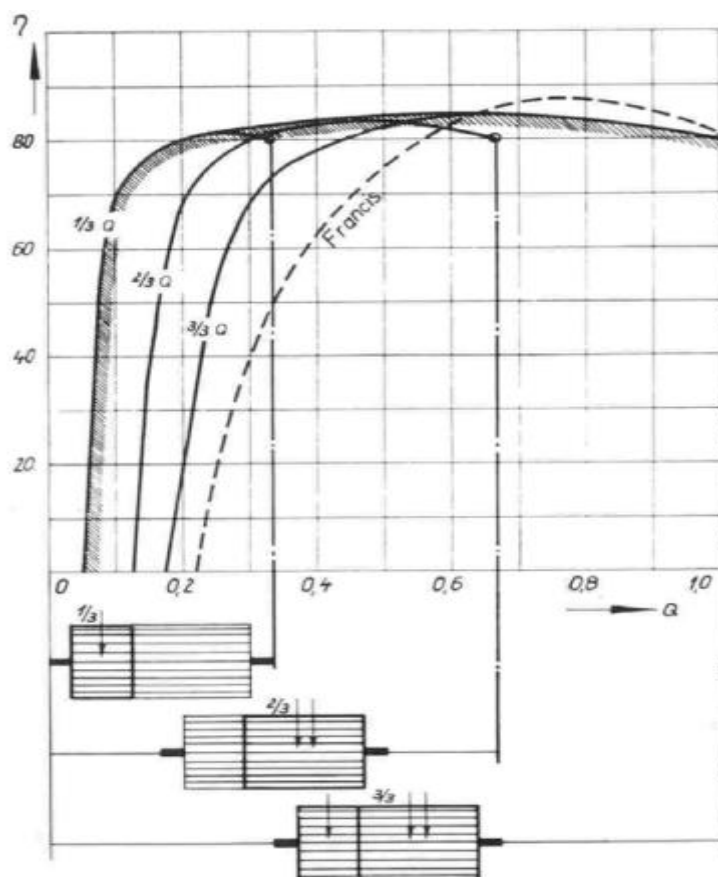


Gráfico 5: Rendimientos de turbina Michell - Banki para 3 modos de admisión. [G⁴]

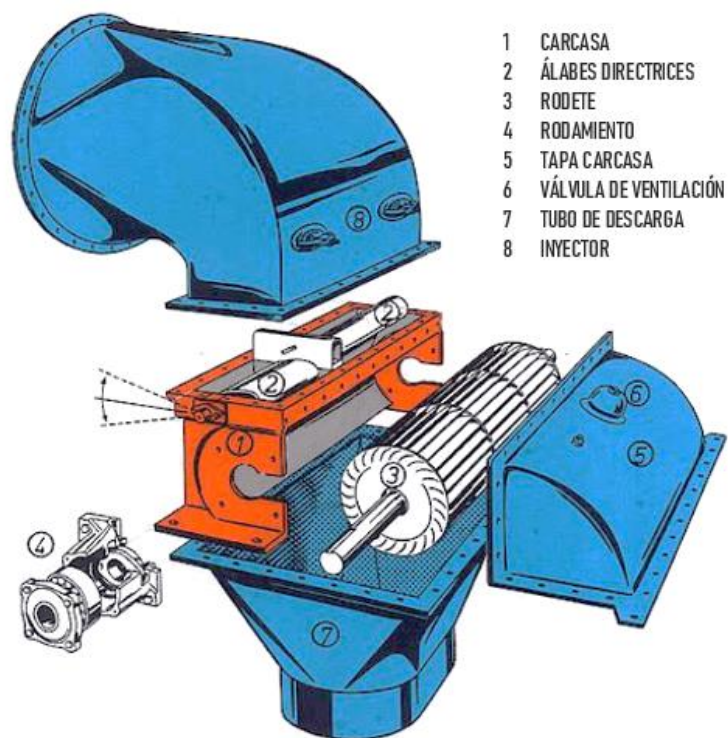


Ilustración 71: Elementos de turbina Michell - Banki con tecnología Ossberger. [I⁴²]

Turbina Turgo

Las turbinas de acción Turgo son de aplicación intermedia entre las Francis y las Pelton, para saltos de entre 15 y 300 m. Presentan un menor rango de condiciones de operación pero alcanzan rendimientos de en torno al 90% en algunos casos. A pesar de existir centrales de alta potencia operadas por turbinas Turgo, su uso está más enfocado a media y baja potencia.

El rodete de la turbina Turgo es aproximadamente medio rodete de Pelton y los inyectoros no impulsan el chorro en la dirección tangencial, sino que lo hacen con una cierta inclinación lateral. Los demás elementos de la instalación son prácticamente idénticos.



Ilustración 72: Rodete de turbina Turgo. [143]

Turbina Bulbo

Más que un tipo alternativo de turbina, los Bulbo son una configuración del grupo de potencia que integran en un mismo conjunto los elementos de generación: turbina, transmisión y alternador. Son muy empleados en centrales mareomotrices o instalaciones de pequeño salto y elevado caudal, por ello las turbinas que suelen incorporar son tipo Hélice o Kaplan y la dirección del flujo es axial.

El alternador se encuentra en el interior de una carcasa unida al rodete, de forma que el agua fluye sobre todo el conjunto. Cuando se trata de un grupo de grandes dimensiones, el bulbo dispone de las correspondientes entradas para el personal a través de pozos con perfil aerodinámico para no obstruir el flujo u ocasionar elevadas pérdidas hidráulicas.

En el *Gráfico 4* se muestran las condiciones recomendadas de funcionamiento para este tipo de turbinas. La altura del salto es muy reducida, para valores máximos de unos 20 m. Los caudales permiten mayor variación, sin embargo, cuando se reducen considerablemente, las turbinas de flujo transversal son más aconsejables.

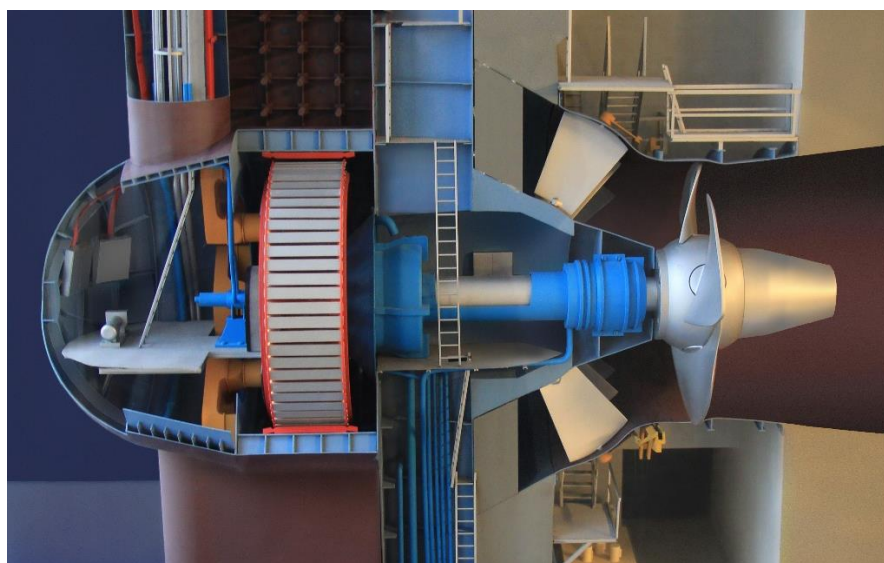


Ilustración 73: Grupo Bulbo. [144]

TABLA COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS GENERALES

TURBINA	TIPO	ADMISIÓN	FLUJO	EJE	ALTURA [m]	CAUDAL [m³/s]	COSTE	RENDIMIENTO
Francis	Reacción	Total	Diagonal	H / V	20 - 200	2 - 200	Alto	Bueno
Kaplan	Reacción	Total	Axial	H / V	< 50	> 15	Alto	Excelente
Pelton	Acción	Parcial	Tangencial	H / V	> 200	< 10	Medio	Excelente
M - B	Acción	Parcial	Tangencial	H	1 - 200	0,04 - 12	Bajo	Medio
Turgo	Acción	Parcial	Lateral	H / V	50 - 300	< 10	Medio	Bueno
Bulbo	Reacción	Total	Axial	H / V	< 20	> 10	Medio - Alto	Bueno

Tabla 9: Características generales en turbinas de uso extendido. [T¹]

Los valores presentados en la *Tabla 9* son orientativos y abarcan las características de uso y diseño más frecuentes en la industria, sin embargo, en la actualidad existe una gran variedad de productos y empresas del sector especializadas en la producción de máquinas para usos específicos cuyos intervalos de trabajo no coinciden con los mencionados.

El objetivo de la comparación y el análisis realizados es disponer de información sobre la que basar los criterios de selección a partir de las variables y las condiciones de contorno establecidas para llevar a cabo el proyecto.

Número específico de revoluciones

El *número específico de revoluciones* (n_s) es uno de los parámetros fundamentales de las turbinas hidráulicas que involucran las variables de diseño más importantes. La unidad corresponde a la velocidad de giro del rodete necesaria para, con una altura de salto de 1 m, producir una potencia mecánica de 1 CV. La siguiente formulación del número específico de revoluciones expresa esta misma definición sustituyendo la unidad de potencia por kW, por ser generalizada en el tratamiento de centrales hidroeléctricas:

$$n_s = n \frac{\sqrt{P_a}}{H^{5/4}} \quad (\text{Ec. 11})$$

donde n es la velocidad de giro del rodete, en r.p.m. El número específico de revoluciones tiene el mismo valor para turbinas geoméricamente semejantes operando en puntos de trabajo homólogos, esto es, de mismo rendimiento. Este parámetro permite identificar numéricamente una turbina, así como sus semejantes, por lo que es de gran relevancia en el campo del prototipado. Para agua como fluido de trabajo, la Ec. 11 puede formularse de la siguiente manera:

$$n_s = 3,65 \cdot n \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \sqrt{\eta_t} \quad (\text{Ec. 12})$$

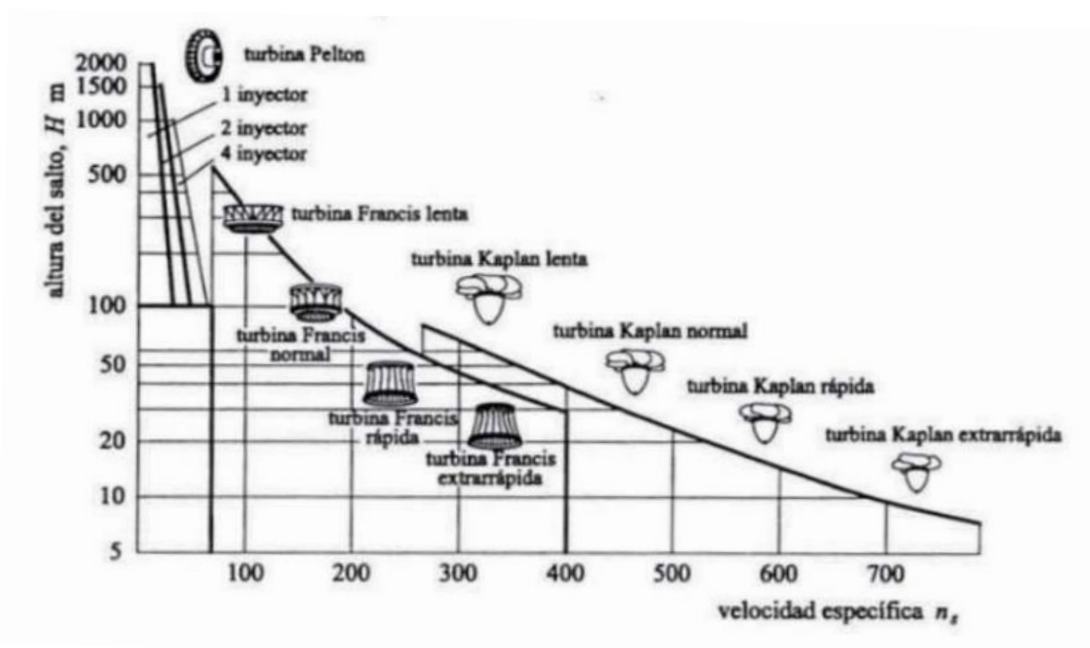


Gráfico 6: Diagrama de velocidades específicas para diversas turbinas. [G⁵]

El número específico de revoluciones proporciona un método sistemático para el dimensionamiento de turbinas hidráulicas, además de otra información relevante sobre los requisitos del grupo de potencia. La metodología a seguir será la siguiente:

1. Obtención o estimación aproximada de variables de diseño Q y H .
2. Estimación de la potencia instalada P_a tomando un valor de rendimiento razonable, dadas las características de la instalación.
3. Determinación de tipo de turbina y número específico de revoluciones a partir de *Gráfico 6*. Puede emplearse el *Gráfico 4* como herramienta comparativa en la selección del tipo de turbina, teniendo en cuenta que se trabaja en rangos de potencia muy bajos.
4. Cálculo de *régimen de giro* o *velocidad de rotación síncrona* (n) de la turbina a partir de la *Ec. 11* o *Ec. 12*.
5. Número de *pares de polos* (p) del generador eléctrico como función de la *frecuencia eléctrica* (f) y la velocidad de rotación, según la siguiente expresión:

$$n = \frac{60f}{p} \quad (\text{Ec. 13})$$

El número de pares de polos deberá redondearse a la cifra más próxima según la disponibilidad comercial, siendo esta habitualmente en múltiplos de dos o cuatro.

6. Con la velocidad de sincronismo se calcula nuevamente n_s , que entrando nuevamente en el diagrama permite hacer las correcciones sobre el salto y dimensionar la turbina.

El número específico de revoluciones es un parámetro dado por el fabricante de turbinas, por lo que el diseñador debe calcularlo previamente, acorde a las condiciones de operación.

En la *Tabla 10* se presentan las velocidades específicas para los distintos tipos de turbinas, así como los saltos asociados. Las turbinas con mayor n_s requieren elevadas velocidades de giro por unidad de generación, siendo destinadas al funcionamiento con grandes caudales y pequeños saltos. Estas son principalmente las turbinas de flujo axial, como Kaplan o Hélice.

Por otra parte, cuando el número específico de revoluciones de la turbina es bajo, para generar una unidad de energía se requiere una menor velocidad y saltos de gran altura. Las turbinas lentas son las Pelton y las de flujo radial, como algunas Francis o Dériaz.

Las turbinas Francis de flujo diagonal y Michell - Banki se sitúan en el término medio y sus rangos de velocidad son más amplios. Trabajan en condiciones intermedias a las anteriores en sus variantes normales, sin embargo, el modelo Francis se dispone desde velocidades lentas del carácter de las Pelton hasta rápidas como algunas Kaplan.

TURBINA	TIPO	VELOCIDAD ESPECÍFICA (n_s)	SALTO [m]
PELTON	1 Inyector	Hasta 18	800 o superior
		De 18 a 25	800 a 400
		De 26 a 35	400 a 100
	2 Inyectores	De 26 a 35	800 a 400
		De 36 a 50	400 a 100
		De 51 a 72	400 a 100
MICHELL - BANKI	-	De 60 a 200	200 a 1
FRANCIS	Extralenta	De 55 a 70	400 a 200
	Lenta	De 70 a 120	200 a 100
	Normal	De 120 a 200	100 a 50
	Rápida	De 200 a 300	50 a 25
	Extrarrápida	De 300 a 450	25 a 15
HÉLICE	Extrarrápida	De 400 a 500	15
KAPLAN	Lenta	De 270 a 500	50 a 15
	Rápida	De 500 a 800	15 a 5
	Extrarrápida	De 800 a 1100	5 o inferior

Tabla 10: Número específico de revoluciones para distintas turbinas. [T⁶]

Ecuación de las turbomáquinas

La ecuación fundamental de las turbomáquinas o *ecuación de Euler* permite describir el comportamiento de estas bajo hipótesis de flujo unidimensional, a partir del campo de velocidades del fluido. Esta teoría se basa en el supuesto de que toda partícula de fluido entra en el rodete a la misma velocidad, del mismo modo que a la salida. Para que estas circunstancias se pudiesen dar y todas las líneas de flujo se desviasen por igual, el rodete tendría que tener teóricamente un número infinito de álabes. Se dice entonces que el flujo estaría perfectamente guiado por los álabes.

En turbomáquinas generadoras, como bombas hidráulicas, la experiencia no concuerda con la aplicación de esta hipótesis al estudio del fluido, por lo que existe una relación entre la energía teórica con infinito número de álabes y la real, asumida por el denominado coeficiente de disminución de trabajo.

Sin embargo, el estudio teórico y experimental de las turbomáquinas generadoras ha demostrado concordancia, pues no se producen desprendimientos notables en las corrientes que atraviesan la turbina. El concepto de infinito número de álabes queda entonces descartado. La ecuación de Euler para turbomáquinas se formula de la siguiente manera:

$$H_u = \frac{u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}}{g} \quad (\text{Ec. 14})$$

o bien expresando en función de todas las componentes de la velocidad a la entrada y la salida de la turbina:

$$H_u = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} \quad (\text{Ec. 15})$$

En ambos casos, los términos corresponden a:

H_u es la altura absorbida por el rodete, en [m]. Este término representa la altura neta (H) menos las pérdidas hidráulicas (H_{r-int}) que tienen lugar en el interior de la turbina.

$$H = H_u + H_{r-int} \quad (\text{Ec. 16})$$

c_i es la velocidad absoluta del fluido en el punto i , en [m/s]

u_i es la velocidad absoluta del rodete en el punto i , en [m/s]

w_i es la velocidad relativa del fluido respecto del rodete en el punto i , en [m/s]

En cuanto a los subíndices de los términos de velocidades, que serán empleados en otros términos de cálculo, se establecen los siguientes en relación a la posición en la turbina:

1 representa el punto de entrada al rodete

2 representa el punto de salida del rodete

E representa el punto de entrada a la turbina

S representa el punto de salida de la turbina, con frecuencia $S \equiv Z$

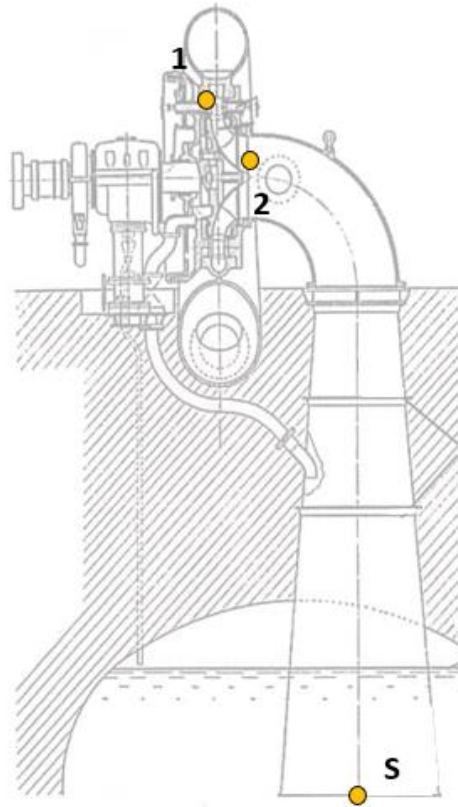


Ilustración 74: Ubicación de los subíndices de referencia. [135]

La ecuación de Euler describe la cantidad de movimiento del fluido y puede expresarse sencillamente en forma de potencia, sin embargo, la formulación de altura hidráulica es la más empleada por la facilidad de cálculo y lo intuitivos que se presentan los resultados en dicha unidad.

Las diferentes componentes de la velocidad del fluido serán analizadas en la sección de *Triángulos de velocidades*, así como los términos c_{1u} y c_{2u} de la Ec. 14 que no han sido descritos debidamente.

Triángulos de velocidades

Los triángulos de velocidades son una representación geométrica de los campos de velocidad del fluido, generalmente a la entrada y la salida del rodete, que se constituyen a partir de los módulos, direcciones y sentidos de dichas magnitudes.

Una vez presentada la ecuación fundamental de las turbomáquinas, resulta inmediata la dependencia de las características de velocidad del flujo sobre la potencia que el rodete es capaz de absorber y transmitir al eje. De esta forma, el diseñador persigue optimizar la trayectoria y el módulo de la velocidad a lo largo de los álabes variando diferentes aspectos constructivos de los mismos, como por ejemplo los ángulos de inclinación. El distribuidor es otro elemento destinado a generar las condiciones de flujo más favorables para mejorar la eficiencia.

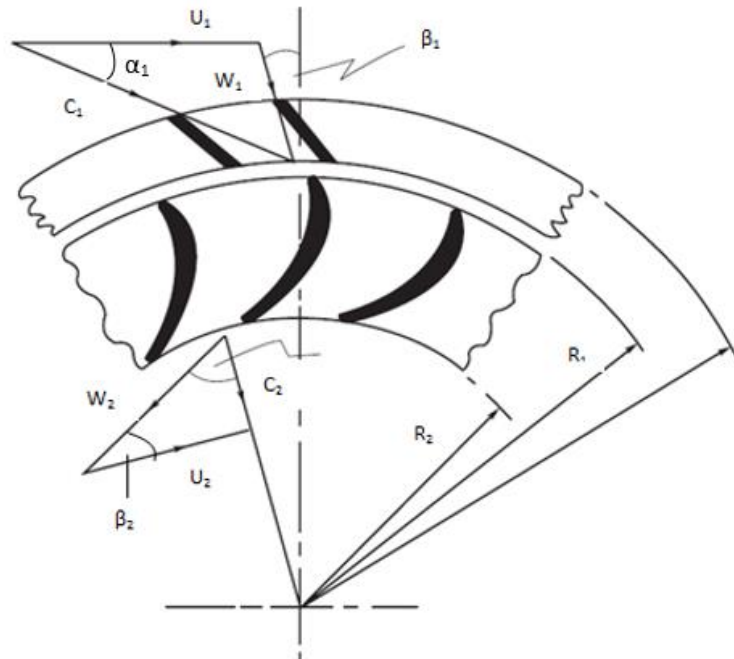


Ilustración 75: Triángulos de velocidades a la entrada y salida de turbina Francis. [145]

Tal y como se definieron en el apartado anterior, las tres componentes del triángulo representan la velocidad absoluta del fluido, la del rodete y la relativa del primero respecto del segundo. Además, los ángulos entre estas son de suma importancia desde la perspectiva del diseño y dan lugar a algunas proyecciones como el término c_{1u} o c_{2u} de la Ec. 14.

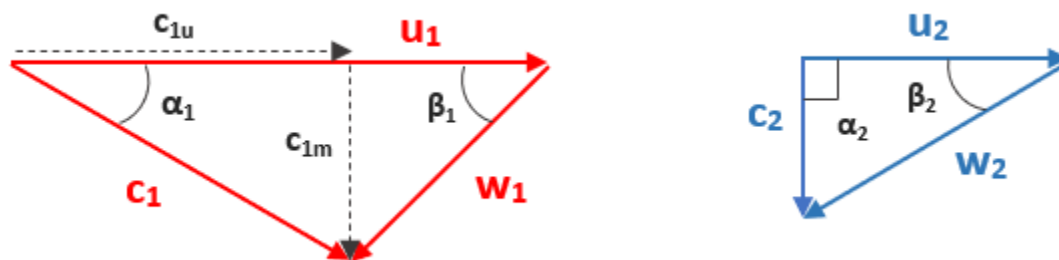


Ilustración 76: Posibles triángulos de velocidades en turbina de reacción. [18]

Si los triángulos no son únicamente cualitativos y se respetan las escalas, el de entrada deberá ser considerablemente mayor al de la salida, pues el fluido pierde la mayor parte de su energía al atravesar el rodete.

A partir de los triángulos ejemplo de la Ilustración 76, pueden establecerse las siguientes relaciones entre las componentes, siendo la primera de ellas la obtenida a partir de la velocidad de rotación del rodete:

$$u_i = n \frac{2\pi}{60} r_i \quad (\text{Ec. 17})$$

donde i es un punto cualquiera del rodete, habitualmente la entrada o la salida y r_i es el radio del rodete en dicho punto, en [m].

$$c_{iu} = c_i \cos \alpha_i \quad c_{im} = c_i \sin \alpha_i \quad c_i = \sqrt{c_{iu}^2 + c_{im}^2}$$

$$w_{iu} = w_i \cos \beta_i \quad w_{im} = w_i \sin \beta_i \quad w_i = \sqrt{w_{iu}^2 + w_{im}^2}$$

Además de estas, pueden establecerse otras relaciones basadas en teoremas trigonométricos para constituir los triángulos. Son de especial relevancia las proyecciones c_{iu} y c_{im} de la velocidad absoluta del fluido, puesto que:

- La componente periférica de la velocidad c_{iu} está directamente relacionada con el intercambio de energía en el rodete. El ángulo α_i es el ángulo de diseño cuya variación resulta en un mayor o menor módulo de dicha componente, por ser el ángulo sobre el que se proyecta la velocidad absoluta del fluido. Observando la Ec. 14 se deduce que cuanto mayor sea c_{1u} y menor c_{2u} , mayor será la altura absorbida por el rodete. En otras palabras, a mayor variación de la velocidad (por tanto, cantidad de movimiento), mayor es la energía que la turbina es capaz de extraer del fluido. De normal se busca que la velocidad absoluta (c_2) y la periférica (u_2) sean perpendiculares a la salida, de este modo la componente c_{2u} se hace nula.
- La componente meridional de la velocidad c_{im} está directamente relacionada con el caudal que atraviesa el rodete. La expresión que relaciona dicha componente de velocidad con el caudal es la siguiente:

$$Q_i = \pi d_i b_i \tau_i c_{im} \quad (\text{Ec. 18})$$

donde:

Q_i es el caudal que atraviesa el punto i , en [m³/s]

d_i es el diámetro del rodete en el punto i , en [m]

b_i es el ancho de sección del rodete en el punto i , en [m]

τ_i es el coeficiente adimensional de obstrucción, dependiente del espesor de los álaves

Regulación de velocidad

La regulación de velocidad de una turbina hidráulica es la acción de mantener constante dicha magnitud aun variando condiciones como la carga, la tensión eléctrica en la línea, etc. Si se diesen circunstancias de variación de carga sin un sistema de regulación, al aumentar esta la turbina reduciría su velocidad, llegando a pararse en casos límite o, al reducirse, la máquina podría sufrir embalamiento.

El motivo para mantener la velocidad de giro (n) a un valor constante es que la turbina ha sido proyectada en conjunto con el alternador, el cual dispone de un determinado número de pares de polos. La velocidad de giro del rotor condiciona, por tanto, la frecuencia eléctrica (f) de la corriente generada, que es característica de cada línea eléctrica. En la mayor parte de Europa o países de África como Zimbabwe o Sudáfrica, la frecuencia es de 50 Hz. La *Ec. 13* establece la velocidad de giro a partir de la frecuencia de la línea y el número de pares de polos.

Al tratar la variabilidad de carga, se recuerda de la *Ec. 10* que la única variable susceptible de ser controlada es el caudal, pues los demás términos son constantes o varían ligeramente sin suponer cambios notables en la potencia. Para regular el caudal existen numerosas técnicas, muchas de las cuales son particulares para cada tipo de turbina y han sido debidamente analizados en previas secciones. Por ejemplo, las turbinas Francis emplean el distribuidor Fink, las Pelton las válvulas de aguja en los inyectores o las Kaplan la orientación de los álabes.

La regulación de velocidad puede realizarse:

- **Manualmente.** Reservado para pequeñas instalaciones, requiere de un operario que permanezca constantemente en el centro de control.
- **Automáticamente.** Es el método preferido y más extendido. En grandes centrales la implementación de esta técnica es indiscutible.

El fabricante de turbinas analiza en detalle la capacidad de respuesta ante variaciones bruscas en la carga que no permitan modificar la velocidad de giro del rodete instantáneamente, debido en buena medida a la elevada inercia de este. Sin embargo, puesto que ello es objeto del diseño de turbomáquinas y que los grupos de potencia en microcentrales con frecuencia incorporan los sistemas de regulación automática, se realizará un breve análisis que permita conocer los fundamentos básicos.

Existen diversos tipos de reguladores, algunos de ellos puramente mecánicos y poco empleados en la actualidad y otros electromecánicos. En una primera evaluación, se distinguirán dos subsistemas:

- **Regulador.** Es el conjunto de elementos destinados a realizar una medición continua de la velocidad de giro del rodete y transmitir la señal a los mecanismos responsables de la propia variación del caudal.

- **Accionador.** Es el conjunto de mecanismos formado por válvulas, bielas, balancines, servomotores y otros elementos responsables de transmitir la señal del regulador a los distribuidores y sistemas de regulación de caudal.

El proceso llevado a cabo sería el siguiente:

1. Un generador de imanes permanentes es instalado sobre el eje motriz de la turbina, de modo que emite señales a una frecuencia proporcional al giro del eje.
2. La señal es recibida por el regulador o tacómetro, que compara esta con la de sincronismo del grupo.
3. La señal resultante de la diferencia medida es transmitida mecánicamente al actuador, compuesto generalmente por un circuito hidráulico de aceite.
4. Las válvulas del actuador, cuyo grado de apertura depende de la señal recibida por la diferencia de velocidades, dan paso al aceite a las cámaras del servomotor hidráulico.
5. La presión hidráulica en cada cámara del servomotor desplaza el pistón debidamente hacia un lado u otro.
6. El pistón, acoplado mecánicamente a la corona directriz del distribuidor, provoca su giro y el de las palas directrices, dando paso a un mayor o menor caudal.
7. La variación del caudal modifica la velocidad de giro del rodete y el proceso se repite de nuevo.

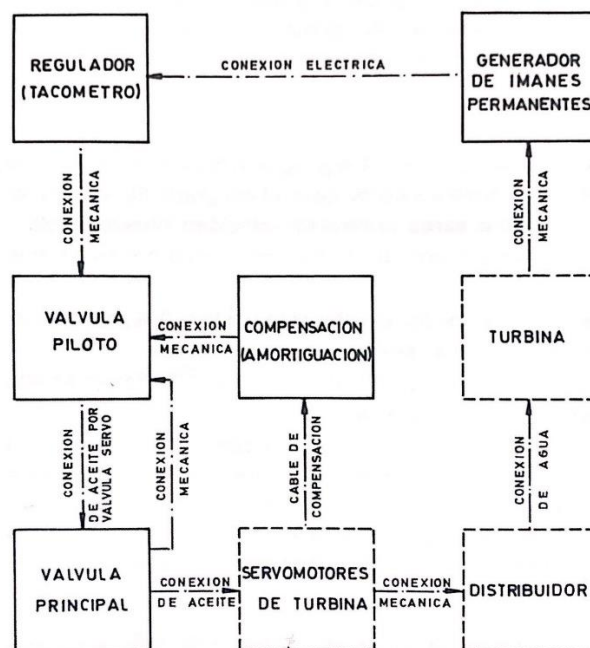


Ilustración 77: Esquema general de regulación de velocidad. [133]

Las turbinas Pelton y Kaplan disponen de sistemas de regulación más complejos, puesto que deben coordinar dos de ellos independientes. Las primeras, las válvulas de aguja y los deflectores y las segundas, las palas del distribuidor y el giro de los álabes del rodete.

Otras turbinas que no disponen de distribuidores y otros dispositivos específicos realizan procesos similares de regulación por medio de válvulas que gestionan el caudal que entra a la cámara de turbinado.

Pérdidas en la turbina

En la sección de *Rendimiento de la instalación* se exponían los tres tipos de pérdidas producidas en el proceso de generación. Las pérdidas hidráulicas tenían lugar en todo punto de la instalación como consecuencia de la conducción del fluido, incluyendo la turbina. Sin embargo, las pérdidas mecánicas y volumétricas eran exclusivas de los grupos de potencia. A continuación se presentan estas y la importancia de su determinación en términos de eficiencia y rentabilidad.

Pérdidas hidráulicas

Representan el término H_{r-int} de la Ec. 16 y expresan la diferencia entre la altura puesta a disposición a la entrada de la turbina y la absorbida por el rodete. Al igual que en el resto de la instalación, son la suma de las pérdidas de rozamiento por superficie (primarias) y forma (secundarias). Estas pérdidas son aportadas por el fabricante en forma de curvas de eficiencia, de forma que no son constantes para cada turbina, sino que dependen del régimen de trabajo.

Pérdidas mecánicas

Estas no afectan al rendimiento interno de la máquina y dependen de las características conjuntas del grupo de potencia, teniendo lugar en todo contacto entre mecanismos. Reducen la potencia mecánica disponible en el eje de la turbina y tienen lugar principalmente en:

- Cojinetes y rodamientos, por fricción en el deslizamiento relativo entre elementos giratorios. Se sitúan próximos al rodete y al rotor del alternador o como apoyos libres en la longitud del acoplamiento.
- Cierres mecánicos, juntas de sellado y otros dispositivos destinados a favorecer la estanqueidad de la cámara de turbinado. Estos tienden a presionar el eje y suponen un par resistente, por ello no deben disponerse con excesiva firmeza.
- Elementos de transmisión, en caso de que el acoplamiento entre ejes se realice de forma indirecta a través de multiplicadoras de velocidad, correas, etc. Cuanto mayor sea el número de mecanismos de transmisión, mayores pérdidas involucrarán.

- Dispositivos de accionamiento derivado de la potencia del eje, como por ejemplo sistemas de refrigeración, medición, etc.

Existen dos formas adicionales de degradación de la energía disponible que con frecuencia son incluidas como parte de las pérdidas mecánicas:

- **Por rozamiento de disco.** En el interior de cualquier turbomáquina hidráulica se produce un movimiento continuo del fluido de trabajo que ocupa todo el interior de la carcasa. En los intersticios existentes entre el rodete y las paredes estáticas, si bien el ideal sería que existiese un vacío, el fluido se acumula y el giro del rodete provoca una continua recirculación de este por la diferencia de velocidades entre los radios exteriores y los interiores.

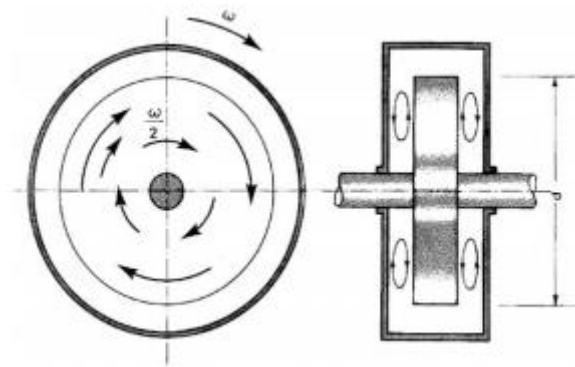


Ilustración 78: Recirculación del fluido en intersticios. [135]

- **Por ventilación.** Tienen lugar únicamente en turbinas de admisión parcial, como las de tipo Pelton. Son causadas por las salpicaduras de agua que tienen lugar al proyectarse el chorro sobre los álabes, que impactan en álabes contiguos o sobre la cubierta interior de la máquina, que rebotan en el rodete. También se producen por el rozamiento de los álabes con el aire circundante en la cámara.

La eficiencia mecánica es una característica aportada por el fabricante del grupo. De añadir elementos adicionales o variar algunos de los predeterminados, las pérdidas mecánicas deben medirse in situ.

Pérdidas volumétricas

Un cierre excesivo de la cámara de turbinado provocaría un exceso de pérdidas mecánicas, reduciendo considerablemente la potencia útil en el eje y el rendimiento. Por tanto, toda turbomáquina hidráulica involucra pérdidas en su caudal útil de manera inevitable.

En la actualidad, estas pérdidas han alcanzado valores extraordinariamente reducidos en turbinas. Si se define el rendimiento volumétrico como el cociente entre el caudal turbinado y el disponible a la entrada de la turbina, pueden lograrse valores por encima del 99%.

Se distinguen dos tipos:

- **Pérdidas interiores.** Representan la parte del caudal que no entrega su energía directamente al rodete, sino que fluye por los intersticios de la cámara y avanza hasta la salida. Las pérdidas volumétricas interiores provocan pérdidas por rozamiento de disco. La técnica más extendida para minimizar estas es por medio de cierres laberínticos, que presentan una elevada resistencia hidráulica.
- **Pérdidas exteriores.** Son aquellas que implican un escape del fluido entre el eje y la carcasa y salen al exterior. Se reducen instalando juntas en los contactos, prensaestopas o cierres mecánicos.

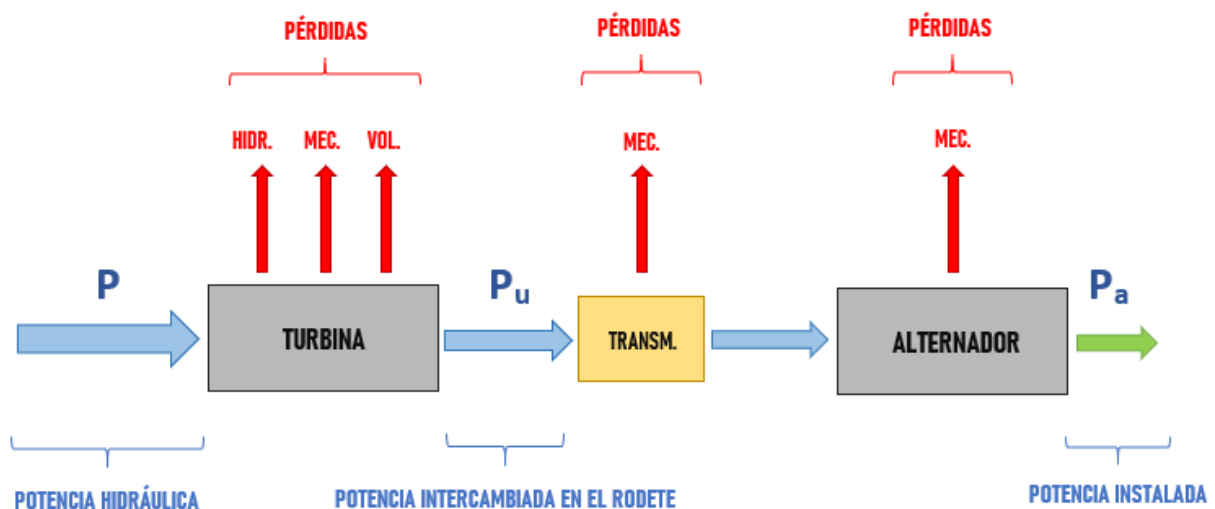


Ilustración 79: Esquema de potencias y pérdidas. [1¹⁸]

Fenómenos de conducción hidráulica

Con el fin de prevenir algunos de los fenómenos asociados a la conducción y generación que pueden tener efectos negativos en los diferentes elementos de la instalación, en la presente sección se analizarán las causas que los originan y los criterios de diseño empleados para su prevención.

Golpe de ariete

El golpe de ariete es un suceso que se origina como consecuencia de la apertura o el cierre brusco de elementos reguladores de caudal como válvulas, compuertas, etc. Cuando un fluido se desplaza a lo largo de una tubería, manteniéndose el caudal constante y se realiza un cierre poco progresivo, la energía cinética del flujo se ve repentinamente degradada y forzada a transformarse en energía de presión, resultando en:

- Sobrepresiones en el lado de la tubería aguas arriba, apareciendo tensiones positivas que tienden a deformar o quebrar el conducto por ensanchamiento excesivo. La sobrepresión se desplaza aguas arriba hasta el depósito de carga o el embalse.
- Depresiones en el lado de la tubería aguas abajo, apareciendo tensiones negativas que tienden a deformar o quebrar el conducto por aplastamiento. La depresión se desplaza por el conducto hasta que el fluido es evacuado.

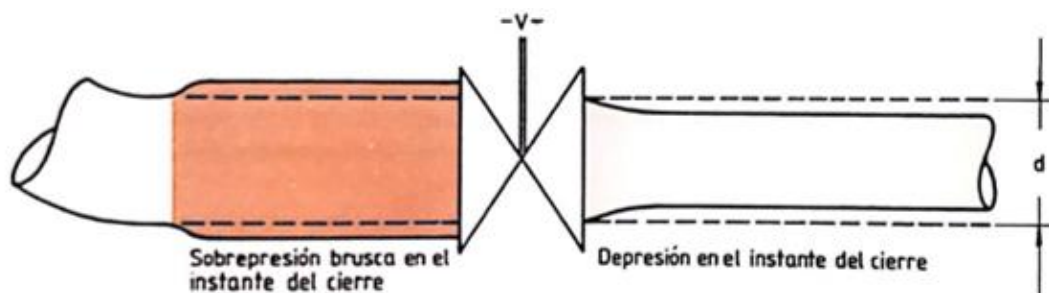


Ilustración 80: Deformación de tubería tras golpe de ariete. [1¹⁹]

Además de esto, el golpe de ariete puede provocar vibraciones y otros efectos indeseados que pueden provocar daños considerables, afectar al funcionamiento correcto de la instalación y provocar pérdidas económicas por reparación e inhabilitación temporal de esta.

La solución a este posible fenómeno es, en primer lugar, dotar de progresividad a todos los accionamientos responsables de la regulación del caudal y la velocidad del fluido. Como medida adicional, pueden preverse las ubicaciones del circuito donde puede acontecer e instalar tuberías de aireación, válvulas de seguridad o chimeneas de equilibrio.

Cavitación

La cavitación es el fenómeno hidráulico por excelencia, cuyo origen es menos sencillo de controlar que el golpe de ariete y que provoca daños severos en tuberías, álabes, etc. El efecto de la cavitación es, además del deterioro de la instalación, el aumento de las pérdidas, la disminución de la potencia y el rendimiento, la aparición de vibraciones y ruidos, etc.

Los flujos que atraviesan las conducciones de la instalación en puntos de baja presión favorecen la rápida evaporación y formación de burbujas de aire o cavidades. Esto sucede cuando la presión se reduce por debajo de la presión de saturación o presión de vapor. Después, cuando aumenta la presión, las cavidades implosionan y generan turbulencias o arrancan el material al que se encontraban adheridas.

En el estudio previo de la instalación para prevenir la cavitación se establecen dos coeficientes:

- El *coeficiente de cavitación de la instalación* (σ_{inst}). Depende única y exclusivamente de las características de la instalación. Se expresa como sigue:

$$\sigma_{inst} = \frac{\frac{p_{atm} - p_v}{\rho g} - z_x}{H} \quad (Ec. 19)$$

donde:

p_{atm} es la presión atmosférica, en [Pa]

p_v es la presión de vapor del fluido a la temperatura de trabajo, en [Pa]

z_x es la cota del punto de menor presión de la instalación, en [m]

- El *coeficiente de cavitación de la turbina* (σ_T). Este es idéntico para todas las turbinas geoméricamente semejantes trabajando en condiciones análogas. Se obtiene como:

$$\sigma_T = \frac{\frac{p_{atm} - p_v}{\rho g} - H_{s \text{ máx}}}{H} \quad (Ec. 20)$$

donde:

$H_{s \text{ máx}}$ es la altura de aspiración máxima, en [m]

La *altura de aspiración* (H_s) se obtiene como la diferencia de cotas entre la entrada del tubo de aspiración y el nivel del agua en la descarga. Nótese que se hace referencia al tubo de aspiración, puesto que las turbinas de acción no son susceptibles de experimentar el fenómeno de cavitación, pues este se origina de variaciones de presión considerables. La salida del rodete (2), considerada habitualmente como el mismo punto de entrada al tubo de aspiración, es el punto de menor presión y por tanto el más crítico. Entonces, la *altura de aspiración máxima* es el valor de H_s para el cual comienza a darse la cavitación. Debe cumplirse siempre:

$$\sigma_{inst} > \sigma_T$$

La condición anterior permite garantizar que en el punto seleccionado como crítico no tendrá lugar este fenómeno. Con frecuencia se establece un margen de seguridad en el diseño de la instalación para amparar inexactitudes de cálculo, tal que:

$$H_s = H_{s\,m\acute{a}x} - \text{margen seguridad}$$

Se dan dos casos en el estudio de la cavitación al proyectar la instalación:

- Para una turbina ya fijada (σ_T predefinido), se calcula el valor de $H_{s\,m\acute{a}x}$. Con ello se puede conocer cual es la altura mínima a la cual debe situarse la turbina con respecto al nivel inferior (Z).
- Para una instalación ya fijada (σ_{inst} predefinido), se determina la turbina que se debe instalar.



Ilustración 81: Efecto de cavitación en palas de hélice. [1⁴⁶]

Trabajos de referencia

Las pequeñas instalaciones renovables son un recurso cada vez más frecuente en el abastecimiento de comunidades rurales en las que no es viable tender líneas eléctricas, ya sea por razones económicas, geográficas, etc.

En esta sección se analizarán algunos trabajos llevados a cabo en el ámbito de la microgeneración hidroeléctrica como respuesta al aislamiento eléctrico de pequeñas poblaciones. Se valorarán especialmente los estudios realizados para la proyección, las tecnologías y criterios empleados, las condiciones de contorno, los costes involucrados y los resultados obtenidos. Con ello, además de conocer soluciones que ya han sido probadas, podrán preverse aspectos que hayan sido obviados a lo largo del estudio o determinar el estado de progreso del trabajo.

Se recuerda que el propósito del proyecto no consiste en llevar a cabo técnicas o tecnologías innovadoras, pues son factores extremadamente limitantes la economía y la necesidad de autonomía de la instalación, que permitan su funcionamiento prolongado con un mínimo nivel de mantenimiento y en las condiciones de trabajo previstas.

Microcentral de Pucará, Cajamarca (Perú)

Este proyecto fue llevado a cabo en el año 2010 por un alumno de la Universidad de Burgos, como resultado de su Trabajo de Fin de Grado, en colaboración con otras organizaciones como Ingeniería sin Fronteras y Soluciones Prácticas.

Pucará es una pequeña localidad de la provincia de San Pablo, en la región de Cajamarca (Perú). Dicha localidad se encontraba desprovista de suministro eléctrico y las administraciones locales solicitaron asistencia técnica para el estudio de implementación de la microcentral.

El territorio se encuentra a una cota elevada, por encima de los 3200 m de altitud. El terreno posee amplios desniveles y se encuentra principalmente cubierto de vegetación, debido a la humedad y el clima lluvioso, que alcanza en torno a los 1200 mm de precipitaciones anuales.

Para llevar a cabo el proyecto se llevaron a cabo estudios previos de carácter social, económico, topográfico, geológico, hidrológico, etc. La magnitud de los datos disponibles acerca de los factores influyentes es considerablemente superior a los manejados en el presente trabajo.

La microcentral, diseñada para abastecer a un total de 51 familias, además de pequeños comercios y alumbrado público, posee las siguientes características técnicas:

- ✓ Potencia instalada: 12 kW
- ✓ Salto bruto: 31,73 m
- ✓ Caudal fluvial: 0,5 - 41 m³/s
- ✓ Caudal de diseño: 0,08 m³/s

- ✓ Turbina Pelton de 1 inyector (eje horizontal)
- ✓ Velocidad nominal de rotación: 900 r.p.m.
- ✓ Características eléctricas: 220 V, 60 Hz
- ✓ Coste de la instalación: 48.320 €

Constructivamente, la microcentral consta de las siguientes características:

- ✓ Captación de caudal de agua fluyente con bocatoma en margen de río.
- ✓ Tubería de conducción de PVC de 1000 m de longitud hasta cámara de carga, con inclinación de 4 : 1000.
- ✓ Cámara de carga con desarenador, regulación de caudal y canal aliviadero.
- ✓ Tubería forzada de PVC reforzado y 115 m de longitud. Se instala libremente enterrada en zanjas subterráneas a poca profundidad y se ancla en los cambios de pendiente en 3 puntos hasta la casa de máquinas.
- ✓ Casa de máquinas de 30 m² construida en hormigón y ladrillo, contiene los grupos de potencia, paneles de control, transformadores y espacio para personal.
- ✓ Canal de descarga excavado sobre el terreno desde la casa de máquinas hasta el río sin obra de conducción.

Las diferencias más notables con respecto al análisis realizado y proyección de este trabajo son las siguientes:

- Terreno: el poblado de Kazai (Zimbabwe) se encuentra a una altitud muy inferior y posee escasos desniveles.
- Clima: el río Tabanas, del que se abastece la microcentral de Pucará, posee un caudal variable a lo largo de todo el año, sin llegar a secarse. En Kazai, durante la estación seca de invierno, el río no porta agua.
- Demanda: la demanda en Kazai es inferior, la población de la región se encuentra mucho más dispersa y no dispone de equipos como cocinas, calefacción, etc. El suministro se destina especialmente a servicios comunes como colegios y hospitales y sistemas de regadío.
- Organización: la organización territorial en Kazai es prácticamente nula y no existe una administración local supervisora que colabore en el desarrollo del proyecto.
- Costes: los costes son muy superiores a los asumibles, especialmente la instalación de conducciones supone casi un 40% del total de la microcentral de Pucará por realizar largos transportes de caudal.

Microcentral de Jinotega (Nicaragua)

En 2013 se llevó a cabo la obra de una microcentral hidroeléctrica en el municipio de San José de Bocay, en el departamento de Jinotega, al noroeste de Nicaragua. El objetivo fue llevar a cabo una instalación de 25 kW para abastecer a un total de 130 familias.

Al igual que la microcentral de Pucará, el terreno es de relieve irregular y el clima es húmedo y lluvioso, ampliamente cubierto por vegetación frondosa. Las características fundamentales de la instalación son:

- ✓ Potencia instalada: 25 kW
- ✓ Salto bruto: 68 m
- ✓ Salto neto: 58 m
- ✓ Caudal de diseño: 0,065 m³/s
- ✓ Turbina Turgo de 2 inyectores (eje horizontal)
- ✓ Características eléctricas: 240 V, 60 Hz
- ✓ Coste aproximado: 83.400 €

Características constructivas:

- ✓ Construcción de pequeña represa de 15 m de longitud y 2,2 m de altura en hormigón y reforzada con estructuras metálicas de parrilla.
- ✓ La tubería forzada parte directamente de los paramentos de la presa, precedida por una bocatoma de hormigón con rejillas para filtrar los sólidos en suspensión.
- ✓ La tubería de presión de PVC tiene una longitud total de 940 m, con tres reducciones de diámetro hasta la entrada en la cámara de distribución y los inyectores. Se encuentra enterrada en casi toda su longitud y con apoyos en ubicaciones de mayor presión y peso en suspensión de la tubería.
- ✓ La casa de máquinas es de construcción sencilla, de 32 m² de superficie, con ladrillos y base de hormigón. Se emplean vigas de madera para la sustentación del tejado formado por láminas de zinc.
- ✓ El equipo electromecánico consta de una transmisión por correa, ya que la velocidad nominal del generador síncrono es de 1800 r.p.m., superior a la de giro de la turbina.
- ✓ El equipo no dispone de sistema de regulación automático de velocidad, los accionamientos son manuales. Incorpora un dispositivo electrónico con carga de lastre para destinar la energía excedente generada al calentamiento de tanques de agua.

Las diferencias presentadas son similares a las descritas en el apartado anterior. Las condiciones de trabajo de la central de Jinotega favorecen los grandes saltos y el aprovechamiento hidráulico permanente a lo largo del año. Además, la potencia doble de esta central respecto de la microcentral de Pucará implica también el doble de costes, por lo que analizar las partidas de los diferentes elementos de los proyectos servirá para conocer de forma orientativa cuáles son más propensas a incrementar el presupuesto necesario.

Algunas conclusiones extraídas del análisis de estos trabajos:

- ✓ La obra puede llevarse a cabo sin técnicas excesivamente complejas y costosas, es importante planificarla correctamente, así como los recursos y mano de obra necesaria para su desarrollo.
- ✓ Es importante realizar una proyección flexible que permita asumir modificaciones durante la fase de obra, algunas condiciones no son conocidas de antemano o son cambiantes e influyen en el plan establecido.
- ✓ Algunas tecnologías y materiales son muy comunes entre este tipo de instalaciones. Se emplean principalmente turbinas de acción, las obras civiles se llevan a cabo de la manera más básica con materiales baratos (ladrillo, hormigón, arena, etc.), las conducciones se realizan casi en su totalidad en PVC, pues presenta excelentes características de resistencia mecánica, baja fricción y coste reducido.
- ✓ Los materiales se adquieren, en la mayor medida posible, en comercios e industrias locales, pues además de favorecer la economía, se hacen partícipes del proyecto a otros miembros de la comunidad y suelen ser baratos.
- ✓ La comunicación con la población y el personal de obra es un aspecto fundamental para el correcto desarrollo del proyecto y para realizar un uso posterior responsable y prolongado de la instalación.



Ilustración 82: Represa y tubería de presión, microcentral de Jinotega. [147]



Ilustración 83: Presa vertedero, microcentral de Jinotga. [I⁴⁷]



Ilustración 84: Equipo electromecánico, microcentral de Jinotega. [I⁴⁷]

Variables de diseño

A lo largo del documento se han descrito las características generales y particulares de las centrales hidroeléctricas, así como las variables y parámetros que han de determinarse para comenzar a dimensionar los equipos.

Tomando como punto de partida toda la información que ha sido posible recopilar acerca del área de trabajo, en esta sección se buscará la convergencia entre las necesidades energéticas que han dado lugar al presente trabajo y las condiciones en que este tendrá lugar. Este estudio servirá de base para los cálculos de la instalación y permitirá delimitar el espacio de alternativas.

Estimación de la demanda energética

Para acotar la zona de trabajo se ha establecido un área de influencia de la central sobre la que se disponen los núcleos familiares y los emplazamientos que deben recibir suministro eléctrico. El propósito del proyecto no consiste en electrificar el área completa, llegando a todos los hogares, sino abastecer a determinados edificios y sistemas de gran peso en el desarrollo de la comunidad. Para comprender la posible demanda eléctrica actual y futura, se definen las diferentes construcciones e infraestructuras:

- **Village:** las familias, generalmente numerosas, habitan en pequeños complejos formados por tres elementos independientes y próximos entre sí:
 - *Vivienda:* pequeño inmueble de superficie cuadrada o rectangular donde duerme la familia. No posee ningún tipo de equipamiento ni facilidad.
 - *Cocina:* edificio circular construido principalmente con adobe y paja, empleado como espacio de reunión familiar y en cuyo centro se disponen los utensilios para la cocina con fuego. Es el lugar de mayor importancia de la village.
 - *Letrinas:* lugar de aseo y acumulación de deposiciones humanas, generalmente en condiciones poco higiénicas e insalubres.

En la *Ilustración 85* pueden observarse dos núcleos familiares y la distribución de la *village* con los tres inmuebles principales.

- **Clínica médica:** su construcción se llevará a cabo paralelamente a la instalación. Estará ubicada a 150 m del embalse y servirá para dar asistencia médica a la comunidad. Tendrá dimensiones aproximadas de 12 x 9 m y los siguientes habitáculos:
 - Sala de espera y recepción
 - Sala de consultas

- Sala de curas
- Sala de parto
- Sala de postparto

El suministro de agua no requerirá a priori de electricidad, pues se realizará por gravedad desde un tanque situado a una cota superior al emplazamiento.

- **Colegio infantil:** cuenta con dos aulas grandes y dos salas para profesores. Se pretende iluminar además la zona exterior.
- **Escuela técnica de agricultura.**
- **Sistemas de regadío:** consta de dos bombas para el riego de campos de cultivo situados próximos al embalse. Se prevé que las instalaciones de irrigación puedan aumentar en los próximos años como inversión en el crecimiento de la principal actividad económica de la comunidad.

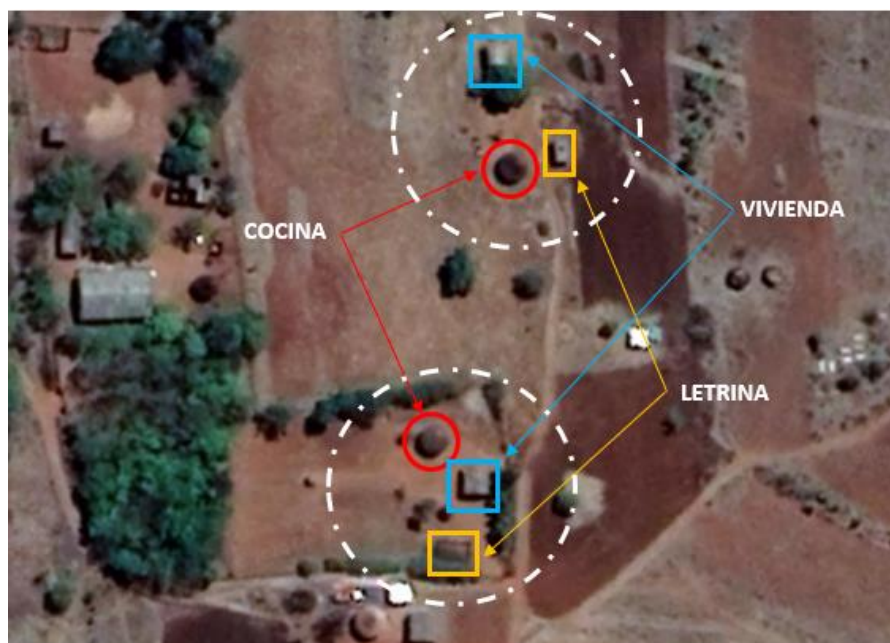


Ilustración 85: Villages de dos núcleos familiares en Kazai. [I⁴⁸]

Con el fin de realizar una planificación a medio plazo, se analizará la posible demanda de iluminación del área de influencia establecida, con una superficie aproximada de 1 km² y un perímetro de 5,25 km. No se contemplan consumos como electrodomésticos, cocina eléctrica, calefacción y otros, puesto que estos disparan los niveles de demanda y requieren de instalaciones mayores e inversiones muy superiores a las admisibles. Se tendrán en consideración los siguientes aspectos:

- La iluminación total del área poblada de influencia es inviable, debido a los elevados costes implicados en el tendido de líneas de suministro. Sin embargo, se realizará la correspondiente estimación con el fin de dar pie a nuevos proyectos de desarrollo en la aldea de Kazai.
- Se llevará a cabo una instalación cuya capacidad de generación será superior a la demanda para la que estará proyectada. El objetivo será disponer de una fuente de energía ya existente para futuros proyectos orientados a ampliar las redes eléctricas.
- La sobreproducción eléctrica deberá permanecer en márgenes razonables con el fin de no suponer una excesiva pérdida de eficiencia de la instalación durante su periodo de funcionamiento para las condiciones de demanda actuales.

En cuanto a los criterios para la estimación de la demanda, se siguen los siguientes:

- Las villages se encuentran dispersas en los alrededores del embalse, situadas a distancias de entre 100 y 1000 m. De media, las distancias al embalse son de unos 400 m. Las viviendas y las cocinas son diáfanas y sus superficies aproximadas son de 20 - 35 m², por lo que pueden alumbrarse con una o dos lámparas de bajo consumo. Se calculan aproximadamente 68 viviendas y 64 cocinas.
- La clínica médica dispone de 5 salas pequeñas. La sala de curas y la de parto requieren de mayor iluminación que las otras, por lo que se preverá el uso de lámparas de mayor potencia. La iluminación exterior debe permitir la visibilidad nocturna del edificio.
- Los sistemas de riego están accionados por dos bombas, cuya potencia media es de 800 W por unidad. Se estima la instalación de 2 nuevas bombas para el suministro de otros campos de cultivo próximos.
- El colegio infantil dispone de dos aulas de una superficie aproximada de 40 m² cada una, además de dos salas de profesores y el recinto exterior. La iluminación se realizará preferiblemente con lámparas de bajo consumo para favorecer un alumbrado más homogéneo, empleando fuentes más distribuidas.
- Un aspecto interesante es el alumbrado exterior de caminos que conectan los edificios más importantes y los núcleos de villages principales. Se emplearían focos LED resistentes a la humedad y el agua separados lo suficiente para asegurar la visibilidad y minimizar el número de fuentes.
- En la clínica, el colegio y la escuela podrían instalarse un reducido número de ordenadores, cuyo consumo medio es de 180 W. Especialmente en los dos últimos, su uso se realizaría durante el día, por lo que no interferiría con la mayor parte de la carga debida al alumbrado.

EMPLAZAMIENTO	NÚMERO	CONSUMO UNITARIO [W]	CONSUMO TOTAL [W]
<i>Vivienda</i>	68	20	1360
<i>Cocina</i>	64	25	1600
<i>Letrina</i>	20	12	240
<i>Clínica médica</i>	1	360	360
<i>Colegio infantil</i>	1	270	270
<i>Escuela técnica</i>	1	270	270
<i>Bombas de riego</i>	4	800	3200
<i>Alumbrado exterior</i>	110	15	1650
DEMANDA TOTAL			8950

Tabla 11: Demanda mínima estimada en los próximos 5 años. [T¹]

La Tabla 11 muestra el desglose de potencia requerida para la iluminación completa del área de influencia en los próximos años. Si la demanda estimada es de 8,95 kW, teniendo en cuenta unas pérdidas del 10% en líneas de transporte eléctrico y transformadores, la potencia instalada requerida sería de:

$$Demanda \cdot 1,1 = 9,85 \text{ kW}$$

Es decir, la microcentral a desarrollar debería tener una capacidad útil de 10 kW. Sin embargo, la realidad es que la mayoría de esta demanda está proyectada a futuro, por lo que instalar tal potencia implicaría un funcionamiento a muy bajo rendimiento de la instalación en los primeros años, además de costes considerablemente mayores. La demanda actual para la que se solicita el proyecto se refleja en la Tabla 12.

EMPLAZAMIENTO	NÚMERO	CONSUMO UNITARIO [W]	CONSUMO TOTAL [W]
<i>Colegio infantil</i>	1	270	270
<i>Clínica médica</i>	1	360	360
<i>Bombas de riego</i>	2	800	1600
DEMANDA TOTAL			2230

Tabla 12: Demanda actual a cubrir. [T¹]

Realizando el mismo cálculo sobre la demanda actual, se obtiene que la instalación necesaria debe tener una capacidad final de **2,5 kW**, lo cual supone un 25% de la demanda total proyectada para los próximos años.

Al analizar las demás variables de diseño y predimensionar los equipos, se valorará el intervalo de potencia entre la demanda actual y la futura en términos de eficiencia, costes, etc. El objetivo final será instalar tanta potencia como sea posible siempre que las características del área de trabajo, los presupuestos y el rendimiento en condiciones inferiores a las nominales sean asumibles.

Estimación del salto bruto

Con el fin de estimar la pendiente del cauce aguas abajo desde la presa se han tomado muestras discretas de diferentes cotas y su respectiva distancia hasta la obra del embalse. Con ello se pretende establecer una relación entre el potencial hidráulico disponible y el coste de instalación para su aprovechamiento.

Para ilustrar lo anterior, la topografía del terreno admite saltos de altura considerables, sin embargo, para obtener un salto de 20 m, el mínimo en línea recta es de 330 m. Teniendo en cuenta la derivación del caudal y el trazo de la tubería forzada desde un posible depósito de carga, la conducción superaría los 400 m de longitud. Esto implica mayores costes de obra y material. El *Gráfico 7* permite realizar una primera aproximación de la relación mínima entre potencial explotable y coste de los sistemas de conducción, los cuales suponen un elevado porcentaje del presupuesto en instalaciones de baja potencia.

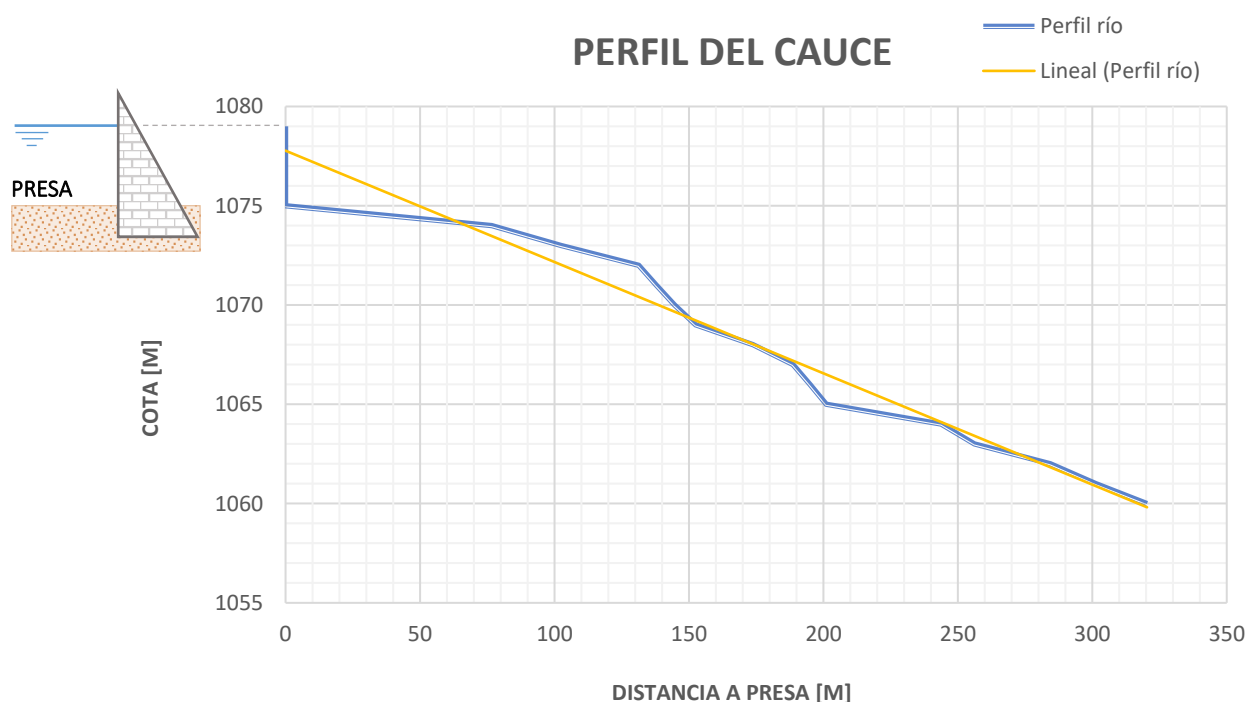


Gráfico 7: Perfil del cauce aguas abajo. [G⁶]

Realizando una interpolación lineal de las muestras se obtiene la recta amarilla del *Gráfico 7*, útil para determinar la longitud mínima de tubería, suponiendo que esta fuese paralela al trazado medio del cauce.

Distancia a presa [m]	Cota [m]	Potencial [kW]	Coste aprox. [€]	Δ coste rel. [%]	Δ coste / ΔP [€/kW]
0	1079	0	0,00	-	-
0	1075	$39,24 \cdot Q$	0,00	-	-
76,7	1074	$49,05 \cdot Q$	613,60	-	-
102,36	1073	$58,86 \cdot Q$	818,88	+ 33,45	20,93
131,36	1072	$68,67 \cdot Q$	1050,88	+ 28,33	23,65
137,86	1071	$78,48 \cdot Q$	1102,88	+ 4,95	5,30
144,66	1070	$88,29 \cdot Q$	1157,28	+ 4,93	5,55
152,56	1069	$98,10 \cdot Q$	1220,48	+ 5,46	6,44
173,86	1068	$107,91 \cdot Q$	1390,88	+ 13,96	17,37
188,66	1067	$117,72 \cdot Q$	1509,28	+ 8,51	12,07
194,96	1066	$127,53 \cdot Q$	1559,68	+ 3,34	5,14
201,06	1065	$137,34 \cdot Q$	1608,48	+ 3,19	4,97
243,86	1064	$147,15 \cdot Q$	1950,88	+ 21,28	34,90
256,16	1063	$156,96 \cdot Q$	2049,28	+ 5,04	10,03
284,36	1062	$166,77 \cdot Q$	2274,88	+ 11,00	23,00
301,36	1061	$176,58 \cdot Q$	2410,88	+ 5,98	13,86
320,36	1060	$186,39 \cdot Q$	2562,88	+ 6,3	15,49

Tabla 13: Valores asociados a las cotas. [T¹]

En la *Tabla 13* se presentan los costes mínimos asociados a instalaciones de conducción para saltos de altura cada vez mayor. Para ello, tomando como referencia el precio de venta de tuberías hidráulicas de presión de PVC de calidad media en Zimbabwe y los costes de instalación (para los cuales se han asumido ligeramente inferiores a trabajos similares), se estima un coste de 8 €/m de tubería. En el análisis no se contemplan otros elementos tipo desarenadores, depósitos de reunión, cámaras de carga, etc. por no ser costes variables, sino independientes de la magnitud de los sistemas de conducción.

Se presentan además los incrementos de coste relativos y los incrementos de coste respecto de las variaciones de potencia. Estas últimas se han tomado constantes, por considerarse del mismo modo el caudal y la amplitud entre muestras de cota. Dicha relación se encuentra representada en el *Gráfico 8*.

En todo caso, los costes reales serán incrementados lo correspondiente a la desviación de las líneas hidráulicas con respecto a la supuesta trayectoria rectilínea del río, tomando como presupuesto base el mínimo indicado en la *Tabla 13*.

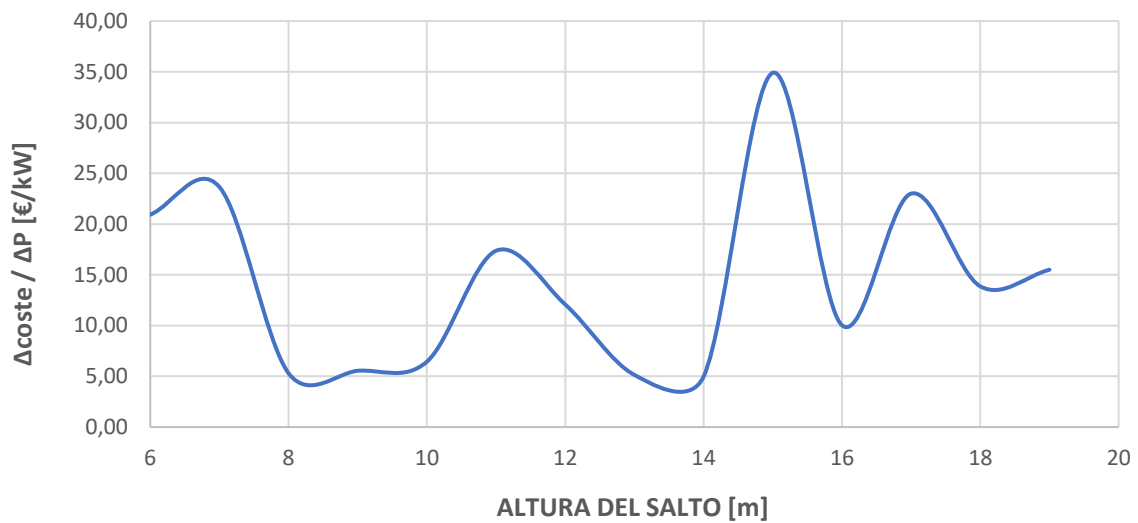


Gráfico 8: Variación de costes de instalación según altura del salto. [G6]

Para ilustrar el significado del Gráfico 8, pasar de un salto de 14 a 15 m de altura conlleva un incremento de costes muy elevado con respecto a la poca variación de potencia lograda. Esto se debe a que el terreno pierde inclinación y realizar un ligero aprovechamiento adicional requiere muchos metros de tubería.

Para determinar finalmente el salto bruto se deben analizar previamente las condiciones hidrológicas y conocer el caudal del que puede disponerse. Como primera aproximación para prever las características de la central, es de utilidad conocer un intervalo admisible de alturas, el cual estará comprendido entre los 10 y los 20 m, según otras variables y parámetros.

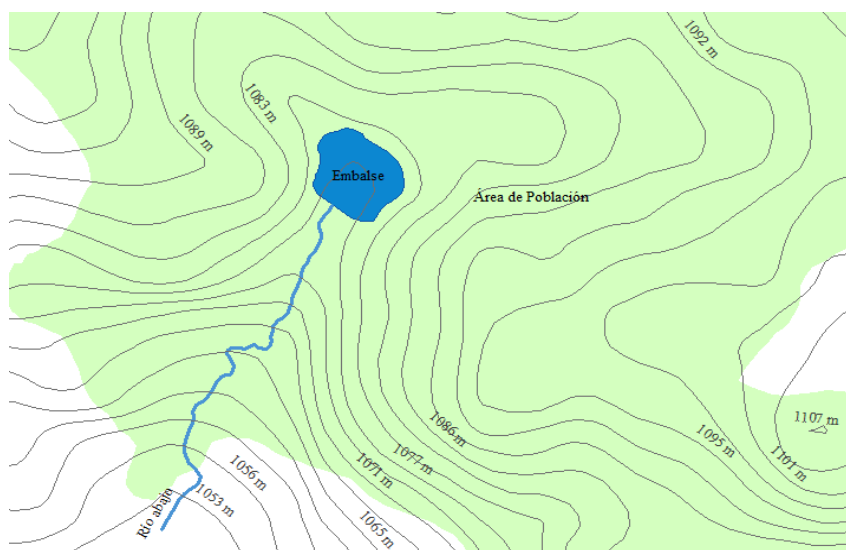


Ilustración 86: Topografía de la cuenca. [I49]

Los mapas detallados pueden encontrarse en los anexos del documento.

Condiciones hidrológicas

El estudio de las condiciones hidrológicas del área donde se pretende llevar a cabo la instalación es probablemente el aspecto más importante del diseño de centrales hidroeléctricas. Para ello, la práctica común es obtener información de la hidrología de la cuenca de los últimos 25 años a través de la recopilación de datos en estaciones de aforo. Por motivos evidentes, como el bajo nivel de desarrollo y el aislamiento de la zona de trabajo, no es posible disponer de dicha información, por lo que el estudio hidrológico deberá basarse en estimaciones y justificaciones teóricas. Algunos conceptos fundamentales que deben analizarse:

- **Caudal máximo** ($Q_{m\acute{a}x}$). Es el mayor caudal alcanzado a lo largo del año. En este caso, puede equipararse al volumen máximo embalsado.
- **Caudal mínimo** ($Q_{m\acute{i}n}$). Es el menor caudal alcanzado a lo largo del año. En este caso, correspondería al volumen mínimo embalsado, que es igual a cero en los meses secos. Por ello, la central no tendrá capacidad para funcionar durante todo el año.
- **Caudal de servidumbre** (Q_{srv}). Es la suma de dos caudales: el requerido para usos varios (regadío, abastecimiento, generación, etc.) y el ecológico. En este caso, el caudal de servidumbre incluye el consumo humano, el regadío y el requerido para la instalación. No se considera un caudal ecológico por no existir un cauce fluvial.
- **Caudal de equipamiento** (Q). Caudal de diseño de la instalación.
- **Caudal mínimo técnico** ($Q_{mt\acute{e}c}$). Es el mínimo necesario para poder operar la instalación. Depende de un factor K asociado a cada modelo de turbina, de forma que:

$$Q_{mt\acute{e}c} = KQ \quad (Ec. 21)$$

MODELO TURBINA	FACTOR K
Pelton	0,10
Flujo cruzado (M - B)	0,15
Kaplan	0,25
Semikaplan	0,35
Francis	0,40
Hélice	0,65

Tabla 14: Valores de factor K para diferentes turbinas. [T⁷]

Realizar una estimación del caudal disponible resulta difícil debido a la variabilidad climatológica y a la reducida cantidad y calidad de los datos que pueden recopilarse. En primera instancia, deben mencionarse los siguientes aspectos característicos del área de trabajo.

- El embalse se forma únicamente a partir de las lluvias, no existe un río efluente que aporte un caudal permanente.
- Las precipitaciones son muy variables, por lo que el volumen acumulado del embalse también sufrirá importantes alteraciones a lo largo del año.
- El embalse debe abastecer de agua a una población aproximada de 2.000 habitantes, además de los sistemas de riego.
- El cauce del río aguas abajo se forma como resultado de la escorrentía y el aliviado de las aguas de la presa. Puesto que el agua es un bien escaso, la descarga del caudal turbinado será acumulada en la medida de lo posible.

Los datos aportados por el autor del *Proyecto Presa*, presentados en la *Tabla 15*, reflejan el volumen de agua aportado a la cuenca, el consumo mensual estimado para abastecimiento de la población, las pérdidas por evaporación y el volumen embalsado, mensualmente.

Mes	Aportación [m³]	Días/mes	Consumo [m³]	Evaporación [m³]	Volumen embalsado [m³]
Enero	43419,80	31	4701,65	854,59	7080,3
Febrero	34445,76	28	4246,65	749,67	7080,3
Marzo	18938,37	31	4701,65	867,24	7080,3
Abril	4120,48	30	4549,98	819,63	5831,16
Mayo	846,89	31	4701,65	805,69	1170,72
Junio	199,60	30	4549,98	795,04	0
Julio	161,43	31	4701,65	750,41	0
Agosto	0	31	4701,65	908,04	0
Septiembre	191,02	30	4549,98	990,23	0
Octubre	1522,55	31	4701,65	1248,95	0
Noviembre	13912,0	30	4549,98	1121,46	7080,3
Diciembre	35291,43	31	4701,65	745,72	7080,3

Tabla 15: Datos hidrológicos del embalse. [T⁹]

La presa ha sido diseñada con criterios de optimización para mantener una cota máxima de la superficie de 1.078 m, para la cual corresponde un volumen máximo embalsado de 7.080,3 m³. Este nivel será alcanzado únicamente entre los meses de noviembre y abril, descendiendo progresivamente hasta junio y siendo nulo hasta octubre.

Durante los meses en que el volumen del embalse alcanza su valor máximo, existe excedente de agua debido a que las aportaciones superan al consumo. Esto implica que la presa vierte un determinado caudal a través de los aliviaderos, que es desaprovechado. El objetivo del estudio hidrológico consiste en obtener un balance óptimo entre las aportaciones del embalse, el consumo, las pérdidas y el excedente desaprovechado para determinar un caudal de diseño.

Mes	Excedente mensual [m ³]	Caudal excedente [m ³ /s]
Enero	36339,50	0,03004
Febrero	27365,46	0,01863
Marzo	11858,08	0,01372
Abril	0	0
Mayo	0	0
Junio	0	0
Julio	0	0
Agosto	0	0
Septiembre	0	0
Octubre	0	0
Noviembre	6831,70	0,00790
Diciembre	28211,13	0,02041

Tabla 16: Excedentes de agua del embalse mensuales. [T⁸]

Dado que debe trabajarse el caudal como una fuente de energía agotable, se define el caudal disponible para la tarea de la generación (Q_{disp}) como:

$$Q_{disp} = Q_{embalsado} + Q_{exc} - Q_{cons}$$

donde Q_{exc} es el caudal excedente y Q_{cons} es la fracción del caudal de servidumbre destinada a consumos ajenos a la generación, ambos de carácter mensual y medidos en [m³/s].

Durante los meses de junio a octubre, la generación no es viable puesto que no hay disponibilidad de caudal y, en caso de haberlo, sería destinado a finalidades prioritarias como el consumo humano.

De noviembre a marzo, el embalse se encuentra a máxima capacidad y existe un excedente considerable, por lo que la extracción de caudal no supondrá un problema.

Los meses de abril y mayo requieren de mayor atención desde la perspectiva de la explotación, pues no existe excedente y el volumen de agua es inferior al máximo.

Además, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- El caudal extraído no es constante, la demanda diaria es muy variable y se ve incrementada especialmente durante las horas de funcionamiento de las bombas de riego. Por tanto, no se extraerá un caudal que permita aportar la potencia instalada las 24 horas del día, sino que dependerá de la demanda.
- La instalación deberá dimensionarse para trabajar en las condiciones de máxima demanda. Dado que la diferencia de demanda de las horas pico respecto de los niveles base es considerable, el margen adicional de potencia instalada será bajo para no producir bajos rendimientos en régimen normal de trabajo.
- El caudal de diseño deberá determinarse en conjunto con el salto hidráulico, buscando el conjunto que mejores resultados aporte en términos de prestaciones, economía, optimización de uso del recurso hídrico, etc.
- El volumen de agua embalsada que no sea destinada a consumo o generación será desaprovechada debido a evaporación o a la acumulación de excedente.

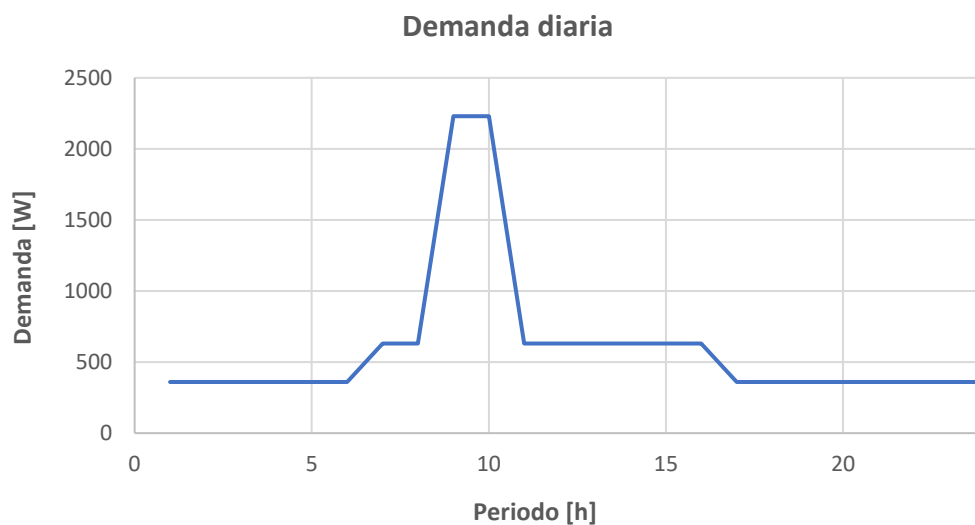


Gráfico 9: Curva de demanda diaria. [G⁶]

Mes	Volumen máximo [m³]	Volumen máximo limitado [m³]	Excedente [m³]	Volumen disponible [m³]
Enero	7080,3	4956,21	36339,5	41295,71
Febrero	7080,3	4956,21	27365,46	32321,67
Marzo	7080,3	4956,21	11858,08	16814,29
Abril	5831,16	4081,812	0	4081,812
Mayo	1170,72	819,504	0	819,504
Junio	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	0
Noviembre	7080,3	4956,21	6831,7	11787,91
Diciembre	7080,3	4956,21	28211,13	33167,34

Tabla 17: Volumen mensual disponible para turbinar. [T¹]

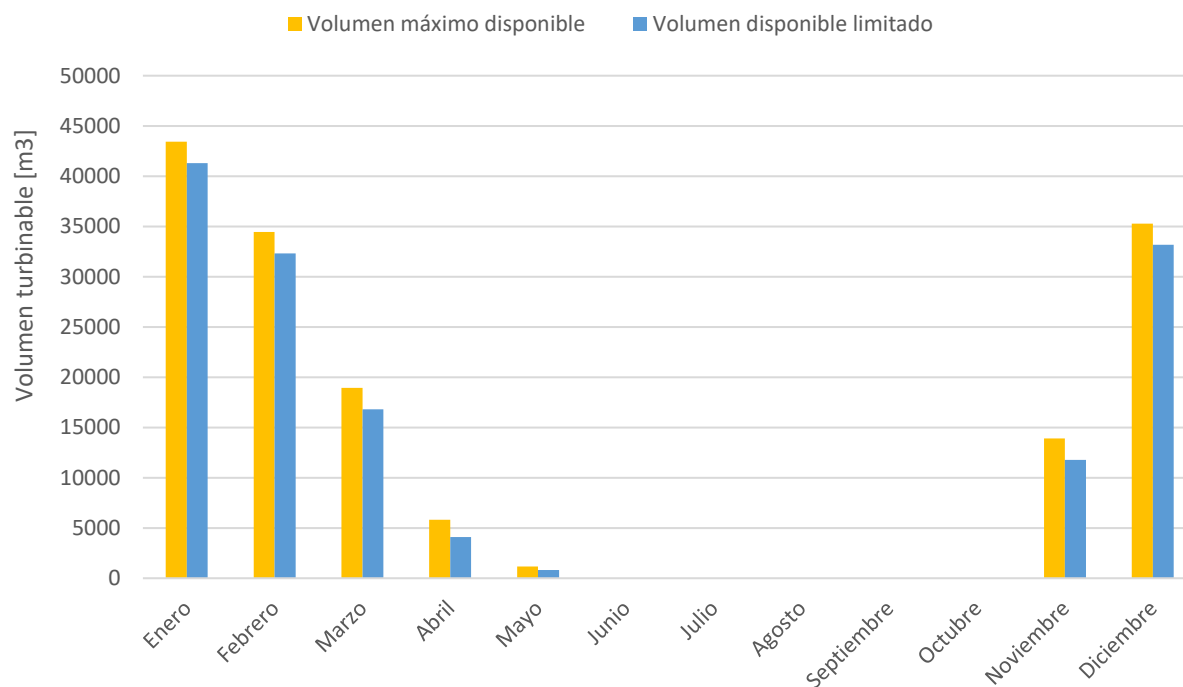


Gráfico 10: Volumen mensual disponible para generación. [G⁶]

Se ha tomado un factor limitante de valor 0,7 sobre el volumen máximo del embalse con un doble propósito. Por una parte, que el diseño no pueda partir de la total explotación del embalse y exista en remanente mínimo para necesidades de consumo. Por otra, dar lugar a que la proyección de la instalación se realice con capacidad para tolerar variaciones climatológicas y ello no suponga dificultades en el funcionamiento de la misma.

Previamente se ha analizado la demanda energética que la instalación deberá atender y las condiciones topográficas que dan lugar a los posibles saltos hidráulicos. Ambos, junto con los volúmenes de agua disponibles, serán estudiados en conjunto para establecer las variables de diseño fundamentales.

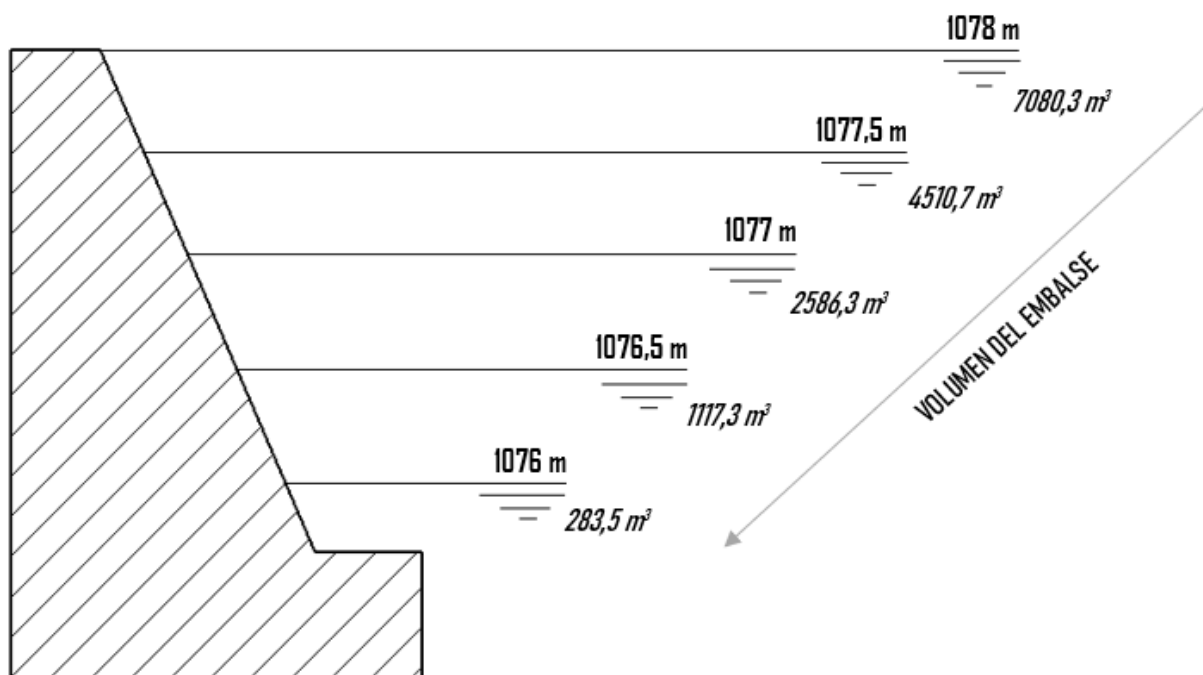


Ilustración 87: Volumen embalsado en función de cota de superficie. [18]

Mecánica de suelos

El estudio de los suelos será de importancia en la proyección de obras civiles, conociendo las características de composición, resistencia, etc. Los suelos serán uno de los aspectos más profundamente sometidos a reconocimiento e inspección del área de trabajo, puesto que los datos disponibles son orientativos y basados en muestras concretas del territorio que pueden variar considerablemente. Los motivos principales para llevar a cabo un análisis de los suelos en el área de trabajo son:

- Determinar la **capacidad de carga** frente a obras civiles: obras de captación, soportes de líneas hidráulicas, depósitos de carga, desarenadores, casa de máquinas, etc.
- Disponer de **estabilidad** suficiente para asegurar la ausencia de deformaciones inadmisibles en los diferentes sistemas de la instalación.
- Conocer el grado de **consistencia** para evitar el desmoronamiento de excavaciones para zanjas, cimientos, etc.
- Conocer el grado de **permeabilidad** del suelo con el fin de evitar que el agua pueda variar la capacidad portante del terreno sobre el que se sitúan los cimientos o provocar desplazamientos de tierra.

En general, el estudio debe verificar que el terreno es apto para disponer la instalación sin riesgo de fallas, deterioro o peligro para el personal. Dado que ya se han llevado a cabo numerosas obras en la zona, se sabe que el suelo es válido para la construcción. Sin embargo, por falta de información precisa acerca de las características de este y por razones de seguridad, se realizará un estudio teórico que deberá ser contrastado con datos reales obtenidos del análisis físico del terreno de trabajo.

El *Instituto de Investigación de Química y Suelo de Zimbabwe* establece la siguiente descripción para los suelos del área de Kazai, ubicada en la latitud 16° 33' S y longitud 31° 31' E:

Grupo sialítico: suelos mayoritariamente arcillosos, con alto porcentaje de saturación, cuya composición principal es illita o mezcla de esta con montmorillonita. Estos suelos son característicos de las proximidades de las cuencas de ríos como el Limpopo, al Sur, o el Zambeze, al Norte. Por ello y por su elevada capacidad de intercambio catiónico son altamente fértiles.

Las capas más superficiales son generalmente de arenas marrones y rojizas de grano medio a fino sobre marga o arcilla arenosa. Las profundidades son variables, generalmente desde intermedias a profundas, hallándose como material madre en los horizontes base del suelo minerales como el granito o el gneis.

La consistencia de las arcillas es muy variable, incluso dentro de las diferentes áreas del mismo grupo, por lo que a priori se tomarán casos desfavorables para justificar las propiedades mecánicas del suelo y su aptitud para la construcción.

PERFILES	PROFUNDIDAD [cm]	% ARCILLA	% SATURACIÓN	ROCA MADRE
8	25,4 - 40,6	13	100	Material calcáreo
	55,9 - 71,1	20	100	
9	15,2 - 30,5	63	88	Epidorita
	35,6 - 50,8	59	97	
10	35,6 - 50,8	44	98	Gneis básico
	91,4 - 106,7	33	100	
11	20,3 - 35,6	17	100	Gneis intermedio
	40,6 - 55,9	22	100	
12	30,5 - 45,7	8	87	Gneis silíceo
13	50,8 - 66	31	88	Aluvión granítico
14	25,4 - 40,6	44	100	Aluvión granítico
	48,3 - 68,6	40	100	
	94 - 106,7	42	100	
15	33 - 48,3	33	93	Coluvios
	76,2 - 91,4	39	100	
	152,4 - 167,6	20	100	
16	48,3 - 63,5	38	86	Coluvios
	88,9 - 104,1	32	100	
	137,1 - 155	28	100	

Tabla 18: Características generales de suelo para zonas de grupo sialítico. [T⁹]

Dependiendo de las características geográficas y meteorológicas de las diferentes ubicaciones dentro del área denominada sialítica, se clasifican diferentes tipos de perfiles de suelo, presentados en la *Tabla 18*. Dada la imposibilidad de incluir la zona de trabajo en una categoría específica, se tomarán como base los datos comunes a aquellas de mayor semejanza, así como valores numéricos medios. Las características asumidas serán:

- Profundidad hasta material madre: 89 – 152 cm
- Material madre: Gneis o Granito
- Capas superficiales arenosas de grano medio y fino
- Capas intermedias de arcilla y marga de consistencia media, creciente con la profundidad. Elevada saturación, contenido en raíces.

PARTÍCULA	DIÁMETRO DE GRANO [mm]
Grava	> 2
Arena	0,5 - 2 (gruesa)
	0,05 - 0,5 (fina)
Limo	0,002 - 0,5
Arcilla	< 0,002

Tabla 19: Clasificación de partículas según tamaño. [T¹⁰]

El análisis granulométrico es un estudio regulado por normas como UNE o ASTM que consiste en la determinación de los porcentajes de los diferentes tipos de partículas indicados en la *Tabla 19*, empleando técnicas generalmente de tamizado progresivo. Dicho análisis permite clasificar el suelo según su textura, lo que otorga a este de unas características específicas.

Si bien la granulometría debe realizarse sobre el mismo terreno de la obra, los datos indican composiciones arcillosas con contenido considerable en arena (entre un 50 y un 80%). Como primera aproximación se tomará una textura de suelo intermedia *arcillosa* y *arcilloso-arenosa*.

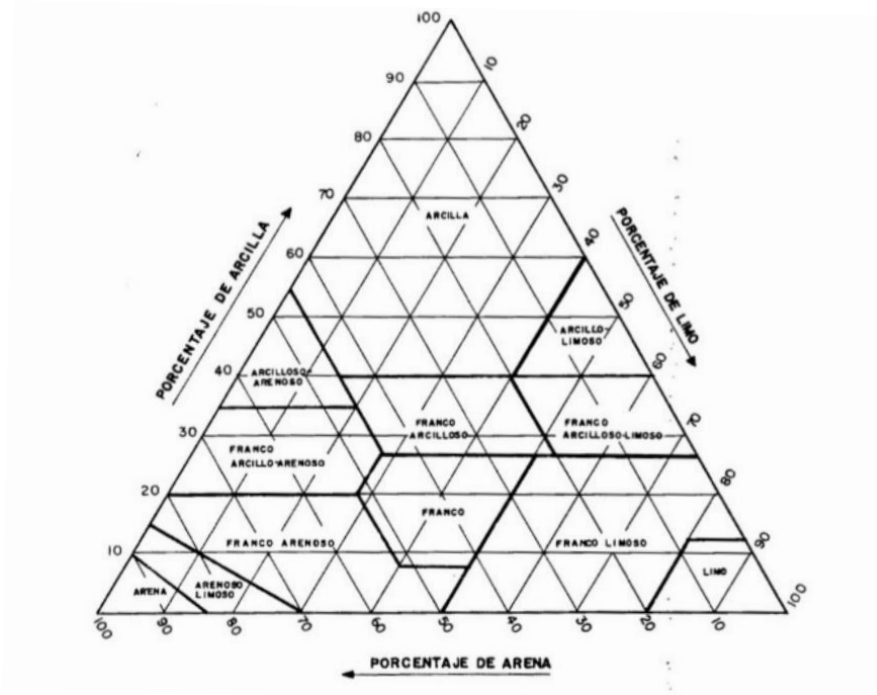


Gráfico 11: Triángulo de clasificación de texturas de suelo. [G⁷]

El método más extendido en el cálculo de la capacidad de carga (q_c) de los suelos para cimentaciones superficiales es la *teoría de Terzaghi*. La expresión generalizada define la presión máxima a la que puede someterse un suelo:

$$q_c = cN_c + \gamma D_f N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (\text{Ec. 22.1})$$

Dicha expresión puede particularizarse para cimentaciones cuadradas como:

$$q_c = 1.3cN_c + \gamma D_f N_q + 0.4\gamma B N_\gamma \quad (\text{Ec. 22.2})$$

donde:

c es la resistencia al corte o cohesión, en $[\text{kg}/\text{cm}^2]$

N_c, N_q, N_γ son los factores de capacidad de carga, dependientes del ángulo de fricción interna del suelo (ϕ_{int}).

γ es la densidad del suelo, en $[\text{kg}/\text{cm}^3]$

D_f es la profundidad de desplante o de cimentación, en $[\text{cm}]$

B es el ancho de la cimentación o zapata, en $[\text{cm}]$

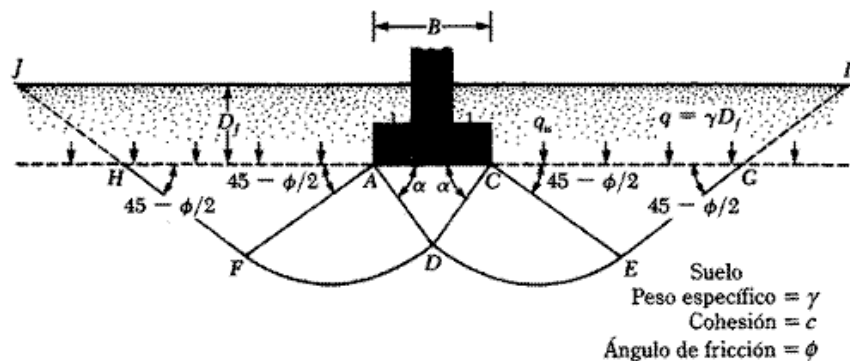


Ilustración 88: Falla por capacidad de carga, teoría de Terzaghi. [150]

En la *Ilustración 88*, según Terzaghi, la zona de falla se divide en tres partes. El triángulo ACD representa la cuña de material del terreno sobre el que descansa el cimiento. El peso de este tiende a desplazar la cuña en sentido descendente, provocando una carga tangencial y radial en los sectores contiguos, ADF y CDE. Estas cargas se traducen en fuerzas con componente vertical sobre las zonas AFH y CEG. Cuando la capacidad de carga última es superada, se produce el hundimiento de la cimentación junto con la cuña y el levantamiento del terreno a los laterales como consecuencia de las fuerzas internas ascendentes.

El ángulo de fricción (ϕ_{int}) es una característica de los materiales granulares que depende de la geometría, tamaño y disposición de sus partículas y que expresa la resistencia al desplazamiento interno de capas de material. Los factores de capacidad de carga pueden obtenerse a partir del *Gráfico 12* o la *Tabla 20*, en función del ángulo.

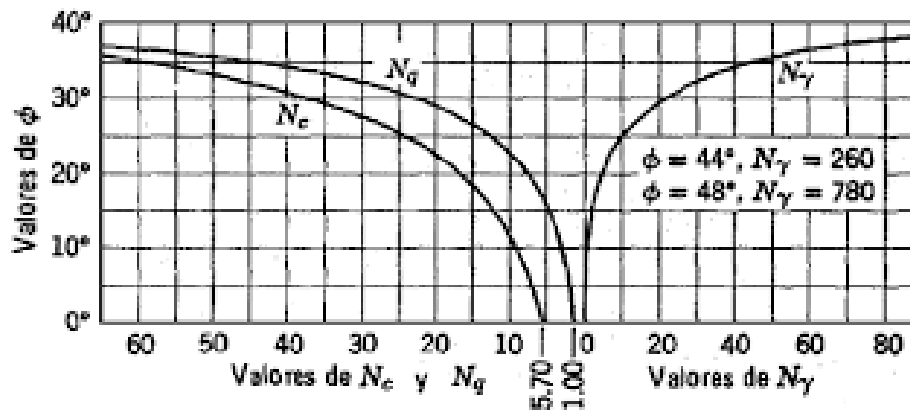


Gráfico 12: Factores de capacidad de carga de Terzaghi. [G³]

ϕ'	N_c	N_q	N_γ^a	ϕ'	N_c	N_q	N_γ^a
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.1	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	261.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1 072.80
25	25.13	12.72	8.34				

Tabla 20: Factores de capacidad de carga de Terzaghi. [T¹¹]

Las propiedades de los suelos en el área de trabajo según los datos recogidos se indican en la siguiente tabla:

Material suelo	Densidad [t/m ³]	Cohesión [kg/cm ²]	Ángulo de fricción [°]
Arcilla firme	1,45 - 1,89	1,0 - 2,0	≈ 15
Arcilla intermedia	1,47 - 1,92	0,5 - 1,0	≈ 16
Arcilla blanda	1,22 - 1,76	0,25 - 0,5	≈ 17
Arcilla arenosa	1,6 - 1,8	0,05	19 - 23

* Los valores comprendidos en los intervalos dependen fuertemente de la humedad.

Tabla 21: Características de materiales del suelo en zona de trabajo. [T¹]

Para realizar los cálculos se asumirán condiciones desfavorables que permitan trabajar con un cierto margen de error. Para ello, se tomará un grado de cohesión bajo (0,05 kg/cm²) y un ángulo de fricción de 16°. Si el suelo se encuentra en condiciones de baja humedad la densidad (γ) puede asumirse en torno a 1,5 t/m³. En cuanto a las características de la cimentación, considerando la obra civil de mayores dimensiones, la casa de máquinas, se supondrá que se realiza a una profundidad (D_f) de 40 cm y con un ancho máximo (B) de 50 cm.

$$N_c(\varphi) = 13,68$$

$$N_q(\varphi) = 4,92$$

$$N_\gamma(\varphi) = 1,82$$

Para estas suposiciones, la teoría de Terzaghi devuelve un valor de **1,047 kg/cm²**, el cual es muy razonable para la construcción en las condiciones planteadas. Si bien se ha tomado un caso desfavorable, se establecerá un factor de seguridad ($f.s.$) adicional que de respaldo a la justificación teórica:

$$\sigma_{adm.} = \frac{q_c}{f.s.} \quad (Ec. 23)$$

Cabe notar que, en caso de proyectar cualquier cimentación o apoyo que pueda ser susceptible de errores considerables de cálculo, variaciones no controlables o resultados poco fiables, existen formas simples de incrementar los márgenes de seguridad, como aumentar la profundidad de desplante o la superficie de apoyo de los cimientos, considerando que ello implicaría ciertos costes adicionales de obra y material.

$$\sigma = \frac{\text{Carga total portada [kg]}}{\text{Superficie apoyo [cm}^2\text{]}} \quad (\text{Ec. 24})$$

En el diseño de toda obra civil llevada a cabo a lo largo del trabajo deberá cumplirse:

$$\sigma < \sigma_{adm}$$

Los cálculos deberán rehacerse tras el reconocimiento del terreno, siguiendo la metodología de trabajo que será expuesta en secciones posteriores del documento. Esto puede dar lugar a:

- Mejores propiedades de suelo de las previstas. En tal caso, podrán realizarse ligeras modificaciones que conllevarán un decremento de costes económicos y temporales.
- Peores propiedades de suelo de las previstas. Deberán valorarse las alternativas de diseño que permitan validar la aptitud de la obra, involucrando la menor desviación posible con respecto a la planificación.
- Propiedades similares a las supuestas. Si la variación no es considerable y se encuentra dentro de los intervalos admisibles, será prioritario no realizar modificaciones en los diseños.

Diseño conceptual

El diseño conceptual se basa en realizar una breve descripción de los componentes y sistemas que conformarán la instalación, analizando sus características fundamentales y permitiendo ubicarlos esquemáticamente en el área de trabajo. Cada uno de los elementos será caracterizado, dimensionado y justificado en el apartado de *Cálculos*.

El objetivo de este análisis es determinar las necesidades de cálculo, los requisitos a cumplir y la interdependencia entre los diferentes sistemas, con el fin de abordarlos correcta e íntegramente sin obviar aspectos relevantes del diseño. Para ello, se establecerán criterios que permitan responder a posteriori a:

- Características físicas, mecánicas, funcionales, económicas, estéticas, etc.
- Disposición de los sistemas sobre el terreno.
- Accesibilidad, metodología de obra requerida, necesidades de mantenimiento.
- Prestaciones finales, optimización de recursos, minimización de pérdidas.

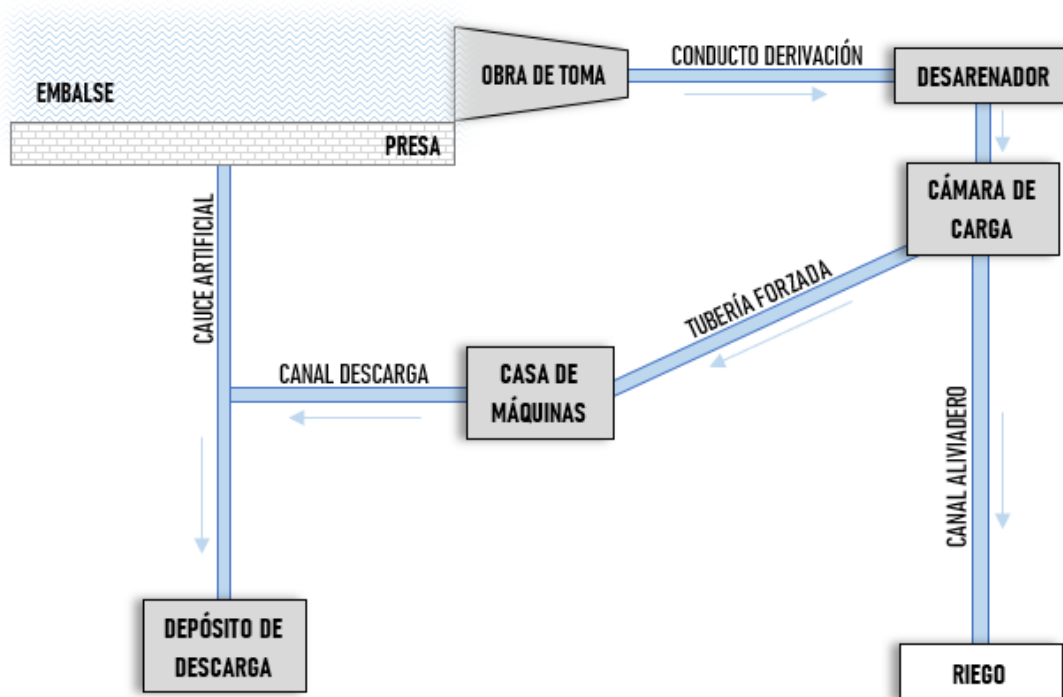


Ilustración 89: Esquema de diseño conceptual. [18]

Obra de toma

Esta será la responsable de captar el caudal de trabajo del embalse y conducirlo hasta la cámara de carga a través del conducto de derivación. Se ubicará sobre una de las laderas del embalse, próxima a la obra de la presa y se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- El volumen del embalse depende únicamente de la lluvia, por lo que existirán escasas partículas y sólidos en suspensión arrastrados por las corrientes.
- No existe una tasa de renovación periódica del agua embalsada, por lo que el nivel del embalse no se mantendrá constante, sino que variará con las condiciones climatológicas y el consumo.
- Ubicar la toma excesivamente próxima al fondo del embalse favorece la entrada de sedimentos en los conductos y requiere mayores tareas de mantenimiento y limpieza de sistemas de desbaste y desarenado.
- Ubicar la toma excesivamente próxima a un supuesto nivel máximo de superficie libre del embalse conlleva el riesgo de quedar descubierta con facilidad, ya sea debido al consumo o a épocas de pocas lluvias y descenso del volumen embalsado.
- Desde la perspectiva energética, el agua embalsada posee el mismo contenido de energía en todas sus cotas, puesto que las componentes potencial y de presión se compensan a lo largo de cada columna de agua. La cota de la toma no influirá en la altura (H_b) y, por tanto, en las prestaciones.

A partir de lo mencionado previamente, la obra de toma debe incluir las siguientes características de diseño:

- ✓ La posición de la toma se realizará a 40 cm del fondo del embalse con el fin de realizar un aprovechamiento hidráulico prolongado y evitar el paso de sedimentos.
- ✓ Se dispondrá una válvula de regulación de caudal para obstruir el paso hacia el conducto de derivación, en caso de que se requieran tareas de mantenimiento.
- ✓ Se instalará una rejilla metálica sobre la toma para impedir el ingreso de sólidos superiores a 20 mm en el sistema hidráulico que pudieran obstruirlo o dañarlo.
- ✓ La obra se llevará a cabo en concreto u hormigón, la cual deberá asegurar la correcta cimentación sobre el terreno y posición de la toma. El conducto de derivación se encontrará embebido o soportado por la obra de toma.
- ✓ La obra se hallará sumergida, lo cual supone un aspecto importante del diseño.

Conducto de derivación

El conducto de derivación transportará el caudal captado hasta el desarenador y la cámara de carga. Con el fin de minimizar la pérdida de carga, este sistema se diseñará con un nivel bajo de pendiente que favorezca un desplazamiento muy lento del flujo. Si se proyecta una pendiente de 1 : 100, la toma, ubicada a una cota teórica de 1076,40 m, define la longitud de la conducción, la cual deberá ser de:

$$\frac{\Delta z_{toma}}{\Delta y_{pend}} \cdot \Delta x_{pend} = 40 \text{ m}$$

Con frecuencia, las pendientes de los conductos de derivación son incluso inferiores, sin embargo, por cuestiones económicas, es necesario realizar un ligero incremento para evitar líneas hidráulicas excesivamente extensas y costosas.

Para facilitar el proceso de obra se tomará una trayectoria rectilínea desde la toma hasta el desarenador con un perfil de terreno poco irregular, siguiendo líneas de contorno lo más próximas posible. El perfil del terreno y el diseñado para el conducto se observan en el *Gráfico 13*.

Las alternativas más habituales son realizar un canal abierto de hormigón sobre una zanja excavada o tender una tubería subterránea. En el *Gráfico 13*, la diferencia de cota entre ambas curvas en cada abscisa representa la profundidad de excavación necesaria para realizar la zanja con una inclinación recta, siendo la máxima de aproximadamente 28 cm. Si la tubería se adaptase al perfil del terreno, el margen de 40 cm de la toma para un aprovechamiento prolongado perdería sentido y la altura de la toma debería considerarse el punto más alto del conducto. Atendiendo a criterios económicos y de sencillez, la conducción se realizará del siguiente modo:

- Método: tubería enterrada en zanja de inclinación constante.
- Material: Policloruro de vinilo (PVC).
- Longitud: 40 m
- Sección y calidad: por determinar

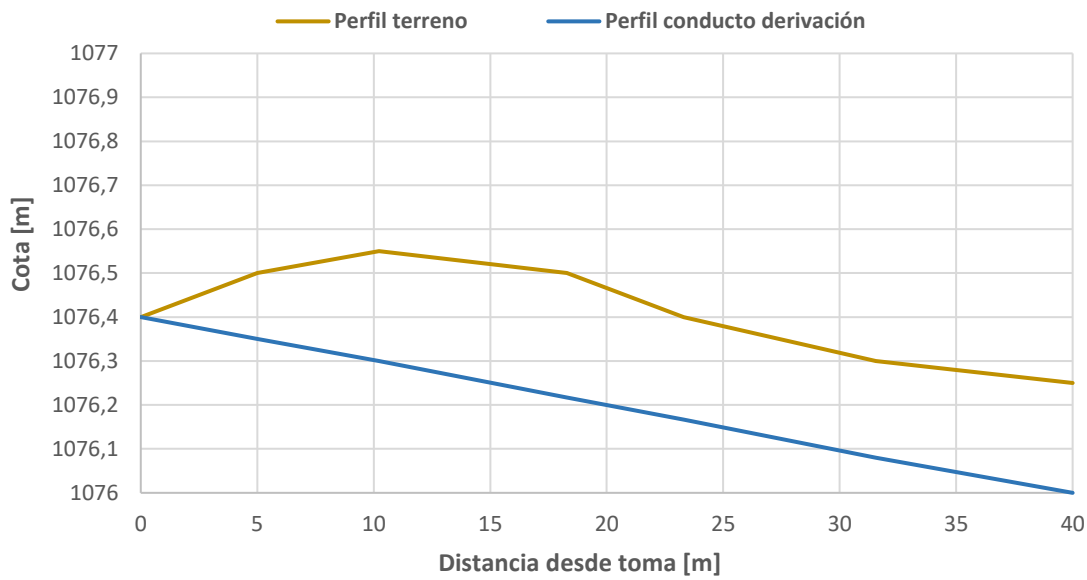


Gráfico 13: Perfiles de terreno y conducto de derivación. [G⁶]

En este caso, la instalación de la cámara de carga a una cota inferior implica cierta pérdida de potencial hidráulico, el cual ha sido necesario para dar uso a la central en los meses en que el volumen embalsado desciende considerablemente.

Desarenador

Este elemento será responsable de remover del caudal partículas en suspensión de diámetro superior a 0,2 mm mediante sedimentación de las mismas. Se diseñará anexo a la cámara de carga y de características sencillas, puesto que es propio de centrales en que las corrientes arrastran arena y otros sedimentos. Se prevé que pueda haber mayor movimiento de aguas y material arrastrado durante las lluvias intensas.

El conducto de derivación desembocará muy próximo al fondo del desarenador con el objetivo de evitar las turbulencias y dispersar las partículas. Poseerá una geometría alargada con suelo inclinado una cierta pendiente para facilitar la tarea de limpieza de los sedimentos. Las características constructivas y dimensionales serán justificadas posteriormente.

Cámara de carga

Consistirá en un depósito cuyo caudal de agua limpia se recibe del desarenador y que se encuentra conectado a la tubería forzada. Se deberán realizar los cálculos pertinentes para que el balance de caudal entrante del desarenador y saliente por la tubería sea constante. Además, incorporará un canal aliviadero que recogerá el excedente del desarenador y la cámara y lo distribuirá en el riego de los campos de cultivo próximos.

Se deberán resolver los siguientes aspectos del diseño de la cámara de carga:

- Evitar la entrada de aire (vórtices) en la tubería de presión y, por tanto, en la turbina. Esto se logra imponiendo dos condiciones en el diseño de la cámara:
 - Sumergencia de la embocadura de la tubería forzada es superior a 0,7 veces el diámetro de la misma:

$$y_s > 0,7D \quad (\text{Ec. 25})$$

- La velocidad del fluido cumple:

$$v < 0,5\sqrt{gD} \quad (\text{Ec. 26})$$

donde y_s es la profundidad de sumergencia, en [m] y D es el diámetro de la tubería forzada, en las mismas unidades.

Otro criterio de diseño aplicable empleado para el mismo fin, además de para minimizar las pérdidas hidráulicas por la transición perpendicular cámara - tubería es practicar un abocinado en la embocadura de esta última.

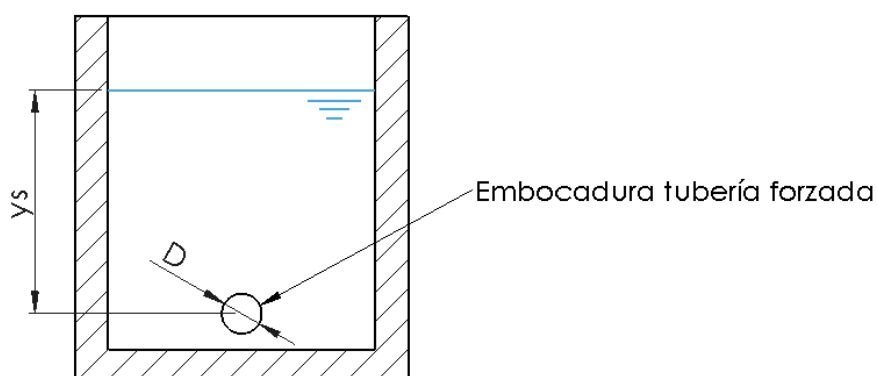


Ilustración 90: Vista en sección de cámara de carga. [18]

- Impedir el ingreso de cuerpos procedentes del desarenador, el cual se encuentra abierto a la superficie. Para ello, la cámara de carga estará separada de este por una rejillas metálicas a la altura de la superficie.
- Mantener un volumen de agua constante. Para ello, deberán analizarse las dimensiones de la cámara en función de los caudales.

El conjunto cámara - desarenador estará equipado con una compuerta de entrada para obstruir el caudal y posibilitar tareas de mantenimiento y limpieza de sedimentos y rejillas. Para llevar a cabo el vaciado se dispondrá una tubería de desagüe de fondo en el punto más bajo.

La cámara de carga es un elemento que, en circunstancias de agua fluyente y caudal constante a lo largo de todo el año, podría ser prescindible. Sin embargo, derivar la tubería de presión directamente de la obra de toma implicaría que las prestaciones de la central fluctuarían constantemente e incluso en exceso, debido a la variación de cota de la superficie del embalse. La cámara de carga es, por tanto, un dispositivo destinado a regular las variaciones hidrológicas experimentadas por el embalse a lo largo del año.

Tubería forzada

La tubería forzada, encargada de tomar el caudal del depósito de carga y llevarlo hasta la casa de máquinas a alta presión, deberá diseñarse a partir del caudal de equipamiento y la altura del salto. Además de presentar propiedades mecánicas compatibles con las elevadas presiones del fluido en conducción, deberán valorarse los siguientes aspectos:

- Trayectoria. Cuantos menos cambios de dirección se produzcan en la conducción del fluido, menores pérdidas secundarias se producirán en la tubería.
- Unión. La unión de tuberías deberá tener cierto grado de flexibilidad para absorber pequeñas deformaciones debidas a dilatación, desplazamiento de tierra, etc.
- Apoyo. En función de la topografía del terreno, deberán disponerse los soportes necesarios para sustentar el peso de la tubería, el fluido y los diferentes esfuerzos, especialmente en los cambios de rasante.
- Economía. En este ámbito influye el material empleado, la longitud de tubería, los costes de instalación, etc.

Para proyectar el trazo de la tubería, de forma independiente al caudal transportado y la altura final del salto hidráulico, se ha tomado la trayectoria que minimiza la distancia entre curvas de contorno consecutivas, es decir, aquella de mayor pendiente. De este modo se consigue tener el mayor salto con la menor longitud de tubería posible. La tubería presentará, en todo su recorrido, un trazo cuya proyección en el plano horizontal será rectilínea, con el fin de garantizar el primer aspecto característico previamente mencionado.

Cota [m]	Distancia [m]	Cota [m]	Distancia [m]
1076,0	0,00	1068,0	139,92
1076,0	9,68	1067,5	142,39
1075,5	38,90	1067,0	156,54
1075,0	47,32	1066,5	163,55
1074,5	56,31	1066,0	170,03
1074,0	61,20	1065,5	180,28
1073,5	66,28	1065,0	189,77
1073,0	79,25	1064,5	194,63
1072,5	82,87	1064,0	210,41
1072,0	89,00	1063,5	217,11
1071,5	103,78	1063,0	223,10
1071,0	112,71	1062,5	234,73
1070,5	119,36	1062,0	243,81
1070,0	128,51	1061,5	252,61
1069,5	132,31	1061,0	260,74
1069,0	134,90	1060,5	267,06
1068,5	137,42	1060,0	272,54

Tabla 22: Perfil del terreno en trayectoria de tubería forzada. [T¹]

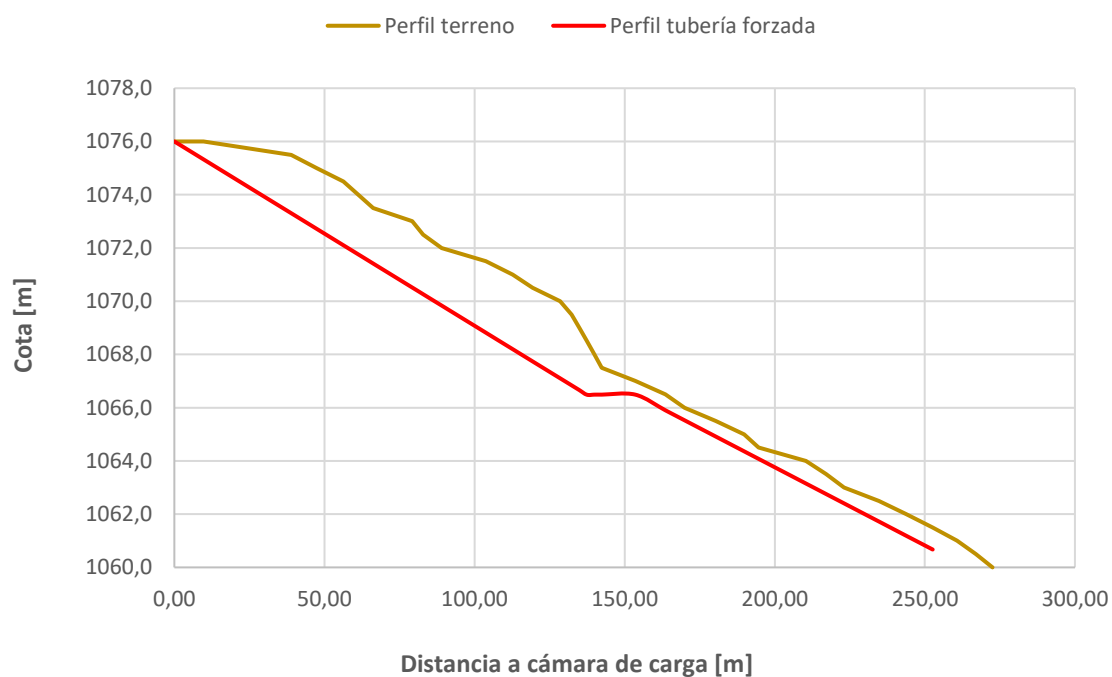


Gráfico 14: Perfil de terreno y trazo de la tubería. [G⁶]

En el *Gráfico 14* se observa un posible trazo de la tubería de presión para el terreno seleccionado, cuyo perfil también se muestra. Se realiza con dos cambios suaves de rasante y enterrada en toda su longitud, con el fin de protegerla y minimizar el impacto visual de la instalación.

Una vez determinado el salto de diseño, se determinará el trazado que mejor se adapte a las singularidades del terreno, minimizando las pérdidas hidráulicas y permitiendo la construcción de la casa de máquinas. Como material se empleará nuevamente PVC, por presentar excelentes características hidráulicas, económicas y mecánicas. El dimensionamiento de la tubería, tanto en sección como en calidad, se realizará en la sección de *Cálculos*.

Casa de máquinas

La casa de máquinas está destinada a contener el equipo electromecánico de la instalación, por lo que es el lugar donde tendrá lugar la generación y el origen de la distribución. Dadas las reducidas dimensiones de dicho equipo, no será necesario llevar a cabo una construcción considerable para albergarlo o realizar tareas humanas, pues será suficiente con disponer una base sólida para el anclaje y un elemento de cobertura que proteja el equipo del exterior.

Canal y depósito de descarga

A la salida de la turbina, el caudal será extraído de la casa de máquinas a través de un canal que desembocará en el cauce artificial del vertido excedente de la presa o directamente en un depósito de almacenamiento.

En la sección de *Cálculos* se determinarán las siguientes características:

- Conexión del canal con la turbina. Dependerá del modelo seleccionado.
- Características constructivas del canal: dimensiones, geometría, materiales, método de obra, trayectoria, etc.
- Características del depósito: dimensiones, comercial o fabricado, etc.

Cálculos

Conocidos los intervalos admisibles de las variables de diseño y los factores limitantes del área de trabajo, es posible comenzar a dimensionar y seleccionar los sistemas de la instalación. El resultado del estudio realizado a lo largo de esta sección será obtener un diseño definitivo, adaptado y optimizado, que responda a las necesidades y cumpla con las condiciones de contorno.

Prestaciones

Para determinar las prestaciones de la central será necesario fijar los valores de las variables de diseño. Tal y como se describió en apartados anteriores, la potencia instalada se define como:

$$P_a = \rho Q g H \eta_t$$

donde además, el término de rendimiento total podría expresarse como:

$$\eta_t = \sum \eta_i = \eta_{turbina} + \eta_{multiplicador} + \eta_{generador}$$

Debe considerarse también:

- Las pequeñas instalaciones tienen peores rendimientos.
- La altura neta H no se toma como variable de diseño, sino la altura bruta H_b .
- Es necesario tomar valores típicos para estimar parámetros desconocidos, que únicamente podrán obtenerse a partir del diseño y la selección de equipos.
- Podrán realizarse pequeños ajustes a posteriori que permitan rectificar los errores asumidos debido a las estimaciones iniciales.

Puesto que la potencia instalada será inferior a los 5 kW, se adquirirá un grupo turbina - generador integrado, por ser la opción más económica, sencilla y extendida en centrales de tan baja potencia. Otras alternativas duplicarían los costes, no únicamente del grupo, sino de envío, instalación, etc. y supondrían mayores dificultades de diseño. Estos grupos pueden encontrarse adaptados a cualquier escenario de funcionamiento y presentan rendimientos próximos al 90%, en algunos casos incluso superiores. Tomando como referencia un valor desfavorable de entre los ofrecidos por los fabricantes de estos grupos, se asumirá una eficiencia $\eta_{grupo} = 0.87$.

Tal y como se exponía anteriormente, la altura neta es aquella que permite obtener información de las prestaciones de la central. Un valor habitual de partida es tomar:

$$H = 0.9H_b$$

De este modo, se tiene la siguiente igualdad:

$$\frac{P_a}{0.9 \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_{grupo}} = H_b Q$$

en la que las variables de diseño fundamentales, altura y caudal, quedan expresadas en términos conocidos. Además, la oferta de grupos se realiza, generalmente, para valores de potencia enteros (1 kW, 2 kW, 3kW, ...), por lo que, aun siendo posible encontrar modelos con capacidades intermedias, tomar un valor redondo facilitará la búsqueda y aportará un mayor rango de selección. Como se expuso en secciones previas, existirá un pequeño margen de potencia, resultando en los siguientes valores:

ρ	1000 kg/m ³
g	9.81 m/s ²
P_a	3 kW
η_{grupo}	0.87

La relación resultante es la siguiente:

$$H_b Q = 0,3905$$

A partir de aquí, podría simplemente fijarse un valor de forma deliberada para una de las dos variables y obtener el restante. Sin embargo, existen diversos factores de influencia y consecuencias resultantes del valor que tome cada una de las variables que deben tenerse en consideración:

- El agua es un bien escaso, se debe tomar el mínimo caudal necesario para asegurar el correcto funcionamiento de la instalación a corto y medio plazo.

- Proyectar saltos de mayor altura implica costes crecientes que no aumentan proporcionalmente con la distancia, sino que dependen del terreno.
- La topografía es un aspecto fijo y la hidrología variable. Si el salto es mayor, es posible alcanzar la potencia de diseño con un caudal más bajo en caso de no existir disponibilidad. En caso de proyectarse un salto de menor altura, si no existe disponibilidad de caudal, no será viable alcanzar la capacidad útil de la instalación y quizá tampoco cubrir la demanda.

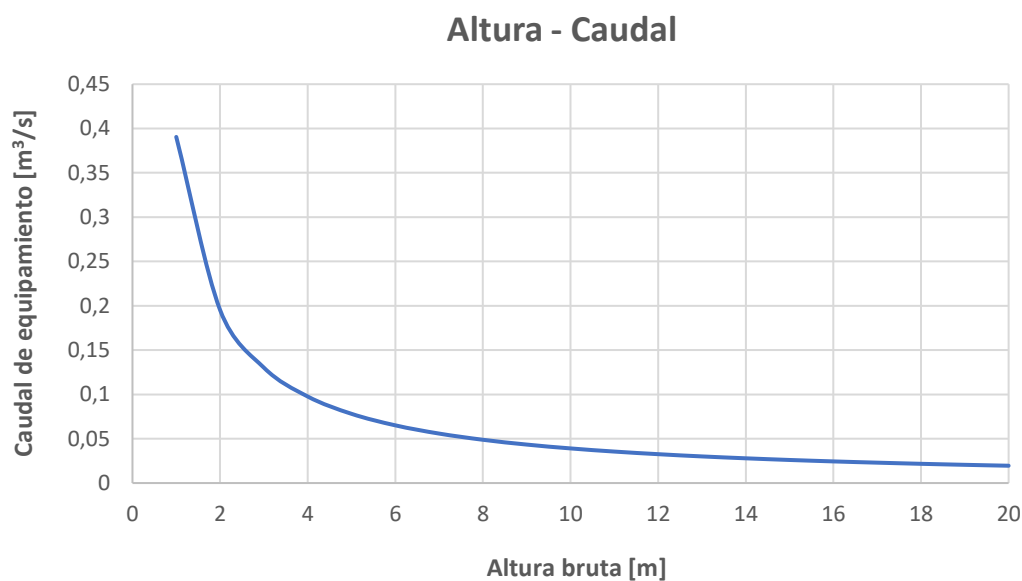


Gráfico 15: Valores de caudal para diferentes alturas de salto. [G⁶]

El Gráfico 15 muestra los valores de caudal necesarios para obtener la potencia instalada a partir de diferentes alturas, según la relación establecida entre ambas variables. Tal y como se observa, la pendiente de la recta tangente a la curva tiende a cero para saltos de altura cada vez mayor, por lo que la variación de caudal es prácticamente despreciable frente a variaciones de altura. Esto repercute también de forma directa en los costes y en el consumo de agua.

Por otra parte, dado que el consumo diario no es constante, es necesario estimar la demanda de volumen hidráulico mensual en función de la altura proyectada. En el Gráfico 16, la curva representa el volumen extraído del embalse mensualmente para abastecer la instalación en función de diferentes valores de altura. Los puntos rojos representan el volumen disponible cada mes, teniendo en cuenta que de junio a octubre la capacidad del embalse es nula. Tomando una determinada altura, los meses que quedan a la izquierda sobre la curva son aquellos que podrán cubrirse en su totalidad. Los que quedan a la derecha podrán abastecerse únicamente de forma parcial. Los meses de abril y mayo estarán sujetos a abastecer los consumos prioritarios.

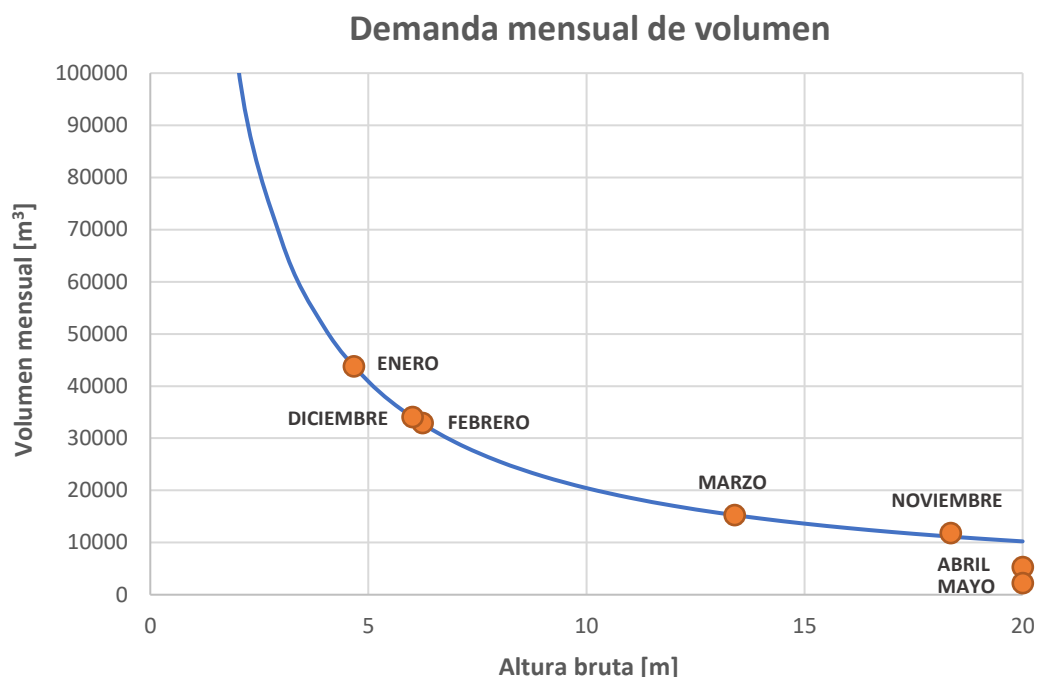


Gráfico 16: Volumen disponible y demandado según altura de salto. [G⁶]

Además de esto, en secciones previas se estudió la relación de altura y costes. El punto en el cual la variación de costes alcanza su máximo con respecto a la variación de potencia se considera insuficiente desde la perspectiva de la generación, puesto que la demanda de los meses de abril, mayo y noviembre quedaría notablemente desatendida por falta de recurso hídrico. El ligero incremento de costes de instalación supuesto en la proyección de un salto de mayor altura será compensado con una operación más versátil e independiente de las condiciones climatológicas y un mayor ahorro de agua.

Como deducción del análisis de los datos y gráficos presentados, las prestaciones generales de la central se indican a continuación:

Potencia instalada	3 kW
Grupo electromecánico	Integrado
Caudal de equipamiento	0,02 m³/s
Salto bruto	19 m

Tabla 23: Características de la instalación. [T¹]

Número de revoluciones

El cálculo de n_s es de suma importancia en la caracterización de instalaciones hidroeléctricas para la selección de equipos. Como primera aproximación, las pequeñas centrales, especialmente aquellas en que el recurso hídrico es muy limitado, implementan turbinas de acción, pues son aquellas que mejor trabajan con pequeños caudales y poseen mejores rendimientos frente a variaciones de carga. Entre estas se encuentran los modelos Pelton, Turgo y Michell - Banki.

El empleo del número específico de revoluciones como criterio de selección de turbinas en centrales de tan baja potencia es de menor utilidad, puesto que los proveedores de estas ofrecen directamente las condiciones de funcionamiento para las que han sido diseñadas y logran una adaptación muy precisa. Además, los ábacos y diagramas de selección más extendidos contemplan potencias mínimas instaladas de en torno a 50 kW y caudales de 0,5 m³/s en adelante.

Los gráficos expuestos en secciones previas, así como los ofrecidos por otros autores, apuntan a que las condiciones de funcionamiento son adecuadas para turbinas de flujo cruzado y pueden ser compatibles con turbinas Pelton o Turgo. La selección de la turbina Pelton para la instalación está motivada por los siguientes aspectos:

- Elevada disponibilidad y variedad comercial
- Capacidad de trabajo en amplio rango de caudales
- Excelente rendimiento en amplio rango de caudales
- Sencillez del grupo, facilidad de instalación y mantenimiento mínimo
- Costes de adquisición y tiempos de envío razonables
- No presenta problemas de cavitación

Las turbinas Pelton de esta potencia cuentan con un único inyector y su número específico de revoluciones es de aproximadamente 40 rpm para las condiciones de trabajo. La *Ec. 11* permite calcular una primera aproximación de la velocidad de giro del rodete y obtener también el número de pares de polos necesarios del generador, a partir de la *Ec. 13*, resultando en los siguientes valores:

<i>Velocidad de giro</i>	803 rpm
<i>Nº pares de polos generador</i>	3,74 → 4

Al tomar el valor más próximo posible de pares de polos del generador, se recalcula la velocidad de giro del rodete y se obtiene el valor final para el n_s .

$$\begin{array}{ll} \text{Velocidad de giro (p = 4)} & 750 \text{ rpm} \\ \text{Número específico de revoluciones} & 37,36 \text{ rpm} \cdot \text{kW}^{0,5} \cdot \text{m}^{-1,25} \end{array}$$

A modo de interpretación, el resultado obtenido implica que para desarrollar una potencia de 1 kW con un salto de 1 m de altura, una turbina geoméricamente semejante a la necesaria para la instalación debería girar a una velocidad específica de 37,36. Bajo las condiciones de trabajo, la velocidad de giro real de la turbina seleccionada es de 750 rpm.

Este proceso de cálculo es el habitual cuando el grupo electromecánico consta de componentes independientes y el generador debe seleccionarse a partir de las variables. Sin embargo, en este caso, el grupo integrado posee las características constructivas adecuadas para trabajar en las condiciones establecidas para la instalación. A modo de contraste, pueden compararse los cálculos previos con las características de los equipos finalmente seleccionados.

Otro método habitual empleado en el ámbito profesional para la caracterización de turbinas en centrales hidroeléctricas es obtener una ecuación por medio de un modelo de regresión lineal a partir de numerosas turbinas fabricadas en un determinado periodo temporal. Con ello, se obtiene una relación entre la velocidad específica y la altura, fundamentada en la dependencia entre ambas variables en turbinas reales.

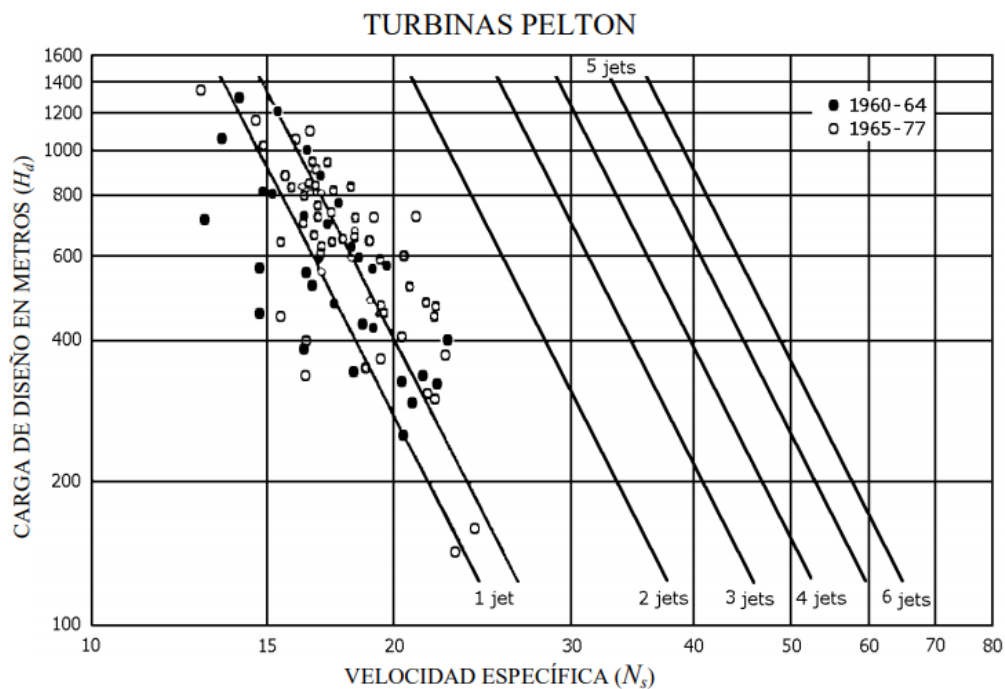


Gráfico 17: Modelos de regresión lineal para turbinas Pelton. [G⁹]

En el *Gráfico 17*, los puntos negros representan turbinas reales fabricadas entre 1960 y 1964. Puesto que están representadas en función de la carga de diseño y la velocidad específica, la ecuación resultante del modelo de regresión es la siguiente:

$$n_s = 78,63 H^{-0,243}$$

Sin embargo, tomando ejemplares fabricados entre 1965 y 1977, representados en el gráfico por puntos blancos, la ecuación obtenida de la recta de regresión es:

$$n_s = 85,49 H^{-0,243}$$

Bajo esta técnica, contemplando modelos preferiblemente fabricados en los últimos años, se obtiene un valor de n_s con carácter estadístico. Evidentemente, el resultado se encuentra sometido a errores propios del modelo matemático empleado. De las ecuaciones anteriores, la velocidad específica toma valores de entre 39,4 y 42,9 para H de trabajo, lo cual se acerca considerablemente a lo obtenido a través del primer método de selección.

Características de la turbina

En turbinas Pelton, el denominado coeficiente de velocidad periférica (ϕ) representa la relación entre la velocidad angular y la tangencial del rodete y es fundamental en la caracterización. Se obtiene como:

$$\phi = \frac{n\pi D_2}{60\sqrt{2gH}} \quad (\text{Ec. 27})$$

donde D_2 es el diámetro nominal del rodete de la turbina Pelton, en m.

Dicho coeficiente se obtiene frecuentemente a partir de un nuevo modelo de regresión que contempla como variables a este y al número específico de revoluciones (n_s), cuya ecuación es:

$$\phi = 0,5445 - 0,0039 n_s \quad (\text{Ec. 28})$$

La *Ec. 28* arroja un valor de 0,399 para el coeficiente de velocidad periférica.

Si se despeja de la Ec. 27 el término del diámetro del rodete, se obtiene:

Diámetro nominal rodete D_2 186 mm

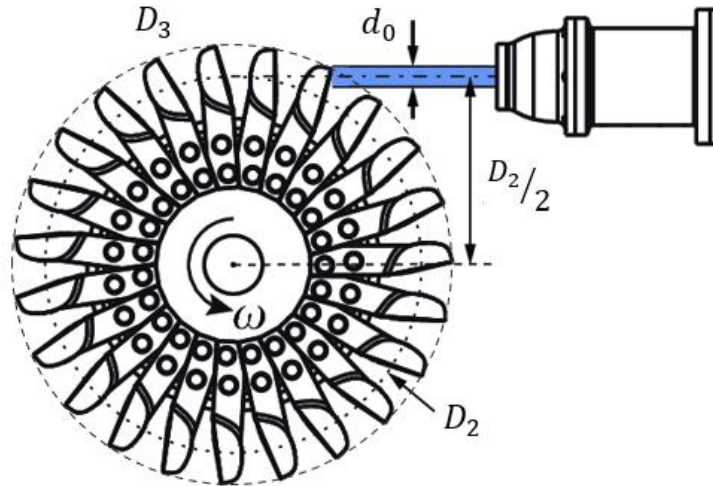


Ilustración 91: Dimensiones características de turbina Pelton. [151]

Aunque desde el punto de vista operativo no posee especial relevancia, el diámetro externo del rodete D_3 puede obtenerse a partir de la siguiente expresión:

$$D_3/D_2 = 1,028 + 0,0137 n_s \quad (\text{Ec. 29})$$

Diámetro externo rodete D_3 286 mm

Para obtener el diámetro del chorro del inyector, se emplea la ecuación:

$$d_0 = 0,55 (QH^{-0,5})^{1/2} \quad (\text{Ec. 30})$$

que da por resultado:

Diámetro chorro inyector d_0 38 mm

Otras dimensiones que pueden calcularse son aquellas asociadas a las cucharas, siendo b_1 el ancho medido en el eje axial del rodete y b_2 la longitud de estas en el eje radial.

$$b_1 = 3,20 d_0^{0,96} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$b_2 = 3,23 d_0^{1,02} \quad (\text{Ec. 32})$$

La velocidad del fluido a la salida del inyector se obtiene a partir del principio de Torricelli, incorporando el término correspondiente a las pérdidas en el inyector, de modo que:

$$c_1 = k_c \sqrt{2gH} \quad (\text{Ec. 33})$$

donde k_c es el coeficiente de velocidad adimensional que se estima habitualmente entre 0,97 y 0,98. La velocidad de salida del inyector será:

$$\text{Velocidad del chorro del inyector } c_1 \quad 17,8 \text{ m/s}$$

Dimensionamiento de conducciones

En esta sección deberán concluirse las características de los sistemas de conducción, dando respuesta a las siguientes cuestiones:

- Dimensiones de los conductos (longitudes, diámetros y secciones).
- Propiedades mecánicas, especialmente en la tubería forzada.
- Propiedades de los materiales empleados.
- Accesorios necesarios (codos, juntas, cambios de sección, etc.).

Estos aspectos, además de resolverse a partir de las variables de diseño obtenidas y las condiciones de trabajo analizadas, tendrán una repercusión directa sobre los costes de la instalación, así como las pérdidas y eficiencia de la misma.

Conducto de derivación

Tal y como se expuso en la sección de *Diseño Conceptual*, el conducto de derivación que transporta el agua desde la toma del embalse hasta la cámara de carga consta de las siguientes características:

Longitud de conducción	40 m
Pendiente de conducción	1 : 100
Material empleado	PVC

La ecuación de Manning para flujo total en tuberías permite calcular el diámetro necesario:

$$D = \left(\frac{2,153 \cdot n_m \cdot Q}{\sqrt{i}} \right)^{3/8} \quad (\text{Ec. 34})$$

donde

n_m es el coeficiente de rugosidad de Manning.

i es la pendiente de inclinación de la tubería.

El coeficiente de rugosidad de Manning para tuberías de PVC tipo Rib Loc de paredes lisas toma un valor de 0,009, entonces el diámetro de la tubería debe ser:

Diámetro de tubería derivación	124,6 mm $\approx$ 125 mm
---------------------------------------	---

Así, según la Ec. 1, el fluido se desplaza por el conducto de derivación a una velocidad de:

Velocidad del fluido por conducto	1,63 m/s
--	-----------------

Diámetro Nominal	Presión nominal de trabajo en Kg/cm ²			
	4	6	10	16
25			22.0	21.2
32			28.4	27.2
40		36.4	36.0	35.2
50	47.2	46.4	45.2	42.6
63	59.4	59.2	57.0	53.6
75	71.4	70.6	67.8	63.8
90	86.4	84.6	81.4	76.6
110	105.6	103.6	99.4	93.6
125	120.0	117.6	113.0	106.4
140	134.4	131.8	126.6	119.2
160	153.6	150.6	144.5	136.2
180	172.8	169.4	162.8	
200	192.0	188.2	180.8	
250	240.2	235.4	226.2	
315	302.6	296.6	285.0	
355	341.0	334.2		
400	384.2	376.6		
500	480.4			

Tabla 24: Diámetros de tubería normalizados y presiones de trabajo. [T¹²]

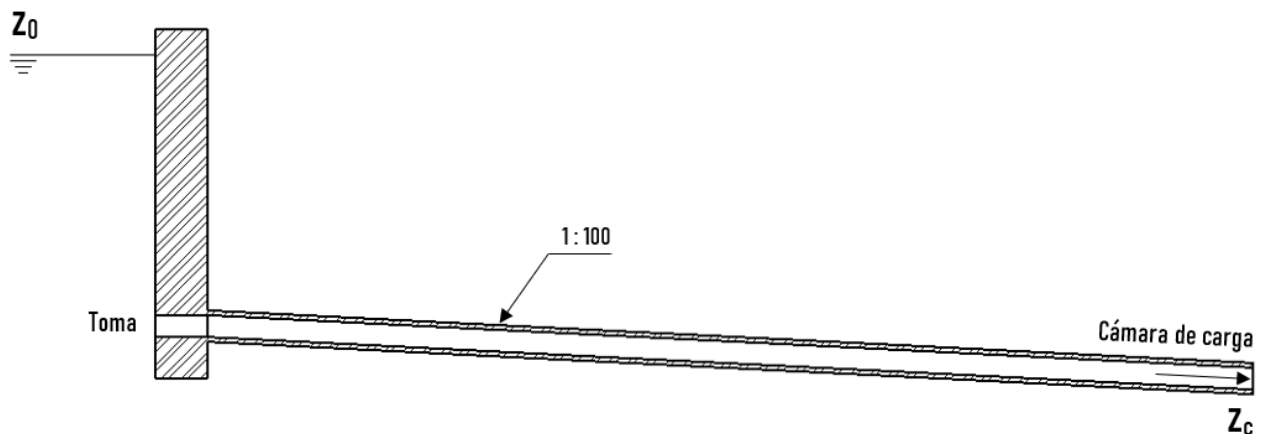


Ilustración 92: Representación del sistema de derivación. [I¹⁸]

La Ilustración 92 representa la tubería de derivación desde el embalse hasta el desarenador y la cámara de carga. Nótese que la superficie libre del embalse se ha designado con z_0 y el punto inferior de la tubería con z_c . Ello se debe a que se reserva el subíndice A para denotar la cota a la que se encuentra referida la altura bruta, es decir, el tirante en la cámara de carga.

Para dimensionar el conducto deberán analizarse las presiones a lo largo del mismo, incluyendo posibles sobrepresiones debidas a golpe de ariete. Estas son poco probables y de escaso efecto en la tubería de derivación pues, al contrario que en la tubería forzada, las presiones son razonablemente bajas.

Tomando como z_0 el nivel máximo del embalse (1078 m) y z_c el nivel de descarga en la cámara (1076 m), se aplica el principio de Bernoulli entre ambos puntos de la instalación:

$$\frac{p_0}{\rho g} + z_0 + \frac{c_0^2}{2g} = \frac{p_c}{\rho g} + z_c + \frac{c_c^2}{2g} + h_{r\ 0 \rightarrow c}$$

donde:

p_i es la presión del fluido en el punto i , en [Pa]. El cociente con ρg devuelve uds. [mca].

z_i es la cota del punto i , en [m].

c_i es la velocidad del fluido en el punto i , en [m/s].

$h_{r\ 0 \rightarrow c}$ son las pérdidas hidráulicas entre los puntos de cálculo, en [m].

Puesto que se trabaja con presiones relativas, el término p_0 , correspondiente a la presión atmosférica, se hace nulo. La velocidad del fluido en dicho punto también es despreciable, pues el fluido embalsado se asume estático. Las pérdidas hidráulicas pueden obviarse en el cálculo pues, en todo caso, reducirían el valor de presión en C y puede tomarse como margen de seguridad. La resolución de la ecuación, cuyos valores son conocidos, resulta en:

$$\text{Presión en la tubería} \qquad 18,3 \text{ kPa} = 0,19 \text{ kg/cm}^2$$

La presión en el conducto es muy baja, incluso asumiendo sobrepresiones excesivas una tubería de PVC de calidad normal cumpliría la función sin dificultades y no sería necesaria la instalación de una tubería de presión.

Tubería forzada

Conocida la altura de diseño y las condiciones topográficas del terreno, es posible determinar la longitud necesaria de tubería para conducir el caudal desde la cámara de carga hasta la sala de máquinas.

Ampliando el alcance del *Gráfico 14* es posible disponer del perfil del terreno para proyectar la longitud mínima de tubería forzada, la cual estará enterrada en una zanja en toda su longitud y será dispuesta en trayectoria rectilínea con el fin de facilitar la instalación. En su tramo final un codo direcciona el flujo horizontalmente a la entrada del distribuidor.

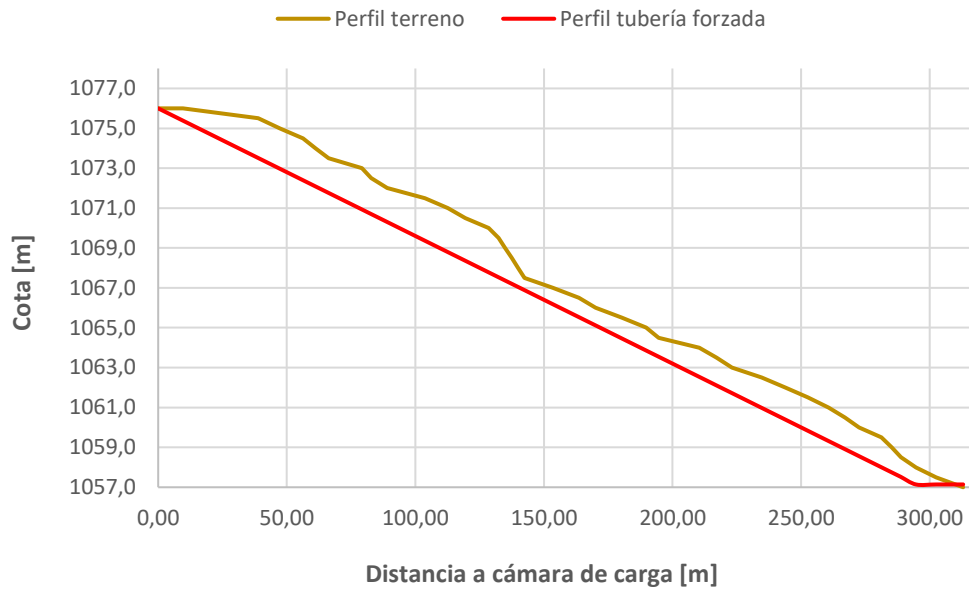


Gráfico 18: Trazo de tubería forzada sobre el terreno. [G⁶]

La tubería forzada constará, en primera instancia, de las siguientes características:

Longitud de conducción	315 m
Material empleado	PVC

En posteriores secciones será necesario valorar la disposición de anclajes en determinados puntos. La elección del PVC resulta indiscutible pues, en pequeñas instalaciones, materiales como el hormigón o el acero no están justificados y suponen un sobredimensionamiento de la instalación y los costes.

El diámetro necesario de tubería forzada se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$D = 0,3 \sqrt[5]{\frac{Q^2 L}{H_b}} \quad (\text{Ec. 35})$$

donde L es la longitud total de la tubería, en [m]. Se obtienen los siguientes valores:

Diámetro de tubería requerido	110 mm
--------------------------------------	---------------

Velocidad del fluido 2,1 m/s

Es importante tener en cuenta que a mayor diámetro de tubería, menor es la velocidad del flujo y menores son las pérdidas hidráulicas primarias. Por este motivo, así como por disponibilidad comercial, se tomará un perfil de las siguientes características:

Diámetro de tubería seleccionado **140 mm**

Velocidad del fluido **1,3 m/s**

En el diseño de la tubería de presión es necesario considerar posibles sobrepresiones como efecto de cierres bruscos de las válvulas de regulación. Conocido el diámetro, puede calcularse el espesor de la sección de la tubería como:

$$e = \frac{(p + \Delta p)D}{2\sigma - p} \quad (\text{Ec. 36})$$

donde:

e es el espesor de la tubería forzada, en [mm]

p es la presión estática del fluido, en [MPa]

Δp es la sobrepresión máxima en la tubería, en [MPa]

σ es la tensión de trabajo del material (PVC), en [MPa]

El término de sobrepresión, incorporado a la presión estática del fluido, permite dimensionar la tubería teniendo en cuenta no solo el régimen permanente de trabajo, sino el caso crítico de cierre instantáneo de la válvula del distribuidor o el inyector. Este término se calcula a partir de la fórmula de Allievi:

$$\Delta p = \frac{av}{g} \quad (\text{Ec. 37})$$

donde a es la celeridad de la onda de presión, que es la velocidad de propagación de esta por el fluido en circulación y, por tanto, se mide en [m/s]. Su cálculo se realiza como sigue:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k \frac{D}{e}}} \quad (\text{Ec. 38})$$

El factor k es dependiente del módulo elástico (E) del material de la tubería, tal que:

$$k = \frac{10^{10}}{E} \quad (\text{Ec. 39})$$

Las propiedades generales del material son las siguientes:

Policloruro de vinilo (PVC)	
PROPIEDAD	VALOR
Densidad	1,3 g/cm ³
Resistencia a la tracción	500 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	3·10 ⁸ kg/m ²

Tabla 25: Propiedades del PVC. [T¹]

Se determina la presión en el punto de mayor sollicitación a partir del principio de Bernoulli:

$$\frac{p_A}{\rho g} + z_A + \frac{c_A^2}{2g} = \frac{p_E}{\rho g} + z_E + \frac{c_E^2}{2g} + h_{r\ A \rightarrow E}$$

donde el término $h_{r\ A \rightarrow E}$ representa las pérdidas en la tubería forzada, en [m]. Aunque este término podría incluirse en base a la suposición de diseño $H = 0,9 H_b$ o aproximarse mediante el cálculo de las pérdidas hidráulicas en la tubería, se despreciará del cálculo de presión a modo de margen de seguridad. La presión a la entrada de la turbina en régimen permanente es:

$$\text{Presión en la tubería} \quad 18,9 \text{ m} = 186 \text{ kPa} = 1,9 \text{ kg/cm}^2$$

En el dimensionamiento de tuberías de presión en instalaciones hidráulicas se recomienda tomar un factor de seguridad cuyo valor se sitúa entre 1,4 y 2.

Factor de seguridad dimensionamiento 1,5

Se toma, por tanto, como tensión de diseño admisible:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lím}}{f \cdot S.}$$

La tensión de diseño es:

Tensión de diseño σ_{adm} 32 MPa

Combinando las Ecs. 36, 37, 38 y 39 y resolviendo se obtienen los siguientes valores

Factor k	33,33
Celeridad a	126,67 m/s
Sobrepresión Δp	16,8 m
Espesor tubería e	0,77 mm

A la vista de los resultados, un tubo de PVC con pared inferior a 1 mm soportaría correctamente las condiciones de trabajo, incluido el caso en que se produjese un golpe de ariete. Puesto que no existe una sección normalizada de estas características, se optará por la alternativa más similar, cuyos datos se exponen a continuación.

Tubería presión (UNE-EN 1452) Ø140 mm PN-6

Este modelo atiende a criterios de normas internacionales extendidas, como ISO, por lo que son fáciles de localizar y adquirir. La designación PN-6 hace referencia a la presión nominal de 6 bar y posee un espesor de 3,5 mm. Otras categorías PN-10, PN-16, PN-20 etc. corresponden

a tuberías que, por ser de mayor espesor, han sido diseñadas para presiones de trabajo superiores y su coste supone un incremento aproximado del 100% en cada salto de categoría.

Finalmente, los resultados del estudio son:

Factor k	33,33
Celeridad a	266,35 m/s
Sobrepresión Δp	35,3 m
Espesor tubería e	3,5 mm

A modo de contraste, la *Tabla 26*, empleada por algunos autores en el estudio de sobrepresiones y dimensionamiento de tuberías, muestra los valores de celeridad para tuberías de presión de distintos materiales plásticos. El valor obtenido se encuentra entre las categorías PN-4 y PN-6, lo que permite cerciorar que los cálculos realizados para la selección son razonables.

Tubería	Presión nominal (kg/cm ²)			
	4	6	10	16
PE baja densidad	118	147	196	-
PE alta densidad	-	234	305	-
PVC	240	295	380	475

Tabla 26: Celeridades para tuberías de plástico. [T¹³]

Por último, al alcanzar la cota de la turbina se realizará un empalme con un codo de las mismas características dimensionales y mecánicas. El tramo final se dispone horizontalmente a la entrada del distribuidor. En caso de que el modelo de turbina seleccionado posea un diámetro de entrada inferior, dicho tramo constará de una reducción de sección gradual.

RESUMEN DE CONDUCCIONES		
	DERIVACIÓN	PRESIÓN
<i>Material</i>	PVC	PVC
<i>Tubería</i>	Ø125 mm	Ø140 mm PN-6
<i>Longitud</i>	40 m	315 m
<i>Accesorios</i>	No	Codo ángulo abierto

Tabla 27: Características de principales sistemas de conducción. [T¹]

Obra civil

Obra de toma

La toma es la obra de captación destinada a recibir el agua del embalse y conducirla por el conducto de derivación hasta la cámara de carga. Puesto que se prevé variaciones en la cota de la superficie libre del embalse y el volumen depende únicamente del agua de lluvia, la toma no puede ubicarse en la superficie, sino que debe localizarse sumergida. Tal y como se expuso en la sección de *Diseño Conceptual*, se dispondrá a 40 cm con respecto a la cota de la cámara de carga, de modo que no se depositen ni transfieran sedimentos del fondo del embalse.

La tubería de derivación se embeberá en un bloque de hormigón cimentado próximo a la presa, en la ladera del embalse, que asegure su posición frente a las crecidas y el movimiento de aguas. Dispondrá en su embocadura de una rejilla metálica para el desbaste de sólidos.

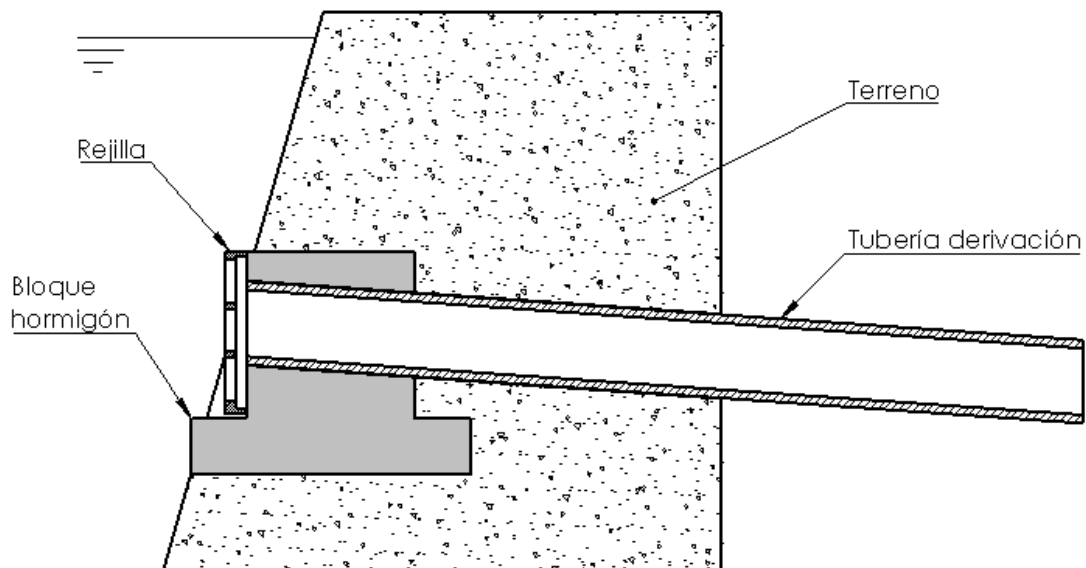


Ilustración 93: Representación de la obra de toma de la instalación. [18]

La ecuación que rige el caudal captado a través de un orificio sumergido es la siguiente:

$$Q = CA\sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{Ec. 40})$$

donde:

C es el coeficiente de descarga del orificio de la toma.

Δh es la altura hidráulica sobre el orificio, en [m].

El coeficiente de descarga depende de la disposición y geometría de la embocadura de la toma, que para el caso en estudio puede estimarse en 0,61. Despejando la sección del orificio (A) de la ecuación se obtiene:

Sección requerida de orificio **5030 - 10500 mm²**

Diámetro de orificio de toma **80 - 115 mm**

El diámetro obtenido es dependiente de la altura hidráulica, por lo que las ligeras variaciones implicadas en la captación de caudal serán reguladas a través de los vertederos. Puesto que el diámetro de la tubería de derivación es superior al requerido para la toma, a priori se presenta una incompatibilidad de diseño que requeriría un cambio de sección en el conducto. Sin embargo, la instalación de la rejilla de desbaste en la entrada de la tubería supone una reducción de la sección de captación que permite ajustar ambos requisitos de diseño.

Tomando en consideración que la rejilla deberá impedir el ingreso de sólidos superiores a 20 mm y que el diámetro de la tubería de derivación es de 125 mm, el área total ocupada por una rejilla de dimensiones típicas sobre la entrada del conducto es de 1237 mm². Realizando la siguiente operación:

$$A_{\text{útil}} = A_{\text{tubería}} - A_{\text{rejilla}}$$

se obtiene:

Sección útil tubería derivación **11000 mm²**

Esto implica que, cuando el nivel del embalse desciende, la sección del orificio de toma requerido se aproxima hasta igualar la de la tubería de derivación. Sin embargo, cuando el embalse se encuentra a capacidad máxima, la sección necesaria es considerablemente inferior, por lo que, en las condiciones de diseño, captaría un caudal mayor al de equipamiento.

Algunas soluciones efectivas, como la instalación de válvulas automáticas de regulación, implican costes inasumibles. En caso de no incorporar ningún dispositivo ni sistema de regulación, tendría lugar un desaprovechamiento hidráulico inadmisibles.

La solución más práctica y económica hallada es la instalación de una válvula manual en la toma que permita variar la sección de paso de caudal, de este modo se cumplen dos funciones de suma importancia en el funcionamiento de la instalación:

- Obstrucción total del conducto, permitiendo el vaciado de la instalación y la realización de tareas de mantenimiento y reparación.
- Control del caudal según la época del año y volumen del embalse. El responsable o supervisor de la instalación situará la válvula en la correspondiente posición, acorde con la carga hidráulica. Debido a que el periodo de lluvias en la zona de trabajo es muy marcado y la demanda es muy reducida y controlada, dicha supervisión no deberá realizarse con excesiva frecuencia.

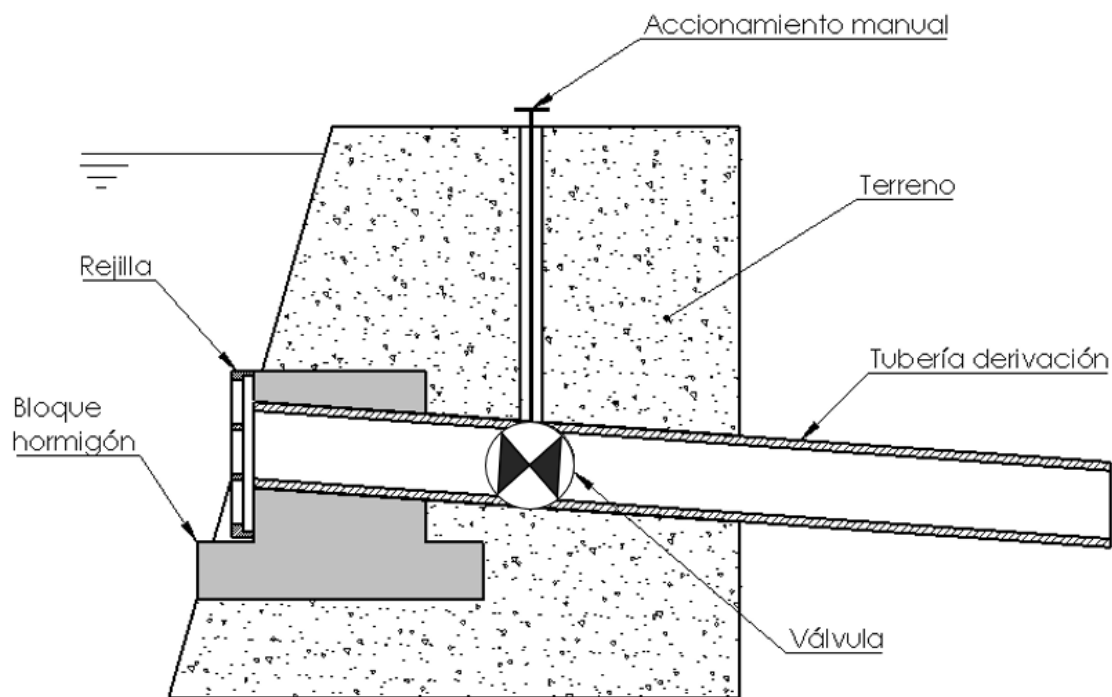


Ilustración 94: Ubicación de la válvula reguladora en la instalación. [1¹⁸]

Con respecto a la mecánica de suelos, se analizan las características del bloque:

BLOQUE DE APOYO	
Material	Hormigón
Densidad	2400 kg/m ³
Volumen	0,05 m ³
Masa	120 kg
Superficie apoyo	2500 cm ²

Tabla 28: Características del bloque de obra. [T¹]

Aplicando la Ec. 24, se obtiene un valor de carga de:

$$\text{Carga } \sigma \quad 0,048 \text{ kg/cm}^2$$

Puesto que la carga es muy inferior a la admisible, se valida el diseño desde la perspectiva de la mecánica de suelos.

Desarenador

El desarenador o sedimentador es el elemento responsable de transferir el caudal desde la tubería de derivación hasta la cámara de carga, en condiciones aptas para el turbinado. Especialmente en centrales de microgeneración, donde las turbinas son de dimensiones muy reducidas, la entrada continua de partículas en suspensión puede obstruir los inyectores, dañar los álabes de la turbina, etc. Por tanto, el sedimentador debe asegurar la deposición de dichas partículas, superiores a 0,2 mm.

Constructivamente, consiste en un tanque alargado que almacena temporalmente y desplaza el fluido a muy baja velocidad, permitiendo así la decantación por gravedad de las partículas en suspensión. El diseño debe realizarse en base al tamaño de dichas partículas que deben sedimentar y se tiene en cuenta además el tipo de turbina y el tamaño de la central. Las turbinas Pelton, en especial debido a los inyectores, son aquellas que menor tamaño admiten, considerado generalmente entre 0,2 y 0,4 mm.

En primer lugar, se determina la velocidad necesaria en el tanque para permitir la sedimentación v_s mediante la fórmula de Camp:

$$v_s = \alpha \sqrt{d} \quad (\text{Ec. 41})$$

donde:

α es una constante dependiente del diámetro de las partículas.

d es el diámetro de las partículas a sedimentar, en [mm].

α	d
51	0,1
44	0,1 - 1
36	1

Tabla 29: Valores de la constante alpha. [T¹⁴]

Entonces, la velocidad de diseño en el tanque desarenador es:

$$\text{Velocidad } v_s \quad 19,6 \text{ cm/s} \rightarrow \text{f.s.} = 2 \rightarrow 9.8 \text{ cm/s}$$

En segundo lugar, se obtiene la velocidad de sedimentación (w), que es aquella a la que sedimenta una partícula en aguas tranquilas. Existen diversos métodos, a través de fórmulas, gráficos y tablas. Para el cálculo se obtendrá un promedio de las soluciones obtenidas por diferentes métodos.

TABLA DE ARKHANGELSKI

d (mm)	w (cm/s)
0.05	0.178
0.10	0.692
0.15	1.560
0.20	2.160
0.25	2.700
0.30	3.240
0.35	3.780
0.40	4.320
0.45	4.860
0.50	5.400
0.55	5.940
0.60	6.480
0.70	7.320
0.80	8.070
1.00	9.44
2.00	15.29
3.00	19.25
5.00	24.90

Tabla 30: Velocidades de sedimentación según Arkhangelski. [T¹⁵]

$$\text{Velocidad de sedimentación } w \quad 2,16 \text{ cm/s}$$

GRÁFICO EXPERIMENTAL DE SELLERIO

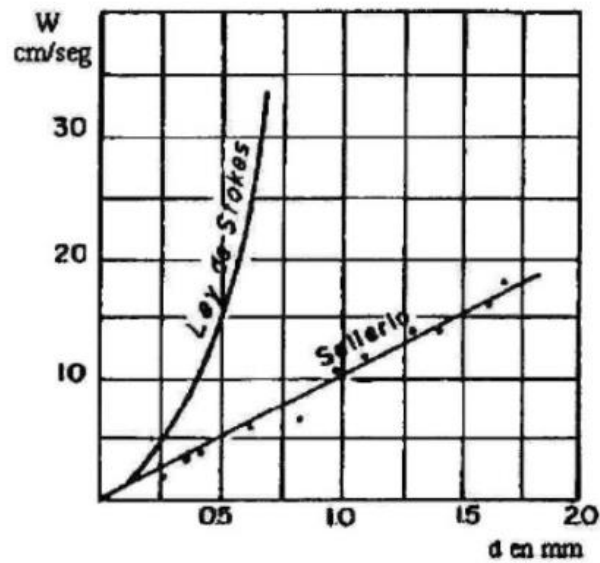


Gráfico 19: Obtención gráfica de velocidad de sedimentación. [G¹⁰]

Velocidad de sedimentación w 2 cm/s

LEY DE STOKES

A partir del Gráfico 19:

Velocidad de sedimentación w 2 cm/s

FÓRMULA DE OWENS

$$w = k\sqrt{d(\rho - 1)} \quad (\text{Ec. 42})$$

donde:

k es una constante dependiente de la forma y naturaleza de las partículas.

ρ es el peso específico del material en suspensión, en [g/cm³].

Considerando que las partículas más pequeñas que deben sedimentar son de 0,2 mm, se corresponden con la denominación de arena fina, cuyo valor de k es 4,8. El peso específico es de 1,65 g/cm³. Por tanto, la fórmula de Owens aporta el siguiente valor:

$$\text{Velocidad de sedimentación } w \quad 5,47 \text{ cm/s}$$

Realizando un promedio de los cuatro valores obtenidos, se toma como velocidad de sedimentación para el diseño del desarenador:

$$\text{Velocidad de sedimentación } w \quad 2,9 \text{ cm/s}$$

Conocidas ambas velocidades, es posible caracterizar dimensionalmente el tanque. El tiempo de retención (t_r) es aquel que cada porción de caudal permanece en el desarenador desde su salida del conducto de derivación hasta su entrada en la cámara de carga y su valor recomendado en pequeñas instalaciones es de entre 45 y 120 segundos. Cuanto mayor sea este, mayor deberá ser la capacidad del tanque, las dimensiones, el material empleado y los costes. Se establece un tiempo de retención de:

$$\text{Tiempo de retención } t_r \quad 45 \text{ s}$$

Con esto, se determina el volumen necesario del desarenador (V_d):

$$V_d = Q \cdot t_r$$

$$\text{Volumen desarenador } V_d \quad 0,9 \text{ m}^3$$

Además, dada la velocidad de diseño calculada, es posible obtener la sección transversal del tanque necesaria como:

$$A_t = \frac{Q}{v_s}$$

$$\text{Área transversal } A_t \quad 0,2 \text{ m}^2$$

Los desarenadores se proyectan, por lo general, con una longitud muy superior a las otras dos dimensiones principales. Además, la profundidad debe ser baja para permitir una deposición más rápida de las partículas y facilitar las tareas de limpieza.

Con el fin de establecer unas dimensiones óptimas y no basar el diseño en criterios personales o aleatorios fundamentados en los cálculos anteriores, se definen los siguientes conceptos:

t_s es el tiempo de sedimentación, invertido por una partícula en llegar al fondo del tanque desarenador, en [s].

t_d es el tiempo de decantación, invertido por una partícula en recorrer la longitud total del tanque desarenador, en [s].

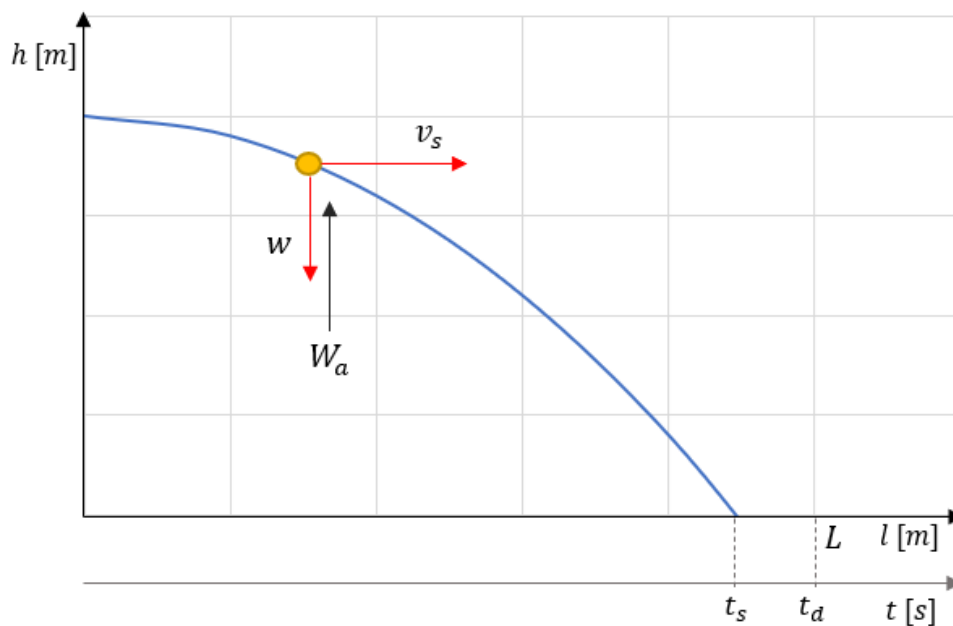


Gráfico 20: Variables de decantación de partículas en suspensión. [G⁶]

Puesto que la partícula debe alcanzar el fondo antes de recorrer la longitud completa del tanque, se debe verificar lo siguiente:

$$t_d \geq t_s$$

A partir del Gráfico 19, se definen los tiempos de sedimentación y decantación como:

$$t_d = \frac{L}{v_s} \quad t_s = \frac{h}{w - W_a}$$

donde el término W_a corresponde al empuje ascensional dinámico, el cual es consecuencia de los sedimentos que se depositan en el fondo del tanque y provocan turbulencias en el flujo. El cálculo de este se realiza por medio de la ecuación de Sokolov:

$$W_a = 0,152 w \quad (\text{Ec. 43})$$

Igualando los tiempos de sedimentación y decantación y despejando el término de longitud del desarenador (L) se obtiene la longitud mínima requerida de diseño, que puede ser incrementada ligeramente como margen de seguridad:

$$L = \frac{v_s h}{w - W_a}$$

A continuación, se presentan los valores de diseño del desarenador asumiendo distintos valores de profundidad h y considerando los cálculos previos de sección:

Profundidad [m]	Longitud mín. [m]	Ancho [m]	Sección transversal [m2]	Volumen [m3]
0,05	0,20	4,00	0,20	0,04
0,10	0,40	2,00	0,20	0,08
0,15	0,60	1,33	0,20	0,12
0,20	0,80	1,00	0,20	0,16
0,25	1,00	0,80	0,20	0,20
0,30	1,20	0,67	0,20	0,24
0,35	1,39	0,57	0,20	0,28
0,40	1,59	0,50	0,20	0,32
0,45	1,79	0,44	0,20	0,36
0,50	1,99	0,40	0,20	0,40

Tabla 31: Resultados dimensionales del tanque desarenador. [T¹]

Puesto que el cálculo de la longitud total a partir de la igualdad de tiempos de decantación y sedimentación resulta de un criterio de diseño que aporta el valor mínimo de dicha longitud para que se cumpla, los volúmenes no se corresponden con el requerido. Para ello, se realizan los ajustes pertinentes, tomando el volumen, la profundidad y la sección transversal como variables de entrada y verificando que la condición de longitud mínima se verifica en todo momento.

Además, para obtener valores de longitud más precisos, se toma la siguiente expresión de diseño, la cual debe considerarse con cierta flexibilidad, puesto que únicamente contempla aspectos geométricos y obvia aquellos relacionados con la cinemática y el régimen de flujo:

$$L = \sqrt{A_s a}$$

donde a expresa la relación o cociente entre el largo y el ancho. Al asumir una profundidad, el ancho queda determinado por la sección transversal. Entonces, la longitud final debe verificar:

- $L \geq L_{\min}$
- $L \times b = A_s$
- $L \times b \times h = V$

El término A_s se corresponde con la superficie de la lámina de agua sobre el desarenador, obteniéndose a partir de:

$$A_s = \frac{v_s A_t}{w}$$

Conocidas las longitudes mínimas de diseño, el volumen del tanque y la sección que regula el paso del caudal a la velocidad de diseño, se establecen las dimensiones finales del desarenador, teniendo en cuenta que la relación L/h en la práctica toma valores elevados y que es preferible, por cuestiones logísticas y económicas, llevar a cabo una obra de mayor longitud frente a una de mayor profundidad.

Profundidad	0,4 m
Ancho	0,5 m
Longitud mínima decantación	1,6 m
Longitud tomada	4,5 m
Volumen	0,9 m³
Sección transversal	0,2 m²
Tiempo de retención	45 s
Velocidad de trabajo	9,8 m/s

A modo de comprobación, puede verificarse el principio de continuidad entre la tubería de derivación y el desarenador, de modo que los caudales sean constantes:

$$A_{tubería} v_{tubería} = A_{desarenador} v_{desarenador}$$

Además de las dimensiones establecidas para el desarenador, este contará con

- Ventanas de vertido a la altura del tirante máximo de agua, con el fin de permitir el rebose en caso de excedente.
- Área de transición a la entrada del desarenador con ángulo de inclinación de paredes laterales de 15° (valores recomendados 12° - 30°) y suelo inclinado 20°, con el fin de facilitar la deposición de los sedimentos y liberar la salida de la tubería de posibles obstrucciones. Se calcula la longitud necesaria de transición:

$$L_T = \frac{b - b_t}{2 \operatorname{tg} \beta}$$

donde:

b es el ancho del desarenador, en [m].

b_t es el ancho del canal que precede al desarenador, en [m].

β es el ángulo de transición de las paredes, en [°].

Para no desembocar la tubería directamente sobre el desarenador y provocar corrientes indeseadas en el flujo, la transición se realizará de la tubería a un pequeño canal y de este al desarenador. Este se diseñará con un área ligeramente superior al de la tubería para ralentizar el flujo y con un ancho b_t de 20 cm.

La longitud de transición resultante es:

Longitud de transición L_T 0,55 m

En la *Ilustración 95* se muestra una representación del tanque desarenador y los elementos previamente descritos.

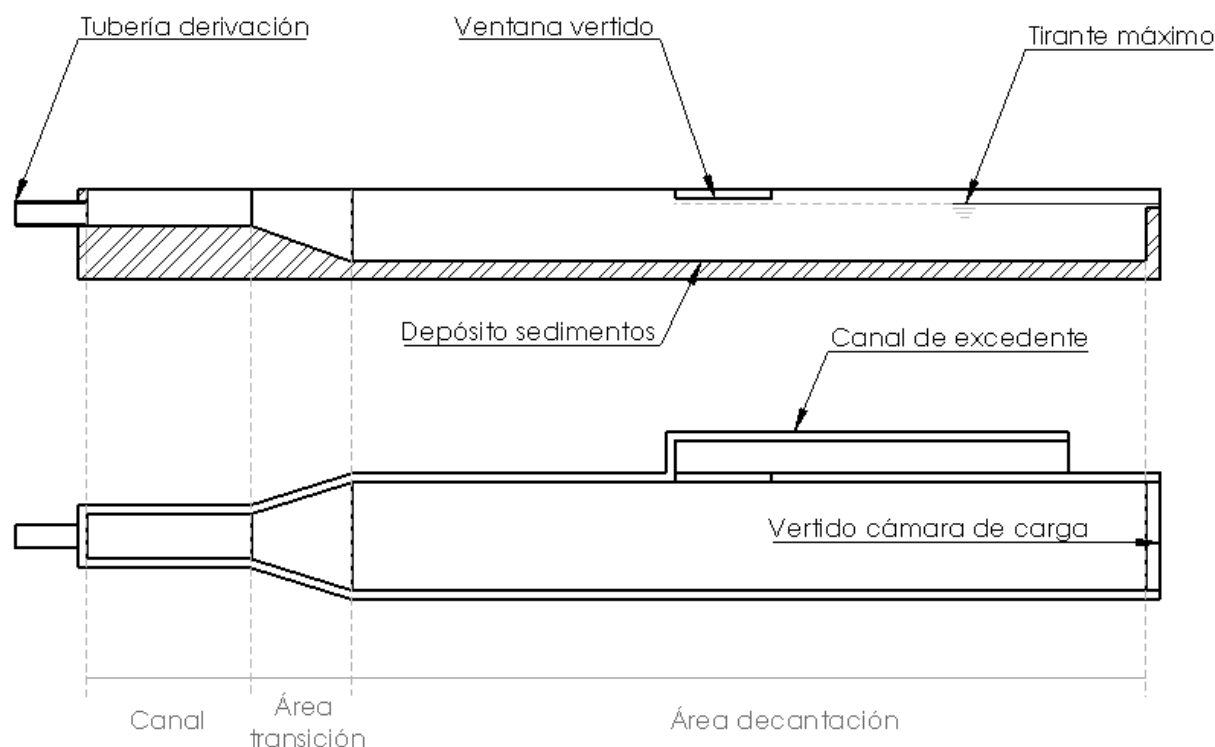


Ilustración 95: Representación constructiva del tanque desarenador diseñado. [18]

La construcción del desarenador se realizará en hormigón encofrado, no siendo necesaria su armadura metálica, debido a la reducida presión estática y dimensiones de la obra. El encofrado será practicado in situ con materiales auxiliares. Esto presenta las siguientes ventajas:

- Sencillez del proceso de obra e implementación de los materiales.
- Coste muy reducido de la obra. El precio medio del hormigón es de 60 €/m³.
- Prestaciones mecánicas e hidráulicas suficientes para función desempeñada.

Las propiedades físicas del tanque desarenador son las siguientes:

TANQUE DESARENADOR	
Material	Hormigón
Densidad	2400 kg/m ³
Volumen	0,75 m ³
Masa	1790 kg
Superficie apoyo	3,78 m ²

Tabla 32: Propiedades físicas del desarenador. [T¹]

Considerando la capacidad del tanque y el peso del volumen máximo contenido, la carga de la obra es de:

$$\sigma = \frac{m_{obra} + m_{agua}}{S_{apoyo}}$$

Carga σ 0,074 kg/cm²

Cuyo margen de seguridad con respecto a la carga admisible es muy amplio.

Cámara de carga

Este elemento es el encargado de recibir el caudal procedente del desarenador y transferirlo a la tubería de presión, hasta la sala de máquinas. Su función principal es homogeneizar el caudal y mantener un nivel aproximadamente constante que regule la cantidad de agua transferida a la tubería, permitiendo con su diseño eludir el efecto de las variaciones hidráulicas.

Constructivamente, se encontrará adjunto al tanque desarenador por medio de un muro separador y una ventana de vertido. La lámina de fluido, antes de depositarse en la cámara de carga, atraviesa una rejilla de desbaste que elimina posibles elementos flotantes arrastrados por el viento o el entorno.

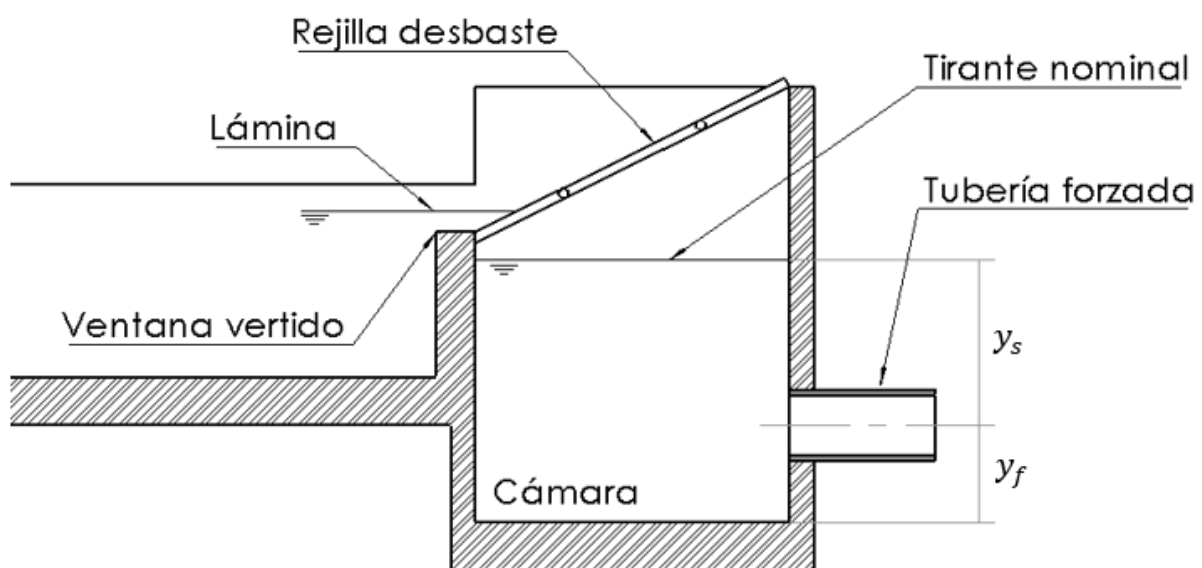


Ilustración 96: Representación constructiva del depósito de carga. [18]

Algunas condiciones teóricas del diseño de cámaras de carga fueron mencionadas en la sección de *Diseño Conceptual*. Además de estas, en la práctica, se consideran:

$$0,2 \text{ m} < y_f < 0,5 \text{ m}$$

$$0,7D < y_s < 1,5D$$

$$v < 0,5\sqrt{gD}$$

donde D es el diámetro de la tubería forzada, en [m].

La primera condición se establece con la finalidad de evitar la entrada de sedimentos en la tubería. Puesto que la cámara está precedida por el desarenador y su diseño ha sido basado en cálculos y márgenes de seguridad que permiten decantar las partículas en suspensión, se tomará un valor bajo para la profundidad y_f .

Profundidad y_f	0,15 m
-------------------------------------	---------------

La segunda y la tercera tienen por finalidad evitar la formación de vórtices y burbujas que sean transferidas a la tubería y puedan provocar problemas de cavitación.

A la salida del desarenador, el agua se vierte por la ventana hacia la cámara. Cuando el ancho de la ventana es igual al de la cámara, como es el caso de estudio, la lámina de agua que atraviesa la ventana, conocida también como resalto hidráulico, posee un espesor (h_v) determinado por la siguiente ecuación:

$$h_v = \left(\frac{Q}{1,84 b} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Ec. 44})$$

donde b es el ancho de la ventana, en [m]. La lámina de agua obtenida es:

Profundidad h_v	7,8 cm
-------------------------------------	---------------

Entonces la velocidad de entrada a la cámara de carga se calcula como el cociente entre el caudal y la sección de la lámina, obteniéndose:

Velocidad de vertido **0,5 m/s**

La cual se encuentra en el intervalo recomendado (0,3 - 3 m/s) de velocidades del fluido sobre muros o estructuras hidráulicas. Como alternativa mejor, puede proyectarse el vertido de forma que la altura de la lámina coincida con el tirante de agua en la cámara, realizándose así una transferencia del caudal menos brusca y turbulenta.

Los criterios para establecer un volumen de la cámara varían considerablemente entre autores, asumiendo proporciones de 10 a 100 veces el caudal de equipamiento. Con el objetivo de acotar el área de decisión, se toma, además de la segunda condición para la prevención de la cavitación, la siguiente expresión de diseño:

$$y_s \text{ mín} = Cv\sqrt{D}$$

donde C es una constante que toma valores aproximadamente entre 0,3 y 0,5, v es la velocidad media en la tubería forzada y D es el diámetro de la misma. Cumpliendo ambos criterios:

Sumergencia y_s **0,2 m**

Se puede verificar, además, que aplicando la Ec. 40 para caudales captados por orificios sumergidos, tomando $\Delta h = y_s$, el caudal es el de equipamiento.

Dimensionalmente, se tiene:

$$V_{\text{cámara}} = (y_f + y_s)bL$$

Tomando un valor de L razonable y coherente con las dimensiones calculadas, se tienen las siguientes dimensiones definitivas de la cámara de carga:

Profundidad	0,35 m
Ancho	0,5 m
Longitud	0,5 m
Volumen	0,0875 m³

Puesto que la altura hidráulica en el desarenador y la cámara de carga es la misma, los posibles excedentes son evacuados mediante los mismos sistemas. Se dispondrá, de forma auxiliar, una segunda ventana de vertido sobre la cámara, conectada al canal de excedente. A la salida de la cámara, se dispondrá una válvula en la tubería forzada para permitir la obstrucción de entrada de caudal y el vaciado de la misma para tareas de mantenimiento.

Puesto que este elemento se encuentra adjunto al desarenador, será fabricado con los mismos materiales y siguiendo el mismo proceso de obra. El volumen de material conjunto es de $0,87 \text{ m}^3$, lo cual será importante desde la previsión económica del proyecto. Dada la carga sobre el suelo calculada en la obra del desarenador y la reducida dimensión de la cámara con respecto a este, no se considera necesario el análisis mecánico del suelo.

Casa de máquinas

La proyección de la sala de máquinas se realizará de un modo sencillo y económico. Con frecuencia, cuando la potencia generada por la instalación es suficientemente alta como para requerir dimensiones considerables del grupo de potencia, la casa de máquinas se diseña considerando el acceso y maniobras de personal y adquiere un carácter importante de obra.

Sin embargo, cuando se trata de pequeños grupos, la solución óptima consiste en cimentar una base sobre el suelo de dimensiones similares al grupo para facilitar su anclaje y, opcionalmente, disponer una cubierta para su protección. Las características cualitativas son descritas a continuación:

- Será fabricada en hormigón, siguiendo métodos análogos a otras obras civiles.
- Constará de la cimentación, la sala formada por tres muros verticales de baja altura y un techo inclinado que será dispuesto posteriormente mediante planchas metálicas ligeras para evacuar el agua de la lluvia sobre la sala.
- En su parte frontal se practicará un cajeado como inicio del canal de descarga, con una ligera pendiente, sobre la que incidirá el agua de la campana de descarga.
- La tubería entrará por la parte trasera, atravesando el muro de hormigón, precedida de una válvula de regulación y una llave de desagüe para el vaciado del conducto. Esta se acoplará directamente al distribuidor de la turbina, la cual se encontrará anclada al suelo de la sala mediante los elementos de fijación correspondientes.

Dimensionalmente, la obra será caracterizada tras realizar la selección de los equipos y conocer las medidas de estos, en los planos de obra. De manera orientativa, la base de cimentación puede tener dimensiones de $1 \times 1 \times 0,4 \text{ m}$, elevándose los muros aproximadamente $0,7 \text{ m}$ sobre el suelo. La obra tendría un volumen de material de $0,44 \text{ m}^3$ y una masa de 1065 kg .

La superficie de apoyo de la obra es de 1 m^2 y, suponiendo una masa del equipo electromecánico de 100 kg, la carga se encuentra muy por debajo de la admisible.

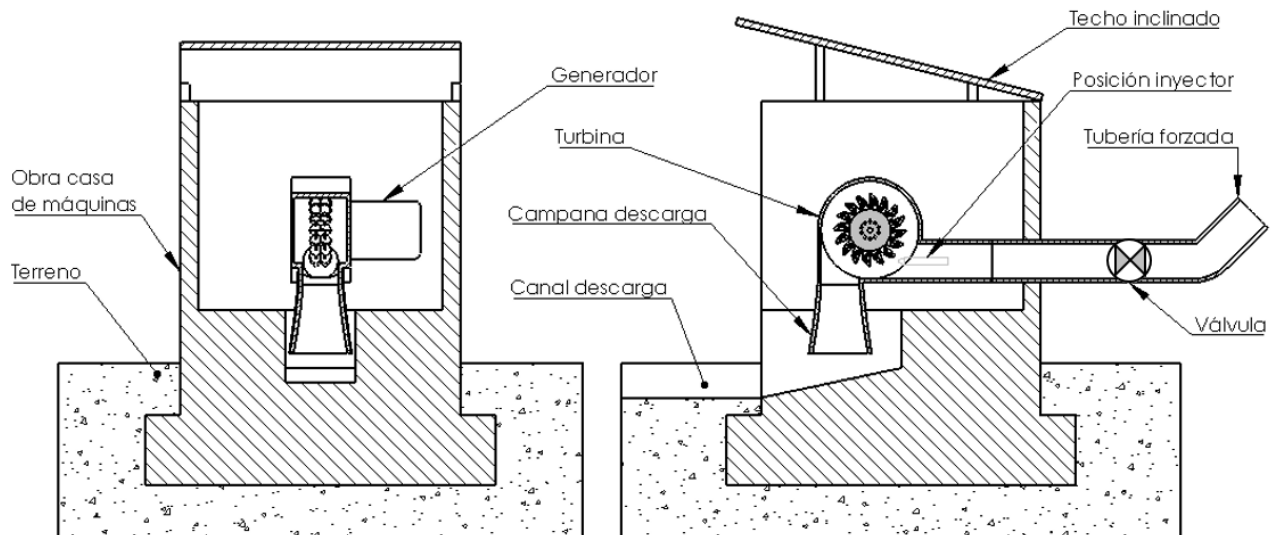


Ilustración 97: Representación constructiva de sala de máquinas diseñada. [18]

Soportes de línea hidráulica

En algunos casos, especialmente cuando las líneas hidráulicas son de gran longitud, pueden requerir soportes que afiancen su posición y absorban las cargas procedentes de los efectos de conducción y de la propia mecánica de los materiales.

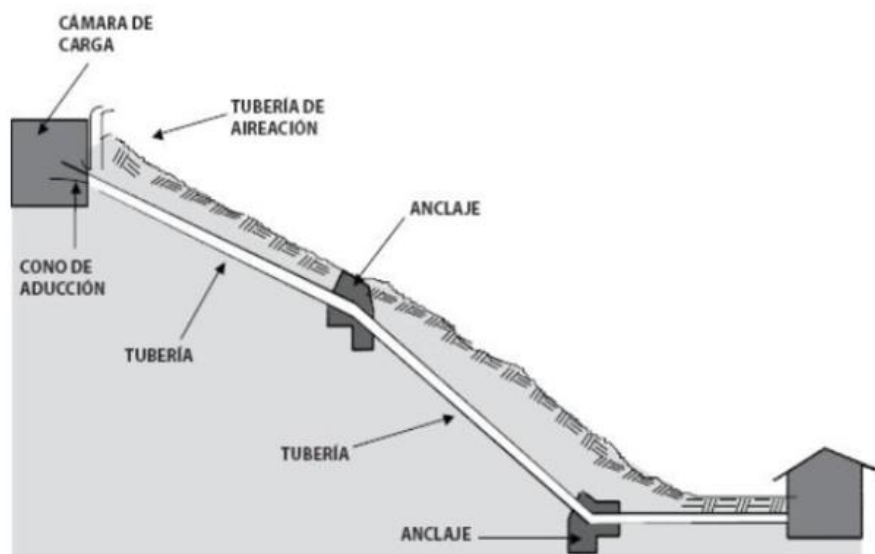


Ilustración 98: Disposición de anclajes de tubería forzada. [152]

En la *Ilustración 98* se observa la ubicación de anclajes únicamente en los cambios de dirección de la tubería, lo cual es razonable, debido a las fuerzas que se ejercen. En el caso de la tubería de derivación, dada su reducida longitud y pendiente, así como la ausencia de cambios de dirección, se considera adecuado el apoyo de esta sobre la zanja, buscando en todo caso terreno firmemente asentado que impida la deformación de la línea.

En el caso de la tubería forzada, la posible instalación de soportes fijos estaría expuesta a las siguientes fuerzas:

- Debidas al peso de la tubería y el fluido.
- Debidas al peso de la tubería situada por encima o por debajo, en sentido axial.
- Debidas a la presión hidrostática.
- Debidas al peso de los propios soportes.
- Debidas al cambio de momento lineal en fluido.

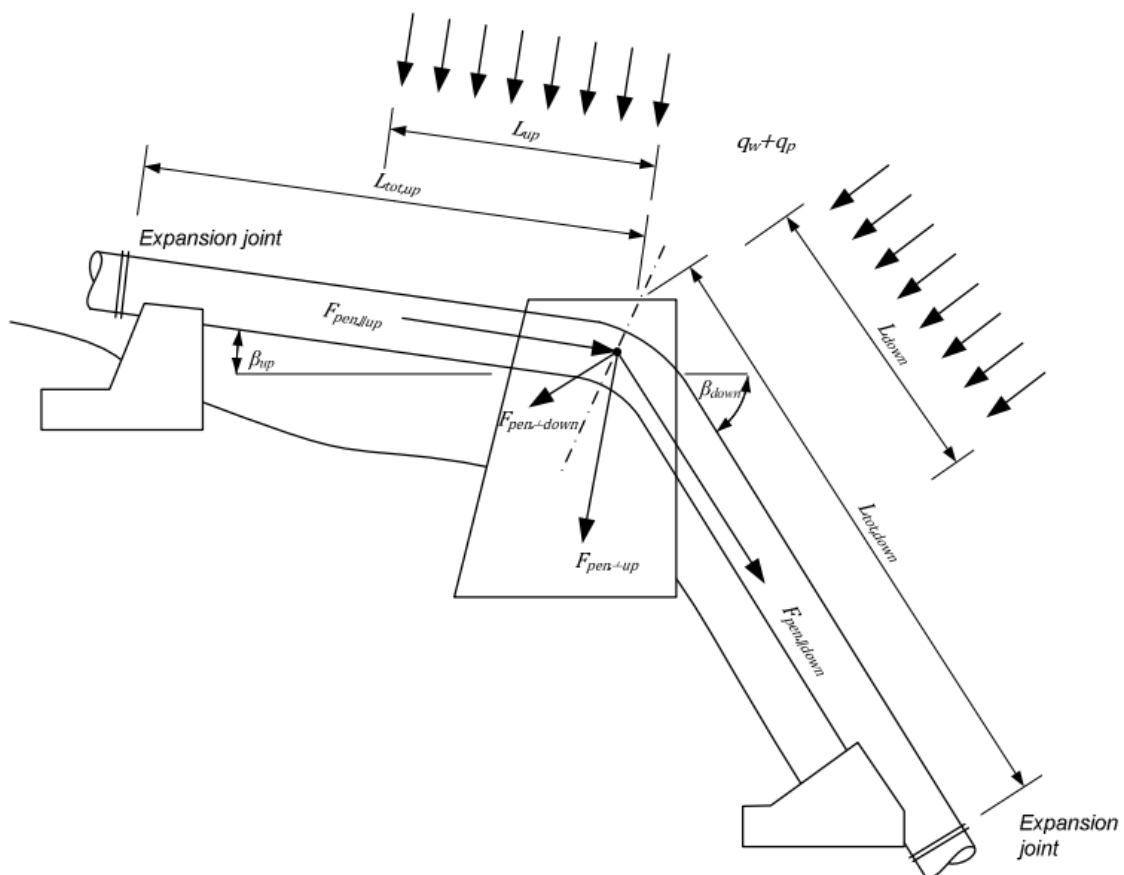


Ilustración 99: Diagrama de fuerzas en soporte fijo. [153]

En cambio, cuando se trata de soportes libres, en los que la tubería únicamente descansa su peso sobre estos pero existe libertad axial, las fuerzas se reducen a:

- Peso de la tubería y el fluido.
- Fuerza de fricción entre tubería y soporte.

Por ello, este tipo de soportes se emplean únicamente en tramos rectos de línea hidráulica.

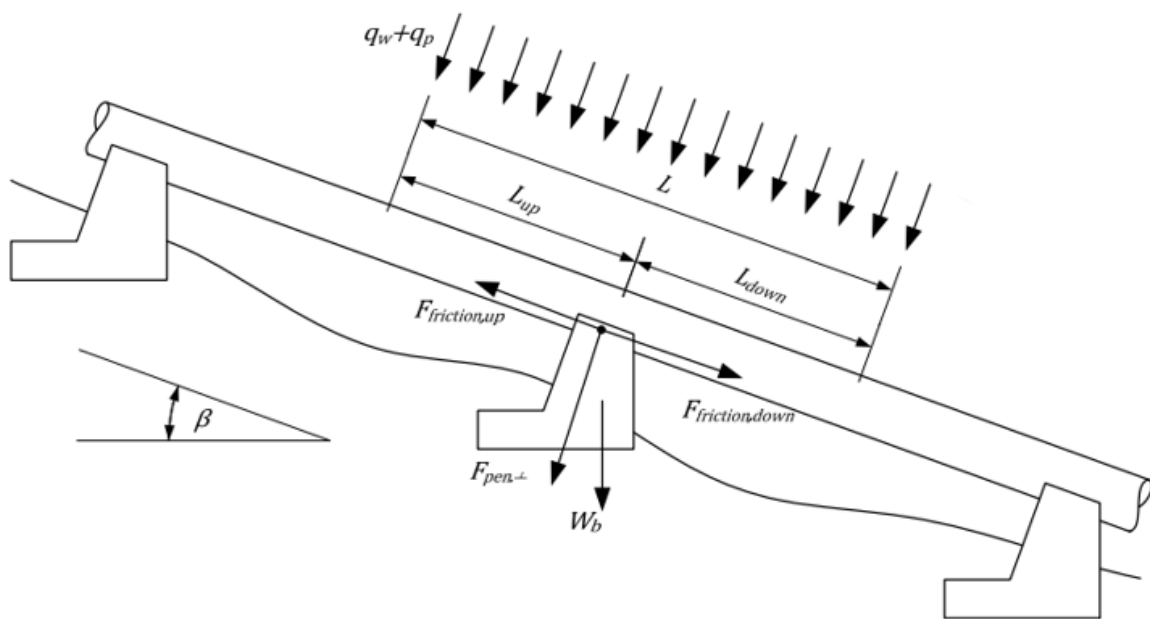


Ilustración 100: Diagrama de fuerzas en soporte libre. [153]

En pequeñas instalaciones con tuberías de PVC, como criterio general de diseño, no se emplean soportes debido a que estas se apoyan y entierran en zanjas, las cuales cumplen perfectamente las necesidades para conducciones tan reducidas. Sin embargo, con el fin de contrarrestar los esfuerzos de flexión previstos en los cambios de dirección de la tubería de presión a la salida de la cámara de carga y a la entrada de la sala de máquinas, así como para mantener una posición recta de la línea con respecto a dichos emplazamientos, se instalarán dos anclajes fijos en los codos.

El diagrama de fuerzas de ambos anclajes se muestra a continuación. Debe tenerse en cuenta que la nomenclatura de los vectores empleada es la misma para ambos soportes, aunque los cálculos se realizarán de forma independiente.

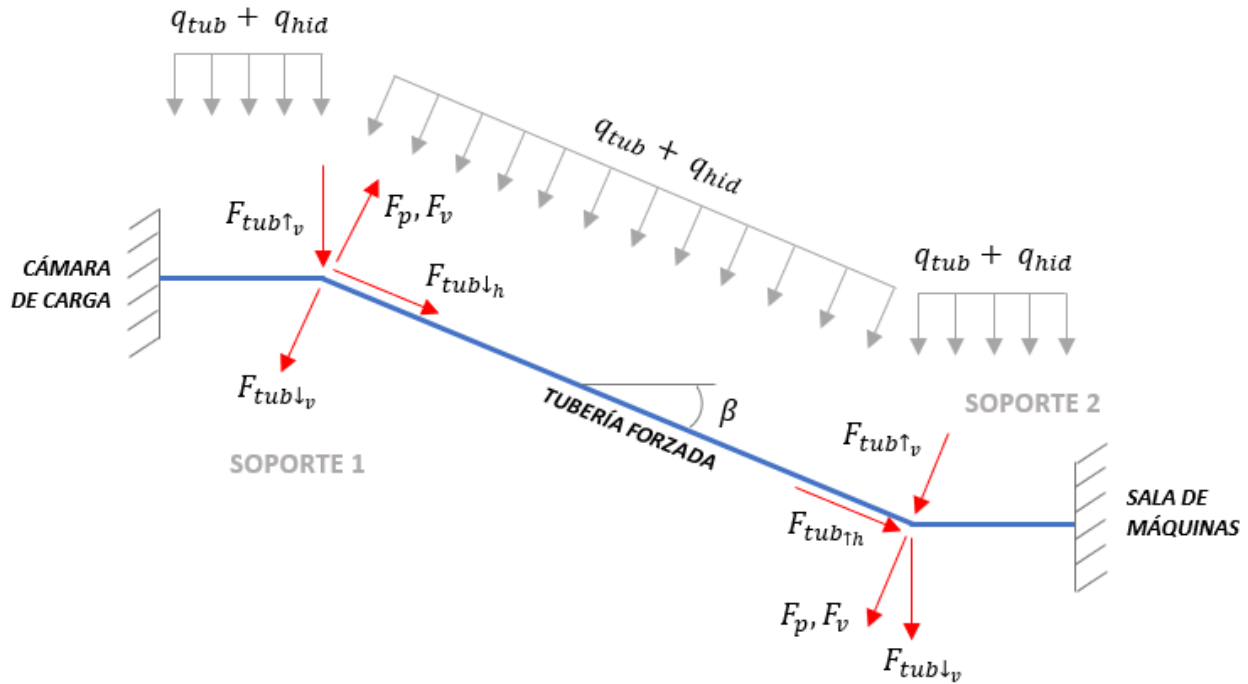


Ilustración 101: Diagrama de fuerzas en soportes de tubería de presión. [18]

En la ilustración previa, las designaciones de las fuerzas y cargas son las siguientes:

- $F_{tub\uparrow_v}$ es la componente perpendicular a la tubería de la fuerza debida al peso del conducto más el del fluido, correspondiente al tramo de aguas arriba o aguas abajo respecto del soporte, según indica la flecha, en [N].
- $F_{tub\uparrow_h}$ es la componente paralela a la tubería de la fuerza debida al peso del conducto más el del fluido, correspondiente al tramo de aguas arriba o aguas abajo respecto del soporte, según indica la flecha, en [N].
- F_p es la fuerza debida a la presión hidrostática ejercida por el fluido en el interior del conducto, en [N].
- F_v es la fuerza debida a la variación del momento lineal en el cambio de dirección del conducto, en [N].
- q_{tub} es la carga uniformemente distribuida del peso de la tubería por unidad de longitud, en [N/m].
- q_{hid} es la carga uniformemente distribuida del peso del fluido por unidad de longitud de tubería, en [N/m].

Puesto que la línea hidráulica dispone de dos cambios de dirección, puede dividirse en tres tramos de longitudes L_1, L_2, L_3 . Entonces, el cálculo de las cargas y fuerzas se realiza como:

$$q_{tub} = \pi \cdot D_{ext} \cdot e \cdot \rho_{PVC} \cdot g$$

$$q_{hid} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int}^2 \cdot \rho_{agua} \cdot g$$

Soporte 1

$$F_{tub\uparrow_v} = \frac{L_1}{2} \cdot (q_{tub} + q_{hid})$$

$$F_{tub\downarrow_v} = \frac{L_2}{2} \cdot (q_{tub} + q_{hid}) \cdot \cos \beta$$

$$F_{tub\downarrow_h} = \frac{L_2}{2} \cdot (q_{tub} + q_{hid}) \cdot \sin \beta$$

$$F_p = \sqrt{F_{p\uparrow}^2 + F_{p\downarrow}^2 - F_{p\uparrow} \cdot F_{p\downarrow} \cdot \cos \beta}$$

$$F_{p\uparrow} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot p_{\uparrow}$$

$$F_{p\downarrow} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot p_{\downarrow}$$

$$F_v = \rho_{agua} \cdot Q \cdot \sqrt{v_{\uparrow}^2 + v_{\downarrow}^2 - 2 \cdot v_{\uparrow} \cdot v_{\downarrow} \cdot \cos \beta}$$

Además, el peso propio del anclaje:

$$W_{sop} = V_{sop} \cdot \rho_{sop} \cdot g$$

Soporte 2

$$F_{tub\uparrow_v} = \frac{L_2}{2} \cdot (q_{tub} + q_{hid}) \cdot \cos \beta$$

$$F_{tub\downarrow_v} = \frac{L_3}{2} \cdot (q_{tub} + q_{hid})$$

$$F_{tub\uparrow_h} = \frac{L_2}{2} \cdot (q_{tub} + q_{hid}) \cdot \sin \beta$$

$$F_p = \sqrt{F_{p\uparrow}^2 + F_{p\downarrow}^2 - F_{p\uparrow} \cdot F_{p\downarrow} \cdot \cos \beta}$$

$$F_{p\uparrow} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot p_{\uparrow}$$

$$F_{p\downarrow} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot p_{\downarrow}$$

$$F_v = \rho_{agua} \cdot Q \cdot \sqrt{v_{\uparrow}^2 + v_{\downarrow}^2 - 2 \cdot v_{\uparrow} \cdot v_{\downarrow} \cdot \cos \beta}$$

Además, el peso propio del soporte:

$$W_{sop} = V_{sop} \cdot \rho_{sop} \cdot g$$

Podría incluirse también el término de fuerza de rozamiento de la tubería con el suelo de la zanja, sin embargo, este sería un caso menos restrictivo en que dicha fuerza favorecería el equilibrio de fuerzas admitidas por el soporte. Como margen de seguridad, se asumirá que el rozamiento entre el PVC y el suelo es despreciable frente a otras fuerzas que intervienen.

Adicionalmente, como resultado de la elevada longitud de la tubería para lograr un salto de baja altura, la inclinación de esta es muy pequeña y los cambios de dirección son muy suaves. Ello implica que la variación de momento lineal puede considerarse despreciable frente a las otras fuerzas, pues F_v toma valores inferiores a 7 N.

Condiciones de equilibrio

Las condiciones de equilibrio son aquellas que deben establecerse para asegurar que el conjunto de fuerzas sobre un soporte cumple los requisitos estáticos. Dichas condiciones son:

- **Capacidad de carga.** El conjunto de fuerzas ejerza una carga sobre el suelo inferior a la capacidad de este. Incluye términos de momento debidos al desfase relativo entre líneas de aplicación de fuerzas.

$$\sigma_{soporte} = \frac{\sum F_z}{A_{base}} \left(1 + \frac{6 \cdot x}{L_{base}} \right) < \sigma_{adm} (suelo)$$

donde:

F_z son las fuerzas aplicadas en dirección vertical, en [N].

x es el desfase o excentricidad de la línea de aplicación del conjunto de fuerzas verticales con respecto a la esquina del soporte que tiende a ejercer de centro de giro debido al momento resultante, en [m].

$$x = \frac{L_{base}}{2} - \frac{M}{\sum F_z}$$

donde M es el momento de las fuerzas, que se obtiene de:

$$M = \sum F_x \cdot z + \sum F_z \cdot \frac{L_{base}}{2} + W_{sop} \cdot \frac{L_{base}}{2}$$

- **Deslizamiento.** La suma de fuerzas horizontales sobre el soporte debe ser inferior a la resistencia de fricción del suelo, impidiendo el deslizamiento. En la práctica, suele tomarse un valor para el coeficiente de rozamiento de $\mu = 0,5$.

$$\sum F_x = \mu \cdot \sum F_z$$

- **Vuelco.** Implica que la distancia horizontal de aplicación de las fuerzas verticales con respecto al punto de giro, susceptible de vuelco, sea suficientemente pequeño para asegurar el equilibrio. De no cumplirse, el giro del soporte puede provocar esfuerzos de flexión en la tubería y deterioro de la misma. La condición de diseño es:

$$x < \frac{L_{base}}{6}$$

Se toma, inicialmente, un soporte trapezoidal de dimensiones ligeramente superiores al diámetro de la tubería. Con el fin de facilitar su fabricación, se proyectará una geometría sencilla.

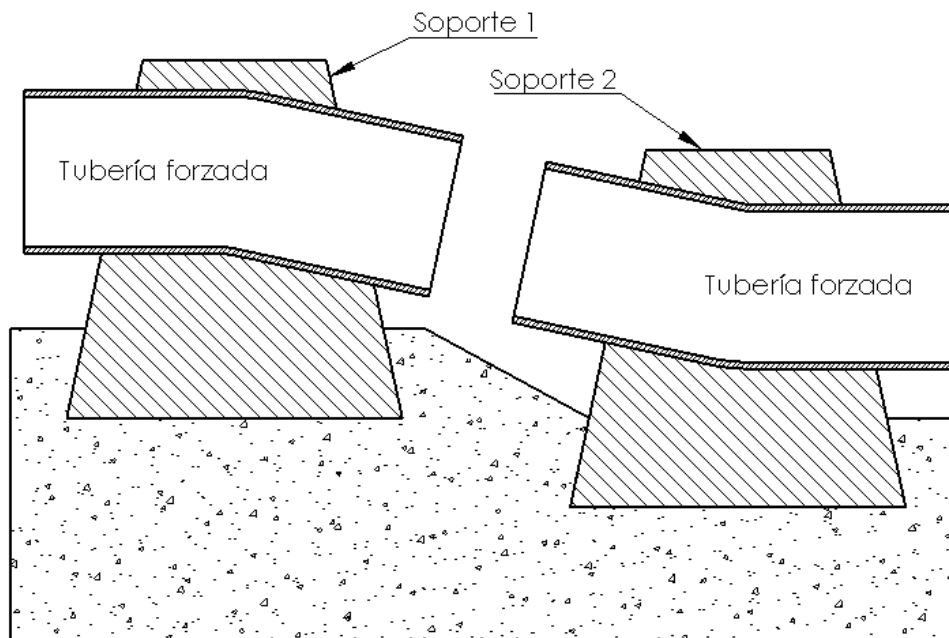


Ilustración 102: Representación constructiva de soportes diseñados para tubería. [18]

Datos de cálculo	
ρ_{PVC}	1400 kg/m ³
ρ_{agua}	1000 kg/m ³
D_{int}	140 mm
D_{ext}	147 mm
e	3,5 mm
L_1	1 m
L_2	313 m
L_3	1 m
β	3,5 °
A_{base}	900 cm ²
L_{base}	30 cm
V_{anc}	14100 cm ³
ρ_{anc}	2400 kg/m ³

Tabla 33: Datos de cálculo de soportes. [T¹]

Se calculan las fuerzas y se resuelven las ecuaciones de equilibrio, obteniéndose:

$$q_{tub} \quad 22,2 \text{ N/m}^2$$

$$q_{hid} \quad 151 \text{ N/m}^2$$

SOPORTE 1

$$F_{tub\uparrow_v} \quad 86,6 \text{ N}$$

$$F_{tub\downarrow_v} \quad 5411 \text{ N (20\%)}$$

$$F_{tub\downarrow_h} \quad 1655 \text{ N}$$

$$F_p \quad 17,2 \text{ N}$$

$$W_{sop} \quad 332 \text{ N}$$

$$M \quad -1176,25 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{soporte} \quad 131,2 \text{ kN/m}^2 = 1,33 \text{ kg/cm}^2$$

SOPORTE 2

$$F_{tub\uparrow_v} \quad 5411 \text{ N (20\%)}$$

$$F_{tub\downarrow_v} \quad 86,6 \text{ N}$$

$$F_{tub\uparrow_h} \quad 1655 \text{ N}$$

$$F_p \quad 2859 \text{ N}$$

$$W_{sop} \quad 332 \text{ N}$$

$$M \quad 1052,6 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{soporte} \quad 156 \text{ kN/m}^2 = 1,59 \text{ kg/cm}^2$$

Para los cálculos se ha supuesto que el 80% del peso de la tubería y el fluido en el tramo inclinado es soportado por el suelo de la zanja, lo cual será, con toda seguridad, incluso mayor.

En este caso, la primera condición de equilibrio no se cumple, pues la capacidad de carga del suelo es inferior a la carga implicada en los soportes. Para resolver esta incompatibilidad de diseño se toma una dimensión mayor del ancho del soporte, de modo que el área de apoyo es 600 cm² mayor, con respecto al caso anterior. El único valor, además de la superficie de la base, que se modifica es el volumen del soporte (28.936 cm³). Los nuevos resultados obtenidos son:

SOPORTE 1	
$F_{tub\uparrow_v}$	86,6 N
$F_{tub\downarrow_v}$	5411 N (20%)
$F_{tub\downarrow_h}$	1655 N
F_p	17,2 N
W_{sop}	681 N
M	-1228,6 Nm
$\sigma_{soporte}$	75 kN/m² = 0,764 kg/cm²

SOPORTE 2	
$F_{tub\uparrow_v}$	5411 N (20%)
$F_{tub\downarrow_v}$	86,6 N
$F_{tub\uparrow_h}$	1655 N
F_p	2859 N
W_{sop}	681 N
M	1138,5 Nm
$\sigma_{soporte}$	91,3 kN/m² = 0,93 kg/cm²

Los valores resultantes permiten validar el diseño frente a la capacidad de carga de los suelos. Además, una rápida comprobación de las condiciones de deslizamiento y vuelco permiten comprobar que la fuerza horizontal es inferior a la resistencia por fricción del suelo y se cumple la restricción para evitar el giro.

Pérdidas de carga

En la presente sección se analizarán las diferentes pérdidas energéticas en la instalación, las cuales fueron debidamente tratadas desde la perspectiva teórica en la sección de *Pérdidas hidráulicas*. Se contrastarán los resultados con las suposiciones inicialmente propuestas para la estimación de la potencia de la central.

Pérdidas por conducción

Puesto que el potencial hidráulico aprovechable de la instalación proyectada se encuentra acotado entre la cámara de carga y la turbina, no se realizarán los cálculos de pérdidas en el conducto de derivación, pues estas no influyen en la energía final generada por la instalación.

Por tanto, las pérdidas en la tubería forzada se obtendrán como la suma de todas las pérdidas implicadas en la conducción desde la embocadura de esta hasta la brida de entrada de la turbina, a partir de la cual las pérdidas vienen dadas por el fabricante.

Pérdidas primarias

Las pérdidas primarias o de rozamiento de superficie son aquellas producidas por efecto de la fricción del fluido con las caras interiores del conducto. Su cálculo a partir de la Ec. 3 requiere de previo conocimiento del régimen del flujo. Para ello, es necesario obtener el número de Reynolds, cuya expresión es:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

donde:

- ρ es la densidad del agua, en [kg/m³].
- v es la velocidad del flujo, en [m/s]
- μ es la viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de trabajo, en [kg/(m·s)].
- D es el diámetro interno de la tubería forzada, en [m]

ρ	1000 kg/m ³
v_s	1,3 m/s
μ (20°C)	0,001 kg/(m·s)
D	0,14 m

Reynolds Re 182000

Puesto que es mucho mayor de 2300, valor tomado como límite o transitorio entre el régimen laminar y el turbulento, se tiene este último. Para la obtención del factor de fricción de Darcy f se toma por tanto la expresión de Colebrook (Ec. 5):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Tomando como valor de rugosidad ε el correspondiente al PVC de la *Tabla 6*, se tiene:

Factor de fricción f 0,015

Lo que implica unas pérdidas primarias por conducción de:

Pérdidas primarias h_f 2,9 m

Pérdidas secundarias

Las pérdidas secundarias o de rozamiento de forma son aquellas que se dan cuando el fluido atraviesa determinados accesorios de la línea hidráulica, como codos, válvulas, bifurcaciones, rejas, etc. En la tubería forzada existen dos codos de ángulo muy abierto y dos válvulas de regulación a la salida de la cámara de carga y a la entrada de la sala de máquinas. Siguiendo la Ec. 6 de pérdidas:

$$h_s = K \frac{v^2}{2g}$$

Se sabe que $K = 0,3$ para codos a 45° y $K = 0,1$ para valor mitad, por tanto el coeficiente de pérdidas en codos será inferior a este último. Tomando dicho valor como caso máximo:

Pérdidas en codos h_{s-c} $2 \times 0,0086 = 0,017$ m

En el caso de las válvulas, en condiciones normales de funcionamiento, para una válvula de compuerta se tiene $K = 0,19$. Entonces:

$$\text{Pérdidas en válvulas } h_{s-v} \quad 2 \times 0,016 = \mathbf{0,033 \text{ m}}$$

Pérdidas totales conducción

$$h_{r-tub} = h_f + h_{s-c} + h_{s-v}$$

$$\text{Pérdidas por conducción } h_{r-tub} \quad \mathbf{2,95 \text{ m}}$$

Pérdidas en desarenador y cámara

Del mismo modo que las pérdidas en el conducto de derivación no son relevantes desde el punto de vista de la generación, tampoco lo son en otros dispositivos previos a la cámara de carga, como el desarenador, por lo que no se realizará su cálculo.

Las pérdidas en la reja de desbaste, frecuentemente ubicada en el fondo de la cámara, influyen en la eficiencia hidráulica si se da tal caso. Sin embargo, puesto que esta es superficial y precede a la superficie de la cámara, tampoco se calculará.

Por otra parte, sí deben calcularse las pérdidas secundarias por entrada de tubería. Existe una diferencia considerable entre disponer dicha entrada de forma recta o abocinada, siendo en el primer caso el factor $K = 0,5$ y en el segundo $K = 0,1$. En el proceso de obra, se tratará de suavizar las aristas de la entrada con el fin de reducir dicho término.

$$\text{Pérdidas entrada tubería } h_{r-ent} \quad \mathbf{0,025 \text{ m}}$$

Rendimiento de la instalación

Sumando el conjunto de pérdidas obtenidas desde el nivel A hasta la brida de entrada de la turbina, se tiene:

$$\text{Pérdidas totales } h_{r-INST} \quad \mathbf{2,98 \text{ m}}$$

Entonces la altura neta es:

$$H = H_b - h_{r-INST}$$

Altura neta H 16 m

El rendimiento hidráulico de la instalación, hasta la turbina:

$$\eta_{diseño} = \left(1 - \frac{h_{r-INST}}{H_b}\right) 100$$

Rendimiento diseño $\eta_{diseño}$ 84,3 %

Para turbinas hidráulicas de 3 - 5 kW, los fabricantes indican rendimientos de 0,87 – 0,92.

$$\eta_{inst.} = \eta_{inst.} \cdot \eta_{grupo}$$

Rendimiento instalación $\eta_{inst.}$ 76 %

Potencia instalada P_a 2.833 kW

Metodología de trabajo

Definidas las características de la instalación y sus diferentes sistemas, a continuación se detallan los métodos y protocolos fundamentales para el desarrollo del proyecto. El objetivo principal será establecer estrategias y directrices que aseguren el correcto cumplimiento de los métodos, plazos, medidas de seguridad, etc.

Instrucción personal de obra

El personal de obra en la zona de trabajo no posee formación cualificada ni experiencia en el desarrollo de instalaciones hidroeléctricas. Generalmente, pertenece a la comunidad y su colaboración en la implementación de los proyectos les otorga ciertas ventajas:

- Uso y disfrute directo de los proyectos y los beneficios que producen.
- Descuentos en servicios ofrecidos por los proyectos de la organización, como la educación en las escuelas.
- Impulso del desarrollo de su comunidad y autonomía.

Por ello, será fundamental en primera instancia llevar a cabo una reunión de instrucción con el personal para definir conceptos, normas y planes de ejecución. La exposición y conocimiento de estos tiene por objetivo velar por la seguridad de todos los recursos humanos y materiales y llevar a cabo el trabajo en las condiciones expuestas a lo largo del documento. Estos serán:

- Conocimiento del área de trabajo y delimitación de sistemas.
- Tratamiento adecuado de material y herramientas de trabajo.
- Procesos y métodos de desarrollo de los sistemas (cronología).
- Normativa de seguridad (horario, equipos de protección, métodos de trabajo, descansos, alimentación e hidratación, etc.)
- Restricciones de manipulación de equipos delicados.
- Programas de operación y mantenimiento de la instalación.

Análisis y reconocimiento de área de trabajo

Al llegar al área de trabajo se deberán llevar a cabo una serie de acciones que permitan conocer el grado de fidelidad de las suposiciones y los parámetros tomados de la información disponible, con respecto a la realidad. Para ello, se realizarán algunas comprobaciones,

mediciones y cálculos, analizando la correlación con los presentados en este documento. En caso de ser necesario, se valorará la necesidad de modificar algún aspecto del diseño, siempre que este sea compatible con el correcto funcionamiento de la instalación y las demás condiciones de contorno.

Análisis topográfico

Conocer la topografía real del terreno es de suma importancia para cumplir los requisitos del diseño, determinar la mano de obra necesaria y la magnitud de los materiales empleados. Para ello, la disposición relativa de los sistemas debe corresponderse con las curvas de contorno empleadas en el diseño. Serán necesarios los siguientes equipos métricos:

- **Cinta métrica (100 m) u odómetro digital de rueda.** Empleado para medir distancias rectas. Útiles para el trazado de líneas, delimitación de sistemas, longitud real entre cotas, etc. Preferiblemente, se empleará la cinta métrica, haciendo uso de hitos o balizas para señalizar los trazados.



Ilustración 103: Cinta métrica de 100 m. [154]

- **Distanciómetro.** Permite realizar por láser mediciones de distancias, ángulos, superficies, etc., permitiendo así obtener la diferencia de cota entre dos puntos. Complementado con la cinta, es posible determinar las curvas de contorno a lo largo de un perfil recto del terreno. Será también práctico para medir otras longitudes y profundidades (zanjas, excavaciones, etc.).



Ilustración 104: Distanciómetro láser. [155]

- **Altímetro.** Puede emplearse para medir la altura con respecto al nivel del mar y obtener la cota de puntos discretos del perfil del terreno. Sustituye o, preferiblemente, complementa la función del distanciómetro.



Ilustración 105: Altímetro digital. [156]

Otras alternativas más sofisticadas, como las estaciones o niveles ópticos, se montan en el terreno sobre trípodes y realizan múltiples mediciones simultáneas de alta precisión. El principal motivo para descartar esta opción es su elevado coste. Los tres dispositivos previamente descritos pueden adquirirse en conjunto por una cantidad inferior a los 100 €, mientras que los niveles y los accesorios necesarios de montaje, en promedio, triplican dicha cifra.

Si la organización dispone de alguno de dichos equipos, será utilizado con el fin de reducir los costes del proyecto. De no ser así, serán adquiridos en España y transportados hasta la zona de trabajo.

Análisis granulométrico

Puesto que se han desarrollado múltiples proyectos de obra civil previamente en la zona de trabajo, se solicitará información a la organización o a entidades locales sobre el estudio de los suelos. De presentarse inviabilidad para conocer la capacidad de carga del terreno, así como características generales de composición, humedad, etc., será necesario llevar a cabo un análisis de la granulometría del mismo.

Dicho estudio tendrá como fin obtener los parámetros reales sobre los que se debe definir la mecánica de los suelos, debiendo rehacerse los cálculos de la correspondiente sección y validar que todos los sistemas cumplen las condiciones de carga.

El análisis granulométrico consiste en emplear una serie de técnicas para determinar la textura del suelo, es decir, la proporción de los diferentes granos presentes en este: arcillas, limos, arenas y gravas. En la práctica, este estudio es realizado en laboratorios con gran variedad de equipos que permiten optimizar cada etapa del proceso (horno, balanza, agitador mecánico, etc.). Sin embargo, pueden realizarse procesos análogos con menor precisión o métodos cualitativos. El estudio se realiza según el siguiente proceso:

1. Toma de muestra del suelo en zona de estrato donde se cimenta la obra. La muestra tomada se recoge en un recipiente y se pesa en una báscula de precisión.
2. Se mezcla la muestra con agua en el recipiente y se lleva a cabo un lavado intenso hasta que el agua adquiere opacidad.
3. Se hace pasar el agua por el tamiz Nº 200, que es aquel de malla más fina que únicamente atraviesan las arcillas y los limos.
4. Se repite el proceso de mezcla con agua, lavado de la muestra y tamizado fino reiteradamente hasta que el agua alcanza una cristalinidad absoluta.
5. La fracción de muestra que no atraviesa el tamiz Nº 200 se conserva en el recipiente y se expone a elevada temperatura para su secado. Puesto que no se dispone de horno eléctrico, se calienta el recipiente en un cazo con fuego.
6. Se realiza nuevamente el pesado de la muestra. La diferencia entre la medida inicial del ensayo y esta devuelve la fracción de finos presente en el suelo.
7. Se introduce la muestra restante en la columna graduada de tamices, agitándose esta de forma intensa en diferentes direcciones.
8. Al separar los tamices, se trata de introducir manualmente o empleando recipientes adicionales, los elementos más gruesos cambiando su posición, de forma que la irregularidad geométrica permita al elemento atravesar la malla únicamente en determinada posición o posiciones. Aquellos en que sea posible, se transfieren al siguiente tamiz.

9. Cuando todos los elementos presentes en un tamiz quedan retenidos en este, se apartan y se pesan para obtener una medida de masa asociada al N° del tamiz.
10. Bajo el tamiz N° 200 existe un depósito cuyas partículas son aquellas que han atravesado la malla, por lo que su masa deberá añadirse a la de las partículas finas eliminadas en la fase de lavado.
11. Se prepara una tabla con el N° de cada tamiz, la masa y porcentaje respecto de la muestra retenido y el porcentaje total que atraviesa el tamiz. También se incluye el diámetro equivalente en milímetros a cada número de tamiz, el cual se encuentra tabulado.

Tamiz N°	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
2"	50,800	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,100	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,400	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,050	11,72	1,09	1,09	98,91
1/2"	12,700	18,73	1,75	2,84	97,16
3/8"	9,520	32,75	3,05	5,89	94,11
4	4,750	174,33	16,25	22,15	77,85
10	2,000	285,92	26,66	48,81	51,19
30	0,600	237,23	22,12	70,93	29,07
40	0,425	65,28	6,09	77,01	22,99
60	0,250	117,79	10,98	87,99	12,01
100	0,150	83,95	7,83	95,82	4,18
200	0,074	42,15	3,93	99,75	0,25
Fondo		2,42	0,23	99,98	0,02
Total error (%)	0,022	1072,27	99,98	-	-

Tabla 34: Ejemplo de registro de medidas del ensayo granulométrico. [T¹⁶]

12. Se representan los datos en una gráfica, siendo el eje de abscisas los diámetros del tamiz en mm, en escala logarítmica y el eje de ordenadas el porcentaje de muestra pasante.

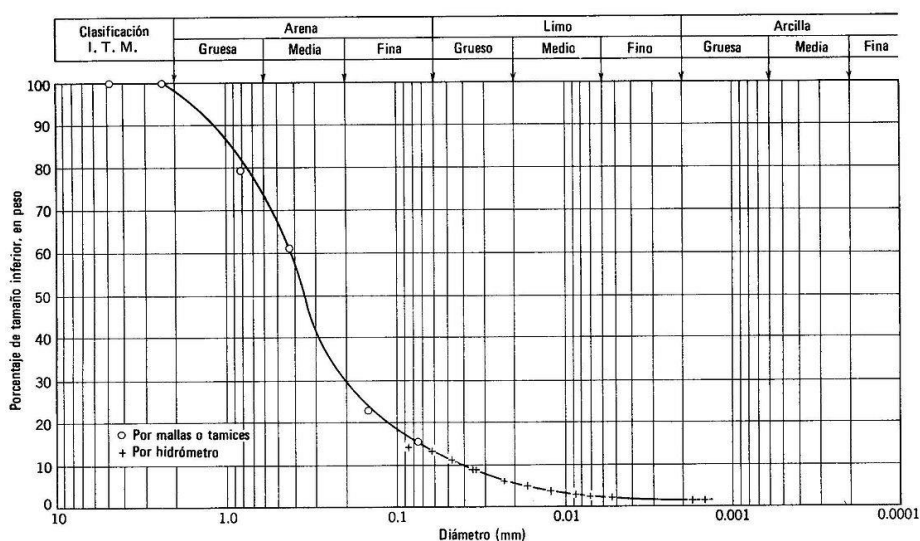


Gráfico 21: Ejemplo de representación de datos del ensayo. [G¹¹]

13. A partir de la curva representada, en la parte superior se observa la fracción de muestra correspondiente a arenas, limos y arcillas. Con dichas fracciones se puede obtener, a partir de tablas o gráficos, la clasificación del suelo y los correspondientes datos necesarios para los cálculos mecánicos.

El ensayo de granulometría requiere de dos elementos básicos:

- **Tamices graduados.** Son sencillos de adquirir, aunque su coste es relativamente elevado. La graduación sigue habitualmente la norma ASTM.



Ilustración 106: Tamices para análisis granulométrico. [157]

- **Báscula de precisión.** Empleada para la medida de masa de las fracciones granulares de la muestra. Deberá ser alimentada por pilas. Será transportada desde España.

Otro material necesario para llevar a cabo el ensayo que podrá adquirirse durante la compra de material en el país de destino son recipientes metálicos ligeros (al menos 3), brocha y martillo o mazo de goma.

Medición y trazado de sistemas

Conocidas las condiciones reales de trabajo, se delimitan en posición y dimensiones los diferentes sistemas de la instalación, con el fin de ubicarlos y facilitar los procesos posteriores. Para ello, se traza la trayectoria de líneas hidráulicas y contornos de las obras civiles mediante balizas señalizadoras y cinta, marcando en cada una de las primeras la información geográfica con respecto a la referencia tomada.

En el centro de cada contorno o bien a lo largo de las líneas se dispondrá una baliza con la información acerca de la excavación (profundidad, geometría de la zanja, inclinación, etc.) y el proceso de obra posterior (enterrado, encofrado de hormigón, cimentación, etc.).

Adicionalmente, se habilitará y delimitará un espacio para contener única y exclusivamente los materiales y herramientas destinados al desarrollo del proyecto, distribuido de tal manera que el acceso a todo ello se realice de forma rápida, sencilla y controlada.

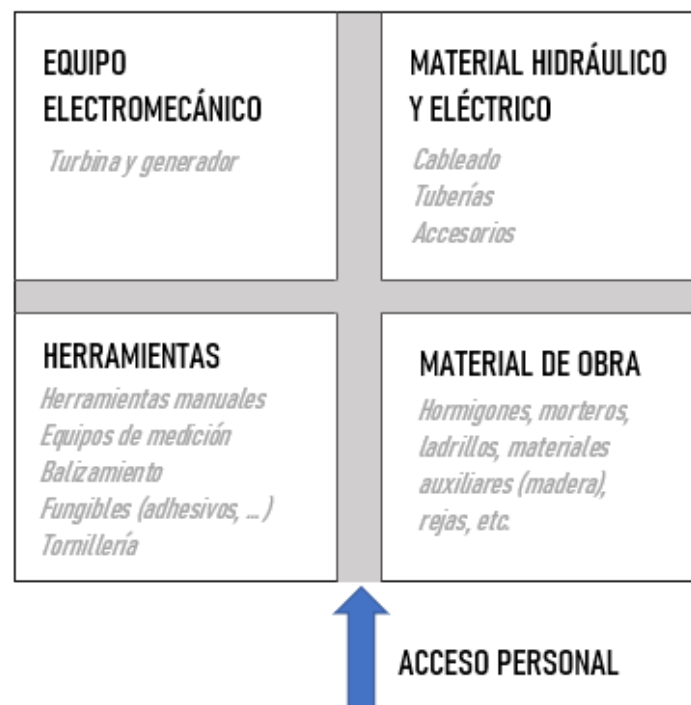


Ilustración 107: Zona destinada al almacenamiento de materiales y equipos. [18]

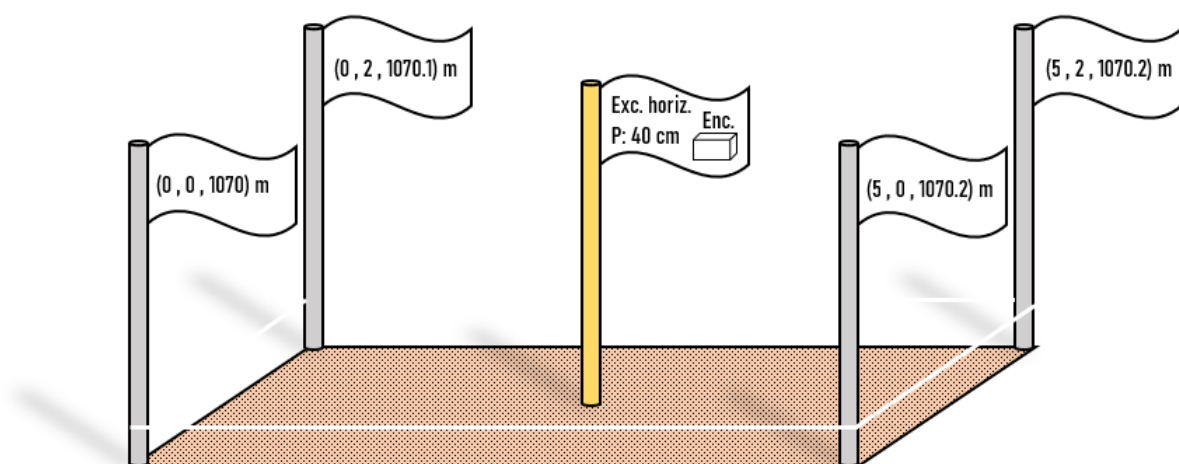


Ilustración 108: Representación de delineado de obra. [18]

Adquisición y recepción de material

Analizado el terreno, sus características y los factores de influencia del área de trabajo, se procederá a la adquisición del material y herramientas de obra. Ello tendrá lugar en la capital, Harare, situada a 2 horas aproximadamente, en acompañamiento de personal con conocimiento del comercio local. Deberán valorarse los siguientes aspectos relativos a la compra:

- Coste propio del material, incluyendo impuestos.
- Posibilidad de transporte o necesidad de contratación (costes).
- Material o herramientas comunes entre proyectos.
- Importación extranjera (costes de envío, empaque, aduanas, etc.).

Se priorizarán los siguientes aspectos del uso de materiales y herramientas:

- Reutilización sobre adquisición, si la organización dispone de determinados materiales o equipos necesarios en el desarrollo del proyecto.
- Adquisición local sobre importación, con el fin de favorecer el comercio local y evitar las dificultades y costes supuestos en los trámites y entrega de productos externos.
- Contratación sobre adquisición, especialmente en maquinaria y herramientas necesarias para llevar a cabo la obra.

En caso de que el material no sea adquirido y transportado directamente por el responsable de obra o quede a cargo de empresas de transporte, la recepción de material deberá realizarse en presencia de dicho responsable o persona que, en su defecto, este designe con el objetivo de almacenarlo correctamente y realizar el correspondiente inventario.

Producto local

El producto local será todo aquel adquirido a nivel nacional. Además del coste y los impuestos (14,50 %), puede involucrar costes de envío y serán los siguientes:

- Materiales de construcción: hormigones, concretos, ladrillos, etc.
- Materiales de obra auxiliares: madera para encofrados, tablones, traviesas, escuadras, etc.
- Tornillería: clavos, tirafondos, alcayatas, tacos, pasadores, etc.
- Fungibles: adhesivos, alambre, pinturas y tratamientos, cintas, bridas, etc.

- Material hidráulico: tuberías, accesorios, válvulas, juntas, etc.
- Material eléctrico: cableado, auxiliares eléctricos, etc.
- Material de señalización: balizas o postes, cinta, marcadores, etc.
- Herramientas manuales: azadas, picos, palas, martillos, sierras, etc.

También será considerado producto local aquel material o servicio contratado temporalmente, como alquiler de maquinaria, contratación de personal cualificado, etc.

Producto importado

Todo producto procedente de países diferentes al de destino será producto importado. Comprende tanto aquellos transportados como equipaje por los responsables de los proyectos, como adquirido a empresas extranjeras. Principalmente, serán dos grupos de productos:

- Grupo electromecánico. Será adquirido en China e importado a Zimbabue. Deberán realizarse las correspondientes solicitudes de importación y cumplir los requisitos exigidos, los cuales se detallan en las guías de importación de la Oficina Nacional de Desarrollo del Comercio de Zimbabue. Se recomienda iniciar los trámites con varios meses de antelación con el fin de evitar problemas en la recepción.
- Equipos de valor. Aquellos dispositivos que puedan ser aportados por los responsables de los proyectos o cedidos a estos con el fin de reducir costes: equipos de medición (báscula de precisión, distanciómetro, nivel, etc.) o herramientas de trabajo (taladro, sierra de calar, etc.)

Plan de ejecución

La definición del plan de ejecución permitirá establecer una estrategia para llevar a cabo las diferentes etapas del proyecto en un orden cronológico, conociendo además los recursos necesarios, tanto en mano de obra y material como en tiempo, para llevarlo a cabo de forma óptima.

Además, se considerará la interdependencia entre las fases o tareas concretas para determinar las ejecuciones prioritarias y seguir un orden lógico del trabajo pues, de lo contrario, es muy probable que exista confusión o se produzcan fallos que involucren costes temporales y/o materiales en el proyecto.

El plan de ejecución, adjunto en el ANEXO I, ha sido elaborado contemplando los siguientes aspectos:

- Fases cronológicas del proceso de análisis, preparación y ejecución.

- Disponibilidad de recursos humanos, incluyendo voluntarios.
- Disponibilidad de recursos temporales (planificación).
- Tasas de productividad basadas en mano de obra empleadas en el ámbito profesional y recomendadas para estimar la duración de las fases de obra. Se han reducido las tasas de productividad entre un 30 - 50 % en actividades que requieren de cierta cualificación o tiempo de ejecución.
- Seguridad y protección del personal, prácticas saludables (horarios, descansos, necesidades básicas, relevos, etc.).

Se establecen 5 etapas generales que posteriormente servirán para establecer un orden de prioridad entre tareas y conocer la dependencia entre ellas.

1. Análisis y mediciones sobre terreno, delineado de contornos y líneas hidráulicas.
2. Desarrollo de obra: excavación, apisonado y perfilado de terreno, encofrado, hormigonado, etc.
3. Conexión entre sistemas.
4. Pruebas de operación sobre los diferentes sistemas.
5. Enterrado de líneas hidráulicas, marcación de niveles y ultimación de detalles.

Programa de mantenimiento

Este tendrá por objetivo asegurar el correcto funcionamiento de la instalación, en las condiciones de oferta y demanda existentes en cada momento, así como llevar a cabo un tratamiento adecuado de los sistemas con el fin de conservar la eficiencia y prolongar la vida útil de los equipos.

Regulación de válvula de toma

La válvula instalada sobre la tubería en la obra de toma permite regular el caudal captado del embalse. Los motivos para llevar a cabo esta regulación son:

- Las variaciones del volumen embalsado conllevan desplazamientos de la cota superficial y cambios en la cantidad de agua admitida.
- Los cambios en la demanda implican cambios en el caudal turbinado. La turbina regula de forma automática su propia válvula de admisión, sin embargo, el caudal tomado debe ser el mismo que el turbinado para evitar desbordamientos en el desarenador y la cámara de carga.

Se designará a un responsable local para llevar a cabo la regulación periódica de la válvula de admisión. Sobre el accionamiento de la válvula existirán indicaciones para gestionar el grado de apertura de la misma en función de la carga hidráulica del embalse, la cual podrá observarse sobre un poste graduado, visible desde la posición de regulación.

Al activar o desactivar las bombas de riego, puesto que su consumo es muy superior al de otros emplazamientos, la válvula deberá regularse igualmente para admitir el paso del caudal necesario.

Si bien el responsable de la regulación debe realizar un seguimiento periódico (diario) del nivel del embalse y de los intervalos de funcionamiento de las bombas de riego, este trabajo sustituirá la necesidad de regar los campos manualmente y favorecerá el desarrollo y la especialización del oficio.

Limpieza de desarenador y cámara

El depósito de sedimentos del desarenador acumulará partículas periódicamente y deberá limpiarse con el fin de no alterar el régimen de funcionamiento del sistema. Igualmente, la rejilla de desbaste de la cámara de carga podría retener sólidos. Se designará a un responsable local de limpieza periódica del desarenador y la cámara de carga, cuya tarea deberá realizarse del siguiente modo:

1. Cierre de la válvula de regulación de la obra de toma.
2. Apertura del desagüe lateral del depósito del desarenador y vaciado.
3. Limpieza de sedimentos y sólidos.
4. Cierre del desagüe lateral del depósito del desarenador.
5. Apertura de la válvula de regulación de la obra de toma.

La periodicidad de la limpieza dependerá de la acumulación de sedimentos. Se prevé que en época de lluvias la escorrentía arrastre un mayor número de partículas y el desarenador tenga mayor carga de trabajo, debiendo realizarse la limpieza con más frecuencia. En cualquier caso, deberá observarse la instalación en funcionamiento para su determinación.

Mantenimiento general

En términos generales, deberá asegurarse el buen estado de todos los componentes de la instalación. Además de la limpieza y protección del equipo electromecánico, se seguirán las indicaciones del fabricante para realizar un correcto mantenimiento del mismo.

En caso de avería en alguno de los sistemas, la instalación ha sido diseñada para su vaciado entre sistemas adjuntos. Se cerrarán las válvulas correspondientes y abrirán las llaves de desagüe para proceder a la reparación o sustitución del elemento en cuestión.

Protocolos de seguridad

La seguridad del personal de obra será el mayor foco de atención durante el proceso de obra. Durante la reunión de instrucción se informará de las medidas establecidas como medio para evitar, en la mayor medida posible, el riesgo de los trabajadores. Será tarea del responsable de obra velar por la seguridad del personal y asegurar el cumplimiento de dichas medidas.

Horarios

Puesto que la obra se desarrollará en la estación de invierno, la temperatura y las lluvias no supondrán un problema para la seguridad, pues las primeras alcanzan medias diarias de 20 °C y las segundas son nulas. Las jornadas laborales serán de 8 horas, distribuidas en 2 intervalos horarios:

- Mañana: 8:00 - 12:00
- Tarde: 15:00 - 19:00

Podrán realizarse relevos durante los intervalos de mañana y tarde, así como descansos necesarios para hidratación o aseo.

Alimentación e hidratación

El personal de obra deberá realizar una hidratación frecuente, la cual será promovida y facilitada por el responsable de obra o miembros auxiliares, tanto locales como voluntarios de la organización, que se encuentren desocupados. El mínimo de hidratación por persona e intervalo horario será de cuatro (4 veces por la mañana y 4 veces por la tarde).

En cuanto a la alimentación, deberá realizarse un elevado consumo calórico al comienzo de la jornada, favoreciendo alimentos ricos en potasio como las legumbres, algunas frutas y frutos secos o los carbohidratos. El almuerzo, entre intervalos horarios, deberá ser algo más ligero para no provocar pesadez y descenso del rendimiento.

Material de protección

Algunas de las tareas requerirán de material de protección específico para el trabajador.

Algunos requisitos de equipamiento, que serán considerados imprescindibles durante el desempeño de ciertas tareas, serán los indicados a continuación.

- **Excavación:** zapato cerrado o bota, pantalón largo, mascarilla, gafas de protección, guantes de trabajo.
- **Preparación de encofrados:** zapato cerrado o bota, gafas de protección, guantes de trabajo.
- **Fabricación del hormigón:** zapato cerrado o bota, mascarilla, gafas de protección, guantes de trabajo.
- **Apisonado y perfilado:** zapato cerrado o bota, guantes de trabajo.
- **Enterrado y apisonado:** zapato cerrado o bota, mascarilla, gafas de protección, guantes de trabajo.

					
Excavación					
Encofrado					
Hormigón					
Apisonado					
Enterrado					

Tabla 35: Medidas mínimas de protección. [T¹]

Impacto ambiental

La construcción de centrales hidroeléctricas suele generar cierta controversia acerca del impacto ambiental que estas provocan en el entorno, especialmente en la biosfera. Sin embargo, el impacto producido por las denominadas PCH (Pequeñas Centrales Hidroeléctricas) es mínimo, puesto que además de tomar una cantidad muy reducida de recursos, apenas interfieren con la vida natural en el entorno donde se llevan a cabo.

Se exponen a continuación las razones por las cuales el desarrollo físico del presente proyecto puede considerarse de impacto ambiental nulo:

- Agua embalsada procedente de lluvias. Si bien esto supone un problema desde la perspectiva de la generación, es una ventaja cuando se trata de no alterar los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad, puesto que no se obstruye ningún cauce natural.
- La ubicación del embalse y la instalación se encuentra en el seno de la zona habitada por la comunidad, de modo que no afecta a los ecosistemas terrestres (fauna). Además, en su mayoría, los sistemas de la instalación se encuentran ocultos.
- Todo el conjunto de la instalación será construido sobre terreno árido, no siendo necesario deteriorar el entorno vegetal en ninguno de sus caracteres.
- Los impactos visual y acústico son mínimos puesto que, por una parte, los conductos hidráulicos se encuentran enterrados y las cámaras de carga y desarenado a poco nivel sobre el suelo y, por otra, el grupo electromecánico, que puede generar ligeros niveles de ruido, se encuentra recogido y situado a más de 100 m de distancia de la vivienda más próxima.
- La instalación no produce ningún tipo de desechos ni contaminantes. Las conducciones de PVC son inocuas para el agua, siendo incluso empleadas en el transporte de agua potable. Los elementos metálicos como rejillas, inyectores, álabes de turbina, etc. son inoxidables o incorporan tratamientos para evitar la corrosión.

Además de los aspectos previamente descritos, durante el proceso de obra de la instalación se supervisará que los materiales son cuidadosamente tratados, evitando depositar recipientes, envolturas, envases o los propios materiales, que pudiesen contaminar el entorno.

Viabilidad económica

La viabilidad económica del proyecto será detallada por medio del presupuesto económico, aprobado por la organización representante y adjunto en el ANEXO II del presente documento. Para su elaboración, se tendrán en cuenta los costes de los productos análogos ofrecidos en España, así como precios medios calculados a partir de series de los mismos.

Puesto que se trata de un proyecto solidario y sin ánimo de lucro, la viabilidad económica no contempla aspectos como la rentabilidad. El alcance, predefinido por la organización tras llevar a cabo el pertinente análisis de demanda eléctrica prioritaria y de recursos energéticos renovables, debe ser coherente con la propuesta económica realizada.

DISTRIBUCIÓN GENERAL DE COSTES

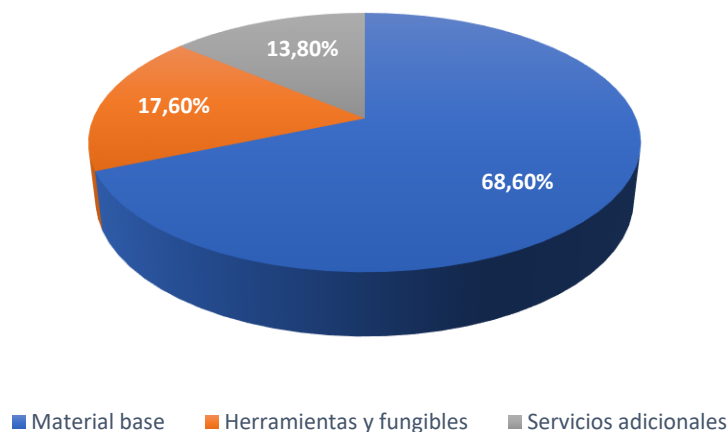


Gráfico 22: Distribución general de costes del proyecto. [G⁶]

El Gráfico 22 muestra la preponderancia del coste del material de obra sobre el monto total del proyecto. En secciones previas del documento se previó dicho aspecto tras analizar el terreno y su carácter topográfico suave, lo cual lleva a proyectar instalaciones poco compactas que requieren mayores inversiones en conducción para lograr una determinada potencia.

Más de un 60 % del coste total de material de obra se encuentra comprendido en este último ámbito, siendo la tubería de presión el elemento que mayor inversión en material requiere con una clara diferencia. Por otra parte, el equipo electromecánico supone un 14,3 % del total, considerando el incremento adicional por tasas de envío, importación, gestión de aduanas, etc.

La obra civil, sin embargo, representa una fracción muy reducida al llevarse a cabo por voluntarios y beneficiarios de la instalación, de modo que los costes de mano de obra implican únicamente aspectos como la alimentación y el material de protección.

DISTRIBUCIÓN COSTES DE MATERIAL

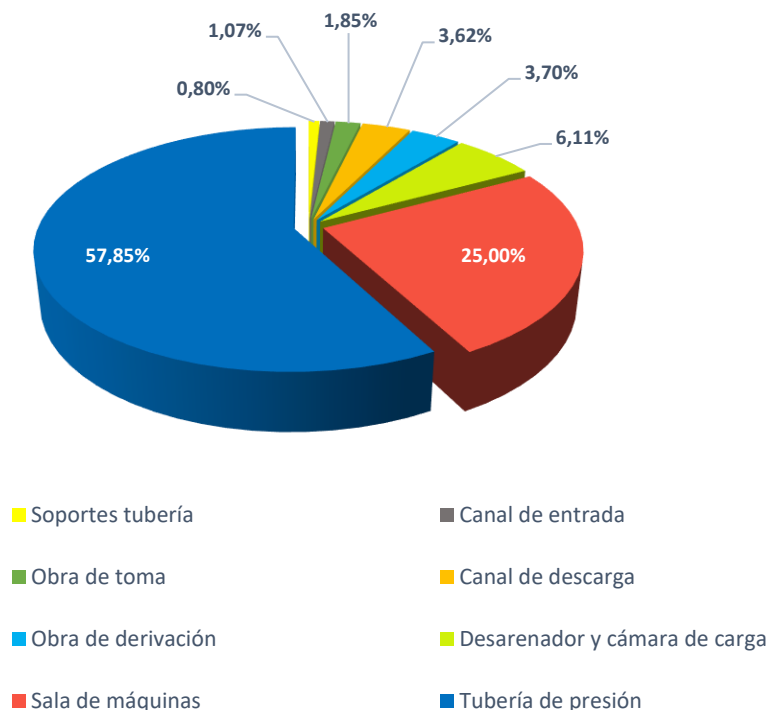


Gráfico 23: Distribución de costes en material de obra del proyecto. [G⁶]

Como conclusión relevante del análisis económico del proyecto, la estimación de los costes involucrados en el desarrollo de la mayor parte de la instalación supone un porcentaje bajo con respecto a un reducido conjunto de partidas de coste fijo, como son las conducciones hidráulicas y el grupo de potencia, los cuales representan un 56 % del total. Esto implica que las variaciones surgidas de los errores de estimación o las posibles contingencias serán asumidas sin dificultad pues, además, el coste de las materias primas en Zimbabue es, por lo general, inferior al tomado como referencia en la elaboración del presupuesto.

Bibliografía general

Conceptos y componentes hidráulicos. Centrales hidroeléctricas I. Editorial Paraninfo, S.A.

Turbinas hidráulicas. Centrales hidroeléctricas II. Editorial Paraninfo, S.A.

Hydropower Status Report 2018.

Osornio Ramos, Alejandro (Junio, 2020). *República de Zimbabwe, Ficha Técnica*. Centro de Estudios Internacionales Gilberto Bosques.

Informe económico y comercial: Zimbabwe. Oficina Económica y Comercial de España en Johannesburgo (Agosto, 2018).

Cantizano González, Alexis. Mochón Castro, Luis M. (2019 - 2020). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.

Arenas Pinilla, Eva. Cantizano González, Alexis (2019 - 2020). *Apuntes de Turbomáquinas*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.

Universidad Nacional Autónoma de México (s.f.). *Rugosidad absoluta de materiales*.

Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. (s.f.). *Pérdidas de carga localizadas*. Cátedra de Ingeniería Rural.

López S., Ricardo A. (2003). *Diseño de cajas espirales de sección circular para turbinas hidráulicas normalizadas*. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Turbina de flujo transversal o Michell Banki. Curso: Pequeñas Centrales Hidráulicas. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de máquinas hidráulicas. (s.f.).

Fierro Arana, Leonardo (2014). *Turbinas hidráulicas*. [Presentación LinkedIn SlideShare].

García Gutiérrez, Héctor. Nava Mastache, Arturo (2013). *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Jaramillo Morilla, Antonio (2008). *Tema 2: Arcillas y Limos Plásticos*. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, España.

Flores Salas, Alicia. *Cimentaciones*. Facultad de Estudios Superiores Aragón. Universidad Nacional Autónoma de México, México. (s.f.)

Castro, A. (octubre, 2006). Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. *Minicentrales hidroeléctricas*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Gobierno de España.

Fernández Diego, Inmaculada. Robles Díaz, Arsenio R. (s.f.). *Centrales de generación de energía eléctrica. Centrales hidráulicas*. Universidad de Cantabria, España.

Castañeda Quinte, Manuel (2011). *El desarenador*. Cátedra de Turbomáquinas. Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú.

Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú. (s.f.). *Criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico*.

Monge Redondo, Miguel Ángel (2019). *Golpe de ariete por cierre de válvula*. Blog, espacio web *iagua*.

Ardüser, C. Karcheter, L. (septiembre, 2009). *Civil works for micro hydro power units*. University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, Suiza.

Renedo, C.J. Fernández Diego, I. Carcedo Haya, J. Ortiz Fernández, F. (s.f.). *Sistemas y máquinas fluido mecánicas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria.

García del Valle, Antonio (2020). *Diseño y reparación de una presa existente y sin funcionamiento en una comunidad rural en Mt. Darwin, Zimbabue*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.

Thompson, J.G. (julio, 1965). *The soils of Rhodesia and their classification*. Faculty of Agriculture, University of Natal.

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña (s.f.). *Clasificación de suelos*. Universidad de A Coruña, A Coruña.

Braja M. Das. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. Séptima Edición. Editorial Cengage Learning, México.

Solano León, F. A. Bolívar Bernal, C. A. (2015). *Diseño de una pico central hidroeléctrica para la generación de energía en el bloque A de la Universidad Libre Sede Bosque Popular*. Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Bogotá D.C.

Cátedra de Ingeniería Rural. (s.f.). *Tema 4: Conducciones forzadas. Materiales de tuberías*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real, Universidad de Castilla - La Mancha.

Cátedra de Ingeniería Rural. (s.f.). *Tema 10: El golpe de ariete*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real, Universidad de Castilla - La Mancha.

Palacio - León, O. Chávez Porras, A. Velásquez Castiblanco, Y. (2017). *Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados*. Revista Tecnura, 21(53), 96-106, doi: 10.14483/22487638.8195.

Hervás Ortega, J. (julio, 2019). *Modelado del flujo de una turbina hidráulica mediante la dinámica de fluidos computacional*. Proyecto Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. Universidad de Cantabria, Cantabria.

Ayerbe Carrera, P. (2010). *Proyecto de la microcentral hidroeléctrica de Pucará, Cajamarca, Perú*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Burgos, Burgos.

Informe final de proyecto. (octubre, 2013). *Construcción de una microcentral hidroeléctrica de 22.5 kW en Jinotega*. Nicaragua.

Ferrada Sepúlveda, L. A. (diciembre, 2012). *Diseño de rodete de turbina hidráulica tipo Pelton para microgeneración*. Memoria para optar a título de Ingeniería Civil Mecánica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Chile.

Gutiérrez L., M^a A. (2007). *Cálculos hidráulicos*. Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental. EOI Escuela de Negocios.

Pérez Farrás, L.E. Pérez, S. (marzo, 2007). *Criterios de diseño, cálculo y selección de tuberías en base al criterio de las prestaciones equivalentes*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

Plasticbages Industrial, S.L. (s.f.). Ficha técnica de material. *Características técnicas del PVC*. Sant Salvador de Guardiola, Barcelona.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México. (s.f.). *Obras de toma para aprovechamientos hidráulicos*.

Oficina Internacional de Trabajo. Oficina Subregional para los Países Andinos. (diciembre, 2003). *Tasas de productividad para la construcción basada en la mano de obra*. Lima, Perú.

Rodríguez González, D. (julio 2010). *Rendimiento de mano de obra de excavaciones para viviendas de una y dos plantas en la ciudad de Barranquilla*. Corporación Universitaria de la Costa, Colombia.

Referencias

- [1] Sánchez Domínguez, Urbano (2012). *Máquinas hidráulicas*. Alicante, España. Editorial Club Universitario.
- [2] Morís Menéndez, Gonzalo (1995). *Ingenios hidráulicos históricos. Molinos, batanes y perre-rías*. Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, E.T.S. Ingenieros Indus-triales de Gijón, Universidad de Oviedo.
- [3] Darío Pasinato, Hugo (2008). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Universidad Tecnoló-gica Nacional. Buenos Aires, Argentina.
- [4] Bergadà Graño, Josep M. (2006). *Mecánica de Fluidos, problemas resueltos*. Aula politèc-nica. Cornellà de Llobregat, España. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- [5] Turmero, Pablo. *Historia de la Mecánica de Fluidos*. Espacio web: Monografías.com.
- [6] Valiente Barderas, Antonio (2003). *Notas breves sobre la historia de flujo de fluidos*. Revista de educación química (vol. 14, no. 3).
- [7] Rafael Contreras, Ricardo (2006). *Francis Bacon, Galileo Galilei y el Método Científico*. Re-vista de la VIII Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- [8] Liñán, Amable. *Las ecuaciones de Euler de la mecánica de fluidos*. Real Academia de Cien-cias y Universidad Politécnica de Madrid.
- [9] Romaña García, John F. (2012). *Los límites de la Ley de Darcy*. Tesis de Magister en Inge-niería. Faculta de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- [10] Riaño Valle, Félix (2019). *Froude, Manning y Reynolds aportan a la hidráulica en el siglo XIX*. (riha vol. 40, no. 2). Universidad Tecnológica de la Habana, La Habana, Cuba.
- [11] *Historia de la electricidad*. Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC).

Fuentes de ilustraciones

- [1¹] CNN Español (mayo, 2016). *Con este billete de 100 billones de dólares no se puede comprar casi nada*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [2²] Google (s.f.). [Mapa de Zimbabue, en Google Maps]. Recuperado en junio, 2020. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [3³] CountryFlags. *Flag of Zimbabwe*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [4⁴] Google (s.f.). [Mapa de Kazai y Harare, Zimbabue, en Google Earth]. Recuperado en junio, 2020. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [5⁵] Google (s.f.). [Mapa de Kazai y Dotito, Zimbabue, en Google Earth]. Recuperado en junio, 2020. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [6⁶] Archivos de ONG, Child Future Africa.
- [7⁷] Naciones Unidas (julio, 2017). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [8⁸] Parque Bezares (s.f.). *Historia de la rueda hidráulica*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [9⁹] Club Jóvenes Exploradores (Polonia). *Elemento misterioso*. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [10¹⁰] Revista de historia (abril, 2016). *La máquina voladora de Leonardo Da Vinci*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [11¹¹] Google (s.f.). [Tema 2, Principio de pascal, en sitio web Google]. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [12¹²] Pinterest (s.f.). *Revisiting Karman Vortex Street*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [13¹³] Austria-forum (septiembre, 2016). *Francis-Turbine*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [14¹⁴] Google. (s.f.). [The Pelton Water Wheel, en Google Books]. Recuperado en vintagemachinery.org, en junio, 2020. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [15¹⁵] Voith Group. (s.f.). *From Heidenheim to all over the world*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).

- [1¹⁶] Arabuko Mexico. (s.f.). *Appleton Edison: La primera hidroeléctrica del mundo*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1¹⁷] ResearchGate (diciembre, 2016). *El ciclo hidrológico del agua*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1¹⁸] Elaboración propia.
- [1¹⁹] *Conceptos y componentes hidráulicos. Centrales hidroeléctricas I*. Editorial Paraninfo, S.A.
- [1²⁰] Ciencia Bosco [Blogspot] (junio, 2018). *La energía hidráulica*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²¹] Red Eléctrica Española. Sistema de Información del Operador del Sistema. (s.f.). *Mapa de instalaciones hidráulicas*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²²] 1. Aula Virtual CEIP Severo Ochoa. *Unit 10: Landscapes*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
2. Pixabay. (s.f.). Imágenes. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
3. Pinterest (agosto, 2020). [Online]. Disponible: [Link Web](#).
4. LivingSpain.es. (s.f.). El Atazar, excursión a la Sierra Norte de Madrid. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²³] Foro-Ciudad.com (octubre, 2010). *Presa Alcántara*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²⁴] 1. Maruny, David (septiembre, 2013). Scoop.it! *Glory holes*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
2. MásQueIngeniería [Blog]. (s.f.). [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²⁵] Edublogs, Shannon's Blog (diciembre, 2015). *Electricity generation and transmission*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²⁶] IntechOpen (noviembre, 2011). *Hydro Power*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²⁷] Hydro Tasmania [Galería de imágenes]. (s.f.). [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²⁸] Anafon Energy [Galería de imágenes]. (s.f.). [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1²⁹] ScienceDirect (febrero, 2017). [Galería de imágenes de publicación]. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [1³⁰] SwitchBazaar.com [Blog] (abril, 2020). *Hydro Electric Power Station or Hydro Electric Power Plant*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).

-
- [131] Ossberger. (s.f.). Control automático. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [132] Google (s.f.). [4. Distribución de la energía eléctrica, en sitio web Google]. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [133] *Turbinas hidráulicas. Centrales hidroeléctricas II*. Editorial Paraninfo, S.A.
- [134] Tyazhmash. (s.f.). Turbinas hidráulicas. [Online]. [Link Web.](#)
- [135] Arenas Pinilla, Eva. Cantizano González, Alexis (2019-2020). *Apuntes de Turbomáquinas*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- [136] HidroEnergia. (s.f.). Turbinas hidráulicas [Galería de imágenes]. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [137] Matos, Ricardo (junio, 2014). *La turbina Pelton*. [SlideShare, Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [138] *Fuente de ilustración deshabilitada temporalmente: [Link Web.](#)*
- [139] Envinergy. (s.f.). Kaplan turbine with variable blade manufactured by Bouvier. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [140] Wikimedia Commons (mayo, 2018). *What is Pelton turbine*. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [141] LuisCalderonf.wordpress.com. (s.f.). *Unidad 6. Turbina de flujo transversal o Michell Banki*. [Online PDF]. Disponible: [Link Web.](#)
- [142] Water21.org. (s.f.). *Ossberger Crossflow Turbine*. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [143] Chongqing Savvy Industries Company Limited (CSIC). (agosto, 2019). Turgo turbine. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [144] Wikipedia (febrero, 2020). Turbina bulbo. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [145] SimplifyingFrancisTurbine. [Blogspot]. (enero, 2013). *Medium Head Turbine Design*. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [146] University of Manitoba, Canada. (s.f.). *Chapter 5-1. Hydraulic Pumps*. [PDF Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [147] Informe final: *Construcción de una microcentral hidroeléctrica de 22.5 kW en Jinotega*. (octubre, 2013). [PDF Online]. Disponible: [Link Web.](#)

-
- [148] Google (s.f). [Mapa de Kazai, Zimbabue, en Google Earth]. Recuperado en junio, 2020. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [149] Ruano, R. (junio, 2020). *Global Mapper* (21.1). Microsoft. EE.UU: Blue Marble Geographics.
- [150] Ingenierociviltips [Blogspot]. (enero, 2011). *Teoría de la capacidad de carga de Terzaghi – Cimentaciones*. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [151] Winther Solemslie, B. (junio, 2016). ResearchGate. *Horizontal axis single jet Pelton turbine*. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [152] Piñeiro Villalba, Felipe. (2017). DocPlayer. *Obras civiles – PCH cámara de carga y tubería de presión*. [Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [153] Ardüser, C. Karcheter, L. (septiembre, 2009). University of Applied Sciences Northwestern Switzerland. *Civil works for micro hydro power units*. [PDF Online]. Disponible: [Link Web.](#)
- [154] Bigeatnc. [Comercio online]. Cinta métrica 30M/50M/100M. Disponible: [Link Web.](#)
- [155] ManoMano. [Comercio online]. Trotec Distanciómetro BD26. Disponible: [Link Web.](#)
- [156] Made-in-China. [Comercio online]. Altimetro digital (DA-500). Disponible: [Link Web.](#)
- [157] Nasco. [Comercio online]. Soil sieve set (175 mm). Disponible: [Link Web.](#)

Fuentes de tablas

- [T¹] *Elaboración propia.*
- [T²] Arenas Pinilla, Eva. Cantizano González, Alexis (2019-2020). *Apuntes de Turbomáquinas*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- [T³] Universidad Nacional Autónoma de México, México. (s.f.). *Rugosidad absoluta de materiales*. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T⁴] Jiménez, S. (julio, 2017). *Hidráulica Fácil*. [Blog Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T⁵] Yepes Piqueras, V. (enero, 2017). *Turbina Francis*. [Blog Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T⁶] Renedo, C.J. Fernández Diego, I. Carcedo Haya, J. Ortiz Fernández, F. (s.f.). *Sistemas y máquinas fluido mecánicas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T⁷] Castro, A. (octubre, 2006). Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. *Minicentrales hidroeléctricas*. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T⁸] García del Valle, Antonio (2020). *Diseño y reparación de una presa existente y sin funcionamiento en una comunidad rural en Mt. Darwin, Zimbabue*. Trabajo Fin de Grado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, Universidad Pontificia Comillas, Madrid.
- [T⁹] Thompson, J.G. (julio, 1965). *The soils of Rhodesia and their classification*. Faculty of Agriculture, University of Natal. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T¹⁰] Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña (s.f.). *Clasificación de suelos*. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T¹¹] Braja M. Das. (2012). *Fundamentos de Ingeniería de Cimentaciones*. Séptima Edición. Cengage Learning. [Formato digital]. Disponible: [Link Web](#).
- [T¹²] Solano León, F. A. Bolívar Bernal, C. A. (2015). *Diseño de una pico central hidroeléctrica para la generación de energía en el bloque A de la Universidad Libre Sede Bosque Popular*. Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Bogotá D.C. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T¹³] Cátedra de Ingeniería Rural. (s.f.). *Tema 10: El golpe de ariete*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real (UCLM). [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [T¹⁴] Castañeda Quinte, Manuel (2011). *El desarenador*. Cátedra de Turbomáquinas. Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).

- [T¹⁵] Palacio - León, O. Chávez Porras, A. Velásquez Castiblanco, Y. (2017). *Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados*. Revista Tecnura, 21(53), 96-106. [Online]. Disponible: [Link Web](#).

Fuentes de gráficos

- [G¹] Situmbeko, S. (enero, 2017). *Electricity Generation Efficiencies*. ResearchGate [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [G²] Martínez Estrada, R. (marzo, 2011). *Diagrama de Moody*. WordPress [Online] Disponible: Link Web.
- [G³] Astorga, E. (2015). *Turbinas hidráulicas*. SlidePlayer. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [G⁴] LuisCalderonf.wordpress.com. (s.f.). *Unidad 6. Turbina de flujo transversal o Michell Banki*. [Online PDF]. Disponible: [Link Web](#).
- [G⁵] Hervás Ortega, J. (julio, 2019). *Modelado del flujo de una turbina hidráulica mediante la dinámica de fluidos computacional*. Proyecto Fin de Grado. Universidad de Cantabria. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [G⁶] *Elaboración propia*.
- [G⁷] Irrigación y Agricultura [Blogspot]. (noviembre, 2015). *Análisis de textura del suelo: rápido y gratis*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [G⁸] Universidad de las Américas Puebla, México. (s.f.). *Factores de capacidad de carga de Terzaghi, factores de forma, profundidad e inclinación*. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [G⁹] García Gutiérrez, Héctor. Nava Mastache, Arturo (2013). *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, México. [PDF Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [G¹⁰] Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú. (diciembre, 2010). *Criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico*. Manual. [Online]. Disponible: [Link Web](#).
- [G¹¹] Wikipedia (octubre, 2006). *Granulometría*. [Online]. Disponible: [Link Web](#).

ANEXO I: Plan de ejecución de obra

PLAN DE EJECUCIÓN DE OBRA							
FASE	SUBFASE	ETAPA	TASA PRODUCT. [ud/t]	VOLUMEN [ud]	M.D.O	TIEMPO UNIT. [h]	TIEMPO ACUM. [días]
OBRA DE TOMA							
	Medición de cota	1	-	-	1	0,5	1
	Medición de profundidad	1	-	-	1	0,5	1
	Posición y delineado	1	-	-	1	1	1
	Excavación	2	2,5 m³/día	0,2 m³	2	2	1
	Verificación de nivel (_)	2	-	-	1	1	1
	Apisonado y perfilado	2	7 m²/día	0,5 m²	2	2	1
	Elaboración del encofrado	2	10 m²/día (+ t. prep.)	0,8 m²	2	4	2
	Colocación reja desbaste	2	-	-	1	0,5	2
	Hormigonado	2	10 m³/día (+t. prep.)	0,05 m³	2	3	2
	Tiempo de fraguado	2	-	-	0	168	9
	Curado del hormigón	2	-	-	1	168	16
	Enterrado y apisonado	5	4 m³/día	0,1 m³	1	1	16
OBRA DE DERIVACIÓN							
	Medición de terreno	1	-	-	1	4	1
	Trazado de línea	1	-	-	1	4	1
	Excavación de zanja	2	2,5 m³/día	8 m³	3	10	3
	Verificación de nivel (\)	2	-	-	1	3	3
	Apisonado y corrección	2	7 m²/día	20 m²	3	8	4
	Tendido de tubería	2	50 m/día	40 m	2	8	5
	Instalación de válvula	2	-	-	1	0,5	5
	Conexionado a toma	3	-	-	1	0,5	5
	Enterrado y apisonado	5	4 m³/día	7,5 m³	3	6	6
CANAL DE ENTRADA							
	Medición de terreno	1	-	-	1	0,5	1
	Trazado de contorno	1	-	-	1	0,5	1
	Excavación de zanja	2	2,5 m³/día	0,25 m³	1	2	1
	Verificación de nivel (_)	2	-	-	1	0,5	1
	Apisonado y corrección	2	7 m²/día	2 m²	1	2,5	1
	Perfilado	2	-	-	1	2	1
	Elaboración del encofrado	2	10 m²/día (+ t. prep.)	1,5 m²	2	4	2
	Hormigonado	2	10 m³/día (+t. prep.)	0,3 m³	2	4	2
	Tiempo de fraguado	2	-	-	0	168	9
	Curado del hormigón	2	-	-	1	168	16
	Conexionado a tubería	3	-	-	1	1	16

DESARENADOR Y CÁMARA DE CARGA						
	Medición de terreno	1	-	-	2	1
	Trazado de contorno	1	-	-	2	1
	Excavación de zanja	2	2,5 m³/día	1,5 m³	3	1
	Verificación de nivel (_)	2	-	-	2	1
	Apisonado y corrección	2	7 m²/día	7,5 m²	2	2
	Disposición de puntales	2	-	-	2	2
	Perfilado de taludes	2	-	-	2	3
	Elaboración del encofrado	2	10 m²/día (+ t. prep.)	8 m²	4	4
	Colocación reja desbaste	2	-	-	1	4
	Hormigonado	2	10 m³/día (+t. prep.)	0,9 m³	2	5
	Tiempo de fraguado	2	-	-	0	168
	Curado del hormigón	2	-	-	1	168
	Conexionado a codo	3	-	-	1	19
TUBERÍA DE PRESIÓN						
	Medición de terreno	1	-	-	2	1
	Trazado de línea	1	-	-	2	2
	Excavación de zanja	2	2,5 m³/día	50 m³	5	6
	Verificación de nivel (\)	2	-	-	2	7
	Apisonado y corrección	2	7 m²/día	90 m²	4	10
	Tendido de tubería	2	50 m/día	310 m	2	13
	Instalación de válvulas	2	-	-	1	14
	Conexionado a codos	3	-	-	1	14
	Enterrado y apisonado	5	4 m³/día	45 m³	5	16
SOPORTES DE TUBERÍA						
	Medición del terreno	1	-	-	1	1
	Trazado de contorno	1	-	-	1	1
	Excavación	2	2,5 m³/día	0,1 m³	1	1
	Verificación de nivel (_)	2	-	-	1	1
	Apisonado y corrección	2	7 m²/día	0,6 m²	1	1
	Elaboración del encofrado	2	10 m²/día (+ t. prep.)	1 m²	2	2
	Ubicación de codos	2	-	-	1	0,5
	Hormigonado	2	10 m³/día (+t. prep.)	0,06 m³	2	2
	Tiempo de fraguado	2	-	-	0	168
	Curado del hormigón	2	-	-	1	168
	Enterrado y apisonado	5	4 m³/día	-	1	17
SALA DE MÁQUINAS						
	Medición de cota	1	-	-	1	0,5

<i>Posición y delineado</i>	1	-	-	1	1	1
<i>Excavación</i>	2	2,5 m³/día	1 m³	2	4	1
<i>Verificación de nivel (_)</i>	2	-	-	1	1	1
<i>Apisonado y perfilado</i>	2	7 m²/día	1 m²	2	2	2
<i>Elaboración del encofrado</i>	2	10 m²/día (+ t. prep.)	3,5 m²	2	8	3
<i>Ubicación soportes techo</i>	2	-	-	1	0,5	3
<i>Hormigonado</i>	2	10 m³/día (+t. prep.)	0,5 m³	2	4	3
<i>Tiempo de fraguado</i>	2	-	-	0	168	10
<i>Curado del hormigón</i>	2	-	-	1	168	17
<i>Enterrado y apisonado</i>	5	4 m³/día	0,4 m³	1	1	17
<i>Instalación grupo electrom.</i>	3	-	-	2	4	18
<i>Conexionado tubería</i>	3	-	-	1	1	18
CANAL DE DESCARGA						
<i>Medición de terreno</i>	1	-	-	1	1	1
<i>Trazado de contorno</i>	1	-	-	1	1	1
<i>Excavación de zanja</i>	2	2,5 m³/día	2 m³	2	4	1
<i>Verificación de nivel (\)</i>	2	-	-	2	2	1
<i>Apisonado y corrección</i>	2	7 m²/día	20 m²	2	8	2
<i>Perfilado</i>	2	-	-	2	4	3
<i>Elaboración del encofrado</i>	2	10 m²/día (+ t. prep.)	1,5 m²	2	4	3
<i>Hormigonado</i>	2	10 m³/día (+t. prep.)	3 m³	2	18	6
<i>Tiempo de fraguado</i>	2	-	-	0	168	13
<i>Curado del hormigón</i>	2	-	-	1	168	20

ANEXO II: Presupuesto económico

PRESUPUESTO ECONÓMICO						
MATERIAL BASE						
FASE	ARTÍCULO	COSTE [€]/Ud.	CANTIDAD [Ud.]	COSTE TOT. [€]	LOC. / IMP.	TRANSP.
OBRA DE TOMA						
	Tablones madera encofrado	15 €/m²	0,8	12,00	LOC.	Sí
	Listones madera encofrado	8 €/m	2	1,60	LOC.	Sí
	Hormigón seco H-25	50 €/m³	0,05	2,50	LOC.	No
	Agua mezcla	200 l/m³	10	0,00	LOC.	No
	Reja de desbaste	50 €/ud.	1	50,00	LOC.	No
	Válvula de compuerta	20 €/ud.	1	20,00	LOC.	No
	Transportes	-	-	20,00	-	-
	TOTAL			106,10		
OBRA DE DERIVACIÓN						
	Tubería PVC, DN 125 mm	3 €/m	45	135,00	LOC.	Sí
	Manguitos unión PVC, 125 mm	2,5 €/ud.	15	37,50	LOC.	No
	Transportes	-	-	40,00	-	-
	TOTAL			212,50		
CANAL DE ENTRADA						
	Tablones madera encofrado	15 €/m²	1,5	22,50	LOC.	Sí
	Listones madera encofrado	8 €/m	3	24,00	LOC.	Sí
	Hormigón seco H-25	50 €/m³	0,3	15,00	LOC.	No
	Agua mezcla	200 l/m³	60	0,00	LOC.	No
	Transportes	-	-	-	-	-
	TOTAL			61,50		
DESARENADOR Y CÁMARA DE CARGA						
	Tablones madera encofrado	15 €/m²	8	120,00	LOC.	Sí
	Listones madera encofrado	8 €/m	5	40,00	LOC.	Sí
	Hormigón seco H-25	50 €/m³	1,5	75,00	LOC.	No
	Agua mezcla	200 l/m³	300	0,00	LOC.	No
	Reja de desbaste	50 €/ud.	1	50,00	LOC.	No
	Válvula de compuerta (PN6)	60 €/ud.	1	60,00	LOC.	No
	Tapón desagüe	7 €/ud.	1	7,00	LOC.	No
	Transportes	-	-	-	-	-
	TOTAL			352,00		
TUBERÍA DE PRESIÓN						
	Tubería PVC, DN 140 mm PN-6	9 €/m	320	2880,00	LOC.	Sí
	Manguitos unión PVC, 140 (PN-6)	6 €/ud.	55	330,00	LOC.	No
	Accesorio codo 175°	5 €/ud.	2	10,00	LOC.	No
	Accesorio válv. desagüe	10 €/ud.	1	10,00	LOC.	No

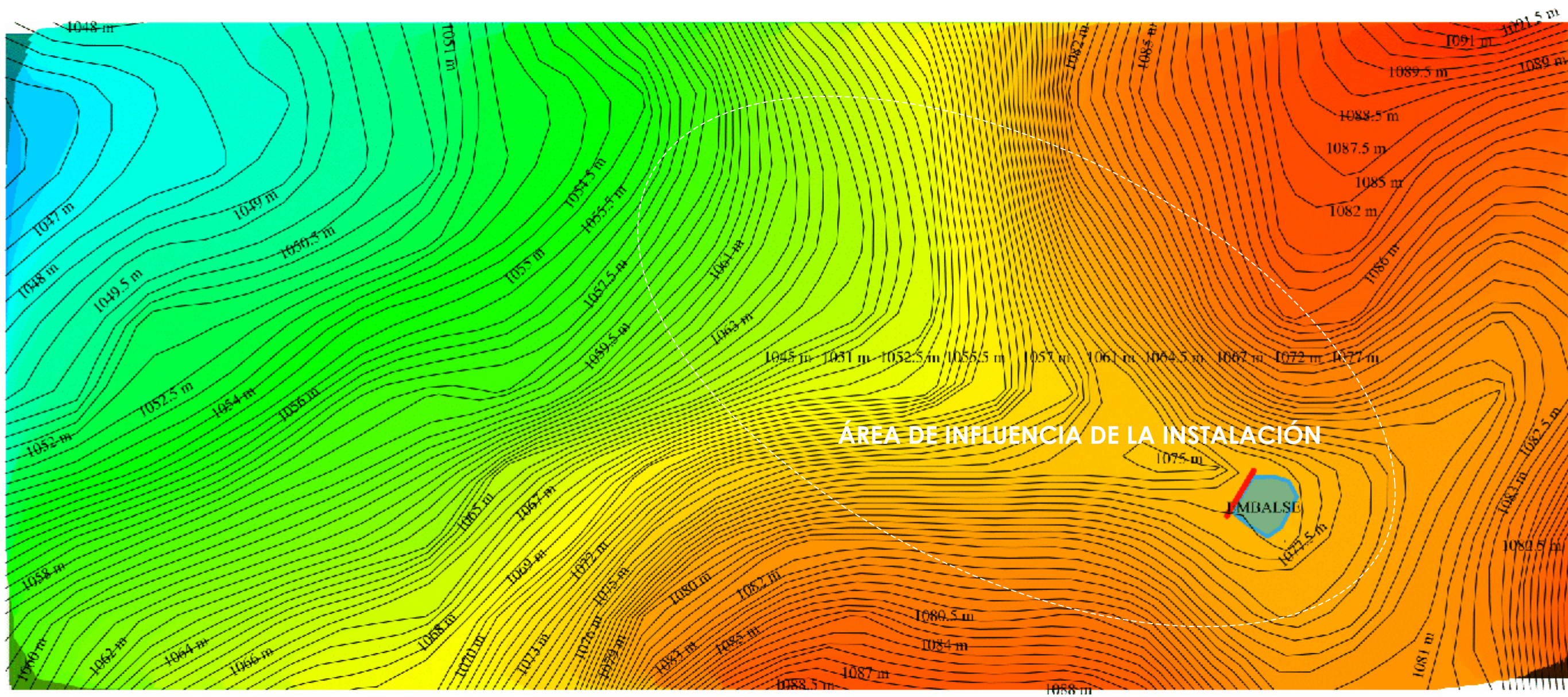
	Transportes	-	-	100,00	-	-
	TOTAL			3330,00		
SOPORTES DE TUBERÍA						
	Tablones madera encofrado	15 €/m²	1	15,00	LOC.	Sí
	Listones madera encofrado	8 €/m	1	8,00	LOC.	Sí
	Hormigón seco H-25	50 €/m³	0,06	3,00	LOC.	No
	Agua mezcla	200 l/m³	12	0,00	LOC.	No
	Transportes	-	-	20,00	-	-
	TOTAL			46,00		
SALA DE MÁQUINAS						
	Tablones madera encofrado	15 €/m²	3,5	52,50	LOC.	Sí
	Listones madera encofrado	8 €/m	4	32,00	LOC.	Sí
	Hormigón seco H-25	50 €/m³	0,5	25,00	LOC.	No
	Agua mezcla	200 l/m³	100	0,00	LOC.	No
	Planchas metál./plást.	30 €/m²	1	30,00	LOC.	No
	Varillas soporte techo	10 €/ud.	4	40,00	LOC.	No
	Equipo electromecánico	900 €/ud.	1	900,00	IMP.	Sí
	Válvula de compuerta (PN6)	60 €/ud.	1	60,00	LOC.	No
	Transportes	-	-	200,00	-	-
	Trámites aduana	-	-	100,00	-	-
	TOTAL			1439,50		
CANAL DE DESCARGA						
	Tablones madera encofrado	15 €/m²	1,5	22,50	LOC.	Sí
	Listones madera encofrado	8 €/m	2	16,00	LOC.	Sí
	Hormigón seco H-25	50 €/m³	3	150,00	LOC.	No
	Agua mezcla	200 l/m³	600	0,00	LOC.	No
	Transportes	-	-	20,00	-	-
	TOTAL			208,50		
	TOTAL MATERIAL			5756,10		
HERRAMIENTAS						
CATEGORÍA	ARTÍCULO	COSTE [€/Ud.	CANTIDAD [Ud.]	COSTE TOT. [€]	LOC. / IMP.	TRANSPORTE
MANUALES						
	Sierra corte madera	8,00	3	24,00	LOC.	No
	Pala excavación	30 €/ud.	5	150,00	LOC.	No
	Pico - Azada excavación	30 €/ud.	5	150,00	LOC.	No
	Apisonadora de tierra	25 €/ud.	3	75,00	LOC.	No
	Tornillo banco	40 €/ud.	2	80,00	LOC.	No
	Martillo goma	15 €/ud.	1	15,00	LOC.	No

	Martillo cabeza gruesa	20 €/ud.	2	40,00	LOC.	No
	Juego destornilladores	30 €/ud.	1	30,00	LOC.	No
	Alicates alambre	12 €/ud.	2	24,00	LOC.	No
	Tijera	5 €/ud.	2	10,00		
	Brocha fina	3 €/ud.	5	15,00	LOC.	No
	TOTAL			613,00		
AUTOMÁTICAS						
	Sierra calar	50 €/ud.	1	50,00	LOC.	No
	Taladro	60 €/ud.	1	60,00	LOC.	No
	TOTAL			110,00		
EQUIPOS MEDICIÓN						
	Báscula precisión	-	1	0,00	IMP.	Sí
	Cinta métrica 100 m	20 €/ud.	1	20,00	IMP.	Sí
	Cinta métrica estándar	4 €/ud.	1	4,00	LOC.	No
	Tamices granulométricos	50 €/ud.	1	50,00	IMP.	Sí
	Distanciómetro láser	40 €/ud.	1	40,00	IMP.	Sí
	Altímetro digital	25 €/ud.	1	25,00	IMP.	Sí
	Recipiente métrico líquidos	5 €/ud.	2	10,00	LOC.	No
	TOTAL			149,00		
BALIZAMIENTO						
	Poste señalizador	3 €/ud.	70	210,00	LOC.	No
	Rollo cinta (100 m)	2 €/ud.	5	10,00	LOC.	No
	TOTAL			220,00		
FUNGIBLES						
	Adhesivo tuberías PVC	18 €/ud.	5	90,00	LOC.	No
	Alambre 100 mm	10 €/ud.	2	20,00	LOC.	No
	Bridas sujeción (100 uds.)	2 €/ud.	3	6,00	LOC.	No
	Cinta aislante	1 €/ud.	3	3,00	LOC.	No
	Silicona sellado	6 €/ud.	4	24,00	LOC.	No
	TOTAL			143,00		
TORNILLERÍA						
	Clavos para madera	-	-	10,00	LOC.	No
	Tirafondos	-	-	10,00	LOC.	No
	Alcayatas	-	-	5,00	LOC.	No
	TOTAL			25,00		
OTROS						
	Recipiente metálico	3 €/ud.	5	15,00	LOC.	No
	Cableado eléctrico 100 m	30 €/ud.	4	120,00	LOC.	No
	Regleta clema eléctrica	5 €/ud.	5	25,00	LOC.	No
	Baterías	5 €/ud.	3	15,00	LOC.	No

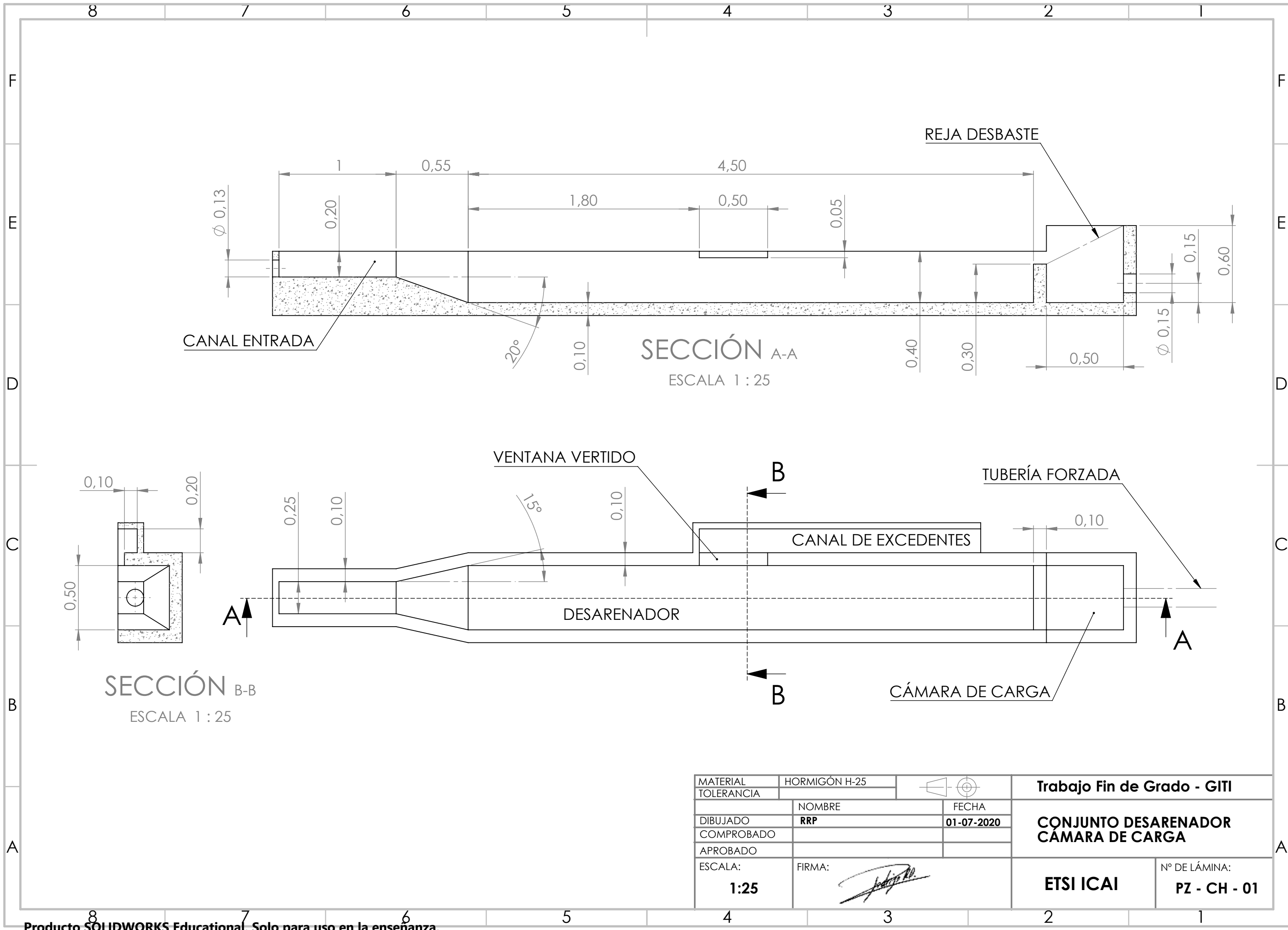
	Mascarillas obra (3 ud.)	6 €/ud.	4	24,00	LOC.	No
	Guantes de trabajo (10 ud.)	2 €/ud.	2	4,00	LOC.	No
	Gafas de protección	2 €/ud.	5	10,00	LOC.	No
	Marcador permanente	1 €/ud.	4	4,00	LOC.	No
	TOTAL			217,00		
	TOTAL HERRAMIENTAS			1477,00		
SERVICIOS ADICIONALES						
CATEGORÍA	ARTÍCULO	COSTE [€]/Ud.	CANTIDAD [Ud.]	COSTE TOT. [€]	LOC. / IMP.	TRANSPORTE
CONTRATACIÓN						
	Alquiler hormigonera	12 €/día	30	360,00	LOC.	Sí
	Transporte	-	-	50,00	-	-
	TOTAL			410,00		
EXTRAS						
	Alimentación personal	2 €/P·día	4·30	240,00	LOC.	No
	Gasolina transporte	1 €/l	200	200,00		
	Fondo contingencia	-	-	300,00	-	-
	TOTAL			540,00		
	TOTAL SERVICIOS			1150,00		
	TOTAL PROYECTO			8383,10	€	

ANEXO III: Planos

TOPOGRAFÍA - Área de Trabajo, Kazai, Zimbabue



MATERIAL			Trabajo Fin de Grado - GITI	
TOLERANCIA				
DIBUJADO	NOMBRE	FECHA	Topografía del terreno	
COMPROBADO	RRP	01-07-2020		
APROBADO				
ESCALA:	FIRMA:		ETSI ICAI	Nº DE LÁMINA: PZ-CH-00



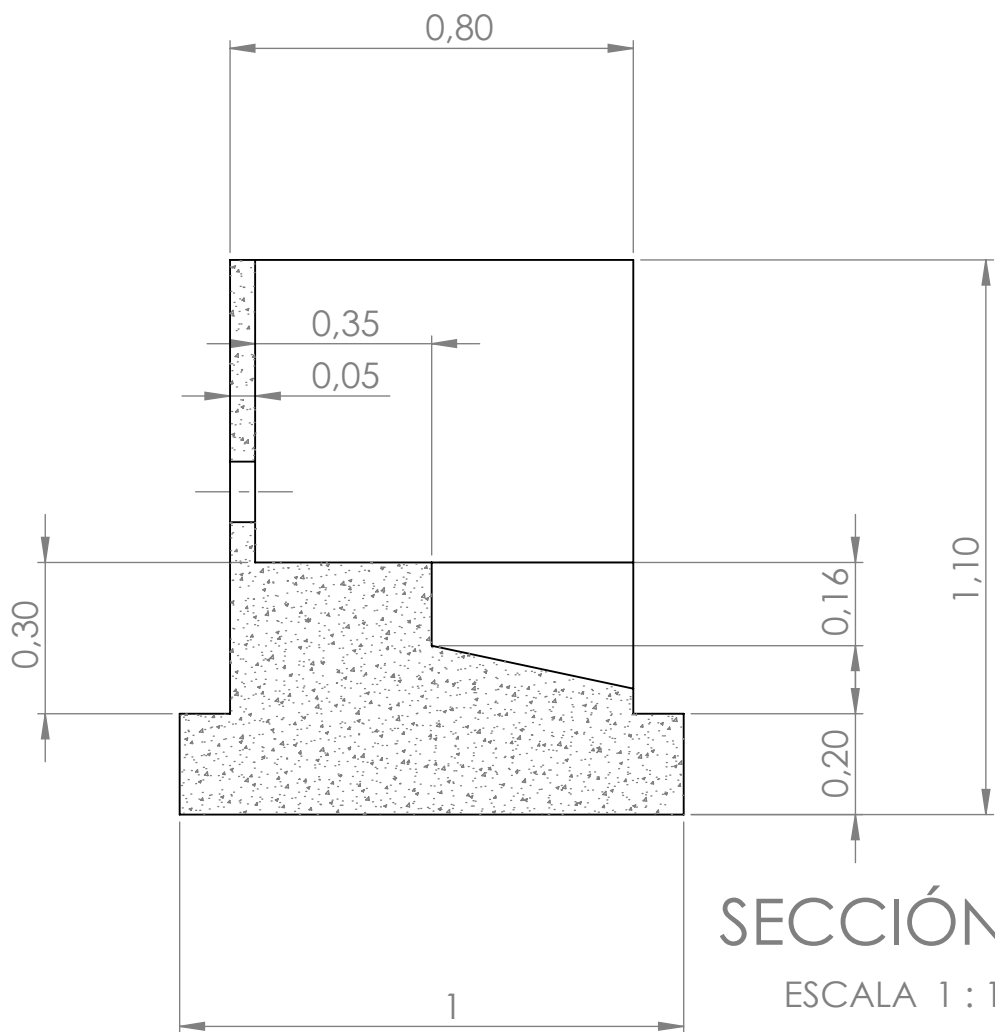
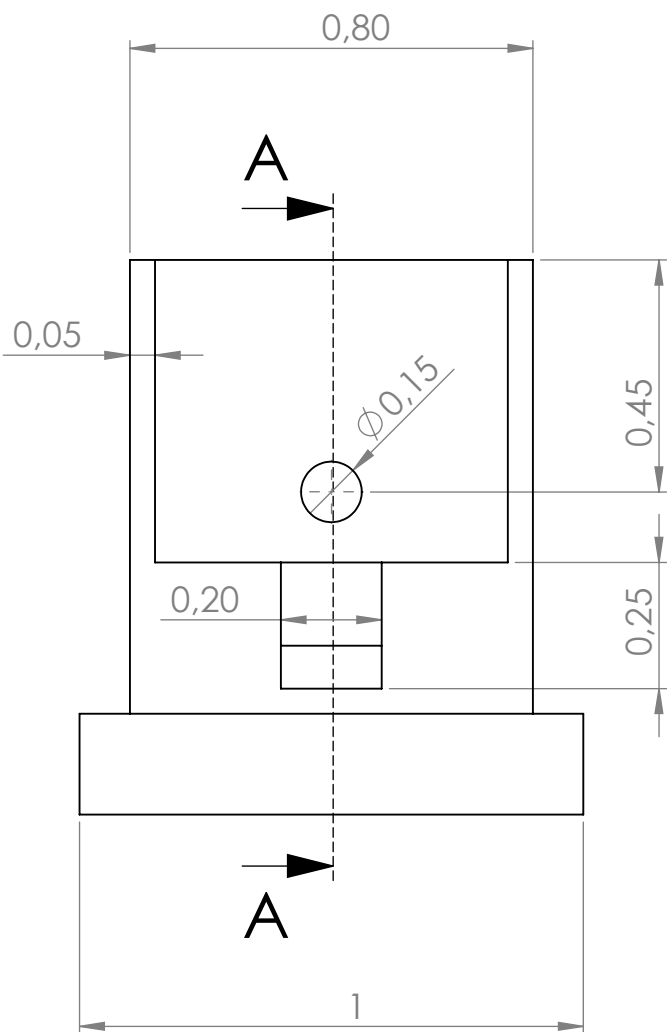
4

BASE DE SALA

Profundidad desplante 40 cm

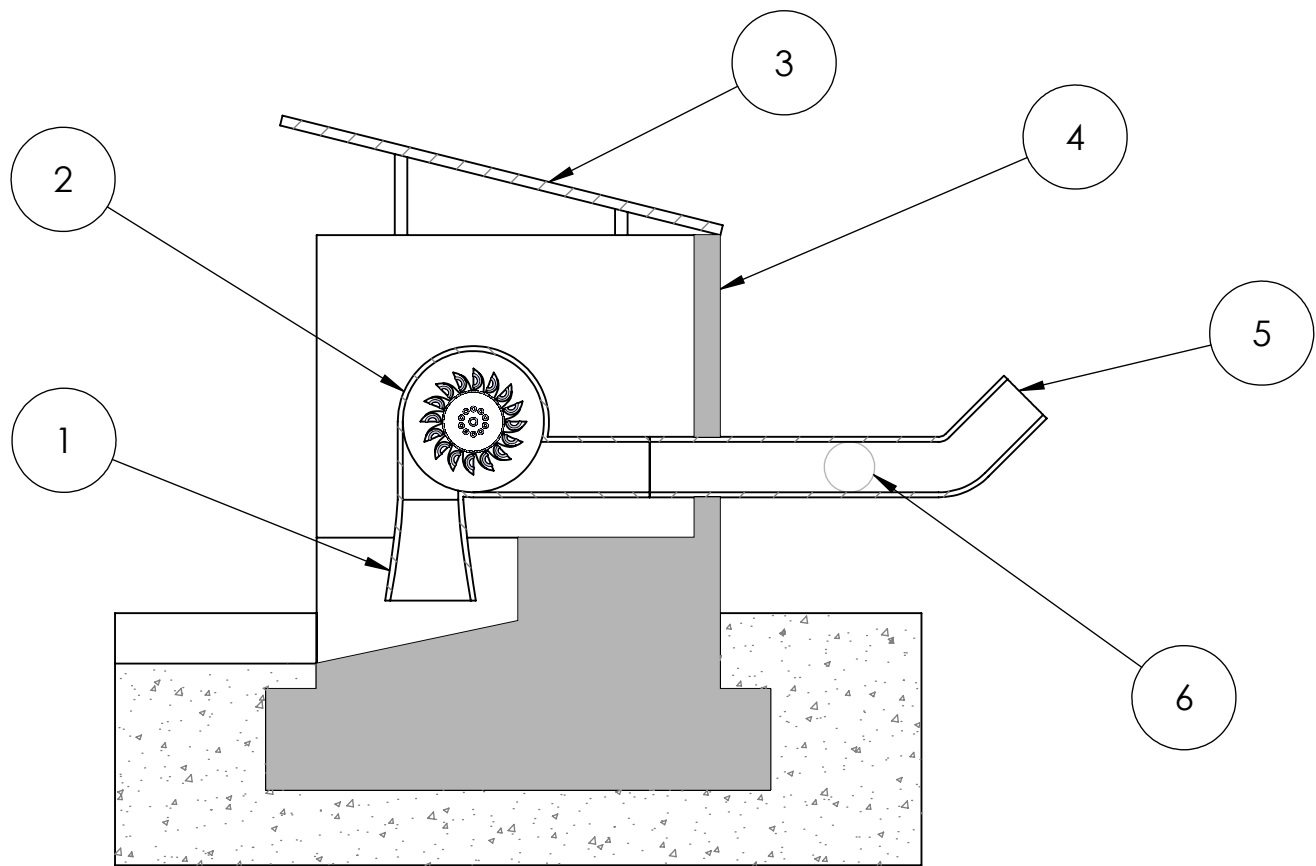
Volumen hormigón 0.45 m3

Encofrado manual madera



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 15

ESQUEMA DE MONTAJE



MARCA	DESIGNACIÓN
1	Campana de descarga
2	Grupo electromecánico 3 kW
3	Techo inclinado
4	Base de sala (cimentación)
5	Tubería PVC ϕ 140 PN-6
6	Válvula de compuerta

MATERIAL	HORMIGÓN H-25		Trabajo Fin de Grado - GITI	
TOLERANCIA				
DIBUJADO	NOMBRE	FECHA	SALA DE MÁQUINAS	
COMPROBADO	RRP	01-07-2020		
APROBADO				
ESCALA:	FIRMA:		ETSI ICAI	Nº DE LÁMINA:
1:15				PZ - CH - 02