



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO PARAMÉTRICO, OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO Y SIMULACIÓN CFD DE UNA BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE UN CANAL DE RIEGO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER
EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

Jorge Eduardo Sánchez Pruna
jorge.sanchez@epn.edu.ec

DIRECTOR: Khaled Hamad Mohamed, Ph.D.
khaled.hamad@epn.edu.ec

Quito, mayo, 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **JORGE EDUARDO SÁNCHEZ PRUNA**, bajo mi supervisión.

Khaled Hamad Mohamed
DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, Jorge Eduardo Sánchez Pruna, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jorge Eduardo Sánchez Pruna

DEDICATORIA

A Dios, por darme "*Todo... y más que todo*",
a la memoria de mi padre, a mi madre y hermano.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por ser mi guía en todo momento, y permitirme finalizar este trabajo de titulación.

Gracias a mi madre, por ser mi ángel en la tierra.

Gracias a mis profesores por enseñarme tanto, en especial a Khaled por confiar en mi.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Certificación.....	i
Declaración.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimiento.....	iv
Nomenclatura.....	xii
Resumen.....	xv
Abstract.....	xvi
Introducción.....	1
Aspectos generales.....	6
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	10
1.1. Hidroenergía.....	10
1.1.1. Aprovechamiento del recurso hídrico para Generación Eléctrica.....	10
1.1.2. Turbinas hidráulicas.....	10
1.1.3. Centrales hidroeléctricas.....	12
1.2. Obras civiles.....	13
1.2.1. Obras de Captación.....	13
1.2.2. Obras de Conducción.....	17
1.2.3. Vertederos laterales.....	19
1.2.4. Compuertas.....	19
1.2.5. Desarenadores.....	20
1.2.6. Tanque de presión.....	21
1.2.7. Tubería de presión.....	23
1.2.8. Casa de máquinas.....	25
1.2.9. Canal de descarga.....	25
1.3. Bombas usadas como turbinas.....	26
1.4. Diseño Paramétrico de PAT.....	29
1.4.1. Eficiencia del álabe de una Turbina.....	29
1.4.2. Grado de reacción.....	30
1.4.3. Número de velocidad.....	30
1.4.4. Sumersión.....	31
1.4.5. Métodos de diseño para disminuir la erosión.....	31
1.5. Técnicas de optimización multiobjetivo empleado en álabes de PAT.....	32
1.6. Dinámica Computacional de Fluidos en PAT.....	39
1.6.1. Modelo de flujo no viscoso.....	39

1.6.2. Modelo de flujo viscoso.....	42
1.6.3. Modelo de erosión.....	44
1.7. Estado del Arte.....	45
1.7.1. Micro y mini - hidrogenación.....	45
1.7.2. Optimización mutiobjetivo – análisis CFD.....	50
2. METODOLOGÍA.....	76
2.1. Pequeña generación hidroeléctrica.....	76
2.2. Criterios de diseño.....	76
2.2.1. Caudal.....	76
2.2.2. Caída.....	78
2.3. Diseño de Obras Civiles.....	78
2.3.1. Obras de Captación.....	78
2.3.2. Obras de Conducción.....	92
2.3.3. Sistemas de Presión.....	95
2.3.4. Casa de Máquinas.....	110
2.4. Análisis Económico.....	111
2.4.1. Cronograma de construcción.....	111
2.4.2. Presupuesto estimativo de obra.....	113
2.4.3. Evaluación económica del Proyecto.....	113
2.4.4. Beneficio Neto Actualizado (B.N.A.).....	116
2.4.5. Relación Beneficio / Costo (B/C).....	117
2.4.6. Tasa Interna de Retorno (T.I.R).....	117
2.4.7. Análisis de sensibilidad.....	118
2.5. PAT.....	118
2.6. Estudio de sensibilidad individual de los parámetros de diseño.....	119
2.6.1. Efectos de la variación del diámetro de salida.....	121
2.6.2. Efectos de la variación de la relación entre el radio del eje y del ojo del rodete	121
2.7. Implementación de técnicas de optimización multiobjetivo.....	122
2.7.1. Método de variación de parámetros de entrada y salida del álabe.....	122
2.8. Simulación numérica en Ansys CFX del diseño propuesto.....	123
2.8.1. Mallado.....	123
2.8.2. Condiciones de contorno.....	123
2.8.3. Validación de la simulación numérica.....	124
2.9. Calibración del modelo.....	124
2.9.1. Características turbomáquina.....	124
2.9.2. Modelo numérico.....	125

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	128
3.1. Obras Civiles.....	128
3.1.1. Topografía y cartografía.....	128
3.1.2. Curva de Duración General.....	129
3.1.3. Canal de conducción.....	131
3.1.4. Sedimentador.....	132
3.1.5. Tanque de Presión.....	132
3.1.6. Tubería de Presión.....	136
3.1.7. Anclajes y apoyos.....	137
3.1.8. Turbina.....	139
3.1.9. Casa de Máquinas.....	139
3.2. Análisis económico.....	139
3.3. Sensibilidad de los parámetros de diseño.....	140
3.3.1. Efectos de la variación del flujo de descarga.....	140
3.3.2. Efectos de la variación de la altura o carga disponible.....	146
3.3.3. Efectos de la variación del diámetro de salida del rodete.....	149
3.3.4. Efectos de la variación del número de álabes del rodete.....	150
3.3.5. Función objetivo.....	151
3.4. Optimización multiobjetivo para álabes de PAT.....	151
3.5. Simulación numérica en Ansys CFX del diseño propuesto.....	153
4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	158
4.1. Resumen.....	158
4.2. Conclusiones.....	160
4.3. Trabajos futuros.....	161
Referencias Bibliográficas.....	163
Anexos.....	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Flujo en curva.....	15
Figura 1.2. Esquema bocatoma.....	16
Figura 1.3. Trazado de obras de conducción – zona de curva.....	17
Figura 1.4. Vertedero de pared delgada (forma general).....	18
Figura 1.5. Compuerta plana.....	19
Figura 1.6. Desarenador de lavado continuo.....	21
Figura 1.7. Desarenador de lavado intermitente.....	22
Figura 1.8. Desarenador de lavado intermitente.....	24
Figura 1.9. Bomba centrífuga.....	26
Figura 1.10. Vista axial del rodete con sus componentes principales.....	27
Figura 1.11. Triángulos de velocidades en la entrada y salida del álabe.....	28
Figura 1.12. Mecanismos de erosión por partículas sólidas.....	32
Figura 1.13. Mecanismos de desgaste abrasivo.....	33
Figura 1.14. Mecanismos de desgaste erosivo.....	34
Figura 1.15. Taxonomía de los algoritmos globales de optimización.....	37
Figura 1.16. Diagrama de flujo de la optimización mediante GA (genetic algorithm).....	42
Figura 1.17. Economía de escala de las microcentrales hidroeléctricas.....	53
Figura 2.1. Forma de cresta estándar para vertedero.....	86
Figura 2.2. Resalto hidráulico.....	87
Figura 2.3. Tipos de resalto hidráulico – calados conjugados (d_2 y d_3).....	87
Figura 2.4. Sumersión del resalto hidráulico a contrapendiente.....	89
Figura 2.5. Protección aguas abajo del colchón de aguas.....	90
Figura 2.6. Cargas externas actuando sobre el azud.....	90
Figura 2.7. Cargas externas actuando sobre el azud.....	92
Figura 2.8. Calado a la entrada (d_1) y salida (d_2) del tanque de carga.....	100
Figura 2.9. Fuerzas que intervienen en los apoyos.....	108
Figura 2.10. Distancia entre apoyos o puntos medios (L_a).....	108
Figura 2.11. Cálculo de la fuerza F_1	110
Figura 2.12. Cálculo de la fuerza F_2	111
Figura 2.13. Cálculo de la fuerza F_3	111
Figura 2.14. Cálculo de la fuerza F_4	112
Figura 2.15. Cálculo de la fuerza F_5	112
Figura 2.16. Cálculo de la fuerza F_6	113
Figura 2.17. Cálculo de la fuerza F_7	113

Figura 2.18. Cálculo de la fuerza F8.....	114
Figura 2.19. Cálculo de la fuerza F9.....	114
Figura 2.20. Campo de utilización de los diversos tipos de turbinas.....	115
Figura 2.21. Área necesaria para casa de máquinas en una P.C.H.....	116
Figura 2.22. Algoritmo del proceso de diseño conceptual del rodete (PAT).....	123
Figura 2.23. Curva característica caudal vs. Altura.....	130
Figura 2.24 Calibración del modelo - rodete (PAT).....	132
Figura 3.1. Curva de duración general.....	136
Figura 3.2. Efectos sobre eficiencia en función del coeficiente de flujo.....	145
Figura 3.3. Efectos sobre altura y potencia en función del coeficiente de flujo.....	146
Figura 3.4. Eficiencia y Factor de erosión en función del coeficiente de flujo.....	146
Figura 3.5. Potencia y Factor de erosión en función del coeficiente de flujo.....	147
Figura 3.6. Velocidad específica y axial en función del coeficiente de flujo.....	147
Figura 3.7. Componentes de la velocidad a la entrada del rodete en función del coeficiente de flujo.....	148
Figura 3.8. Altura y Velocidad específica en función del coeficiente de descarga.....	148
Figura 3.9. Velocidad absoluta y factor de erosión en función del coeficiente de flujo.....	149
Figura 3.10. Radio de entrada al rodete y factor de erosión en función del coeficiente de flujo.....	149
Figura 3.11. Velocidad tangencial a la salida del rodete y factor de erosión en función del coeficiente de flujo.....	150
Figura 3.12. Velocidad tangencial a la entrada y salida en función del coeficiente de flujo.	150
Figura 3.13. Eficiencia en función de la altura.....	151
Figura 3.14. Potencia y Factor de erosión en función de la altura.....	151
Figura 3.15. Velocidad tangencial a la entrada y salida del rodete en función de la altura.	152
Figura 3.16. Factor de erosión y velocidad axial a la entrada en función de la altura.....	152
Figura 3.17. Velocidad específica y axial en función de la altura.....	153
Figura 3.18. Componentes de la velocidad a la entrada del rodete en función de la altura.	153
Figura 3.19. Altura y Potencia en función del diámetro de salida.....	154
Figura 3.20. Altura y Factor de erosión en función del diámetro de salida.....	154
Figura 3.21. Eficiencia y Factor de erosión en función del diámetro de salida.....	155
Figura 3.22. Velocidad Tangencial en función del diámetro de salida.....	155
Figura 3.23. Eficiencia y Velocidad absoluta en función del número de álabes.....	156
Figura 3.24. Frente de Pareto para el intento 1.....	157

Figura 3.25. Frente de Pareto para el intento 2.....	157
Figura 3.26. Geometría de los álabes – vista isométrica.....	158
Figura 3.27. Geometría modelo propuesto Ansys – álabe.....	159
Figura 3.28. Geometría modelo propuesto Ansys – vista isométrica.....	159
Figura 3.29. Presión dentro del fluido.....	160
Figura 3.30. Esfuerzo cortante en el fluido.....	160
Figura 3.31. Líneas de flujo (variable: velocidad).....	161
Figura 3.32. Líneas de flujo en el rodete.....	161
Figura 3.33. Flujo de sedimentos en el rodete.....	162
Figura 3.34. Erosión en uno de los álabes del rodete.....	162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Recomendaciones para disminuir el desgaste por erosión en una turbina Francis.....	36
Tabla 1.2. Modelos para simulación de turbulencia.....	46
Tabla 1.3. Modelo empírico para predecir la erosión (Gulich, 2008).....	47
Tabla 2.1. Valores del coeficiente de sumersión “S” para vertederos con perfil hidrodinámico.....	83
Tabla 2.2. Corrección paramento vertical – Ofizeroff.....	83
Tabla 2.3. Coordenadas para perfil Creager – Ofizeroff para $H_o = 1,0$	85
Tabla 2.4. Relación ancho vs. carga en un azud.....	91
Tabla 2.5. Coeficiente de fricción (hormigón sobre diversos tipos de suelo).....	92
Tabla 2.6. Separación entre barrotes.....	104
Tabla 2.7. Angulo de inclinación (A_r) de la rejilla.....	104
Tabla 2.8. Espaciamiento entre apoyos [m] para tubería de acero comercial.....	107
Tabla 2.9. Rango de optimización de los parámetros de diseño hidráulico.....	125
Tabla 2.10. Parámetros utilizados para la generación de la malla.....	128
Tabla 2.11. Parámetros utilizados para las condiciones de borde.....	129
Tabla 2.12. Calibración del modelo – presión.....	131
Tabla 3.1. Curva de duración general – datos.....	135

NOMENCLATURA

a_m	amortización
A_{scs}	área superior de la cámara de sedimentación
b	ancho
B_i	beneficios en el año “i” desde el inicio de la construcción
BNA	beneficio neto actualizado
B_{pve}	beneficios anuales por la venta de energía
$C_{s,eq}$	contenido de sólidos – solids content
$C_{s,Ref}$	contenido de sólidos, valor de referencia – solids content, reference value
C	velocidad absoluta
CD	costos directos
CE	costos de escalamiento
C_i	gastos en el año “i” desde el inicio de la construcción
CIA	costos de ingeniería y administración
C_{imp}	costos por imprevistos
C_m	velocidad meridional
$C_{op\&m}$	costos de operación y mantenimiento
C_r	costos de interés durante la construcción
C_u	componente tangencial de la velocidad absoluta
d	diámetro de la partícula de mayor tamaño a ser arrastrada
d_2	calado conjugado del resalto
d_{con}	altura de contracción del resalto
d_s	profundidad de protección aguas abajo del colchón
D	diámetro rodete
D_m	diámetro medio del material con el que se protege al cauce
e	transferencia de energía del rodete al rotor
e_c	profundidad del colchón de agua que se forma al pie del azud
e_t	espesor de la tubería
E	empuje hidrostático
F	fuerza
F_{KG}	factor para el tipo de grano o partícula – factor kind of grain
g	aceleración gravitacional
G	peso del azud
h_d	altura del diente al final del zampeado

h	pérdidas
h_s	altura de seguridad
h_{sa}	altura mínima a la cual debe ubicarse la superficie de agua sobre la tubería
h_t	altura total de la cámara
H	altura o caída neta
K_d	factor de seguridad al deslizamiento
K_v	factor de estabilidad al volcamiento
L	longitud del resalto
L_{cs}	longitud cámara de sedimentación
L_t	longitud de transición
n_b	número de álabes
n_s	esfuerzo portante del suelo (calculado)
N	fuerzas normales a la superficie del terreno bajo el azud
N_s	velocidad sincrónica
N_1	número de espacios libres
N_2	número de barrotes
NPSH	altura neta positiva de succión – net positive suction head
$P(i)$	vector probabilidad
P	potencia
P_{rec}	Precipitación
Q	Caudal, gasto o descarga
r	tasa de interés
r'	tasa interna de retorno (TIR)
r_e	radio a la entrada del rodete
r_s	radio del eje del rodete
S	subpresión, producto del flujo de agua bajo el azud
S_{adm}	capacidad portante del suelo
T_R	periodo de retorno
T	peso o empuje del suelo
U	velocidad tangencial o periférica
V_f	valor futuro
V_p	valor presente
$V_{\text{útil}}$	volumen útil del Tanque de carga
W_{mix}	velocidad relativa
W_{ref}	velocidad relativa, valor de referencia
x	sobre - elevación del agua en el canal de conducción

\varnothing	diámetro
α	plano de deslizamiento - ángulo
β	ángulo del álabe - ángulo
γ	peso específico - densidad
Δ	deflexión
δ	densidad del cuerpo en estudio
ΔT	máxima variación del diámetro de la tubería
ε	coeficiente de bloqueo - eficiencia
η	eficiencia o rendimiento
μ	coeficiente de fricción
σ	grado de reacción – máquinas hidráulicas
σ_c	esfuerzo cortante
σ_F	factor de forma
Φ	coeficiente de flujo
Ψ	coeficiente de carga
Ω	número de velocidad – speed number

RESUMEN

El presente documento tiene por objetivo establecer el diseño paramétrico del rodete de una bomba funcionando en modo turbina, en función de las características propias de una fuente de generación hidroeléctrica (caudal y altura neta); misma que abastece en la actualidad a un sistema de riego en la provincia de Cotopaxi.

Las obras civiles se determinaron en base al caudal, que se obtuvo a través de la curva de duración general (CDG); y a la altura función de la topografía del lugar. En los proyectos de micro y mini generación hidroeléctrica se recomienda un caudal que se presente el 90% del tiempo, sin embargo, debido a que las diferencias geométricas usando el caudal recomendado ($Q-90\%$) o uno mayor ($Q-30\%$), son mínimas y su influencia en el costo total del proyecto es baja, se opta por el valor presente el 30% del tiempo.

Un análisis de sensibilidad individual de los parámetros relacionado con la eficiencia del rodete y de la erosión en los álabes, permite una mejor comprensión acerca de su relación en la optimización de la eficiencia y la disminución de la erosión. Dentro del proceso de optimización multiobjetivo a través de algoritmos genéticos, se seleccionó a la velocidad y ancho a la salida del rodete, el factor de erosión, así como a la eficiencia; como funciones objetivo. Las variables de decisión son el diámetro y ángulo de salida del rodete, además el número de álabes. El proceso termina con la validación de los resultados en CFD.

Palabras clave: CFD, PAT, optimización multiobjetivo, rodete.

ABSTRACT

The objective of present document is to establish parametric design of a pump impeller operating in turbine mode (PAT), based on characteristics of source for hydroelectric generation (flow and net height); same that currently supplies an irrigation system in the province of Cotopaxi.

Civil works were determined based on water flow and height. Water flow which was obtained through general duration curve (CDG), and height is function of place's topography. In micro and mini hydroelectric projects are recommended a flow that is 90% of time, however geometric differences using recommended flow rate (Q-90%) or a larger one (Q-30%) are minimal and their influence is low on project's total cost. Flow rate (Q-30%) was chosen for present work.

An analysis of individual sensitivity parameters related to impeller's efficiency and blade's erosion, allows a better understanding about their relationship with efficiency optimization and erosion decrease. Within multiobjective optimization process through genetic algorithms, impeller's speed and width at exit of it, erosion factor, as well as efficiency were selected; as objective functions. Decision variables are impeller diameter and angle of exit of it, and the number of blades. Process ends with results validation in CFD.

Keywords: CFD, PAT, impeller, multiobjective optimization

DISEÑO PARAMÉTRICO, OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO Y SIMULACIÓN CFD DE UNA BOMBA FUNCIONANDO COMO TURBINA PARA LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA A PARTIR DE UN CANAL DE RIEGO

INTRODUCCIÓN

Una de las principales formas de energía es la electricidad, de carácter indispensable a nivel mundial, es una parte integral tanto en la vida como en el desarrollo del ser humano; en el Ecuador el consumo de esta forma de energía (electricidad) es de alrededor del 14% (año 2014). La base de la oferta de electricidad generada en el país, para el mismo año, predomina la generación a través de centrales térmicas 49.13% (compuesto por: sistemas turbogas, motores de combustión interna y turbovapor), en segundo puesto se encuentran las hidroeléctricas con un 45.57%, así mismo la participación debida a fuentes no convencionales (biomasa, eólica y solar fotovoltaica) es cercano al 2.0% y existe también el importe de electricidad 3.30%. Se puede observar que en la última década la generación de electricidad mediante energías renovables convencionales y no convencionales, tienen una participación que se ha mantenido en valores cercanos al 50% [1].

Adicionalmente, la electricidad ha ido ganando un importante terreno en el contexto mundial, debido a las múltiples ventajas que presenta frente a otros tipos de combustibles. En este sentido se puede predecir que en un futuro próximo tendrá una mayor participación en las tecnologías de usos finales. La electricidad se encuentra presente en muchas de las actividades del ser humano y el consumo registra una tasa de crecimiento positiva; es necesario que esta se origine de fuentes renovables. La hidroenergía o energía hidráulica, se encuentra dentro de las fuentes renovables convencionales, y como la mayoría de energías renovables esta es consecuencia de la radiación solar. Esta energía se encuentra asociada a las corrientes o saltos de agua, este último se lo conoce como energía potencial del agua disponible a una cierta altura y que al pasar a través de turbinas hidráulicas llegan a generar energía eléctrica [2].

Entre las múltiples ventajas que tiene la hidroelectricidad es la de ser autóctona, limpia e inagotable como el resto de energías renovables. Esta tecnología es el resultado de 2000 años de avance, desde la rueda hidráulica con bajos rendimientos hasta los turbo generadores con muy altos rendimientos. A gran escala esta fuente de energía tiene un campo de expansión bastante limitado, esto debido a que en los países más desarrollados un alto porcentaje de los ríos cuentan ya con una o varias centrales; mientras que en los países en vías de desarrollo estos mega proyectos pueden llegar a tener obstáculos de carácter financiero, ambiental e incluso social. En una escala mucho menor, la generación de electricidad a través de las pequeñas centrales hidroeléctricas, tienen altas posibilidades de crecimiento, debido a la amplia variedad de caudales que son sensibles al aprovechamiento con nuevas tecnologías [2].

Debido a las persistentes crisis energéticas, la necesidad de encontrar alternativas a la generación a través de fuentes convencionales se ha ido incrementando. Entre las alternativas la pequeña hidrogenación es una de las más significativas y prometedoras. En todo el mundo los pequeños proyectos hidroeléctricos tienen una amplia demanda, esto debido a que pueden establecerse en un sin número recursos hídricos. Sin embargo, el problema es el elevado capital inicial asociado a la instalación de los pequeños proyectos hidroeléctricos en corrientes de agua que comúnmente se encuentran en regiones alejadas o rurales, como bosques o zonas andinas. Dichas áreas alejadas se encuentran frecuentemente en países en desarrollo, que a su vez enfrentan problemas en los costos y acceso a la electricidad [3].

El costo total de construcción y puesta en funcionamiento de una pequeña central hidroeléctrica, tiene una influencia de carácter significativo por la compra o adquisición de la(s) turbina(s) hidráulica(s). Una alternativa ante esta dificultad es el uso de bombas funcionando en sentido inverso (PAT, por sus siglas en inglés: *pumps as turbines*); debido a las múltiples ventajas que estas poseen, esencialmente en términos económicos por concepto de adquisición y mantenimiento.

Las máquinas rotantes que manejan fluido son totalmente reversibles, por ende, puede efectivamente trabajar como tal o como turbina. En este punto es importante señalar que, el rendimiento no es el mismo. Sin excepción alguna, la altura y caudal necesarios para el funcionamiento como turbina en su punto óptimo es mayor que para el modo bomba; la principal razón de esta diferencia se encuentra relacionada con las pérdidas hidráulicas de la turbomáquina [5].

El uso de bombas centrífugas en dirección inversa es una vía efectiva para reducir el costo en las pequeñas centrales hidroeléctricas. Adicional a la generación de energía, las bombas operando en sentido inverso también pueden ser usadas en sistemas de recuperación de energía, sistemas de suministro de agua, sistemas de riego, etcétera. Las bombas se fabrican en grandes cantidades y se encuentran disponibles en diferentes dimensiones; la principal ventaja radica en un bajo costo y un funcionamiento relativamente simple.

Las PAT son una potencial solución a los problemas de energía en las zonas alejadas y rurales. Estas proveen una alternativa económica a las turbinas actuales especialmente para la pico y micro hidrogenación. PAT es esencialmente una bomba operando en modo turbina a través del cambio de dirección del flujo y por lo tanto la dirección de rotación del rodete [4].

Estudios del uso de las PAT muestran algunas de las características más importantes: las bombas son máquinas relativamente simples y fácilmente disponibles tanto en países desarrollados como en aquellos que se encuentran en desarrollo. PAT tiene una eficiencia aceptable para operaciones con flujo controlado. En la aplicación de las bombas a la producción de energía, varias dificultades existen aún, dada su limitada eficiencia y la pobre capacidad de regulación. Adicional a esto, los fabricantes de este tipo de turbomáquina no disponen de información del desempeño y las características del flujo cuando estas se encuentren operando en modo turbina. La carencia de información respecto del rendimiento de las PAT es una barrera importante para un uso más amplio de esta alternativa. Además, uno de los principales retos en la generación de electricidad a través de bombas es la adecuada selección de las PAT para un sitio específico o particular [3].

La principal diferencia entre una PAT y una turbina convencional radica en que las primeras carecen de un dispositivo de control hidráulico (Predistribuidor y Distribuidor). Esta carencia, explica en cierta medida el bajo costo de las PAT, significa entonces que estas necesitan condiciones de operación constantes. La deficiencia más importante a resolver es la falta de información correspondiente al comportamiento de las PAT [5].

Se disponen de considerables recursos teóricos, experimentales y computacionales en el área de la operación invertida de las bombas. Respecto a este último, se tiene un amplio crecimiento en el área del Análisis Computacional de Fluidos (CFD) en las últimas

décadas. Esta tecnología ha sido ampliamente utilizada en diversas áreas de la ingeniería como la aviación, mecánica de fluidos y oceanografía. El análisis CFD ayuda a la predicción del tipo de flujo a través de modelos matemáticos, herramientas informáticas y métodos numéricos [3].

Los estudios experimentales son herramientas importantes para el diseñador, que puede ser considerado como uno de los métodos más precisos de investigación de campo para la predicción del rendimiento de una turbina. Sin embargo, no se pueden utilizar durante la optimización del diseño iterativo debido principalmente al alto costo y el tiempo requerido para este tipo de análisis. El desarrollo de herramientas de diseño asistido por computadora han hecho que la brecha entre el modelado de construcción y el análisis o simulación con software de ingeniería sea más pequeña, permitiendo realizar un diseño paramétrico empleando las capacidades computacionales actuales, llegando a simular el comportamiento real del sistema y los componentes involucrados.

Bajo estos antecedentes y con el objetivo de hacer cada vez más eficiente el aprovechamiento de los recursos hídricos para generar energía eléctrica, se busca obtener una metodología de diseño del rodete de una PAT, involucrando modelado paramétrico, técnicas de optimización multiobjetivo y simulación numérica a través de la dinámica de fluidos computacional; en donde además se tomen en cuenta las condiciones de operación local, con la intención de maximizar el rendimiento de la PAT.

Objetivo General

Analizar la viabilidad técnica para la generación hidroeléctrica a partir del canal de riego Quilindaña, misma que abastece del líquido vital al proyecto de riego existente (San Antonio – Calapicha – Chillos), en la parroquia de San Antonio de Aláquez, Latacunga - Cotopaxi.

Obtener el diseño de una bomba funcionando como turbina (PAT) para la generación hidroeléctrica a partir del diseño paramétrico, optimización multiobjetivo y simulación numérica en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Objetivos Específicos

- Estimar el caudal de diseño óptimo a través de la curva de duración general (CDG).

- Calcular el porcentaje del tiempo en que el caudal óptimo se encuentra disponible y comparar con los valores recomendados para centrales hidroeléctricas (Q75% - Q90%).
- Establecer las obras civiles: dimensiones y ubicación, necesarias para la generación hidroeléctrica en la zona en estudio.
- Optimizar el rodete de la bomba, para maximizar la eficiencia en su funcionamiento como turbina
- Elaborar el modelo paramétrico de los álabes de la bomba adaptada a las condiciones específicas del sitio.
- Evaluar métodos de optimización multiobjetivo en función a la geometría y aspectos de desempeño.

Alcance

El alcance de esta Tesis de Postgrado es el estudio de la generación hidroeléctrica a partir de un sistema de producción agrícola, especialmente en cuanto al diseño de sus obras civiles como son: captación, canal de conducción, tanque de presión, tubería de presión con sus bloques de anclaje y casa de máquinas; para luego proceder a presupuestar toda la central y realizar su evaluación económica. Adicionalmente de la implementación de una metodología de diseño integral que tome en cuenta el diseño paramétrico, optimización multiobjetivo y simulación numérica mediante CFD, permitirá encontrar una configuración adecuada que se adapte mejor a las condiciones de operación, esto se reflejará en la eficiencia de la PAT.

Guía del documento

El presente trabajo se encuentra hecho con el fin de analizar la viabilidad técnica para la generación hidroeléctrica a partir de un sistema de producción agrícola, mismo que se encuentra localizado en la provincia de Cotopaxi, cantón Latacunga, en la parroquia Aláquez barrio San Antonio.

El capítulo uno del presente se encuentra dividido en dos secciones, la primera de estas, la base teórica necesaria para el entendimiento de la generación hidroeléctrica, partiendo del concepto de energía, eficiencia energética, principios de la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica y tipos de turbinas hidráulicas; para finalmente detallar las obras civiles necesarias para la generación hidroeléctrica. La segunda parte, se elabora un pequeño recuento de los conceptos a emplearse en el presente estudio: diseño

paramétrico, optimización multiobjetivo y análisis CFD. Finalmente, la tercera parte se detalla el estado del arte para las obras civiles y para el diseño del rodete.

En el capítulo dos, se describe de manera más detallada el procedimiento aplicado a las condiciones del proyecto para determinar las dimensiones de las obras civiles. En una segunda parte, se habla acerca de los diferentes conceptos a emplearse para el diseño paramétrico de la bomba, mas específicamente del rodete.

El capítulo tres, se tienen tres partes en la primera se presentan los resultados más significativos del proyecto, entre estos se encuentran: potencia generada, diámetro de la tubería de presión, tipo de turbina seleccionada, y geometría de las diferentes obras civiles (estructuras hidráulicas). Se realiza además un breve resumen de los costos tanto de capital invertido, como los costos de operación y mantenimiento. Finalmente, se presentan los resultados de la optimización multiobjetivo y del análisis CFD del rodete.

El resumen, conclusiones y trabajos futuros se presentan en el capítulo 4.

ASPECTOS GENERALES

Esquema básico del proyecto

Ubicación

El presente proyecto se encuentra ubicado en la zona centro del país, sobre las coordenadas geográficas S 0°46'48.8" y W 78°19'45", aproximadamente a 5.0 km al oeste del sector conocido como Pansache (ver Anexo 5).

La captación se realiza aproximadamente sobre la cota 4 000 m.s.n.m.; mientras que Casa de máquinas se encuentra a una distancia de 6.0 km aguas abajo de la captación a una altura de 3800 m.s.n.m..

Vías de Acceso

Las vías se encuentran asfaltadas hasta la parroquia Aláquez, a partir de esta última las vías son de tierra hasta llegar a las lagunas Yurgacocha y Verdecocha, mismas que se encuentran al pie del cerro Quilindaña. La distancia desde la parroquia Aláquez hasta las lagunas es de aproximadamente 30 km, mientras que la distancia desde la ciudad de Latacunga (capital de provincia) hasta la parroquia Aláquez es de 7.5 km aproximadamente.

Aspectos físicos

Clima de la zona

Se localiza entre las altitudes de 3 500 a 4 000 m.s.n.m.; la temperatura media anual se encuentra entre los 4.1 °C y 13.7 °C, la nubosidad media en la cuenca es de 5/8 y existe también nubosidad nocturna, los vientos son mayores en la zona alta de la cuenca y el promedio de precipitación anual oscila entre los 7.5 mm y 500.0 mm. La zona tiene influencia de clima de Páramo.

Ecología de la zona

El análisis ecológico de la zona proporciona una base científica a problemas agrícolas, ganaderos y de protección de la naturaleza.

- Regionalización física: Sierra central
- Clasificación ecológica: está región bioclimática corresponde a la formación ecológica páramo húmedo (*ph*), con influencia de bosque húmedo montano oriental (*bhmo*) hacia el Este; y bosque húmedo amazónico inundable (*bhai*) hacia el Oeste.
- Temperatura media: 4.1 °C – 13.7 °C
- Régimen de humedad: húmedo
- Relación Evapo – transpiración: aproximadamente 800 [mm]
- Precipitación: el patrón de distribución de lluvias es Zonital, la duración de la estación seca es un tanto variable, pero corresponde mayoritariamente a los meses de julio, agosto y septiembre. Como consecuencia de la distribución de las lluvias de los meses ecológicamente secos fluctúan entre 0 a 5 meses. Dentro de la estación seca los días fisiológicamente secos varían entre 18 y 93.
- Zonas agrícolas: pajonales, 50% pastizales, 20% cultivos, 30% matorrales.
- Cultivos: maíz, papas, habas, morocho, chochos, brócoli, cebada, zapallos, ocas, zambos, avena, vicia, alfalfa y flores.
- Fauna: ganado vacuno y aves de corral.

Aspectos socioeconómicos

Con el fin de evaluar las necesidades de la población de la parroquia de Aláquez y en especial de los barrios más cercanos al proyecto, y las posibilidades de su desarrollo, es útil conocer las condiciones presentes. Así se podrá apreciar el dinamismo de su población y su mayor o menor capacidad para aprovechar los beneficios provenientes del suministro propuesto de energía hidroeléctrica.

Aláquez es una parroquia del cantón Latacunga perteneciente a la provincia de Cotopaxi. Es una zona de gran potencial económico, debido a que su producción ganadera y agrícola que abastece de una gran cantidad de productos a la capital de provincia.

Según el censo de 2 012, el número de habitantes es de 500 que en la actualidad se dedican al desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas. La población dispone actualmente de los servicios básicos fundamentales:

Comunicación: sistema deficiente de correos, carretera de 3^{er} orden, turnos diarios de transporte público desde y hacia Latacunga; al momento existe un porcentaje bajo de la población con acceso al servicio telefónico fijo (en su gran mayoría es servicio móvil).

Educación: Escuela y colegio "Miguel Gonzalo Albán Rumazo " (200 alumnos).

Salud: Sub-Centro de Salud Aláquez

Servicio eléctrico: conectado al sistema interconectado nacional, abasteciendo a la gran mayoría de la población.

Servicio de agua potable: agua potable y de pozo.

Sistema de eliminación de aguas servidas: Pozos ciegos, esta realidad es común en los barrios alejados de la parroquia central.

Comercio interno: inexistente, la mayoría de los productos son llevados hacia la capital de provincia o hacia otras parroquias.

Identificación del recurso hídrico

La identificación del recurso hídrico responde a un estudio de las posibles zonas en donde se puede emplazar el aprovechamiento hidroeléctrico, en nuestro caso a partir de un sistema de riego existente, es decir se buscan las mejores perspectivas de un potencial hidroeléctrico.

Características de la cuenca

Las subcuencas de las aguas que corren por las quebradas El Morro y Tulunchi pertenecen a la vertiente occidental de la cordillera de los Andes y al sistema hidrográfico de la cuenca del Río Tulugchi, que se ubican en la zona centro del país. El canal de riego (San Antonio – Calapicha – Chillos) se origina en la Laguna Yuracocha, aproximadamente a los 4 000 m.s.n.m. y tiene una longitud aproximada de 7.0 km hasta el sector de la captación (obra de toma).

El área de la cuenca de la zona del proyecto se determinó en base a la carta topográfica: Cotopaxi, Ecuador 3991 IV J721 Edition 1-NIMA(IGM), escala 1:50 000. Se obtiene como

resultado (ver planos: *PHQ-G01-TUG-03A* & *PHQ-G01-TUG-04A*; en el Anexo 5) área de la cuenca 15.49 km².

El canal que alimenta al sistema de riego, debido a la hidrografía y características topográficas de la zona, se considera como una alternativa viable para la implementación de una minicentral hidroeléctrica.

Por los bajos caudales que se observa en el canal de la zona, se deduce que existe una gran infiltración y por lo tanto un coeficiente de escorrentía entre 0.20 y 0.40.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1. Hidroenergía

El objetivo de un sistema hidroeléctrico es transformar la energía hidráulica de una masa de agua (exergía) situada a una cierta altura H , en energía eléctrica.

Energía hidráulica (Q & H ; caudal y altura) » sistema hidroeléctrico = energía eléctrica (Joules) + pérdidas; un sistema hidroeléctrico está enfocado en tener la máxima eficiencia.

La hidroelectricidad permite desarrollar un futuro con energía balanceada; esto bajo el criterio de que, si bien se interviene en el ambiente, una vez construida y puesta en operación la pequeña central, el combustible es gratuito y además es de origen renovable. Este recurso no puede ser visto como la solución al problema energético, esto implicaría tener un criterio muy pobre acerca de la situación energética mundial; en otras palabras, las pequeñas centrales hidroeléctricas son una parte de la solución, que se deben complementar con otras alternativas tales como: acumulación por bombeo y energías no convencionales o alternativas, etcétera.

1.1.1. Aprovechamiento del recurso hídrico para generación eléctrica

La energía hidráulica se define como la energía cinética del movimiento de las masas de agua o la energía potencial debido a la diferencia de altura. Al igual que el resto de las energías renovables la energía hidráulica es el resultado o consecuencia de la radiación solar. Así, la energía hidráulica es “la energía asociada a las corrientes o saltos de agua”; las centrales hidroeléctricas son las encargadas de aprovechar esta energía y transformarla en energía eléctrica. El recurso hídrico al pasar de una cota elevada a otra más baja, a través de una turbina hidráulica, provoca la transformación de la energía hidráulica en energía mecánica de rotación y a su vez mediante un alternador (generador) se transforma en energía eléctrica.

1.1.2. Turbinas hidráulicas

La palabra turbina viene del latín *tubo-inem*, que significa rotación o giro de cualquier cosa. Las primeras máquinas usadas, fueron las ruedas hidráulicas tangenciales. Estas aparecen en Alejandría y Egipto en los principios de la era cristiana. Los romanos convirtieron la rueda hidráulica en una fuente de fuerza mecánica, en usos como el de los

molinos. La historia recoge el nombre de Vitruvius como el ingeniero que llevó a cabo tal modificación [46].

Las turbinas hidráulicas producen aproximadamente, una cuarta parte de la energía eléctrica en el planeta. Así debemos recordar que la energía hidráulica ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de nuestra civilización. Se prevé además, que esta (energía hidroeléctrica) siga desempeñando un papel importante en el escenario energético mundial y que tendrá un impacto cada vez más trascendente en el progreso de las regiones en vías de desarrollo del planeta.

La turbina hidráulica tiene una rica y muy variada historia, producto de un proceso natural de evolución originado a partir de la rueda hidráulica. En sus inicios, las turbinas hidráulicas se empleaban para impulsar directamente la maquinaria; no obstante el uso para la generación de electricidad se considera una actividad reciente. Una gran parte del desarrollo de esta (turbina hidráulica) ocurrió en Francia, que a diferencia de Inglaterra, no disponía de las fuentes de hulla (baratas y abundantes) que catapultaron la revolución industrial durante el Siglo XVIII. Francia encontró (siglo XIX) que su recurso energético más abundante era el agua, la *houille blanche* (literalmente hulla blanca) es el término que se usó para la energía hidráulica [47].

Con el objetivo de transformar la energía que contiene un fluido en energía mecánica o viceversa, se emplean diferentes tipos de máquinas, que pueden clasificarse del siguiente modo:

- a) Máquinas gravimétricas
- b) Máquinas hidrostáticas o de desplazamiento
- c) Máquinas rotodinámicas o turbomáquinas

Las *máquinas gravimétricas* emplean la variación de la energía geodésica del fluido. Dentro de este grupo tenemos, por ejemplo, las ruedas hidráulicas [48].

Las *máquinas hidrostáticas*, también conocidas con el nombre de máquinas de desplazamiento positivo o volumétricas, aprovechan fundamentalmente las variaciones de la energía de presión del fluido; estas se construyen en dos variantes: reciprocantes y rotativas. Dentro de este tipo tenemos, por ejemplo: máquinas de vapor, motores de combustión interna de ciclo Otto y Diesel, las bombas de émbolo, las bombas de engranaje, etcétera [48].

A diferencia de los dos grupos anteriores, la *turbomáquinaria* o *maquinaria rotodinámica* usa las variaciones de energía cinética, experimentadas por el fluido al pasar por la maquinaria [48].

En base a lo expuesto en los párrafos anteriores, una turbina hidráulica viene a ser una turbomáquina hidráulica, donde el trabajo mecánico se origina en la variación de la cantidad de movimiento del agua al fluir en un sistema de álabes rotativos. Es esta estructura, conocida como rodete, la que alberga desde desviaciones del flujo de agua hasta procesos de desviación y aceleración simultánea del flujo [48].

Los criterios para clasificar a las turbinas hidráulicas se muestran a continuación:

Función del cambio en la presión estática dentro del rodete:

- a) Turbinas de acción o impulso, la presión estática es constante tanto a la entrada como a la salida del rodete
- b) Turbinas de reacción, la presión estática disminuye entre la entrada y salida del rodete.

Dependiendo de la dirección del flujo a través del rodete

- a) Turbinas de flujo tangencial
- b) Turbinas de flujo radial
- c) Turbinas de flujo semi-axial
- d) Turbinas de flujo axial

(Esta clasificación determina la geometría del rodete)

Según el grado de admisión del rodete

Asumiendo que, los álabes del rodete se encuentran sometidos parcial o simultáneamente a la acción del flujo de agua.

- a) Turbinas de admisión parcial
- b) Turbinas de admisión total

1.1.3. Centrales hidroeléctricas

El uso del potencial hidroeléctrico se ejecuta en zonas puntuales o muy específicas, mismos que reúnen las características técnicas, económicas, ambientales y sociales para la construcción, operación y mantenimiento de una central hidroeléctrica. Los

aprovechamientos hidroeléctricos actuales (tal y como los conocemos) son el resultado de los avances tecnológicos de alrededor de 2 000 años, desde la rueda de madera, que convertía un bajo porcentaje de energía hidráulica en energía mecánica útil, hasta los modernos turbogeneradores que giran a 1 500 [rpm] y producen energía eléctrica con rendimientos elevados. En este sentido es necesario recalcar que hace más de 100 años se empezó a emplear la energía hidráulica para generar electricidad. A diferencia del resto de energías renovables, la energía hidroeléctrica constituye una tecnología muy bien constituida (madura). Existe un sin número de sistemas hidráulicos empleados en la utilización de dicho potencial; de manera general, se puede clasificar a las centrales hidroeléctricas en dos grandes tipos: centrales con embalse de agua y centrales de pasada o de agua fluyente.

1.2. Obras civiles

En los párrafos siguientes se describen a detalle los elementos (obras civiles) que conforman el aprovechamiento hidroeléctrico: captación (dique – derivación), desarenador, acueducto (canal de derivación), tanque de presión, cámara de carga, tubería de presión (tubería forzada), casa de máquinas, canal de descarga (tubería de desagüe).

1.2.1. Obras de captación

Se denominan obras de toma u obras de captación a todas aquellas estructuras hidráulicas construidas sobre el cauce del río o canal; cuyo fin es captar parcialmente el agua que es transportada o acarreada. Existen diversos tipos de captación, pero básicamente se los puede dividir en dos:

- con almacenamiento
- por derivación directa

Obras de embalsamiento (con almacenamiento)

Principalmente consiste en una presa (represa) que cierra el cauce del río, formando un embalse o reservorio hacia aguas arriba de esta estructura; esto permite a su vez regular el caudal del río, almacenado en épocas de creciente, a fin de poder usarlo en períodos o temporadas secas. En función de diversos factores como el geológico por ejemplo, las presas pueden ser de tierra, piedra u hormigón. Además, la geometría de estas últimas, puede ser a gravedad o en arco. De manera general la inversión es alta en esta clase de obras [49].

Obras de captación directa (derivación directa)

El agua se capta sin ningún tipo o clase de almacenamiento, por lo tanto, no son necesarias estructuras de regulación; para esto el caudal del río tiene que ser constante durante todo el año, y como resulta obvio el caudal de captación debe de ser inferior [49].

En consecuencia de lo anterior, el nivel del agua en el río debe permanecer constante; este tipo de estructuras (obras) pueden catalogarse dentro del grupo de bajo costo. Para el presente trabajo se considera esta primera opción, esto debido a que no existe un caudal alto en la zona (ver más adelante hidrología). La altura del dique debe ser baja y se debe tener en cuenta que la altura de agua varía mucho, en épocas lluviosas o secas; para lo cual se deberán colocar compuertas en la cresta.

Consideraciones para el diseño de la bocatoma

En general se tienen dos tipos de obras toma, así:

- Obra de Toma Convencional, con azud fijo o azud móvil (compuertas), se denomina así ya que son usadas con bastante frecuencia [49].
- Obra de Toma de rejilla de fondo, conocida también como toma caucasiana o tirolesa, son aquellas cuya captación se encuentra en el mismo cuerpo del azud [49].

El buen funcionamiento de la obra de toma, cumpliendo con las condiciones de diseño, dependerá de la presencia de un dique, que permita cerrar el cauce del río y elevar el nivel de agua sobre una cota pre-establecida. Las principales funciones de la Bocatoma se muestran a continuación [49]:

- Asegurar la derivación constante del caudal de diseño.
- Captar el mínimo de sólidos y una vez que estos se acumulen, poder evacuarlos.
- Proveer de un sistema adecuado que permita la circulación del flujo de agua con una gran cantidad de sólidos y material flotante.
- Tener la suficiente capacidad de transporte de sedimentos en la zona de aguas abajo de la obra, a fin de evitar al máximo los procesos de sedimentación.

Ubicación de la obra de toma

Es favorable ubicar la bocatoma en zonas o tramos rectos del río, para el efecto se puede localizar el eje de la obra formando un ángulo de entre 60° y 90° con respecto a la dirección de la corriente. Sin embargo, en zonas o en los tramos en donde el río forma ondulaciones, se deben hacer algunas consideraciones; así por ejemplo es conveniente

ubicar la bocatoma en el sector donde termina la concavidad (zona de barranco) y comienza la parte convexa (zona de playa) [49], ver *Figura 1.1*.

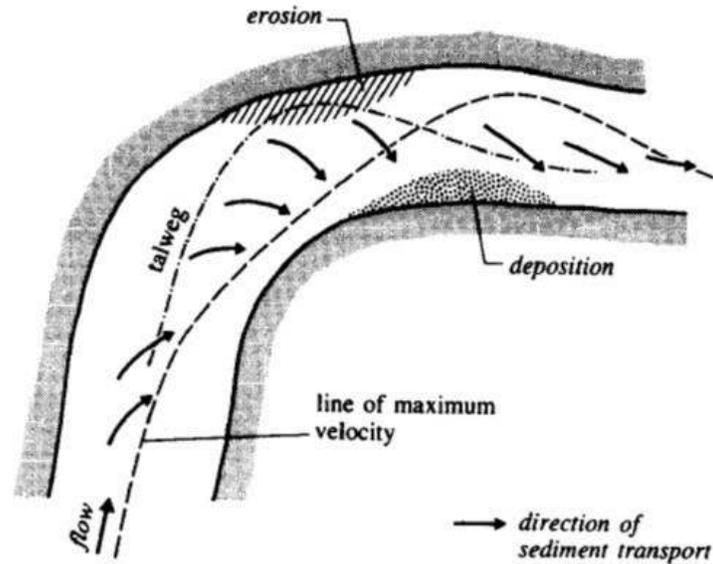


Figura 1.1. Flujo en curva.
(Fuente: Novak P., 2007)

Se debe tomar en cuenta que, si se ubica la toma en el tramo convexo del cauce, se corre el riesgo de que durante la época lluviosa (de crecidas), ingresen una mayor cantidad de arena y piedras; mientras que después de estas crecidas se forman frente a la bocatoma bancos de arena, estos impiden o hacen difícil el paso de agua hacia la derivación. Por otro lado, si se ubica la obra de toma en el lado cóncavo (barranco del río), durante la crecida los materiales flotantes de gran tamaño, así como las piedras impactan directamente contra las estructuras que conforman la obra de toma (azud y bocatoma) [49].

La ubicación de la obra de toma, a más del trazo del cauce, debe considerar las condiciones topográficas y geológicas del sitio, esto debido a que es necesario disponer de un terreno de condiciones geológicas aceptables y en lo posible en un sector lo bastante plano, a fin de ubicar el desripador y la transición. Además, se debe tener en cuenta la construcción de ataguías o diques provisionales, en épocas de estiaje, a fin de desviar el agua que viene a través del cauce del río, y poder construir la bocatoma y sus estructuras complementarias [49].

Finalmente, la ubicación de la obra de toma depende principalmente de la cota necesaria para obtener la caída o salto hidráulico, que permitirá satisfacer la demanda de la población a la cual se desea suministrar de energía eléctrica, y del cual se deriva la

potencia instalada. Es conveniente entonces partir del tanque de presión (tanque o depósito de carga), ubicándolo en un lugar apropiado para la producción eléctrica, a partir del cual se proyecta la línea de conducción, tomando en cuenta las consideraciones técnicas y económicas, hasta encontrar el punto óptimo (intersección con el río); estableciendo de forma aproximada pero aceptable el sitio para las obras de captación. En la *Figura 1.2* se muestran los elementos constitutivos de una obra de toma típica.

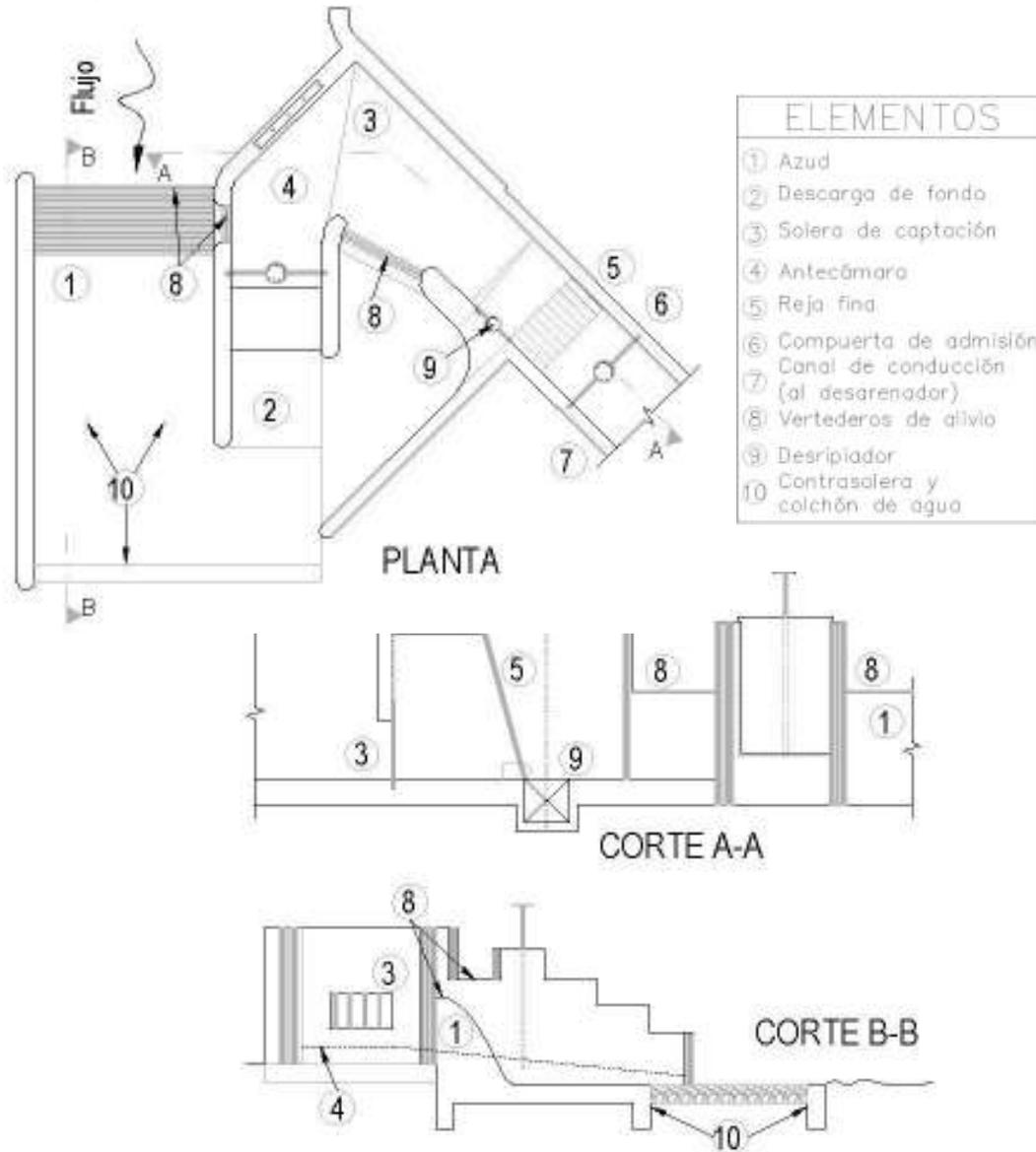


Figura 1.2. Esquema bocatoma.
(Fuente: Nicola G., 1987)

1.2.2. Obras de conducción

El agua que es atraída por las obras de captación (toma), es conducida hacia el sitio de su utilización y esto se logra empleando canales abiertos o tuberías de presión

(forzadas). La diferencia entre tuberías que conducen el agua a presión y aquellas en las que el agua circula a superficie libre, es que en las primeras el líquido ocupa toda la sección y tiene una presión diferente (usualmente mayor) de la atmosférica; mientras que en los segundos el agua ocupa solamente parte de la sección transversal y la presión en la superficie es similar a la atmosférica. Consecuentemente, en los conductos libres la superficie del agua coincide con la línea piezométrica y la gradiente es siempre positiva; en los conductos a presión la inclinación de la tubería es independiente siempre y cuando se encuentre por debajo de la línea piezométrica [50].

Se denominan canales, a todo cauce artificial que sirven para conducir agua; en estos el flujo será siempre a superficie libre, es decir la presión que se tiene es igual a la atmosférica. Se entiende entonces que se considerará canal a todo conducto abierto o cerrado (tubería o túnel) que funcione parcialmente lleno. En otras palabras, se conoce como canales abiertos a los conductos que van a cielo abierto (acequias); estos usualmente se excavan a media ladera, empleando el material excavado para rellenar el labio inferior del canal [50].

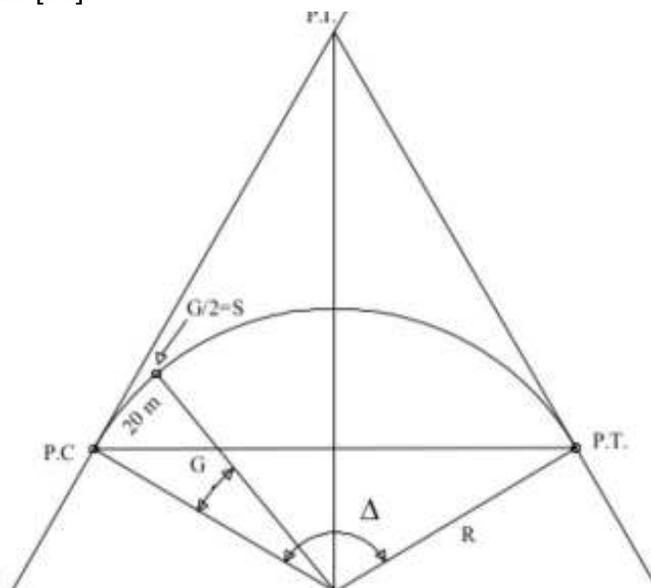


Figura 1.3. Trazado de obras de conducción – zona de curva.
(Fuente: Propia)

Criterios del trazado

La razón que rige el trazado de los canales, es el de conseguir la mayor eficiencia y seguridad de las obras, garantizando a su vez el menor costo.

El trabajo de trazado puede compararse con el que se realiza para carreteras (ver *Figura 1.3*), con la diferencia fundamental, de que en este caso se busca conseguir que la pendiente longitudinal del canal sea siempre positiva (disminuyendo, como es lógico en la

dirección del flujo de agua); llegando a variar solo dentro de ciertos límites. Generalmente, se traza la línea desde el sitio establecido donde se va a utilizar el agua (zona de riego, tanque de almacenamiento, tanque de presión, etcétera) hacia el río a fin de determinar la ubicación de la obra de toma. La gradiente del canal es inversamente proporcional a la del río; además la sección, la longitud y por ende el costo del canal guardan una relación directa con la pendiente de este. Resulta entonces fácil entender que la sección y el costo disminuyen con el aumento de la gradiente [50].

Deberán estudiarse varias alternativas económicas a fin de optimizar o hacer más eficiente el cálculo de la pendiente del canal. El criterio económico no es el único que va a prevalecer, sino que está sujeto a las características (morfológicas, topográficas, geológicas, etcétera) del sitio de toma y del caudal del río, este último frecuentemente disminuye hacia aguas arriba especialmente cuando hay varias vertientes (afluentes). Si se traza la línea del canal desde la captación hasta el sitio donde se utiliza el agua, siguiendo las curvas de nivel del terreno y descendiendo el número de metros por kilómetro en función de la gradiente escogida, se tiene una muy alta probabilidad de generar un recorrido sinuoso con una longitud mucho mayor a la línea recta que une los dos puntos (captación & uso). Es entonces necesario el estudio de diversas alternativas a fin de rectificar la alineación, reduciendo la longitud del recorrido por medio de túneles, acueductos, rellenos u otro tipo de obras. Se deberá tener presente para cada opción el costo – beneficio para el proyecto [50].

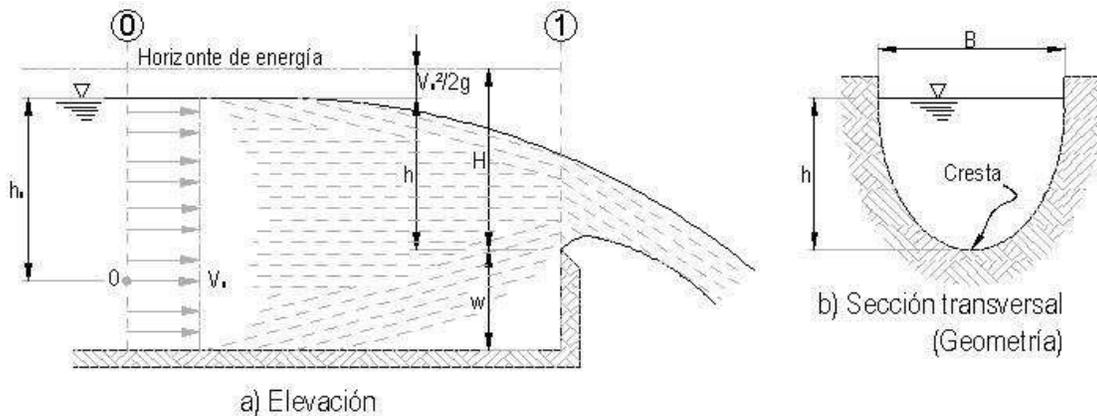


Figura 1.4. Vertedero de pared delgada (forma general).
(Fuente: Sotelo, 1997)

1.2.3. Vertederos laterales

Es toda estructura hidráulica, sea esta un muro o una placa, sobre la cual se efectúa una descarga a superficie libre. Existen diversas formas, según la finalidad a la cual se vaya a destinar así:

- *vertedero de pared delgada.*- la descarga se ejecuta sobre una placa, de sección transversal cualquiera, y con la particularidad de tener una arista aguda (ver *Figura 1.4*).
- *vertedero de pared gruesa.*- se presenta cuando el contacto entre la pared y la lámina vertiente es toda una superficie.

Ambos tipos pueden emplearse como dispositivos de aforo (medición del caudal) en laboratorio o en canales de pequeñas dimensiones. Sin embargo, el segundo tipo se puede emplear como una obra de control de excedencias en una presa, o incluso en canales de grandes dimensiones aportan para el aforo.

El punto más bajo de la pared en contacto con la lámina vertiente, se denomina como cresta del vertedor; el desnivel entre la superficie libre (aguas arriba del vertedor) y su cresta, se denomina carga.

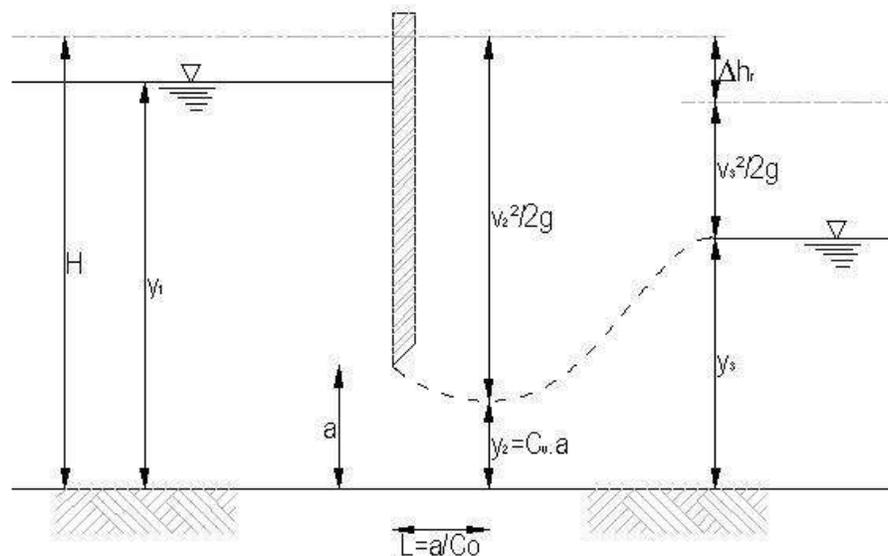


Figura 1.5. Compuerta plana.
(Fuente: Sotelo, 1997)

1.2.4. Compuertas

Los principales requerimientos de una compuerta son: control de crecientes, impermeabilidad, capacidad mínima de izaje, conveniencia en la instalación y posterior mantenimiento. Así mismo, se busca que el funcionamiento se encuentre libre de fallas, que exista una elevada seguridad a fin de mantener alejado de cualquier clase de peligro, tanto al personal de operación y mantenimiento, como al público en general. Pese al diseño robusto y diversas precauciones, pueden existir fallas y los mecanismos deberán ser capaces de tolerar dichas falencias sin consecuencias inaceptables (ver *Figura 1.5*).

1.2.5. Desarenadores

Se denomina desarenador a toda obra hidráulica que sirve para separar y remover el material sólido que lleva el agua que fluye a través de un canal. Este tipo de estructuras cumplen una función muy importante y por este motivo, salvo casos especiales de aguas muy limpias, se considera como una obra indispensable dentro de los proyectos de uso de recursos hídricos. En la mayoría de obras de toma, la velocidad de entrada es lo suficientemente grande para arrastrar partículas sólidas, esto ocurre especialmente en tiempo de creciente cuando pueden entrar al canal grandes cantidades de sedimentos. Se ha observado que durante las crecientes la cantidad de sólidos en los ríos de montaña pueden llegar a ser del 4.0 – 6.0 % del volumen total y en ríos de llanura del 0.2 – 1.0 % [50]. Algunos de los perjuicios que ocasiona la captación con cierto contenido de arenas son:

1. Una gran parte del material sólido va depositándose en el fondo de los canales disminuyendo su sección, este efecto hace que la sección útil del canal disminuya tanto que incluso el agua se desbordará por los aliviaderos; para evitar que esto suceda es necesario limpiar el canal lo que significa un aumento en los costos de mantenimiento y fastidiosas interrupciones en el funcionamiento del canal [50].
2. La sedimentación de las partículas es intensa debido a la velocidad baja existente en este tipo de estructuras, disminuyendo la capacidad de regulación [50].
3. La arena arrastrada por el agua, al no ser retenida en el desarenador, puede llegar a las turbinas desgastándolas, tanto más rápido cuanto mayor es la velocidad (velocidad de ataque del agua – rodete). Esto significa una disminución del rendimiento de la turbomáquina, y en ocasiones puede llegar a requerirse mantenimientos frecuentes y costosos [50].

Se ha observado que en muchas plantas hidroeléctricas ha sido necesario reparar las turbinas 3 ó 4 veces al año, con una reducción de su rendimiento de entre un 10 – 50 %, en periodos muy cortos; en este sentido, se ha demostrado que la construcción de desarenadores aumenta de 5 a 6 veces el tiempo de duración de las turbinas. Los desarenadores pueden tener muchos diseños diferentes; según la forma de eliminación de sedimentos se dividen en dos tipos [50]:

- desarenadores de lavado continuo
- desarenadores de lavado intermitente

Los primeros como su nombre lo indica, permiten que el material depositado se elimine en forma continua (ver *Figura 1.6*); mientras que los segundos son aquellos que se lavan

periódicamente, con un intervalo de tiempo de dos lavados (mínimo), determinado por la cantidad de sedimentos que trae el agua [50] (ver *Figura 1.7*).

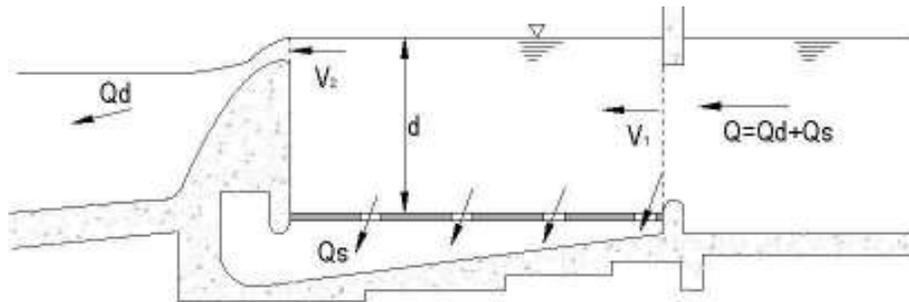


Figura 1.6. Desarenador de lavado continuo.

(Fuente: Propia)

1.2.6. Tanque de presión

El tanque de carga o tanque de presión es una estructura hidráulica que se construye entre el final del canal o túnel de conducción y el inicio de la tubería de presión. Esta estructura hidráulica cumple con las siguientes funciones [50]:

1. Crear un volumen de reserva, mismo que permite satisfacer las necesidades de las turbinas durante los aumentos bruscos de la demanda.
2. Impedir la entrada en la tubería de presión de materiales sólidos de arrastre y flotantes (hielo y basuras).
3. Producir la sedimentación y eliminación de materiales sólidos (arenas, por ejemplo) que vienen por el canal.
4. Desalojar el exceso de agua, durante los intervalos de tiempo, en los que la cantidad de agua que requieren las turbinas es menor al caudal de diseño.
5. Evitar la entrada de aire a la tubería, manteniendo una altura de agua suficiente sobre la misma.
6. Proporcionar la conexión entre el sistema de conducción y la tubería de presión.

Elementos constitutivos

Como se puede observar en la *Figura 1.8* los elementos que conforman el Tanque de Presión son:

- Canal de conducción
- Transición
- Cámara de sedimentación (reservorio)
- Vertedero de excesos
- Canal de desfogue

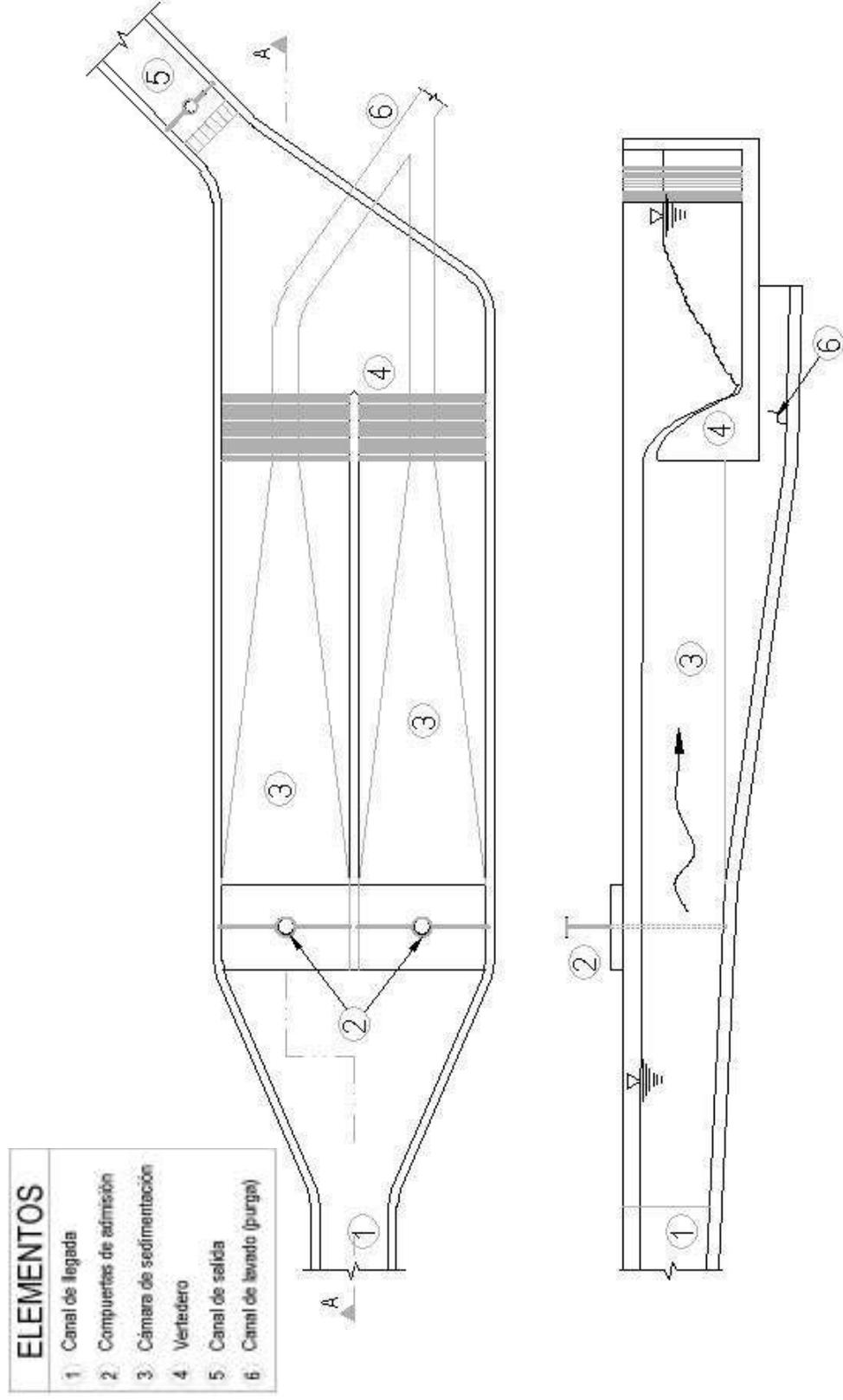


Figura 1.7. Desarenador de lavado intermitente.
(Fuente: Propia)

- Compuerta de lavado
- Tubería de limpieza
- Tubería de presión

En otras palabras, un tanque de presión funciona con un reservorio de capacidad suficiente (factor de seguridad), conectado al canal por medio de una transición y del cual el agua pasa a la tubería a través de una rejilla fina, entre esta última y la tubería se instalan compuertas que en caso de emergencia permiten cerrar la admisión de agua. Dichas compuertas son generalmente del tipo deslizante (ocupan menos espacio); izadas mediante motores eléctricos, a fin de cerrar con ligereza en caso de ser necesario. Antes de la rejilla en pilas, muros o paredes se dejan ranuras que permiten la instalación de compuertas de agujas para el caso de mantenimiento y/o reparaciones [50].

En una de las paredes del tanque se colocará una compuerta de fondo que permita vaciarlo (lavar) de los sedimentos que pueden haberse depositado en el fondo. En la misma pared existirá un vertedero o un sifón a través del cual pueda rebosar el agua. El vertedero y la compuerta se conectan a un canal común, con frecuencia a una rápida, que lleva el agua al río o a una quebrada donde la erosión, o no se produzca o no pueda causar daño. La tubería de presión se une al tanque de carga (presión) por medio de un anclaje [50].

1.2.7. Tubería de presión

Los conductos de presión son tuberías de diámetro considerable, frecuentemente pueden ser de acero, de hormigón e incluso de PVC (estos últimos para presiones bajas); que sirven para llevar el agua desde la fuente (reservorio, cámara de presión o tanque de carga) hacia la Casa de Máquinas. Usualmente se diseñan las tuberías de alta presión para resistir los esfuerzos desarrollados a causa de las presiones estáticas ó de golpe de ariete creadas por cambios bruscos en la demanda energética (por ejemplo, cierre de válvulas y apertura en concordancia al rechazo o demanda de energía). La provisión de una línea de alta presión es antieconómica si la longitud de esta es considerablemente grande, en este caso se puede dividir a dicha tubería en dos partes: una transmisión a baja presión de longitud considerable (túnel), seguida por un tramo corto de tubería de carga (alta presión) que llega a las turbinas, separadas por una cámara de carga (chimenea de

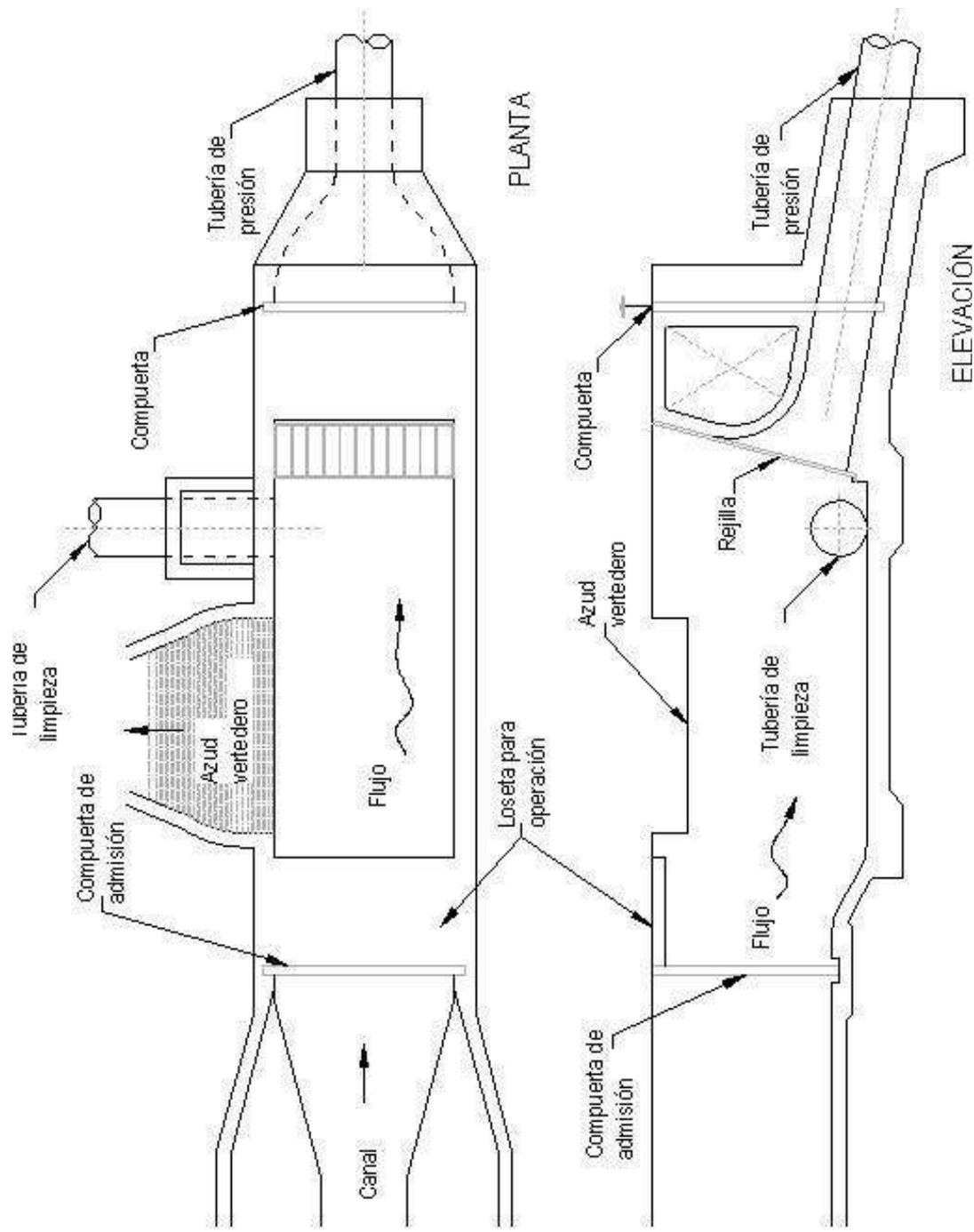


Figura 1.8. Desarenador de lavado intermitente.

(Fuente: Propia)

equilibrio) que absorbe los incrementos de presión producto del golpe de ariete y los convierte en oscilaciones de masa.

1.2.8. Casa de máquinas

Es el sitio, lugar o emplazamiento donde se alojará el equipamiento de la minicentral: turbinas, generadores, alternadores, cuadros eléctricos, cuadros de control, etcétera.

La ubicación del edificio debe analizarse con mucha rigurosidad, considerando para el efecto la topografía, geología y geotecnia, así como también la accesibilidad al mismo; generalmente, se encuentra separado aguas abajo del azud o presa con el objetivo de aumentar la altura del salto. El edificio contará con las conducciones necesarias para que el agua llegue hasta la turbina con las menores pérdidas de carga posibles.

La Casa de Máquinas se compone de una sala de máquinas y de un número de locales secundarios, como: talleres, oficinas, depósitos, guardarropas, lavabos y baños, que se ubican según su destino alrededor de la sala de máquinas donde van las turbinas y generadores. El tipo de turbinas influye notablemente en el diseño de la casa de máquinas, por eso es necesario estudiarlas convenientemente de modo que el proyecto tenga bien definido lo relativo a la instalación, organización y espacio necesario para su ubicación.

Las dimensiones de la casa de máquinas se encuentran en función directa de las medidas de la maquinaria y sus fundaciones serán indicadas generalmente por los fabricantes de ésta. Cuando se instalen varios grupos de generación (Turbina – Generador) se debe dejar espacio suficiente entre estos a fin de no dificultar el trabajo de revisiones y reparaciones (distancia recomendable de 1.50 a 2.0 m), además de disponer suficiente espacio para el montaje. Para las centrales hidroeléctricas pequeñas, conviene aplicar métodos de construcción económica, empleando materiales de construcción dependiendo de la disponibilidad en la región donde se encuentra ubicada [47].

1.2.9. Canal de descarga

El canal de descarga devuelve al río las aguas turbinadas que salen de la central. Cuando se dispone de más de una turbina sus descargas confluirán hacia este canal; salvo cuando exista muy poca distancia al río, escenario en el que cada unidad (turbina) desembocará directamente al río. Con el objetivo de evitar la erosión de las

desembocaduras, estas deben construirse con revestimientos adecuados y generalmente se requerirán de obras de defensa en la orilla del río, según las condiciones locales. En otras palabras, este canal recoge el agua de la salida de la turbina para devolverla nuevamente al río, en el punto más conveniente [47].

1.3. Bombas usadas como turbinas

Una bomba centrífuga es una máquina rotatoria en la cual el flujo y la presión son dinámicamente generadas. La entrada no se encuentra separada o dividida de la salida como es el caso de las bombas de desplazamiento positivo, sea la configuración de estas recíprocante o rotatoria. Dicho de otra manera, una bomba centrífuga entrega energía útil al fluido o bombea en gran medida a través de cambios de velocidad que ocurren haciendo que el fluido fluya a través del rodete y de los pasajes fijos de la bomba. Todas las bombas de rodete (impulsor) son rotodinámicas, incluidas aquellas con rodetes de flujo radial, mixto y axial: el término "bomba centrífuga" tiende a abarcar todas las bombas rotodinámicas [6].

Las bombas centrífugas son las turbomáquinas más comúnmente utilizadas. Sus principales componentes son: entrada (eye - inflow), álabe (blade), rodete (impeller), eje (hub - superficie curva de revolución del rodete), carcasa (casing, housing or volute) y descarga (discharge) [7] (ver *Figura 1.9*).

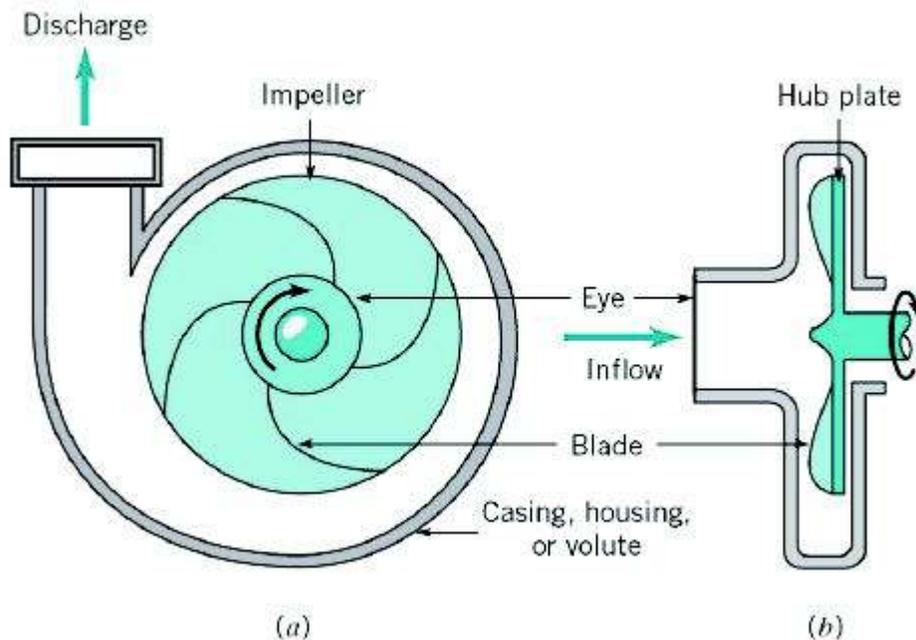


Figura 1.9. Bomba centrífuga.
(Fuente: Shieh J., 2007)

El flujo en cualquier turbomaquinaria es siempre tri-dimensional e inestable. Una mejor comprensión del flujo dentro de las turbomáquinas es esencial para mejorar los resultados; el entendimiento de los complejos patrones de flujo dentro de las turbomáquinas es posible a través del análisis computacional. La interacción entre el rodete y la carcasa (voluta) en las bombas puede ser correctamente predicho a través del uso de métodos numéricos [3].

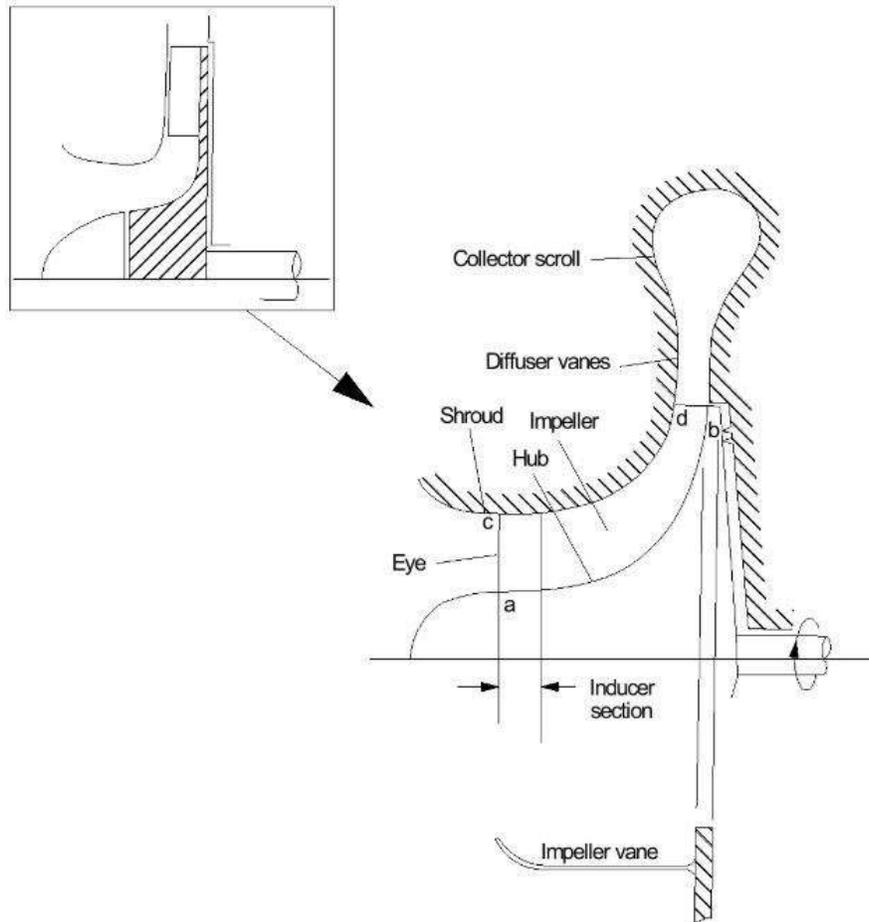


Figura 1.10. Vista axial del rodete con sus componentes principales.
(Fuente: Dixon S.L., 1998)

Se han obtenido considerables mejoras en la predicción del comportamiento de las PAT a través de la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD). Los resultados que se han obtenido en CFD permiten una mejor comprensión de la física del fluido, aunque no se puede utilizar como herramienta de diseño directamente, debido a que el CFD no proporciona elementos de optimización. En otras palabras, el diseñador debe realizar ensayo prueba - error con el objetivo de mejorar el rendimiento mecánico e hidráulico de la PAT. Este enfoque, dependiente del empirismo, enfoca el espacio de diseño, motivo por el cual el diseñador debe generar modelos paramétricos que incluyan variables que afecten al rendimiento de la PAT.

Adicional a lo anterior (criterios de diseño hidráulico), se deben considerar también conceptos de diseño tanto estructural, como de fabricación. La gran mayoría del tiempo, se emplean cuantiosos recursos económicos para investigaciones experimentales, cuyo objetivo es validar el diseño final y evaluar principalmente fenómenos de difícil predicción como por ejemplo la cavitación y erosión.

El diseño del rodete de la PAT tiene mucha influencia en la predicción de la eficiencia o rendimiento que tiene la turbomáquina. En la Figura 1.10 se muestra una vista axial de los principales componentes del rodete. La geometría de la cubierta inferior del álabe se denomina cubo (hub), mientras que la parte superior del álabe se conoce como anillo (ring o shroud).

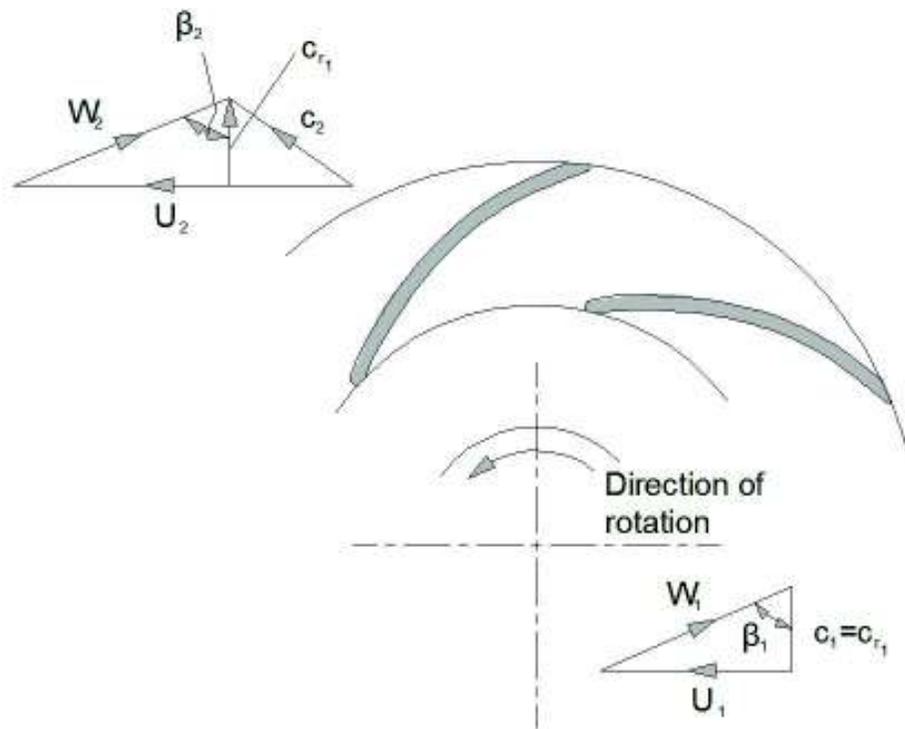


Figura 1.11. Triángulos de velocidades en la entrada y salida del álabe.
(Fuente: Dixon S.L., 1998)

En la Figura 1.11 se presenta los triángulos de velocidades tomando en cuenta que son establecidos para las condiciones de mayor eficiencia (BEP). Donde, W es la velocidad relativa del flujo respecto al álabe, U es la velocidad periférica o tangencial del rotor, C es la velocidad absoluta del fluido, C_m es la componente meridional de la velocidad absoluta, C_u es la componente tangencial de la velocidad absoluta y β es el ángulo de distribución de la forma del álabe. El subíndice "1" se refiere a la entrada del rodete, mientras que el subíndice "2" a la salida del rodete.

1.4. Diseño paramétrico de PAT

En función de las suposiciones que se empleen para relacionar las variables de diseño, se pueden tener modelos de baja o media fidelidad. Los modelos de baja fidelidad llevan a cabo la mayor parte de las iteraciones del diseño de manera manual, del otro lado con solucionadores de alta fidelidad se evalúan directamente los modelos prometedores para verificar las características de diseño y evaluar su desempeño final. Se pueden emplear diversos métodos de parametrización, usando los parámetros geométricos de la PAT a fin de mejorar el rendimiento hidráulico.

Ragoth y Nataraj [8] emplean el método de la superficie de respuesta (RSM, por sus siglas en inglés: *Response Surface Method*) para ejecutar las simulaciones numéricas analizando los efectos del diámetro de entrada al rodete, el ángulo de salida del álabe y el ancho de álabe a la salida. Con el objetivo de verificar las diferentes configuraciones, se emplearon varios modelos empleando la herramienta CFD en ANSYS – Fluent.

Bacharoudis, Filios, Mentzos y Margaris [9] utilizan el método de diseño Pfliegerer para determinar la geometría de los álabes que conforman el rodete. Varios parámetros que afectan al rendimiento de la bomba y al consumo de energía, entre los que se pueden citar: el diámetro de salida del rodete, el ángulo y el número de álabes. El análisis computacional de fluidos se llevó a cabo con el software comercial Fluent, ampliamente usada en el campo de la turbomaquinaria. El estudio se centra en variar el ángulo de salida del álabe.

1.4.1. Eficiencia del álabe de una turbina

En base a la primera forma de la ecuación de Euler para turbinas hidráulicas, se obtiene la ecuación (1.1), donde e , es la transferencia de energía del rodete al rotor por unidad de masa de fluido [10].

$$e = U_1 \cdot C_{u1} - U_2 \cdot C_{u2} \left[\frac{m^2}{s^2} \right] \quad (1.1)$$

Los álabes de una turbina de acción están configurados de manera que la componente tangencial de la velocidad absoluta a la salida sea cero $C_{u2} = 0$, esto permite llegar a tener una energía cinética mínima a la salida, este efecto se produce en el punto de mejor eficiencia (BEP). En este sentido, la velocidad absoluta del fluido es igual a la velocidad meridional a la salida $C_2 = C_{m2}$. La eficiencia del álabe, η_b , sin considerar las pérdidas por rozamiento operando en el BEP es:

$$\eta_b = \frac{e}{e + \frac{C_{m2}^2}{2}} \quad [-] \quad (1.2)$$

1.4.2. Grado de reacción

El grado de reacción, σ , es un factor adimensional que está definido como la relación entre la cantidad de energía transferida tomada como cambio en la presión del flujo, y la energía total transferida [10]. La ecuación (1.3) permite encontrar el grado de reacción para máquinas hidráulicas trabajando en el BEP.

$$\sigma = e - \frac{1}{2} \frac{(C_1^2 - C_{m2}^2)}{e} \quad [-] \quad (1.3)$$

Se debe considerar que el grado de reacción de una turbina de acción es igual a cero, debido a que la transformación de la energía cinética en presión es completa en el distribuidor, en otras palabras, la velocidad de salida de agua por la tobera es la correspondiente a la altura del salto o diferencia de nivel. El grado de reacción para una turbina de reacción se encuentra comprendido entre cero y uno. Para la turbina Francis pura la velocidad específica es baja y un grado de reacción relativamente bajo.

1.4.3. Número de velocidad

El número de velocidad “speed number”, Ω , para las turbinas Francis se encuentran en el intervalo de 0.20 a 0.80. Para turbinas con un bajo número de velocidad, los álabes del rodete suelen ser relativamente largos, lo que implica un aumento de las pérdidas por fricción. Para números de 0.05 a 0.15 se prefieren generalmente usar turbinas Pelton por cuestiones de pérdidas de fricción al utilizar una turbina Francis [11]. Cuando el objetivo es reducir la erosión por sedimentos, los álabes más largos tienen una ventaja porque reducen la velocidad máxima del flujo. El número de velocidad se encuentra con la ecuación (1.4) expresada en función de los parámetros de diseño propios de cada proyecto hidroeléctrico.

$$\Omega = \frac{N \cdot \pi \sqrt{Q}}{30 \cdot (2 \cdot g \cdot H)^{3/4}} \quad [-] \quad (1.4)$$

Donde N es la velocidad sincrónica, Q es el caudal en el punto de BEP, H la caída neta y g la aceleración gravitacional.

1.4.4. Sumersión

La cavitación es el fenómeno de formación de vapor que se produce cuando un líquido fluye por regiones donde, a causa de las altas velocidades de flujo, la presión estática absoluta es menor que la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido. Si las burbujas alcanzan posteriormente zonas de mayor presión que la presión de vapor, entonces se condensan violentamente, originando serios problemas hidráulicos y mecánicos en los aparatos y máquinas donde ocurre este fenómeno [12].

La cavitación puede evitarse, en el caso de turbinas de reacción, si se cumple con la ecuación (1.5).

$$H_s \leq H_{at} - 0.5 - H_v - NPSH \quad [-] \quad (1.5)$$

donde:

H_s = altura de sumersión mínima [m] (distancia entre el punto más alto del borde de salida del álabe y el nivel de agua del canal de desagüe).

H_{at} = altura correspondiente a la presión atmosférica [m].

0.5 = altura de seguridad para aguas con presencia de sedimentos [m].

H_v = altura de presión de vapor de agua a temperatura ambiente [m].

$NPSH$ = altura neta positiva de succión [m].

El valor de NPSH se obtiene a través de la ecuación (1.6) [11]:

$$NPSH = a \frac{C_{m2}^2}{2 \cdot g} + b \frac{U_2^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (1.6)$$

los valores de los coeficientes a y b son obtenidos mediante una relación empírica de Brekke, que depende del número de velocidad del rodete.

$$\Omega < 0.55 \quad a = 1.12 \quad y \quad b = 0.055$$

$$\Omega > 0.55 \quad a = 1.12 \quad y \quad b = 0.1 \cdot \Omega$$

1.4.5. Erosión

El agua que va a ser utilizada en las centrales hidráulicas casi siempre arrastra sólidos en suspensión; pudiendo ser estos: ramas, arbustos, piedras gruesas, ripio, arena gruesa y fina, etcétera. Como ya se mencionó anteriormente es necesario separar la mayor cantidad de estos sólidos antes de que lleguen (principalmente) a la(s) turbina(s). Esta separación puede hacerse ya sea de manera natural, como de forma artificial; la primera se realiza cuando existe un embalse de acumulación o regulación. El material más grueso suele separarse utilizando rejillas y dispositivos similares; mientras que los más finos en pozos de decantación o desarenadores. Sin embargo, es posible que las partículas muy finas logren llegar a las turbinas, ocasionando serios problemas de

desgaste de sus elementos por el efecto abrasivo. La magnitud de daño en las superficies depende (aunque no exclusivamente) de la proporción de partículas sólidas en suspensión sino también del tamaño de ellas, de su perfil, de su diferenciación geológica y también del tipo de turbina. Debe aclararse que la erosión denota desgaste por acción mecánica y diferenciarse de la corrosión que denota efecto químico. A menudo el desgaste de las turbinas puede producirse por acción combinada de erosión y corrosión, caracterizándose la superficie desgastada por su aspecto ondulado y opaco.

Dado el efecto destructivo por efecto de la erosión, es fundamental el tener datos referentes a la calidad del agua, para la selección del material más conveniente para la construcción del rodete y para su reparación durante los períodos de mantenimiento. El comportamiento de un material respecto a su resistencia a la erosión se obtiene mediante ensayos de diferentes materiales, los resultados se expresan, como en el caso de la cavitación, en términos de peso del material destruido en gramos con respecto al tiempo. Algunos factores influyen el desarrollo de los procesos de abrasión de una máquina hidráulica. Estos factores incluyen: velocidad media de las partículas, masa de la partícula, concentración de partículas abrasivas en el flujo líquido (por ejemplo: número de partículas por unidad de volumen líquido), distribución del tamaño de las partículas o del grano de tamaño promedio, ángulo de ataque con que las partículas chocan contra la superficie, duración del efecto provocado por las partículas (de un tamaño y concentración dadas) en la superficie.

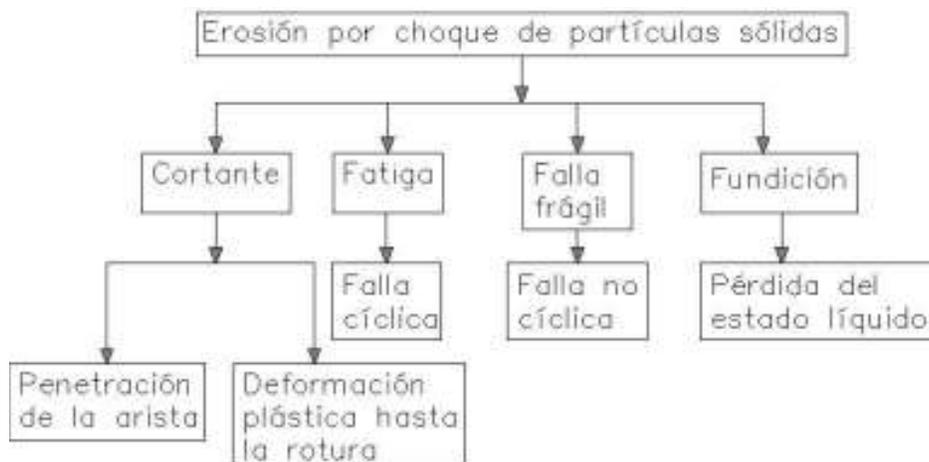


Figura 1.12. Mecanismos de erosión por partículas sólidas.
(Fuente: Agarwal T., 2013)

a) *Erosión sedimentaria en bombas*

También conocida como erosión abrasiva; si se lo compara con la erosión por cavitación, esta es de una naturaleza más general, desde la presencia de

partículas sólidas en sedimentos, estas se encuentran suspendidas y son trasladadas en el agua. Estas partículas contribuyen a la falla de prácticamente toda la superficie en contacto con el flujo de agua; en otras palabras, de los componentes de la bomba sujetos a la erosión abrasiva. Sin embargo, el componente que es decisivamente determinante en el tiempo de duración entre reparaciones (debido a erosión sedimentaria) es el rodete, puesto que la descarga y la carcasa en una bomba son mucho más grandes en tamaño y masa.

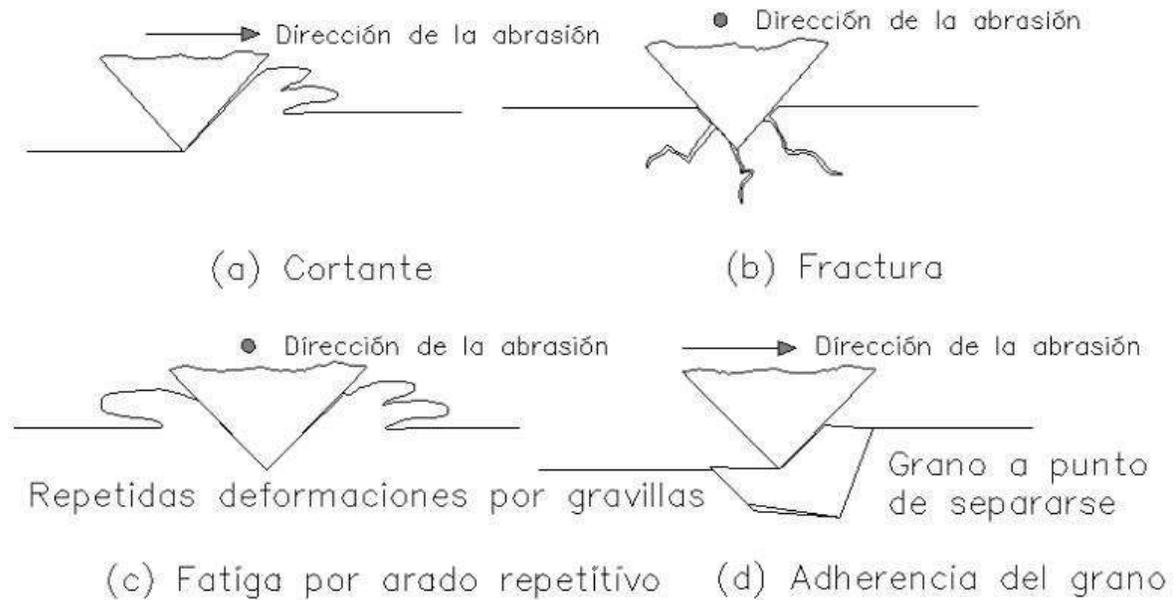


Figura 1.13. Mecanismos de desgaste abrasivo.
(Fuente: Agarwal T., 2013)

b) Mecanismos de erosión en hidromáquinaria

La erosión sedimentaria es el resultado del desgaste mecánico de los componentes. Esto debido a la acción dinámica de los sedimentos fluyendo a través del agua que impactan contra una superficie sólida. Por lo tanto, los sedimentos que fluyen con el agua (pasan a través de la turbomáquina), son la causa de la erosión sedimentaria en los componentes hidráulicos. El desgaste mecánico en la maquinaria hidráulica, se produce principalmente por los sedimentos en suspensión del agua, que están sujetos a la energía cinética, gravedad, viscosidad, turbulencia y cavitación. Aunque la abrasión secundaria puede tomar lugar en ciertas componentes de las hidro - máquinas, la erosión es la principal causa de los daños. De manera general, la erosión puede ser clasificada en: erosión por partículas sólidas y erosión líquida rápida. Aunque la erosión ha surgido como un tipo distinto de mecanismo de desgaste, esta es sin embargo mal entendida como un tipo de desgaste por abrasión. La erosión ocurre

en un amplio rango de máquinas dentro de la generación eléctrica, aviación, procesos e industria minera.

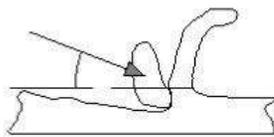
c) *Mecanismos de erosión de partículas sólidas*

Las acciones mecánica, química y térmica son la causa u origen de la separación de material como escombros productos de la erosión, para que esto se produzca las acciones son diferentes; cortante, fatiga, falla frágil y fundición son cuatro mecanismos básicos para la erosión de partículas sólidas. Las acciones cortantes pueden también ser divididas en: cortante por penetración de la arista o deformación plástica hasta la rotura.

d) *Mecanismos de desgaste abrasivo*

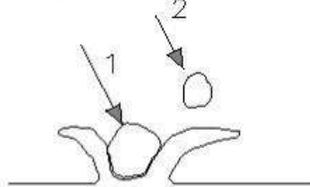
Desgaste abrasivo es la pérdida de material por el paso de partículas duras sobre la superficie. Este desgaste ocurre cuando un objeto sólido está cargado junto con partículas de material que tienen igual o mayor dureza que los componentes de la turbomáquina. El desgaste abrasivo envuelve procesos como micro cortante, fatiga, separación granular y falla frágil. El desgaste erosivo es causado por el impacto de partículas sólidas y líquidas sobre una superficie.

Bajo ángulo de impacto



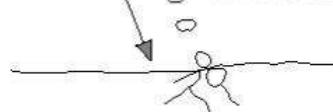
(a) Mecanismo de erosión por cortante

Formación de escamas



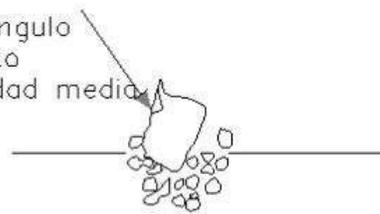
(c) Deformación plástica

Alto ángulo de impacto
Velocidad baja



(b) Mecanismo de erosión por fatiga

Alto ángulo
impacto
Velocidad media



(d) Erosión por falla frágil

Figura 1.14. Mecanismos de desgaste erosivo.

(Fuente: Agarwal T., 2013)

e) *Mecanismos de desgaste erosivo*

Desgaste erosivo envuelve varios mecanismos de desgaste, que son ampliamente relacionados con el material granular, así tenemos: ángulo de choque, velocidad de impacto y tamaño del grano. Si la partícula es dura y sólida es posible que un proceso similar al desgaste abrasivo ocurra.

f) Factores que influyen en la erosión

Existen diversos factores, con varios tipos o mecanismos de erosión; mismos que afectan en diferente porcentaje la erosión. A continuación se muestran la forman en como generalmente se los agrupa:

1. Condiciones de operación – velocidad, aceleración, ángulo de choque, tasa de flujo o concentración, flujo promedio, temperatura.
2. Partículas erosivas (arena) – tamaño, forma, dureza, material
3. Substratos (materiales) – química, propiedades elásticas, dureza, morfología de superficie

g) Métodos de diseño para disminuir la erosión

En varias aplicaciones las superficies son atacadas por partículas sólidas dentro del flujo de un fluido, este tipo de comportamiento se conoce como erosión. La erosión en turbinas es un fenómeno complejo que produce disminución de la eficiencia, vibraciones y deterioro prematuro de las componentes de la turbina.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha elaborado una guía para tratar la erosión en las máquinas hidráulicas [13]. En la guía se presentan teorías de erosión, modelos teóricos, recomendaciones a los modos de operación de las turbinas, sugerencias al diseño con el fin de disminuir el desgaste, selección del material, recubrimientos y rutinas de inspección y mantenimiento. En la literatura se ha encontrado que la erosión depende de varios factores [14],[15] pero el factor que más influye en la erosión es la velocidad relativa de la partícula en el momento de la colisión con la superficie, definida en la ecuación (1.7) [16]:

$$Erosión \propto (Velocidad)^k \quad (1.7)$$

El valor del exponente k depende de las condiciones del flujo y las propiedades del material de la superficie en contacto, es decir el comportamiento en materiales frágiles es muy diferente al caso de materiales dúctiles, en este último se utiliza un valor cercano a tres [17].

La Tabla 1.1 muestra un listado de modificaciones encontradas en la literatura que se pueden realizar a la turbina Francis para disminuir el desgaste por erosión [18].

Tabla 1.1. Recomendaciones para disminuir el desgaste por erosión en una turbina Francis.

Parámetros para el diseño hidráulico	Propuesta de diseño
Velocidad periférica	Reducir la velocidad periférica del rotor respecto al fluido
Aceleración del fluido	Disminuir el rango del cambio de velocidad a lo largo del rodete
Condiciones de entrada	Minimizar el ángulo de incidencia
Forma del álabe del rodete	Reducir la curvatura del álabe en la salida
Longitud del álabe del rodete	Un álabe alargado disminuye la velocidad máxima
Números de álabes del rodete	Reducir el número de álabes
Espesor del álabe del rodete	Álabes más gruesos en el borde de salida
Velocidad específica	Una baja velocidad específica reduce la velocidad de flujo
Sumersión	Aumentar el nivel de sumergimiento
Revestimiento	Proteger la superficie del material
Álabes divisorios en el rodete (splitter blades)	Mejora la distribución de presión
Metodología de fabricación	Es más fácil de aplicar el recubrimiento en un rodete atornillado

(Fuente: Wise T., 2009)

1.5. Técnicas de optimización multiobjetivo empleado en álabes de PAT

El término optimizar se refiere a la búsqueda eficiente de realizar una actividad, o un proceso mediante el cual las cosas se hacen mejor; en otras palabras, es maximizar o minimizar una determinada expresión. La vida se encuentra llena de problemas de optimización que todos nosotros debemos resolver, muchos de ellos cada día en nuestras vidas: ¿qué ruta es más corta hacia la escuela?, ¿qué pan es mejor comprar con el menor precio y que provea la energía requerida?, la optimización es un delicado proceso de afinación de entrada de datos, función o mecanismo para encontrar resultados máximos o mínimos. Los datos de entrada son variables, el proceso o función es conocido como función objetivo, el valor de ajuste (es una función, por ejemplo: el costo) y los resultados son variables de ajuste [21].

De manera general la minimización del costo es el objetivo fundamental de los problemas de optimización; sin embargo, en las funciones en las que el costo máximo es requerido,

es necesario cambiar de signo a la función objetivo, para que la respuesta sea maximizada [21].

Cuando el problema envuelve una función objetivo, esta se conoce como optimización de objetivo – único, sin embargo, en los problemas generales más reales, dos o más funciones objetivo requieren ser optimizadas, y por lo tanto estos problemas con conocidos como optimización multi – objetivo. Los métodos de optimización se clasifican dentro de dos categorías así:

- Métodos clásicos
- Métodos evolutivos

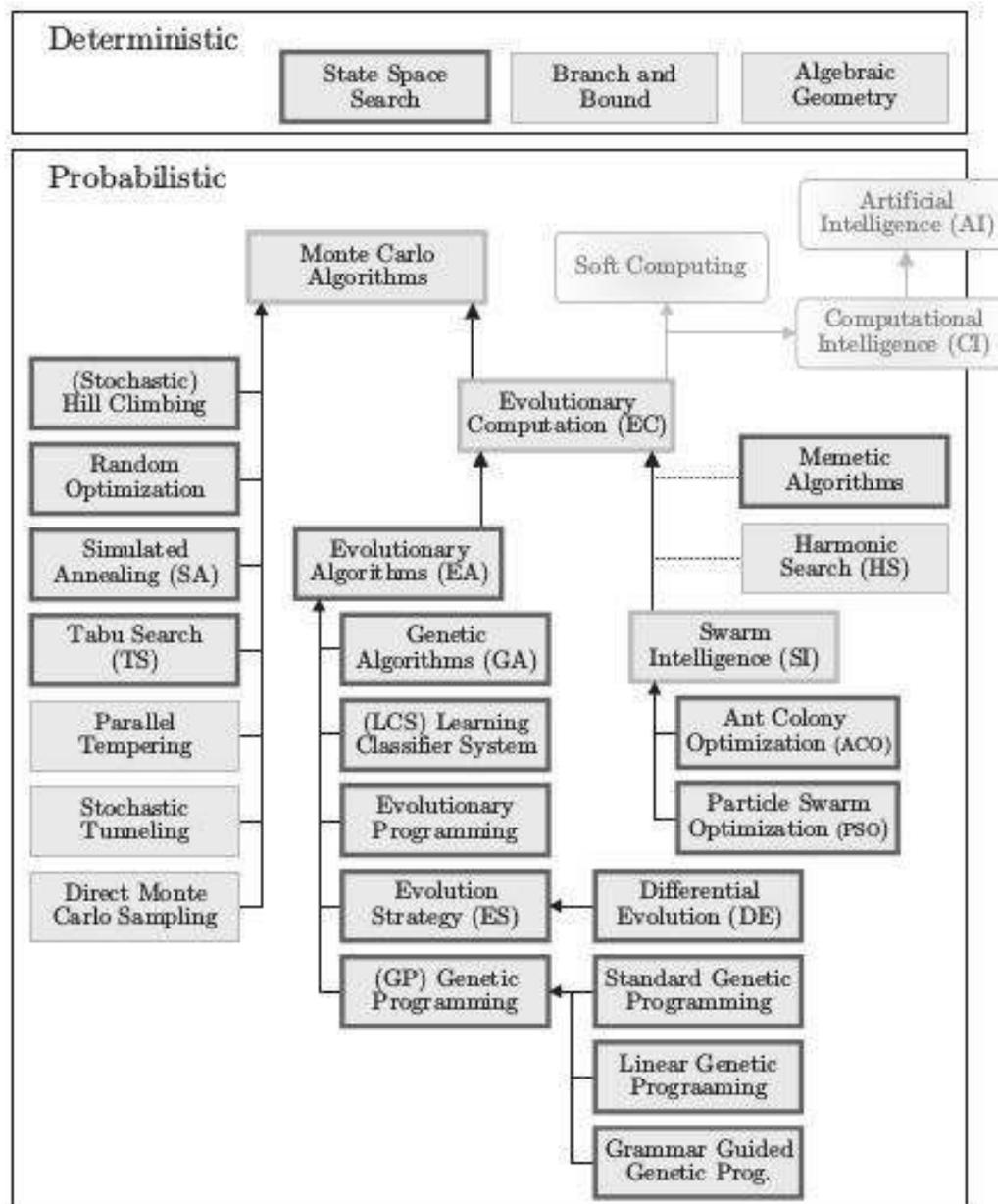


Figura 1.15. Taxonomía de los algoritmos globales de optimización.
(Fuente: Wise T., 2009)

Los *métodos clásicos* comúnmente usan una solución simple aleatoria, cada iteración es actualizada por un procedimiento determinístico que encuentra la solución óptima. Estos métodos a su vez son clasificados en dos grupos diferentes: *métodos directos* donde únicamente la función objetivo y los valores de restricción son usados para encontrar el óptimo y los *métodos basados en gradientes* consideran que la primera y segunda derivada de la función objetivo y/o las restricciones son aplicadas para buscar una tendencia y la solución óptima [21].

- **Optimización de objetivo – único**

(No se trata en el presente documento)

- **Optimización multi – objetivo**

En las aplicaciones del mundo real, la gran mayoría de los problemas de optimización involucran más de un objetivo. En el caso de que una solución excepcional, no satisfaga a las funciones objetivo, dicha solución óptima de un objetivo no será necesariamente la mejor solución para el resto de objetivos. Por lo tanto, soluciones diferentes producirán un intercambio entre diferentes objetivos y un grupo de soluciones son requeridas para representar las soluciones óptimas de todos los objetivos [21]. Las curvas de intercambio revelan que al considerar la solución óptima excepcional de un objetivo (precio o costo, por ejemplo), este se encuentra en relación directa con otros objetivos (así: área de la vivienda). Sin embargo, existen allí un sin número de soluciones compensatorias entre los dos extremos óptimos, cada una de las cuales es mejor respecto a un objetivo.

Las técnicas de optimización permiten localizar un conjunto de parámetros de diseño ofreciendo el mejor resultado posible. El diseño multidisciplinario se encuentra asociado entonces, con una solución eficiente en donde por supuesto se incluyen los costos; en otras palabras, el diseño busca satisfacer simultáneamente múltiples objetivos, quizás algunos de ellos conflictivos; en un área de toma de decisiones de criterios múltiples, que se ocupan de problemas de optimización matemática, es decir optimizar simultáneamente a más de una función objetivo [19]. La gran mayoría de autores definen a la optimización como el proceso matemático a través del cual se establecen las condiciones (satisfaciendo las restricciones) que producen los valores máximos o mínimos de una función específica [20]. Estas técnicas de optimización se pueden clasificar en varias categorías de acuerdo con el tipo de problema y sus especificaciones, como: continuo y discreto, global y local, lineal y no lineal, de un solo objetivo y multiobjetivo. Se conocen dos grupos de algoritmos de optimización: gradiente y no gradiente, los cuales se diferencian por sus procesos de optimización, información requerida, robustez, costos y calidad de solución. Los objetivos en la mayoría de los problemas de ingeniería son

frecuentemente conflictivos, así por ejemplo: maximizar rendimiento, minimizar costos, maximizar fiabilidad, etcétera [21]. Los problemas de turbomaquinaria se enfocan en encontrar perfiles con geometrías óptimas, que maximicen la eficiencia, disminuyan el efecto de erosión, etcétera.

Una solución es Pareto – óptima si no está dominada por ninguna otra solución en el espacio de las variables de decisión. La Pareto – óptima es la mejor solución conocida (óptima) con respecto a todos los objetivos y no puede ser mejorada en ningún objetivo sin empeorar a otro. Los valores de la función objetivo descritos para cada solución Pareto – óptima establecidos en el espacio objetivo se conocen como frente de Pareto [21]. Para el caso de la optimización multiobjetivo se da lugar a un conjunto de soluciones, conocido como frente de Pareto o conjunto de puntos del espacio de búsqueda. Las soluciones son escogidas después de emplear criterios de toma de decisiones adicionales, (como ya se mencionó en párrafos anteriores) tal que mejore un objetivo sin empeorar al menos uno de los otros. Los objetivos tienen un cierto grado de conflictividad, es decir, no existe una solución x tal que todos los objetivos sean minimizados o maximizados simultáneamente. En problemas de optimización multiobjetivo, la calidad de la solución es determinada mediante el concepto de *dominancia*. De manera general la formulación de problemas multiobjetivo puede formularse como se muestra en la ecuación (1.8) [19].

$$\begin{aligned}
 \text{mín } J(x, p) & \quad \text{donde } J = [J_1(x) \dots J_2(x)]^T \\
 \text{s. t. } g(x, p) & \leq 0 \quad x = [x_1 \dots x_i \dots x_n]^T \\
 h(x, p) & = 0 \quad g = [g_1(x) \dots g_{m_1}(x)]^T \\
 x_{i, LB} & \leq x_i \leq x_{i, UB} \quad (i = 1, \dots, n) \quad h = [h_1(x) \dots h_{m_2}(x)]^T \\
 x & \in S
 \end{aligned} \tag{ 1.8 }$$

donde:

- J = vector columna de z objetivos
- x = vector de n variables de diseño
- p = vector de n parámetros fijos
- x_{UB} = límite superior
- x_{LB} = límite inferior
- S = dominio factible
- g = vector de restricciones de desigualdad
- h = vector de restricciones de igualdad

De manera general, los algoritmos de optimización pueden ser divididos en dos grupos básicos: algoritmos determinísticos y probabilísticos. Los primeros son comúnmente usados si existe una clara relación entre las características de las posibles soluciones y su utilidad para un problema existente dado. Luego, el espacio de búsqueda puede ser eficientemente explorado usando por ejemplo un esquema *divide y conquista* (divide and conquer). Las familias relevantes de los algoritmos probabilísticos son aquellas que están basadas en aproximaciones Monte Carlo. Estas tratan de garantizar una correcta solución en un corto tiempo de ejecución [22]. En la Figura 1.12 se bosqueja de manera general taxonomía con los métodos globales de optimización.

Uno de los métodos de búsqueda directa es la denominada *Malla Adaptativa de Búsqueda Directa MADS* desarrollada por Audet y Dennis. Cada iteración del método está compuesta de dos procesos: búsqueda y sondeo. El sondeo genera una malla de prueba con puntos en direcciones determinadas cercanas a la mejor solución, evaluando dichos puntos. En la etapa de búsqueda por defecto se emplea un modelo cuadrático de todas las funciones evaluadas, llevándose a cabo una optimización del modelo. El criterio principal de convergencia del algoritmo se cumple en el momento en que el tamaño de la malla es lo suficientemente pequeño. A pesar de esto, el número máximo de evaluaciones, en la práctica, se puede configurar para cesar la optimización en función de la capacidad de cálculo disponible. BIDMADS es un algoritmo desarrollado para resolver problemas de optimización de dos funciones objetivo, dando como resultado una aproximación al frente de Pareto.

Los algoritmos evolutivos EA están basados en la teoría de la evolución de Darwin. Ampliamente utilizados en problemas de ingeniería, por su capacidad y robustez al momento de optimizar uno o multiobjetivos (MOO). Utilizando estos algoritmos es posible obtener el frente de Pareto de una forma mucho más rápida en comparación con otros algoritmos, de manera frecuente se requiere un número considerable de evaluaciones en comparación con algoritmos basados en gradiente, siendo este último su principal desventaja. A diferencia del algoritmo MADS de nueva generación, el uso de algoritmos evolutivos tuvo sus inicios en la década de los 50 (1950); sus autores son Friedberg, Bremermann y Box. Cada autor desarrolló una versión diferente de algoritmos evolutivos: programación evolutiva, estrategias evolutivas y algoritmos genéticos, respectivamente. Los algoritmos genéticos se emplearon para resolver problemas de optimización con restricciones y sin restricciones sobre la base de un proceso de selección natural que imita la evolución biológica. El algoritmo modifica repetidamente una población de

soluciones individuales. En cada paso, el algoritmo genético selecciona a los individuos de la población actual y los utiliza como padres para producir los niños de la próxima generación. En generaciones sucesivas, la población evoluciona hacia una selección óptima.

Shahram Derakh realiza la optimización del rodete de una Francis GAMM en BEP a través de un paquete de optimización numérica que incluye parametrización, CFD, redes neuronales artificiales (ANN) y módulos de algoritmos genéticos (AG). Se obtiene la máxima eficiencia cambiando los parámetros de diseño de la línea de flujo en al menos en 5 secciones de un álabe. La optimización está acoplada al entorno del software comercial FINE/Turbo como solucionador. Las funciones objetivo son la combinación de las presiones y el torque. El procedimiento iterativo comienza con un “proceso de aprendizaje” que se utiliza para construir la red neuronal artificial sobre la base de datos de ejemplos de diseño de turbinas almacenados en la base de datos del software comercial. Después de este proceso, la red neuronal artificial es capaz de predecir el rendimiento aerodinámico de geometrías de álabes bajo condiciones de contorno dadas que no están en la base de datos. El siguiente paso consiste en encontrar un nuevo diseño utilizando un procedimiento de optimización formado por un algoritmo genético, evaluando el rendimiento aerodinámico mediante la red neuronal artificial en lugar de resolver directamente las ecuaciones de Navier Stokes. La nueva geometría proporcionada por la optimización se evalúa en CFD y ésta nueva muestra se añade a la base de datos. Si no se ha alcanzado el rendimiento objetivo, se inicia otra iteración y se repite el mismo proceso hasta obtener el álabe óptimo. Similar metodología utiliza Kueny y Alnaga para mejorar el diseño de un distribuidor de una turbina Francis para obtener una nueva geometría con mejor eficiencia y rendimiento en comparación con el diseño inicial.

Stylisnos Kyriacou utiliza el software EASY para optimizar un impulsor de bomba y un rotor de turbina. Este programa trabaja con algoritmos evolutivos por metamodelos (MAEA) para problemas de optimización multiobjetivo, en la *Figura 1.13* se muestra el diagrama de flujo empleado para la optimización a través de algoritmos genéticos; este algoritmo analiza primeramente los individuos no prometedores durante la evolución y se excluyen para que no ingresen en los cálculos costosos de la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, este método además de ser robusto y rápido proporciona una gran ganancia en términos de costo computacional. Para el inicio del bucle de optimización, EASY genera un conjunto de parámetros geométricos definidos por el usuario (variables

de diseño) para obtener un conjunto de nuevas geometrías (denominadas soluciones candidatas).

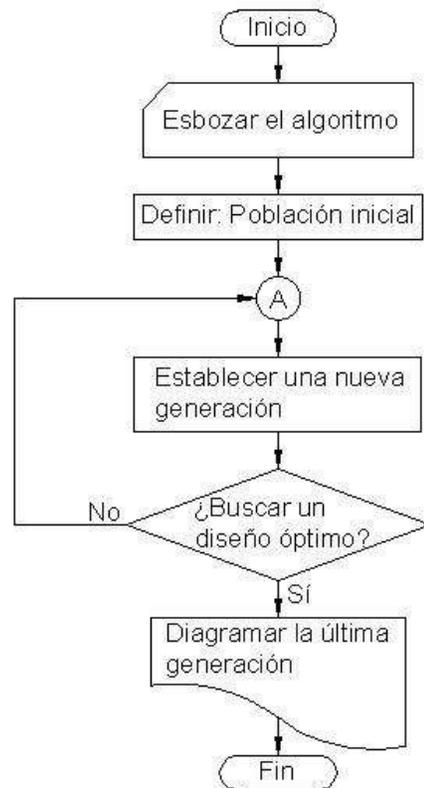


Figura 1.16. Diagrama de flujo de la optimización mediante GA (genetic algorithm).
(Fuente: Propia)

Para cada una de estas geometrías se crea posteriormente una cuadrícula numérica y luego se realiza una simulación en CFD. El post-procesado de los resultados de CFD devuelve los valores de la función o funciones objetivo definida(s) por el usuario, en este caso son la eficiencia hidráulica, la cavitación en donde requiere la maximización de la presión mínima para el buen acoplamiento del tubo de aspiración y la caída hidráulica del rodete que está relacionada con la “calidad” del perfil de las velocidades de salida. Flores y otros realizaron la optimización del rodete de una turbina Francis representado por 24 variables de diseño. Emplearon métodos de optimización local para la carcasa espiral y el perfil del distribuidor hidráulico de una turbina Francis. Por otro lado, para el diseño de los rodetes y el tubo de aspiración, se utiliza optimización global, que implica el diseño de la forma del perfil usando lazos que generan el mallado de forma automática resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes con el modelo SST utilizando algoritmos genéticos.

1.6. Dinámica computacional de fluidos en PAT

Desde hace algunas décadas, el estudio experimental está siendo complementado o sustituido por la dinámica computacional de fluidos (CFD), método que busca cumplir los siguientes objetivos:

- Entender el comportamiento de flujos complejos como: cavitación, erosión, vórtices, flujos inestables, turbulencia, que necesitan de un modelado especial de acuerdo con el fenómeno natural.
- Predecir el rendimiento de la turbina hidráulica en condiciones de operación.
- Evitar investigaciones de experimentación y de campo.
- Disminución de costos y tiempo en las evaluaciones iterativas durante el proceso de optimización.

Williams [23] investiga diferentes formas de métodos predictivos para el uso efectivo de las PAT. Los estudios experimentales fueron dirigidos a más de 30 bombas de diferentes modelos y métodos de succión. El resultado del estudio particular claramente provee que aquel método no puede ser conveniente para la predicción generalizada de las PAT. Yang y otros [24] investigaron el insuficiente entendimiento de la correlación entre el rendimiento de bomba y bomba en modo turbina (PAT) es el mayor problema encontrado al momento de seleccionar una PAT.

Singh y Nestmann [25] desarrollaron un modelo eficiente para estudiar el redondeo de los bordes afilados en los bordes del rodete en una combinación de flujo radial y mixto en bombas funcionando como turbinas usando parámetros experimentales. Una adecuada selección del redondeado del rodete provee una respuesta optimista de la eficiencia total en todas las condiciones de operación.

Derakhshan et al., [26] obtiene una última técnica para pronosticar el BEP (por sus siglas en inglés: *best efficient point*) de una PAT basado en las especificaciones hidráulicas de la bomba. Derakhshan y Nourbakhsh, [27] calcularon el método de “relación de área” para el punto de máxima eficiencia en la investigación teórica. Todas y cada una de las partes de la bomba fueron estimadas por parámetros geométricos y a través de las curvas de rendimiento.

Rodrigues et al., [28] trabajó en la dinámica computacional de fluidos para conocer acerca de las condiciones de flujo y rendimiento hidráulico de la PAT. El estudio numérico

se focalizó en la carcasa de la bomba, en las zonas de entrada y salida, el diámetro del rodete y el tubo de aspiración. CFD provee resultados valiosos cuando se comparan con los resultados experimentales con errores que fluctúan sobre el 10% para diversas condiciones de carga parcial.

Natanasabapathi and Kshirsagar [29] investigaron PAT usando aproximaciones en CFD. Se llegó a la conclusión de las consecuencias imprácticas que pueden ser obtenidas por un mallado amorfo a través de la interfaz entre la estructura estacionaria y rodante. Así, el mallado estructurado cercano a la interfaz es una resolución para minimizar estos errores en los resultados.

Rawal y Kshirsagar [4] llevaron a cabo un análisis numérico en una bomba axial funcionando en modo turbina. Se estableció una semejanza entre los resultados numéricos y experimentales para el punto de mayor eficiencia (BEP). El sistema numérico fue ampliamente sustentado en estudios de diferentes parámetros como pérdidas en el rodete, carcasa, tubo de aspiración y patrón de flujo que no puede ser calculado a través de experimentos.

Derakhshan y Nourbakhsh [27] una bomba centrífuga ($NS=23.50$ [m,m³/s]) fue simulada usando CFD en modo directo e inverso. Para verificar los resultados numéricos, una bomba fue ensayada como turbina en un equipo de pruebas. Las características del punto de mayor eficiencia (BEP) predichas por métodos numéricos no tienen una buena coincidencia con los datos experimentales.

Nautiyal et al., [30] estudia a las aplicaciones de los métodos numéricos y sus restricciones. La investigación muestra que el estudio en CFD fue una herramienta de diseño eficiente para predecir el rendimiento de bombas centrífugas en modo turbina e identificar las pérdidas en los componentes de la turbomaquinaria.

Barrio et al., [31] calcula un análisis numérico en un flujo desigual en una bomba centrífuga comercial trabajando hacia adelante o en dirección inversa con la ayuda de la herramienta CFD. El resultado de la simulación matemática tienen una buena conformidad con resultados experimentales. El estudio claramente explica que en modo inverso, el flujo correspondiente a la geometría del rodete en condiciones normales cuando desarrollan regiones de recirculación de fluido en flujo alta y baja proporción. Fecarotta et al., [32] estudió la más pequeña dificultad del mallado computacional en CFD

desarrolló simulaciones rápidas y consistentes. La investigación describió el estudio en CFD como una herramienta real para un mejor entendimiento de la interacción entre los componentes hidromecánicos y el rendimiento del flujo en compleja computación. Cálculos en CFD fueron llevados a cabo para predecir el rendimiento de la turbina bajo diversas condiciones de flujo, además se obtuvieron las curvas características para los modos bomba y turbina.

Agarwal [33] observó que el análisis computacional de fluidos (CFD) es una eficiente herramienta de diseño para predecir el rendimiento de bombas centrífugas operando en modo turbina. Esto ha provocado que los resultados de investigaciones numéricas y experimentales no puedan ser comparadas exactamente en el caso de las PAT. Es recomendable que la variación pueda ser minimizada a través del desarrollo en análisis computacionales a través del estudio de una malla fina, métodos numéricos y modelos de turbulencia. El análisis mediante CFD permite identificar las pérdidas en los componentes hidráulicos de las máquinas. Varios investigadores emplean en gran medida diversas técnicas de análisis por CFD para estudiar el flujo y evaluar los modelos en las diferentes etapas del diseño. Básicamente, las herramientas de CFD se encuentran en función de los siguientes métodos:

1.6.1. Modelo de flujo no viscoso

Los modelos de flujo no viscoso asumen un fluido ideal que no tiene viscosidad, esta suposición se puede aplicar cuando los efectos no viscosos se pueden despreciar, por ejemplo, al trabajar con un alto número de Reynolds como flujos externos de alta velocidad lo suficientemente alejado de los perfiles de los cuerpos. El número de Reynolds representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido, un número elevado de Reynolds indica una difusión del fluido insignificante. Además, la suposición de flujo no viscoso es válida cuando las escalas de tiempo para la difusión son mucho más grandes en comparación con las escalas del tiempo de convección. Las ecuaciones que gobiernan este tipo de modelo en 2D, son ecuaciones de Euler 2D:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (1.10)$$

En las ecuaciones (1.9) & (1.10) los términos x & y definen la posición en coordenadas cartesianas, mientras que U & V son las componentes cartesianas de la velocidad, p es la presión estática y ρ es la densidad del fluido. Se puede considerar este análisis como flujo potencial irrotacional, es de decir un modelo de baja fidelidad. Se ha empleado en diversos estudios para optimizar la forma de los componentes de las PAT.

Tabla 1.2. Modelos para simulación de turbulencia.

Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)	Eddy – Viscosity	Spalart Allmaras	
		Modelos de dos ecuaciones	$k - \varepsilon$ $k - \omega$ SST $k - \omega$
	RSM	Reynolds Stress Model	
	LES	Large Eddy Simulation	
	DNS	Direct numerical Simulation	

(Fuente: Bahrami, 2015)

1.6.2. Modelo de flujo viscoso

La ecuación de Navier – Stokes expresa de manera general el equilibrio dinámico de un fluido viscoso. Se las conoce también como ecuaciones diferenciales del movimiento de un fluido viscoso o fluido real. La descomposición de Reynolds es empleada, permitiendo que los componentes de la velocidad en la ecuación de Navier – Stokes puedan ser separados dentro de un promedio de tiempo. La ecuación de Navier – Stokes es promedio – Reynolds, o de tiempo – promedio, para turbulencia estática estacionaria [35] [36].

La fluctuación del tiempo – promedio transfiere términos que aparecen en la ecuación Navier - Stokes promedio – Reynolds, comúnmente referidos como tensor de esfuerzos Reynolds. Este es un tensor simétrico que contienen seis cantidades desconocidas dejando a las ecuaciones que gobiernan al flujo como un sistema abierto de ecuaciones. El objetivo del modelo de turbulencia es derivar relaciones para estas seis componentes para el tensor de esfuerzos específicos Reynolds, así se cierra el sistema de ecuaciones. Una aproximación común al modelo de turbulencia es usar la aproximación de la viscosidad – eddy de Boussinesq para determinar el tensor de esfuerzos Reynolds y el tensor de deformación media. En este punto se asume que existe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación en el campo de flujo. Esto se encuentra establecido a través de introducir la energía cinética de turbulencia y las cantidades cinemáticas de

viscosidad eddy, estas últimas son definidas de forma diferente en función del modelo de turbulencia empleado [34].

Tabla 1.3. Modelo empírico para predecir la erosión (Gulich, 2008).

solids content	$\rho = \text{fluid density}$	$c_s = \frac{x}{1-x} \cdot \rho = \frac{c_v}{1-c_v} \cdot \rho_s$	$x = \frac{c_s}{\rho + c_s}$	(1.12)
cs [kg/m ³]	$\rho_s = \text{solids density}$			
Metal loss rate in [mm/year] Valid for: $c_s < 150$ [kg/m ³]	$E_{R,a} = \frac{F_{Form} \cdot F_{Mat} \cdot F_{KG} \cdot F_{HS}}{1 + c_s / \rho_s} \left(\frac{c_{s,eq}}{c_{s,Ref}} \right) \left(\frac{w_{mix}}{w_{Ref}} \right)^3$			(1.13)
	$E_{R,Ref} = 1$ [mm/year]; $c_{s,Ref} = 1$ kg/m ³ ; $w_{Ref} = 10$ [m/s]			
Geometry		F_{FORM}	Relevant velocity	
Annular seals	Annular seals at impeller inlet, balance piston	3 to 5	$w = \sqrt{c_{ax}^2 + \left(\frac{u}{2}\right)^2}$	(1.14)
	Inter-stage seals	4 to 6		
Impeller sidewall gaps		3 to 5	$w \approx 1/2 u_2$	(1.15)
Impeller inlet	Leading edge	10 to 30	$w_1 = \sqrt{c_{1m}^2 \pm (u_1 - c_{1u})^2}$	(1.16)
	Corner vortex	10 to 20		
	Blade surface	6		
Impeller outlet	Blade pressure surface	10 to 20	$w_{2u} = u_2 - c_{2u}$	(1.17)
Diffuser inlet, volute cutwater	Leading edge, corner vortex	10 to 30	$c_{3u} = \frac{d_2 \cdot c_{2u}}{d_3}$	(1.18)
Cylindrical bore or channel [14.39]		3.3	$w = Q_{mix} / A$	
Jet impinging at 90° on a structure [14.39]		68	Velocity at jet orifice	
Rotating disk in wear device		0.03	$w = u_2$	
Equivalent solids concentration $c_{s,eq}$	$c_{s,eq} = \sum \left(c_s \frac{H_s}{H_{Quartz}} \right)$	The fractions of a solids mixture are weighted according to their hardness, $H_{quartz} = 1150$ [HV]		(1.19)
Grain size	$F_{KG} = \frac{d_s}{d_{Ref}}$	$d_{Ref} = 1$ [mm] for $d_s < 0.75 \cdot s$ (s = radial gap width)		(1.20)
Grain shape	$F_{KF} = 1$ for milled quartz sand; $F_{KF} = 0.6$ for rounds grains			
Grain hardness	$F_{HS} = 1$ for quartz sand; $F_{HS} = 0.017$ to 0.05 for lime stone			
Material hardness Hmat Href = 700 HV	Ductile metals (A>5%)		$F_{Mat} = 1 + 1.3 \cdot \ln \frac{H_{Ref}}{H_{Mat}}$	(1.21)
	Stellite 20 $H_{mat} = 670$ [HV]	gap or bore	$F_{Mat} = 0.14 \frac{H_{Ref}}{H_{Mat}} - 0.063$	(1.22)
	Ferro-Titanite $H_{mat} = 535$ to 1150 [HV]	jet	$F_{Mat} = 0.54 \frac{H_{Ref}}{H_{Mat}} - 0.22$	(1.23)
Conversion: HV ≈ 0.29 x R HV = HV	Material	H_{mat} HV	F_{mat}	
	GX250CrMo 15-3	876	Cylindrical bore	Orthogonal jet
	Hard metal 82.5 WC	1380	0.25	0.6
	Silicon carbide SiC	1500	0.004	0.01 (estimated)
	Tungsten carbide WC		0.0035 (estimated)	0.008
	WC-CoCr spray coatings		0.0012	0.003 (estimated)
Conversion of Rockwell to Vickers hardness			0.006 to 0.04	
			$HV \approx 125 \exp(0.029HR_c)$	

Un modelo de turbulencia semejante que se basa en la aproximación de la viscosidad – eddy de Boussinesq es el Transporte de Esfuerzo Cortante de Menter $k - \omega$ (Por sus siglas en inglés: Menter’s $k - \omega$ Shear Stress Transport) dos ecuaciones del modelo de viscosidad – eddy. Este modelo permite mejorar la predicción de gradientes de presión contrarias en la región cercana a la pared a medida que es comparada con los modelos estándar $k - \omega$ y $k - \epsilon$, teniendo en cuenta que el esfuerzo cortante de turbulencia es proporcional a la energía cinética de turbulencia después de la región de capa límite [34]. En la *Tabla 1.2* se muestran los modelos para simulación de turbulencia en CFD.

1.6.3. Modelo de erosión

En base al modelo descrito por Gülich [37] se puede predecir de manera empírica el desgaste por erosión, a través de:

$$Erosion\ factor = F_{KG} \cdot \left(\frac{C_{S,eq}}{C_{S,Ref}} \right) \cdot \left(\frac{W_{mix}}{W_{Ref}} \right)^3 \quad (1.11)$$

En la *Tabla 1.3* se muestran las diferentes ecuaciones necesarias para seguir el modelo empírico, información que se encuentra basada en más de 100 experimentos disponibles en la literatura abierta.

El modelo empírico se basa en una aproximación de flujo – multifase, siendo entonces la velocidad de mezcla w_{mix} relevante para determinar la tasa de erosión. En lugar de considerar a toda la bomba, el modelo se divide en varias regiones (así: laberintos, carcasa del rodete, entrada o salida del rodete, difusor). Cada una de las regiones es contabilizada a través de factores de forma F_{FORM} , mismos que dependen en gran medida de la ocurrencia o presencia de vórtices, recirculación y de la incidencia del flujo. Los efectos secundarios del flujo deben ser tomados en cuenta cuidadosamente, debido a que estos pueden provocar una variación en los factores de forma superior a una multiplicación por 3. La reacción del material al efecto de la abrasión depende del desgaste hidro – abrasivo y se encuentra expresado mediante los factores del material F_{MAT} , que fueron determinados a través de datos medibles (Vetter y Kieling [38]). Así mismo, factores adimensionales para el tamaño de la partícula F_{KG} , forma del grano o partícula F_{KF} , y de la dureza de los sólidos F_{HS} son aplicados.

Este modelo se considera como una aproximación general, esto debido a que tiene influencia de un gran número de factores. En CFX, la erosión se calcula como granos de

material erosionado por gramo de partícula en colisión. El flujo de masa a la entrada y la presión estática se definen como las condiciones de contorno. Adicionalmente, se define una turbulencia de intensidad media a la entrada. A la salida se definió una presión estática de una (1.0) atmósfera. Se empleó el modelo de turbulencia SST, debido a que tiene un comportamiento aceptable en los flujos separados y gradientes de presión adversos.

1.7. Estado del arte

1.7.1. Micro y mini - hidrogenación

Los problemas medioambientales que actualmente enfrenta el planeta, hacen que las minicentrales, ya sean estas nuevas o rehabilitadas, se conviertan en una de las opciones más razonables y viables. En este sentido los principales objetivos de la micro y mini – hidrogenación son:

- dejar bajo tierra los combustibles fósiles y gas natural
- permitir que las comunidades más alejadas y menos desarrolladas, se industrialicen, a través de la entrega de hidroenergía
- promover programas de pequeñas centrales hidroeléctricas descentralizadas (SDH – Small Decentralized Hydropower)

Adicionalmente, los países industrializados en su momento (especialmente durante el siglo XX) impulsaron programas con un número importante de pequeñas centrales hidroeléctricas, mismas que suplieron los enormes requerimientos de energía. Como parte de los programas rurales de electrificación (programas de pequeñas centrales hidroeléctricas – PCH), se tienen los siguientes principios:

- el sitio debe ser técnicamente factible
- el área a servir debe estar fuera del perímetro de la red eléctrica del sistema nacional
- el área puede ser remota y de difícil acceso
- la comunidad/área debe encontrarse entre las menos desarrolladas de la nación

En varios países alrededor del mundo el principal objetivo fue en su momento el desarrollo de grandes proyectos hidroeléctricos y térmicos (por ejemplo: India, EE.UU.) con el objetivo de suplir la creciente demanda y proveer electricidad a tarifas económicas. Así mismo, en su etapa inicial el desarrollo de proyectos de micro y mini hidrogenación estuvieron limitados en su mayoría a las regiones montañosas; así los cambios en el

espectro energético y las incertidumbres acerca de la disponibilidad de los combustibles fósiles han creado un especial interés en el uso de las PCH, se reconoce entonces:

- este potencial es un atractivo recurso energético libre de contaminación
- ayudar a mejorar la calidad de vida y estimular la creación de industrias rurales y agrícolas, particularmente en regiones remotas o atrasadas.

Adicionalmente, en países como India alrededor del 25% de las instalaciones de baja carga son instalaciones que no solo se pueden considerar de gran utilidad, por ser al mismo tiempo proyectos de mediana y pequeña escala: de riego, control de inundaciones y abastecimiento de agua; sino también porque a su vez son relativamente baratos. La necesidad de aprovechar los recursos para micro y mini – hidrogeneración, es un eje transversal que conecta a muchas otras actividades:

- el trabajo de reasignar el pequeño potencial (micro y mini) resulta un trabajo constante
- con frecuencia un número significativo de pequeñas centrales hidroeléctricas se pueden construir aguas abajo de represas construidas anteriormente
- la tecnología de equipamiento para micro & mini generación y sus accesorios se pueden construir en cada nación, e incluso en algunos casos este equipamiento se puede exportar (ejemplo: India cuyas exportaciones llegan a países como Nepal, Afghanistan, Malasia, entre otros estados.)
- todo esfuerzo estará siempre en la búsqueda de reducir los costos de los proyectos de pequeña hidrogeneración, mejorar la relación costo beneficio, con el objetivo de reducir o simplificar las obras civiles y estandarizar el proceso de generación y equipamiento de centrales

Los recursos potenciales de media y gran carga (diferencia de altura) son, dentro del grupo de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), regularmente muy substanciales, dichos recursos se encuentran en su gran mayoría en regiones montañosas, precisamente donde la necesidad poblacional es muy baja; en este caso la relación costo/beneficio puede no ser tan buena como las instalaciones de baja carga.

En estas zonas o regiones el flujo o caudal sostiene descargas permanentes, asegurando la disponibilidad constante de energía a lo largo del año; a su vez y debido a la topografía estos caudales descienden rápidamente (en altura), habilitando o permitiendo la

concentración de grandes cargas con sistemas de conducción de agua relativamente cortos.

En resumen, en el transcurso de la explotación del potencial micro y mini – hidroeléctrico, se necesita acrecentar la especialización en el diseño, ingeniería y construcción. Al mismo tiempo se debe emprender la manufactura de pequeñas unidades de generación en varios tipos, cubriendo un amplio rango de cargas. En las etapas de diseño y construcción, de sistemas de micro generación, se recomienda emplear a personal local; así mismo, existen diversos estudios que avalan el uso de componentes producidos en serie y maquinaria fabricada localmente. Este procedimiento se denomina enfoque localizado.

Metodología preliminar de evaluación

En muchos países se reconoce que los procedimientos de investigación para la instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas no van a ser tan elaboradas, como para aquellas plantas de mediano y gran tamaño, así también los costos de investigación pueden ser comparados con el tamaño de las propuestas de inversión para plantas de generación. En vista de esto, un estudio topográfico por cartografía aérea, información hidrológica de considerables períodos de tiempo con instrumentos de medición adecuados y aforo preciso de flujos de descarga, no están garantizados para muchas de las pequeñas instalaciones propuestas.

En lugar de esto se valora de manera precisa las características del caudal a través de la instalación de un medidor de flujo (vertedero) y llevando a cabo una medición de flujo mínimo, por un razonable período de tiempo, antes de tomar cualquier decisión. Los períodos de descarga pobres o débiles son considerados más importantes que los grandes caudales; desde la mínima descarga disponible la mayor parte del año es seleccionada usualmente como el caudal de diseño.

Se ha encontrado que los estudios de escritorio no son suficientes para evaluar el potencial de los proyectos de micro/mini generación, según se ha observado en visitas al sitio, en muchos casos el área de captación (cuenca, cuenca tributaria) parece lo suficientemente grande para un proyecto de micro – hidroelectricidad; en los estudios de escritorio el área puede estar completamente seca, o tener flujos muy pequeños; que inclusive se pueden igualar a estos solo en periodos cortos de tiempo (por ejemplo: periodos de monzón); mientras que en las áreas aledañas caudales muy confiables están disponibles durante todo el año.

En muchos casos el método más seguro de evaluación, particularmente en regiones montañosas, es realizar visitas a estas áreas en períodos secos y recolectar información de la gente que vive a los alrededores. También el caudal se puede estimar con cierta aproximación con referencia a la cuenca de drenaje y a las marcas que dejó el flujo por inundación (arrastre), mientras que en la casa de máquinas y otras instalaciones eléctricas deben ser protegidas contra las inundaciones para evitar el daño del equipamiento o incluso la necesidad de cerrar completamente la estación eléctrica.

Selección del sitio y diseño hidráulico

Para la selección del sitio de los proyectos micro y mini – hidroeléctricos, los siguientes factores generalmente se deben tomar en consideración:

- encontrarse cercano al centro de carga o distribución, para evitar hasta donde sea posible, líneas de transmisión de alto voltaje y la instalación de equipamiento costoso, además del costo de personal especializado para la instalación de estos sistemas de extensión de la red.
- la potencial demanda de carga, presente y futura, la cual puede incluir: (a) iluminación en hogares, (b) industrias en pequeña escala (como carpinterías, panaderías, aserraderos, fábricas de harina/aceite, etcétera), (c) riego, (d) suministro de agua (rara vez se necesita en regiones montañosas, ya que esta se provee por flujo a gravedad), y
- aspectos socioeconómicos

Las principales características de los pequeños proyectos hidroeléctricos aislados que usan caídas medianas y grandes con frecuencia consisten en: estructuras de derivación (disposición de la captación), sistemas de conducción, desarenador, cámara de presión, tubería(s) de presión, casa de máquinas y el canal de descarga.

Para la mayoría de los proyectos de micro y mini – hidroelectricidad, con frecuencia se selecciona la captación caucasiana; esta consiste en una estructura de hormigón armado construida sobre el lecho del río, con una rejilla en su parte superior que previene el ingreso de piedras y sólidos (palos, piedras, ramas, basura, etcétera).

El canal del vertedero tiene una pendiente, de manera tal que el caudal requerido es arrastrado dentro de la captación, mientras que las arenas y los sólidos son arrastrados por el flujo hacia aguas abajo de la captación.

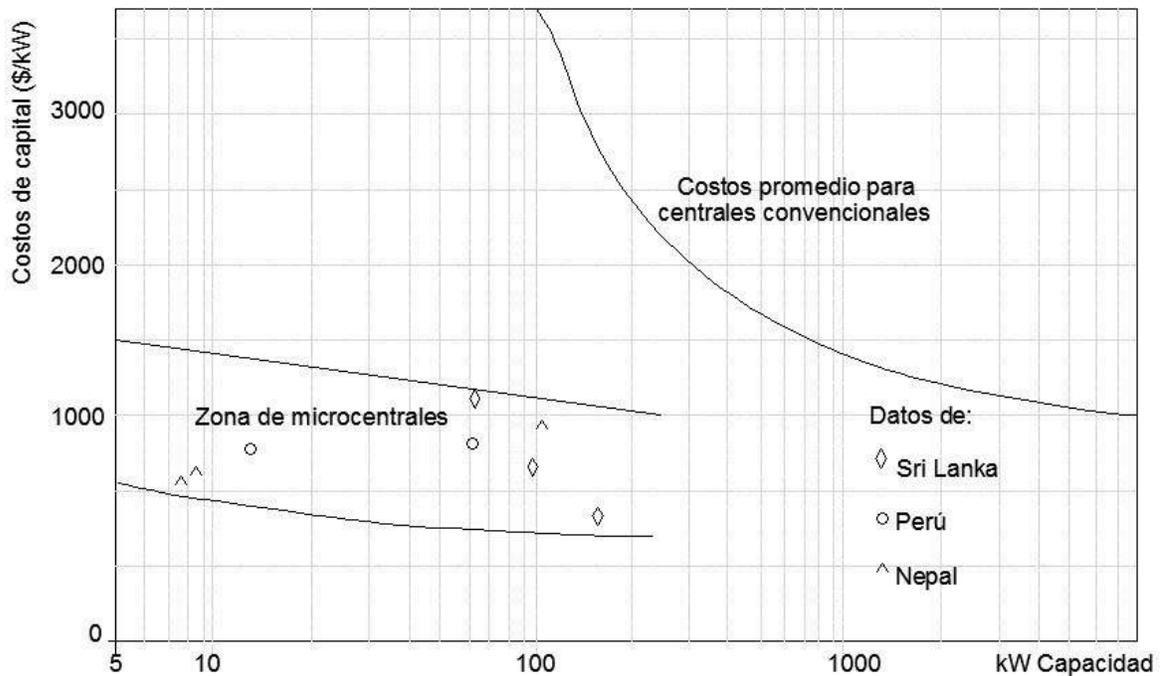


Figura 1.17. Economía de escala de las microcentrales hidroeléctricas.
(Fuente: ITDG – Perú, 1995)

Para el sistema de conducción, se pueden usar cualquiera de los siguientes materiales: canal de madera, placas de acero galvanizado, hormigón prefabricado, tubería de acero, canales ordinarios de piedra u hormigón. La tubería de presión generalmente se construye con placas de acero. En función de la carga, caudal y capacidad, varios tipos de turbinas pueden ser instaladas; para cargas pequeñas, las turbinas tipo “bulk” pueden ser instaladas en muchos casos.

Operación y mantenimiento

Debido a la lejanía de muchos de los proyectos de micro y mini – hidrogeneración, es frecuentemente difícil traer personal calificado para operar y mantener las estaciones; en consecuencia, la tendencia es diseñar y manufacturar unidades que sean simples de operar y mantener, una acción necesaria es seleccionar personas jóvenes de la localidad y entrenarlos en las operaciones diarias. De esta forma el personal técnico especializado para propósitos de mantenimiento, será únicamente requerido en estas estaciones periódicamente y por un lapso bastante corto.

Factibilidad económica

El costo estimado para pequeños proyectos hidroeléctricos varía considerablemente de proyecto a proyecto, dependiendo de la extensión de la obra civil implicada, además del

equipamiento eléctrico y mecánico. La *Figura 1.17* nos muestra la diferencia significativa que constituye la micro – hidrogenación en términos económicos; donde el costo de líneas de transmisión y de los sistemas de extensión de la red desaparecen. A esto se le añade el beneficio económico que implica que estos pequeños sistemas de hidrogenación sean diseñados y construidos por personal local, usando componentes fabricados en serie e incluso maquinaria fabricada localmente [47].

1.7.2. Optimización mutiobjetivo – análisis CFD

A continuación, se muestran algunos de los estudios que son de libre acceso respecto de los temas: i) Algoritmos evolutivos y optimización multiobjetivo, ii) Diseño CFD en bombas centrífugas y iii) Análisis CFD de PAT.

Se debe tomar en cuenta que, estos artículos académicos fueron ordenados alfabéticamente, es decir los temas antes mencionados se encuentran distribuidos no bajo un orden temático principalmente.

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Agarwal	2012, Alternate Hydro Energy Centre, Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee – India	<ul style="list-style-type: none"> - $Q=0.008$ [m³/s] - $H=50.0$ [m] - $n=2900$ [rpm] - $n_s=14$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Investigar el mecanismo de la erosión por sedimentos en bombas funcionando como turbinas (PAT) usando métodos numéricos y experimentales. - Se propone realizar un estudio experimental que permita analizar la erosión por sedimentos en bombas funcionando como turbinas (PAT) con los siguientes objetivos: <ul style="list-style-type: none"> i. Identificar y seleccionar el sistema y parámetros de sedimentación. ii. Diseñar y fabricar el sistema experimental. iii. Dirigir el experimento para los parámetros seleccionados. iv. Identificar los puntos de 	<ul style="list-style-type: none"> - Debido a que no existen modelos exitosos desarrollados para la conversión de factores de bombas funcionando como turbinas así los factores de conversión en los experimentos se toman de los gráficos obtenidos desde los estudios experimentales de Chapallaz. Estos fueron seleccionados porque el rango de la velocidad específica coincide con el rango de velocidad específica de la PAT, propuestos para ser usados en el análisis experimental. - Erosión por sedimentos es uno de los problemas técnicos más importantes que experimentan las estaciones hidro – eléctricas alimentadas por agua cargada de sedimentos, y en las plantas de bombeo que son empleados en la derivación de flujo en dos fases líquido – partículas sólidas en varios sectores industriales y agrícolas. - La selección de nuevos materiales para la

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
			<p>impacto principales punto crítico' en el álabe de la bomba en la que tienen lugar los mayores daños debido a la erosión por sedimentos.</p> <p>v. Dirigir el experimento para diferentes concentraciones de sedimentos y estudiar el efecto de aumentar esta concentración en la cantidad (tasa) de erosión por sedimentos.</p> <p>vi. Desarrollar una correlación entre la concentración de sedimentos y la cantidad (tasa) de erosión por sedimentos.</p> <p>vii. Desarrollar un modelo CFD para el sistema descrito anteriormente y comparar los resultados con el estudio</p>	<p>construcción de bombas trabajando como turbinas depende del entendimiento de las relaciones entre la cantidad (tasa) de erosión por sedimentos y concentración de sedimentos en el agua.</p> <p>- De acuerdo con el presente estudio, una bomba centrífuga (usada como turbina) tiene una carga de 25 [m] y 6.0 [l/s] de descarga y ha sido analizada y posteriormente diseñada para el desgaste debido a la erosión.</p> <p>- Un análisis CFD se lleva a cabo para identificar las zonas propensas a erosionarse en el rodete de la PAT.</p> <p>- El montaje experimental fue diseñado y fabricado a fin de investigar el efecto de la erosión por sedimentos en PAT.</p> <p>- Los principales puntos de impacto han sido identificados y el efecto de la concentración de sedimentos en cantidad (tasa) de erosión por sedimentos ha sido</p>

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
			<p>experimental.</p>	<p>estudiada.</p> <p>- Los resultados del análisis CFD también han sido comparados con los resultados experimentales. A continuación, se detallan algunas de las conclusiones del estudio:</p> <p>i. Basado en el análisis numérico y experimental, la región conocida como hub está identificada como la zona más propensa a la erosión (hotspot – punto crítico) del rodete de la PAT. Por otra parte, los resultados del análisis numérico y experimental tienen una coincidencia muy buena; por lo tanto el estudio numérico puede ser implementado con el fin de estudiar el efecto de otros parámetros en la erosión por sedimentos.</p> <p>ii. La máxima tasa de pérdida de masa se observa a las 7 500 [rpm] con 2.02×10^{-3} miligramos y la mínima a las 3 500 rpm con 1.35×10^{-3} miligramos.</p> <p>El desgaste normalizado (pérdida de masa)</p>

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Ajay y Amudhini	2017, Department of Mechanical	<ul style="list-style-type: none"> - Q=0.00605 [m³/s] - H=25.0 [m] 		<p>se incrementa con el aumento de la concentración de sedimentos para un tamaño específico de sedimentos de 250 μm. Se concluye que cuando la concentración de sedimentos aumenta, el porcentaje de erosión por sedimentos decrece; sin embargo, el total de erosión por sedimentos aumenta.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Como la concentración de sedimentos se incrementa, más hendiduras y surcos se observan en el tipo de metal usado en el análisis experimental. - Se realizó un intento para desarrollar una correlación entre la cantidad de erosión por sedimentos y la concentración de sedimentos que puede ser usada para determinar la cantidad (tasa) o erosión por sedimentos bajo los parámetros antes descritos.
			<ul style="list-style-type: none"> - Optimizar el diseño del rodete sin alterar el diámetro 	<ul style="list-style-type: none"> - El algoritmo PSO (particle swarm optimization) entrega la máxima carga, así

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Stephen	Engineering and Department of Mathematics – Karunya University, Coimbatore, Tamilnadu – India	- P=5.0 [HP]	de este. - Optimizar los parámetros de diseño del rodete usando algoritmos como GA, SA, PS. - Probar el nuevo diseño (rodete) usando el software comercial disponible CFD – Ansys CFX	esta variable se mejora un 17.48%. - Los cambios en las pérdidas por disminución de pérdidas por circulación del 22.17%, decremento en las pérdidas por incidencia a la entrada de 32.67%, incremento de las pérdidas por fricción de 1.11%.
Albayrak, Abgottspon y Boes	2016, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich. Competence Center for Fluid Mechanics and Hydro Machines. Switzerland	Variable	- Presentar un repaso de los estudios en el campo de la erosión hidro – abrasiva, del último siglo.	- Erosión hidro - abrasiva de turbinas hidráulicas es un aspecto económico importante debido a los costos de mantenimiento y pérdidas en la producción, particularmente en plantas hidroeléctricas sin almacenamiento de alta y media carga, en ríos cargados de sedimentos. - Se han mejorado considerablemente, facilidades para la exclusión de sedimentos, trampas de arenas típicas, además del diseño de turbinas y materiales. - Desde 1980, recubrimientos duros han sido aplicados en diversas partes de

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
				<p>turbinas Pelton y Francis, que son susceptibles de erosión. Estas medidas permiten conducir incrementos entre los intervalos entre revisiones y pequeñas reducciones de eficiencia.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Para calibrar, validar y el desarrollo de nuevos modelos de predicción, medidas adicionales de ambos modelos, ensayos físicos en laboratorios y datos en escala real de Plantas Hidroeléctricas son requeridos. - Técnicas de medición comprobadas se encuentran disponibles para el monitoreo en tiempo real de la concentración de sedimentos en suspensión, tamaño de partículas, erosión y eficiencia de la turbina con una alta resolución. - Mejoras significativas para mitigar la erosión hidro-abrasiva han alcanzado un desarrollo elevado y continuo. - Se requiere una buena colaboración entre

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Bellary y Samad	2016, Department of Mechanical Engineering, Shivaji University Kolhapur, Maharashtra – India Indian Institute of Technology, India	Rangos: - Q=0.05 – 0.182 [m³/s] - H=20.0 – 60.0 [m] - P=30.0 – 60.0 [kW]	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar un modelo sustituto, basado en la metodología de optimización de forma, para incrementar el desempeño de una bomba centrífuga. - Usar como variables de diseño a: número y ángulo de los álabes, para definir la forma de los álabes del rodete de la bomba. - Llevar a cabo una simulación tri-dimensional usando las ecuaciones (RANS, Reynolds 	<p>los fabricantes de turbinas. Operadores de Plantas Hidroeléctricas, Proveedores de equipos, Ingenieros consultores e instituciones de investigación. Esto contribuye a energía más eficiente y costos más razonables usando el potencial hidroeléctrico mundial.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El criterio de convergencia usado es de 10-5. - El número de nudos llega a un valor de 550 000, la variación de la carga con el incremento del número de nodos no fue significativo. - La simulación fue llevada a cabo 1 470 rpm, para el diseño de las condiciones del estudio del patrón de flujo. - La carga y eficiencia desarrollado fueron estimados en 7% y 2% comparados con los resultados analíticos. - Los resultados analíticos producen una carga de 40.0 m en la proporción de diseño

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
			<ul style="list-style-type: none"> - averaged Navier Stokes). - Usar el modelo de turbulencia k-ε para las simulaciones de flujo incompresible estable. 	<p>de flujo, considerando que se usó los modelos de turbulencia k-ε, SST y k-ω los valores obtenidos son: 43.11 m, 43.95 m y 45.15 m, respectivamente.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El error más bajo (≈7.21%) entre los modelos de turbulencia se produjo por k-ε y este modelo fue seleccionado para las simulaciones. - los valores óptimos de los ánulos de entrada y salida del álabe son 16.02° y 47.52°, respectivamente. - El punto óptimo de eficiencia hidráulica es 92.15%. - La forma del álabe optimizado produjo una alta eficiencia hidráulica, y esto se produce debido a la reducción en las pérdidas: de flujo y por fricción de disco sobre el rodete (hub/shroud). - Incrementar el ángulo de salida del álabe a través de la optimización de forma, permitió un incremento en el tamaño de la

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Bogdanović – Jovanović, Milenković, Svrkota, Bogdanović, Spasić	2014, Faculty of Mechanical Engineering, University of Nis, Jaroslav Cerni Institute for the Development of Water Resources, Belgrade – Serbia	<ul style="list-style-type: none"> - Q=168 [l/s] - H=50.0 [m] - n=1 450 [rpm] Pump n=1480 [rpm] Turbine n=1510 [rpm] 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir el tiempo necesario para determinar las características de la bomba operando como turbina, aplicando CFD. - Describir los problemas que aparecen durante la modelación y los diversos enfoques usados para resolverlos. 	<p>sección transversal a la salida, por lo tanto, una reducción en la caída de presión del fluido fue observada.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Existen un sin número de sitios donde se pueden usar, así: sistemas de suministro de agua, aplicaciones industriales, aprovechamiento de aguas residuales. - Incrementando la eficiencia energética de los sistemas existentes a través de la instalación de PAT, en lugar de reducir la elevada presión en el sistema, provee una prometedora estrategia de manejo del recurso hídrico. - Las curvas características (altura y eficiencia) de la bomba tienen una diferencia que no exceda el 3%. Siendo la curva numérica la que presenta valores más altos. - El análisis CFD es una herramienta efectiva de diseño que permite determinar el desempeño de las bombas centrífugas

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Derakhshan y Nourbakhsh	2008, Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran – Iran	<ul style="list-style-type: none"> - Q=120 [l/s] - H=25.0 [m] - P=20.0 [kW] 	<ul style="list-style-type: none"> - Llevar a cabo un estudio del punto de mayor eficiencia (BEP) de una bomba centrífuga industrial usando un análisis teórico. - Simular la bomba en ambos modos directo e inverso, a través de la dinámica computacional de fluidos (CFD). - Verificar experimentalmente los resultados teóricos y numéricos. - Usar el software Fine Turbo V.7 para el análisis CFD. 	<p>en ambos regímenes.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El análisis teórico, trata de estimar los componentes hidráulicos del modo inverso (turbina) usando el modo directo (bomba). - Respecto a los datos experimentales en el BEP, el método teórico predice 1.1%, 4.7%, 5.25% y 2.1% número de gasto, de carga, de potencia y de eficiencia, respectivamente más bajos respecto de los primeros. <p>La carga y la potencia que se predicen por este método son más bajas que los datos experimentales debido a la evaluación de las pérdidas del rodete y la carcasa.</p> <ul style="list-style-type: none"> - CFD no puede simular: filtraciones, fricción de discos, y pérdidas mecánicas; puesto que el modelo numérico no incluye el campo de flujo en el espacio entre el rodete (hub/shroud) y carcasa ni el cierre de aberturas. - Para comparar los resultados entre los

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
				<p>datos numéricos (CFD) y experimentales, el valor de las filtraciones se estima usando el método desarrollado por Thorne.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pérdidas mecánicas y por fricción se evaluaron usando el método de Stepanoff, usando la potencia de entrada de la bomba (CFD). - Para el modo directo (bomba) los números de: descarga, carga, potencia y eficiencia del análisis CFD respecto de los datos experimentales en el BEP son más altos, así: 4.1%, 0.3%, 4.2% y 1.3%, respectivamente. - Los resultados del análisis CFD para el modo turbina, no tienen una buena coincidencia respecto de los datos experimentales. - En el modo turbina, el caudal medido es mayor que el valor real a travesando el rodete. - Comparando los resultados numéricos y

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Derakhshan, Pourmahdavi, Abdollahnejad, Reihani y Ojaghi	2013, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology,	- Q=16.0 - 24.0 [m ³ /h] - H=25 – 50 [m]	- Desarrollar y aplicar una eficiente y original aproximación al diseño del rodete de una bomba centrífuga a fin de alcanzar una mayor eficiencia.	<p>experimentales en el BEP del modo turbina, se tiene que las desviaciones entre estos datos son: -1.1%, -22.9%, -16.4% y 5.5% para los números de: descarga, carga, potencia y eficiencia, respectivamente. Estas diferencias se pueden deber a las pérdidas que se presentan en diversas zonas del volumen de control de la PAT y de la teoría de momento rotacional a través del rodete.</p> <p>- Las desviaciones de los resultados del análisis en CFD de la PAT sugieren además una pobre determinación del momento rotacional neto comparado con el deficiente cálculo de las pérdidas hidráulicas.</p> <p>- Los resultados numéricos muestran un aumento de la eficiencia de 3.59% y solo de 6.89 [m].</p> <p>- La diferencia de la altura hidráulica y eficiencia, en el ámbito de 0.80 – 1.20 QBEP, es 1.25 [m] y 4.18%,</p>

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
	Narmak, Tehran – Irán		<ul style="list-style-type: none"> - Elaborar un método de optimización global basado en algoritmos ANNs (Artificial Neural Networks) y ABC (Artificial Bee Colony) para validar 3D Navier – Stokes, rediseñando así la geometría del rodete y mejorando el rendimiento de la bomba centrífuga (Berkeh 32-160). - Simular los resultados optimizados (bomba centrífuga) usando el método CFD. 	<p>respectivamente. Adicionalmente, los errores entre la altura hidráulica y eficiencia pronosticadas y los valores experimentales son de 0.72 [m] y de 0.50%, respectivamente en el BEP. Esto demuestra que el método CFD puede ser usado para predecir el comportamiento de bombas con una aceptable confiabilidad.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La altura y eficiencia en el BEP de la bomba con el nuevo álabe se incrementa desde los 30.05 [m] a 36.94 [m] y desde 47.96% a 51.18%, respectivamente.
Frosina, Buono y Senatore	2016, Department of Industrial Engineering, University of Naples Federico II, Naples – Italia	Rangos: <ul style="list-style-type: none"> - Q=45.4 – 148.0 [m³/s] - H=3.9 – 60.0 [m] - n_s=37.6 – 64.0 	<ul style="list-style-type: none"> - Presentar un nuevo método para predecir las características de una bomba centrífuga industrial operando en modo inverso. 	<ul style="list-style-type: none"> - El coeficiente de gasto usando los métodos de Sharma, Hergt y Schmiedl es muy próximo a la metodología a través de CFD. El método de Grover y Alatorre - Frenk tiene un margen de 10 - 15 % de desviación. Grover tiene una desviación superior al 30%.

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Krüger, Martin y Dupont	2010, Core Technology and Tools Group, Sulzer Pumps Ltd.; Sulzer Markets and Technology Ltd.; Head, Hydraulic Development Group, Sulzer Pumps Ltd. Winterthur, Switzerland	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad (arena cuarzosa) = $\delta = 2\ 610$ [kg/m³] - Tamaño de partícula = 32 [µm] 	<ul style="list-style-type: none"> - Predecir de manera segura la posible erosión en bombas. - Adaptar de manera general al diseño de rodetes, y seleccionar el material adecuado para minimizar y prevenir la erosión. - Describir los parámetros determinantes de la erosión. - Presentar diversas aproximaciones para la predicción de la erosión. - Usar el método CFD (computational fluid dynamics) para considerar la totalidad del patrón de flujo. - Comparar los resultados de los patrones de erosión resultantes de experimentos y simulación. - Investigar la influencia de 	<ul style="list-style-type: none"> - Es fácilmente demostrable que el ángulo de choque de las partículas y la concentración de sólidos juegan un rol predominante en el proceso de choque como ocurre a lo largo del eje principal del álabe del rodete. - De manera contraria, el patrón de flujo tiene un gran impacto en la fricción como proceso de erosión, a lo largo del álabe, borde de salida del rodete, extremo libre y base de la placa. - Ambas aproximaciones, la convencional empírica y la numérica moderna permiten solo una aproximación cualitativa del patrón de erosión. - El complejo comportamiento físico con el material endurecido además de la resolución de la capa límite muestra con claridad las limitaciones de la predicción cualitativa de la fricción entendida como erosión.

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
			<p>parámetros como: concentración de partículas, ángulo de choque, velocidad de las partículas, energía cinética turbulenta y vórtices secundarios en la estructura de flujo, en los patrones de erosión.</p> <p>- Buscar una correlación entre la erosión y los parámetros antes mencionados.</p>	<p>- Ángulo de choque de la partícula, concentración de sólidos y el patrón de flujo se encuentran representados por la energía cinética de turbulencia, vórtices y estructuras de flujo secundario son los parámetros principales para la ocurrencia de desgaste por erosión.</p> <p>- Dos diferentes métodos para la estimación del desgaste fueron presentados. Ambas aproximaciones toman en cuenta los parámetros partícula y material además de la velocidad de flujo y la concentración de sólidos.</p> <p>- El método convencional usado por Sulzer Pumps está adicionalmente basado en factores de forma, que depende de la sección de la bomba.</p> <p>- El análisis CFD permite la simulación de los procesos de erosión y faculta a un análisis profundo de los parámetros principales antes mencionados.</p>

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
				<ul style="list-style-type: none"> - En el eje principal, los procesos de erosión son como choques de partículas y están dominadas por el ángulo de choque de las mismas. - La elevada energía cinética turbulenta cercana al extremo libre empuja las partículas al centro del eje principal, siendo esta la principal localización de la erosión. - Ambos estados de erosión (inicial y final) pueden ser simulados bastante bien. - A lo largo del álabe, del eje principal y de la placa base, la erosión ocurre como un tipo de fricción. En estas zonas el patrón de flujo tiene su mayor impacto. - efectos como la dureza o suavidad del material no pueden ser modelados. - CFD puede ayudar a predecir el desgaste por erosión en un nivel cualitativo. Por ejemplo, las regiones iniciales en las que se presentará la erosión. - Sin embargo, una predicción cuantitativa

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Liu, Wang, Yuan, Tan, Wang y Dong	2013, National Research Center of Pumps – Pumping System Engineering – Technology, Jiangsu university, Zhenjiang – China	<ul style="list-style-type: none"> - Q=34.48 [m³/h] - H= 4.44 [m] - n= 1 000 [rpm] - n_s=1116.7 	<ul style="list-style-type: none"> - Resolver el rendimiento energético a través de un modelo de cálculo y de algoritmos adaptativos. - Optimizar el rendimiento hidráulico del rodete, a través del análisis CFD (computational fluid dynamics). - Mejorar el flujo interno inestable en una bomba centrífuga de doble ábabe (DBCP), usando los parámetros geométricos del diseño original como valores iniciales. - Usar como función objetivo la eficiencia promedio, y como condiciones de borde el porcentaje del diseño de flujo (80% - 100% - 120%) 	<p>de la erosión es imposible al momento.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Los resultados del proceso de optimización son: D₂=diámetro de salida del rodete=201.2 [mm]; D₁=diámetro de entrada al rodete=90.7 [mm]; β₂=ángulo de salida del rodete=23.8[°]; β₁=ángulo de entrada al rodete=21.4[°]; b₂=ancho a la salida del rodete=44.6 [mm]; b₁=ancho de entrada al rodete=53.2 [mm]; φ₁=ángulo de desarrollo del ábabe=177.5 [°]. - El error relativo máximo en la carga es del 3.26% al 80% del Q_d (flujo para la condición de diseño). - El error absoluto máximo de la eficiencia es de 3.09% al 100% del Q_d. - La carga se incrementó 0.05 [m] y la eficiencia aumentó 1.76% en 80% Q_d. En 100% Q_d la carga optimizada se incrementó 0.06 [m] y la eficiencia se incrementó 1.11%. En 120% Q_d la carga se aumentó 0.11 [m] y la eficiencia se incrementó

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Miao, Yang, Shi y Wang	2015, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China	<ul style="list-style-type: none"> - Q=12.5 [m³/h] - H=30.7 [m] - n=2 900 [r/min] - n_s=48 	<ul style="list-style-type: none"> - Incrementar la eficiencia en la recuperación de energía (PAT). Mejorando el desempeño del perfil del álabe. - Parametrización del perfil del álabe. - Diseño experimental Latin Hypercube, técnicas CFD, optimización a través de redes neuronales y algoritmos genéticos. 	<p>1.69%.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La eficiencia del modelo optimizado se incrementó un 2.91% respecto al modelo original. - La altura original es mayor respecto al modelo optimizado. - La potencia del modelo optimizado es ligeramente superior al modelo inicial. - Las pérdidas hidráulicas se dan principalmente en el rodete, y son de mayor magnitud en el modelo original.
Nautiyal, Varun, Kumar y Yadav	2011, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Hamirpur – India	<ul style="list-style-type: none"> - Q=0.0148 [m³/s] - H=32.8 [m] - n=1 500 [rpm] - P=8.18 [kW] 	<ul style="list-style-type: none"> - A través del uso de resultados experimentales (bombas), se definen nuevas correlaciones para predecir el comportamiento de estas funcionando como turbinas. 	<ul style="list-style-type: none"> - La máxima eficiencia en modo turbina es 8.53%, menor al valor en el BEP. - En comparación con otros métodos, la desviación entre los resultados experimentales y los resultados a través de las relaciones propuestas es bajo.
Pagalthivarthi, Gupta, Tyagi y	2011, GIW Industries Inc.,	<ul style="list-style-type: none"> - Q=0.02 [m³/s] - n=710 [rpm] 	<ul style="list-style-type: none"> - Discutir la predicción numérica de la tendencia del 	<ul style="list-style-type: none"> - Con el incremento del porcentaje del flujo de la bomba, la cantidad de desgaste tiende

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Ravi	Grovetown – USA; Dept. Of Mech. Engg., Raghu Engg. College, Visakhapatnam; SHELL Technology, Bangalore – India; Dept. Of Applied Mechanics, IIT Delhi, New Delhi - India	- $d=0.4074$ [m]	<p>desgaste por erosión en bombas centrífugas revestidas, para el bombeo de material espeso diluido.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Considerar el revestimiento bi – dimensional geométrico. - Utilizar el software FLUENT 6.1 y su herramienta DPM (Discrete Phase Model) para obtener el campo de flujo a través de un revestimiento de la bomba empleando dos vías de acople. - Usar el modelo $k - \epsilon$ para la turbulencia. - Estudiar los efectos de varios parámetros de operación como porcentaje de flujo de la bomba, velocidad de rotación (RPM), diámetro de la partícula, varias condiciones 	<p>a nivelarse; mientras que, con el incremento del espesor de recubrimiento, el tanto por ciento de desgaste tiende a decrecer.</p> <ul style="list-style-type: none"> - La validación de los resultados se llevaron a cabo en dos fases. En la primera, los resultados son validados junto a una malla independiente. En la segunda fase, la trayectoria predicha de las partículas a través del módulo DPM en FLUENT 6.1 son comparadas con los resultados del flujo en canales bajo condiciones paramétricas similares. La conformación de la trayectoria de las partículas en canales sirve como un punto de referencia útil para aplicar el módulo DPM en el revestimiento de la bomba puesto que las trayectorias actuales de las partículas en el recubrimiento de la bomba no han sido reportadas en la literatura. - Las soluciones de la independencia de la malla se encuentra establecida por la

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
			<p>geométricas como: curvatura de la punta, pendiente de la tubería de descarga y revestimiento.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Describir las tendencias cualitativas del desgaste por erosión, para los parámetros operacionales y geométricos con una idea de pequeños porcentajes de desgaste y crear un patrón de desgaste uniforme a lo largo de la pared de recubrimiento, como sea posible. 	<p>concentración de partículas dentro de la carcasa de la bomba. La validación de la presente predicción es llevada a cabo para un problema de flujo en canal 2D con datos numéricos publicados.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Desde que se incorporó el parámetro energético que relaciona la cantidad de energía que la partícula pierde con la tasa de erosión, el parámetro de desgaste por impacto V3SCS es calculado por una representación física y cualitativa de la tasa de desgaste por impacto. En todos los estudios anteriores, el efecto es evaluado en términos del parámetro de desgaste por impacto. - La predicción de la erosión se hace a través de diferentes operaciones y parámetros geométricos cuya idea es tasas de desgaste bajas o mínimas y crear patrones de desgaste a lo largo de la pared de la carcasa tan uniforme como sea

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
				<p>posible.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Los parámetros operacionales constituyen la tasa de flujo de la bomba (medido en términos de BEPQ [%]). El hallazgo más importante es aquel que mientras la tasa de flujo decrece desde 120% BEPQ hacia 60% BEPQ, el pico del parámetro de desgaste por impacto cambia desde la región pandeada (punto F) hasta la región de punta (punto B). Para los casos estudiados al 80% BEPQ, el pico del parámetro de desgaste por erosión se encuentra en su valor mínimo y el patrón de desgaste es casi uniforme. - Otro parámetro operacional de importancia es la velocidad de la bomba [rpm]. Con la disminución de RPM, la tasa de desgaste decrece. - Los parámetros geométricos que son estudiados: curvatura de la espiga, pendiente de la tubería de descarga y

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
Rawal y Kshirsagar	2007, Cummins Research and	Rangos: - $Q=0.075 - 0.176$ [m^3/s]	- Demostrar que una PAT es una solución factible para los	<p>espesor de la carcasa. La curvatura de la espiga fue matemática descrita como un radio de dos longitudes (OB y R). Con la espiga dibujada ligeramente hacia adentro, se visualiza una gran reducción en el parámetro de desgaste por impacto y con la espiga dibujada ligeramente hacia afuera, se visualiza un aumento en la tasa de desgaste. De manera similar con el incremento en el espesor de la carcasa, se observa que el parámetro de desgaste por impacto disminuye y con una reducción del espesor de la carcasa, se observa un incremento del parámetro de desgaste. El pico del parámetro de desgaste por impacto ocurre cerca de la región pandeada de la carcasa de la bomba en el punto F ese trata también usando una descarga parcial sobre una descarga directa.</p> <p>- El modelo numérico ayuda a investigar varios parámetros que no pueden ser</p>

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
	<p>Technology – Kirloksar Brothers Ltd., Pune – India</p>	<p>- H=8.30 – 12.48 [m] - n=1 450 [rpm]</p>	<p>problemas de energía en las regiones rurales y apartadas.</p>	<p>fácilmente medibles de manera experimental, un ejemplo son las pérdidas hidráulicas internas y el tipo de flujo. - La eficiencia más alta, que se obtuvo para el modo bomba, se da para un caudal de 0.10 [m³/s]. Mientras que, para el modo turbina, se dio para 0.126 [m³/s]. - La eficiencia hidráulica es ligeramente superior en la fase experimental, esto porque en la simulación en CFD, las pérdidas por fricción, filtraciones, rodamientos, empaques, etc., no son contabilizadas. - La predicción numérica de la eficiencia es bastante similar si el caudal es cercano al BEP, sin embargo, la desviación es mucho mayor cuando el flujo es bajo.</p>
Rossi y Renzi	<p>2017, Libera Università di Bolzano, Piazza Università 1,</p>	<p>Rangos: - Q=0.008 – 0.222 [m³/s] - H=1.99 – 99.52 [m] - n=750 – 2 445 [rpm]</p>	<p>- Determinar un método analítico general para predecir el desempeño de la PAT (bomba en modo turbina).</p>	<p>- La eficiencia de la bomba funcionando como turbina es como máximo 10% menor al valor que se obtiene respecto al funcionamiento como bomba.</p>

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
	Bolzano – Italia	<ul style="list-style-type: none"> - $d_{\text{rodete}}=0.165 - 0.30$ [m] - $n_s=0.17 - 2-39$ - $\eta=0.43 - 0.87$ 		<ul style="list-style-type: none"> - El coeficiente de flujo es como mínimo 80% del valor en su BEP.
Ye, Li y Wang	2009, Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang – China	<ul style="list-style-type: none"> - $Q=35.0$ [m³/h] - $H=70$ [m] - $n=2\ 900$ [rpm] - $\eta=54\%$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Mejorar la eficiencia de una bomba centrífuga de baja velocidad específica, tanto experimentalmente como a través de simulaciones. - Se definen álabes con hendiduras y su influencia en la eficiencia de la bomba. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se determina la eficiencia de la bomba mediante ecuaciones, y esta es generalmente superior a la que se determina a través de experimentación. - En general, la eficiencia de la bomba con hendiduras es superior que el caso de los álabes que no tienen dichas hendiduras. - La eficiencia hidráulica es ligeramente superior en la fase experimental, esto porque en la simulación en CFD, las pérdidas volumétricas y las pérdidas por fricción del disco son ignoradas.
Zhou, Shi y Wu	2013, National Research Center of Pumps – Pumping System Engineering – Technology,	Rangos: <ul style="list-style-type: none"> - $Q=7.0 - 60.0$ [m³/h] - $H= 15.0 - 50.0$ [m] 	<ul style="list-style-type: none"> - Mejorar el desempeño hidrodinámico de una bomba centrífuga, a través de un experimento ortogonal, optimizando los parámetros de diseño del rodete. 	<ul style="list-style-type: none"> - Comparado con la bomba original, la eficiencia y altura de la bomba óptima tiene una mejora significativa. - El número de parámetros y el número de niveles se decide, la tabla ortogonal apropiada puede ser seleccionado. Muchas

Investigador	Año y ubicación	Características	Objetivos	Resultados
	<p>Jiangsu university, Zhenjiang – China Department of Mechanical engineering – Materials Science, Washington University, St. Louis – USA</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Predecir el rendimiento de la bomba, para lo cual se emplea el código comercial CFD (computational fluid dynamics) que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo fijo tridimensional. - Seleccionar parámetros geométricos como factores de investigación. - Capturar a través del método de análisis de variación, la combinación del mejor parámetro para una eficiencia más alta. 	<p>tablas ortogonales predefinidas se encuentran en referencias relativas. Estas tablas fueron creadas usando un algoritmo desarrollado por Taguchi y permite para cada variable y ajuste ser ensayadas igualmente.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Las tablas ortogonales $L_{16}(4^5)$ y son usados para estructurar los experimentos, cinco factores son evaluados a la vez y cada factor tiene cuatro niveles. - La bomba óptima tiene una eficiencia de 67.55% y 30.93 m de altura. La bomba original tiene una eficiencia de 64.11% y una altura 29.21 m. - El incremento en la eficiencia es de 5.4%, entre la bomba óptima y la original. - El incremento de la altura es de 5.9%, entre la bomba óptima y la original.

2. METODOLOGÍA

2.1. Pequeña generación hidroeléctrica

Debido a que las plantas hidroeléctricas pequeñas están sujetas a consideraciones de diseño semejantes a las plantas de mayor capacidad, su costo por kilovatio de energía desarrollada tiende a ser alto [47].

Con el objetivo de que estas pequeñas facilidades sean económicamente factibles se requiere un diseño imaginativo e innovador. Estos diseños innovadores son concebidos por diseñadores que consideran los requisitos globales de operación y mantenimiento de la central. Como las facilidades hidroeléctricas tienen altos costos iniciales, con frecuencia existe una tendencia fuerte para ahorrar, usando mínima ingeniería en estos sistemas. En realidad, el porcentaje del costo total del proyecto dedicado a la ingeniería debe ser significativamente más elevado para las plantas pequeñas en comparación con las plantas más grandes. Si esto no se cumple, tanto el diseño como el material y el equipamiento en las alternativas consideradas, no podrán conducir a un diseño final de costo mínimo. Así mismo, el tipo de mantenimiento necesario y su costo, debe recibir suficiente consideración ya que las facilidades hidroeléctricas son diseñadas usualmente para durar entre 40 a 50 años. En este punto cabe mencionar que, históricamente han funcionado por periodos de tiempo mucho mayores al antes mencionado [47].

2.2. Criterios de diseño

Generalmente, la potencia a instalarse se la determina luego de un estudio de demanda; no obstante, para el presente estudio dicha condicionante no existe debido a que las comunidades al momento son abastecidas por el sistema nacional interconectado. En este sentido, se busca aprovechar al máximo tanto el recurso hídrico disponible (caudal), como la altura de caída que estará en función de la topografía del lugar.

2.2.1. Caudal

La cantidad de agua que escurre en un río varía a lo largo del año. Esta variación de caudal obedece a múltiples factores entre los que destacan: el área de la cuenca, las condiciones climáticas existentes, la topografía del terreno y las características geológicas de la cuenca.

Las mediciones ocasionales del caudal son referencias importantes que deben tomarse en cuenta, pero por sí solas no son suficientes para informarnos si el año será muy seco o muy lluvioso, o a qué niveles de caudal puede bajar el río en época de estiaje y hasta qué niveles podría subir en temporada invernal.

Un estudio hidrológico de la cuenca podría contestar estas preguntas y muchas otras, pero debido a que la hidrología no es una ciencia exacta, por lo general las respuestas se dan en forma probabilística de ocurrencia.

Análisis estadístico de la información hidrométrica

El registro de la variación del caudal a lo largo del año se toma de estaciones de aforo, las cuales están ubicadas en el cauce de los ríos. En muchas de estas estaciones se toman los datos durante el transcurso del día. Un registro de aforos de varios años resulta de gran utilidad para poder predecir las variaciones estacionales del caudal.

Este análisis consiste en elaborar primero tablas de frecuencias agrupando los datos en clases o rangos. Estas tablas se representan finalmente en la curva de duración general (CDG).

Curva de duración general (CDG)

Muestra la probabilidad como un porcentaje de tiempo de todo el período de aforos; en el cual el caudal es igual o menor al correspondiente a dicho porcentaje de tiempo.

El periodo de retorno es un parámetro significativo que debe ser tomado en cuenta al momento de dimensionar una obra hidráulica; se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada, este periodo se considera como el inverso de la probabilidad. Así tenemos:

$$T = \frac{n_{ar} + 1}{m_o} \quad [\text{años}] \quad (2.1)$$

$$P = \frac{m_o}{n_{ar} + 1} = \frac{1}{T} \quad [-] \quad (2.2)$$

donde:

T = período de retorno [años]

n_{ar} = número de años de registro [-]

m_o = número de orden [-]

P = probabilidad [-]

2.2.2. Caída

La caída o carga necesaria se ha estimado en función de la topografía existente en la zona, para esto se ha buscado el sector que tenga la mayor diferencia de altura con el fin de aprovechar dicha caída.

2.3. Diseño de obras civiles

2.3.1. Obras de captación

Rejillas

Al borde de la conducción se tendrá que ubicar una rejilla para la captación de agua, dicha captación se realizará a través de un orificio que debe ubicarse en una de las orillas, mismo que estará provisto de barrotes verticales que serán lo suficientemente resistentes para que impidan la entrada de material flotante grueso, piedras e impacto de troncos (con frecuencia traídos por las crecientes) estos barrotes deben encontrarse al ras o sobresalir un poco de la cara del muro a fin de facilitar la limpieza del material flotante, que con frecuencia obstruye la reja. El orificio forma parte del muro que separa al desripador del río, así mismo se prolonga aguas abajo hasta conectarse con la compuerta de purga. El umbral del orificio debe estar a una altura mayor a los 60 – 80 [cm] medidos desde el fondo del río, mientras que el dintel debe llegar hasta una altura superior a la de mayor creciente. Por esto los barrotes se hacen de rieles, varillas de acero o de hormigón armado (con un ancho no menor de 10 [cm]). La ubicación de la reja deberá tener una cierta distancia aguas arriba del azud a fin de que durante la construcción que espacio para poder colocar una ataguía [50].

El muro en el cual se encuentra la reja, frecuentemente se construye perpendicularmente a la dirección del azud, en otras palabras, es paralelo a la dirección del río. Pese a esto es beneficioso darle una inclinación respecto a la dirección del río, tanto para facilitar la construcción del muro (función de terreno) y también para mejorar las condiciones hidráulicas [50]. A continuación, se muestran algunas de las ecuaciones necesarias para el dimensionamiento de la reja de entrada:

- el ancho libre b necesario para la reja, se determina mediante:

$$Q_d = k \cdot S \cdot M \cdot b_r \cdot h_r^{3/2} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.3)$$

donde:

$$Q_d = \text{caudal de diseño [m}^3/\text{s]}$$

k = coeficiente de contracción lateral producida por la presencia de los barros (0.85)

S = coeficiente de corrección por sumersión, ver *Tabla 2.1*

M = coeficiente de descarga, ver *Tabla 2.2*

b_r = ancho efectivo de la reja [m]

h_r = altura de la reja [m]

*los coeficientes S & M se encuentran en función de la descarga, sea esta libre o sumergida.

Tabla 2.1. Valores del coeficiente de sumersión “S” para vertederos con perfil hidrodinámico.

h_n / H	S						
0,40	0,990	0,66	0,930	0,80	0,790	0,94	0,449
0,45	0,986	0,68	0,921	0,82	0,756	0,95	0,412
0,50	0,980	0,70	0,906	0,84	0,719	0,96	0,369
0,55	0,970	0,72	0,889	0,85	0,699	0,97	0,318
0,60	0,960	0,74	0,869	0,86	0,677	0,98	0,254
0,62	0,955	0,75	0,858	0,88	0,629	0,99	0,138
0,63	0,950	0,76	0,846	0,90	0,575	1,00	0,000
0,65	0,940	0,78	0,820	0,92	0,515		

(Fuente: Krochin, 1968)

Tabla 2.2. Corrección paramento vertical – Ofizeroff.

H_o / H_{od}	Corrección
0,2	0,842
0,4	0,842
0,6	0,940
0,8	0,973
1,0	1,000
1,2	1,024
1,4	1,045
1,6	1,064
1,8	1,082
2,0	1,099

(Fuente: Krochin, 1968)

- de manera alternativa se puede emplear el criterio de Bazin-Villemonste:

$$Q_d = K_o \cdot K_s \cdot K_r \cdot b_r \cdot h_r^{3/2} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.4)$$

siendo:

$$K_0 = \left(1.793 + \frac{0.044}{h_r} \right) \left[1 + 0.55 \left(\frac{h_r}{h_r + P_1} \right)^2 \right] \quad [-]$$

$$K_s = \left[1 - \left(\frac{h_n}{h_r} \right)^{1.5} \right]^{0.385} \quad [-]$$

$$K_r = 0.85 \quad [-]$$

donde:

K_0 = coeficiente de descarga del vertedero

K_s = coeficiente por sumergencia

K_r = coeficiente de contracción (rejilla)

P_1 = elevación de la cresta del vertedero aguas arriba [m]

h_n = elevación del agua sobre la cresta del vertedero aguas abajo [m]

Para determinar el número de barrotes se procederá de la siguiente manera:

$$N_1 = \frac{b_r}{e_b} \quad [u]$$

$$N_2 = N_1 - 1 \quad [u]$$

$$B_r = N_1 \cdot t + N_2 \cdot \varphi \quad [m]$$

donde:

Φ_b = diámetro de los barrotes [m]

e_b = espaciamiento entre barrotes [m]

N_1 = número de espacios libres [u]

N_2 = número de barrotes [u]

b_r = ancho libre de la rejilla [m]

B_r = ancho bruto de la rejilla [m]

B_1 = ancho bruto adoptado [m]

Azud

El azud de derivación posee una sección transversal trapezoidal, entre los múltiples beneficios de esta se encuentra su aporte a la estabilidad; con el fin de reducir la presión sobre el cimacio o la parte superior del paramento se adopta un perfil que se encuentre sometido a una presión casi nula en cualquier punto; esto último es lo que se procura conseguir con el perfil Creager. En otras palabras, por razones de estabilidad, usualmente se ha optado por un azud cuyo perfil sea trapezoidal, ligeramente redondeado en su parte superior para facilitar el paso del agua. El perfil del azud es

posible calcularlo en base a la *Tabla 2.3*, valores que han sido determinados para $H_o = 1.0$ [m], en el caso en que H_o sea diferente; tanto las abscisas como las ordenadas deberán ser multiplicadas por H_o . Siendo, H_o la carga total de agua sobre la cresta (incluye la carga correspondiente a la velocidad de llegada) [50].

Tabla 2.3. Coordenadas para perfil Creager – Ofizeroff para $H_o = 1,0$.

x	Ordenada inferior de la lámina	Ordenada del azud	Ordenada superior de la lámina	x	Ordenada inferior de la lámina	Ordenada del azud	Ordenada superior de la lámina
0,0	0,126	0,126	-0,831	2,1	1,456	1,369	0,693
0,1	0,036	0,036	-0,803	2,2	1,609	1,508	0,975
0,2	0,007	0,007	-0,772	2,3	1,769	1,654	1,140
0,3	0,000	0,000	-0,740	2,4	1,936	1,804	1,310
0,4	0,007	0,006	-0,702	2,5	2,111	1,960	1,500
0,5	0,027	0,025	-0,655	2,6	2,293	2,122	1,686
0,6	0,063	0,060	-0,620	2,7	2,482	2,289	1,880
0,7	0,103	0,098	-0,560	2,8	2,679	2,463	2,120
0,8	0,153	0,147	-0,511	2,9	2,883	2,640	2,390
0,9	0,206	0,198	-0,450	3,0	3,094	2,824	2,500
1,0	0,267	0,256	-0,380	3,1	3,313	3,013	2,700
1,1	0,355	0,322	-0,290	3,2	3,539	3,207	2,920
1,2	0,410	0,393	-0,219	3,3	3,772	3,405	3,160
1,3	0,497	0,477	-0,100	3,4	4,013	3,609	3,400
1,4	0,591	0,565	-0,030	3,5	4,261	3,818	3,660
1,5	0,693	0,662	0,090	3,6	4,516	4,031	3,880
1,6	0,800	0,764	0,200	3,7	4,779	4,249	4,150
1,7	0,918	0,873	0,305	3,8	5,049	4,471	4,400
1,8	1,041	0,987	0,405	3,9	5,326	4,699	4,650
1,9	1,172	1,108	0,540	4,0	5,610	4,930	5,000
2,0	1,310	1,235	0,693	4,5	7,150	6,460	6,540

(Fuente: Krochin, 1968)

Otra forma mediante la cual se puede obtener el perfil del azud es mediante las fórmulas y ecuaciones de la *Figura 2.1*. (US Army Waterways Experimental Station, 1959; US Bureau of Reclamation, 1987). En cualquier caso, la fórmula general para calcular el caudal que pasa a través del vertedero es:

$$Q = M \cdot b_c \cdot H_o^{3/2} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.5)$$

donde:

Q = caudal (descarga) [m³/s]

M = coeficiente de descarga

b_c = longitud efectiva de la cresta [m]

H_o = carga total de agua sobre la cresta (incluye la carga correspondiente a la velocidad de llegada)

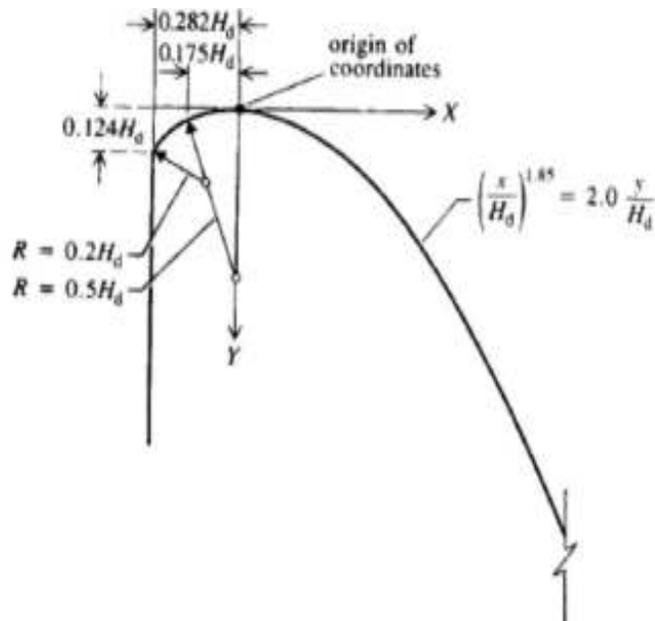


Figura 2.1. Forma de cresta estándar para vertedero.
(Fuente: Novak P., 2007)

Coeficiente de descarga

El valor del coeficiente de descarga para el perfil Creager es $M = 2.21$; sin embargo, este varía en función de diversos factores, entre los que se tienen [50]:

- La profundidad de llegada
- La relación de la forma real de la cresta a la lámina ideal
- El talud del paramento aguas arriba
- Interferencias aguas abajo
- Tirante o profundidad de la corriente aguas abajo

Para el caso de un vertedero libre de cresta delgada, el valor del coeficiente puede ser calculado con la siguiente fórmula:

$$M_o = \left(0.407 + \frac{0.045}{H + y_1} \right) \left[1.0 + 0.285 \left(\frac{H}{H + y_1} \right)^2 \right] \sqrt{2 \cdot g} \quad [-] \quad (2.6)$$

donde:

y_1 = elevación de la cresta sobre el fondo, aguas arriba [m]

H = carga total de agua sobre la cresta [m]

El subíndice "o" del coeficiente M , significa que la velocidad de aproximación está incluida en el mismo y no es necesario añadirla en la carga H . El valor del coeficiente M es válido para el parámetro vertical y para un caudal que pasa por una carga H_{od} , misma que se ha utilizado en el diseño. Así cuando el valor de H_o es diferente o sencillamente varía, el

coeficiente M debe ser ajustado, los valores de corrección (Ofizeroff) para el parámetro vertical [50], se observan en la *Tabla 2.2*.

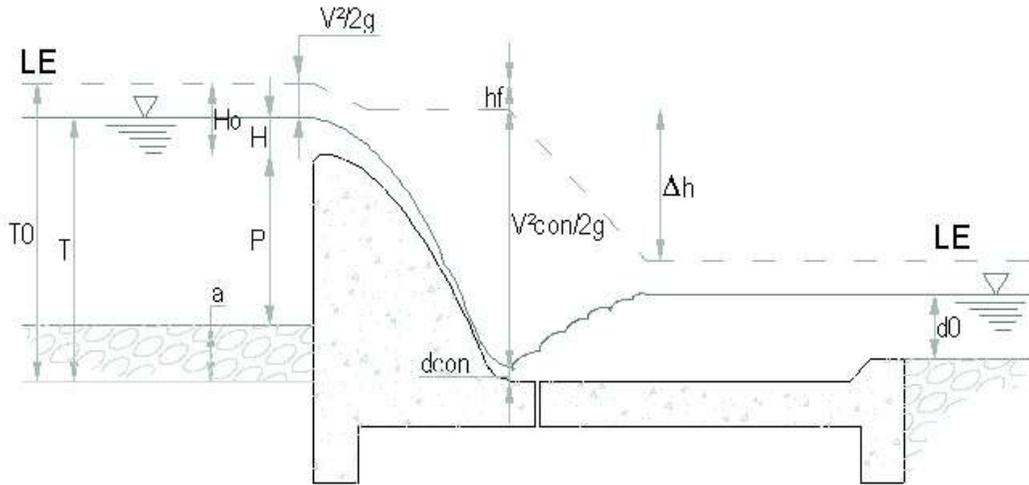


Figura 2.2. Resalto hidráulico.
(Fuente: OLADE, 1985)

Así también, el valor del coeficiente de descarga (M), es válido únicamente si la descarga es libre. Para el caso en que el azud quede sumergido, M deberá ser multiplicado por un factor de corrección S [50](ver *Tabla 2.1* & *Figura 2.2*).

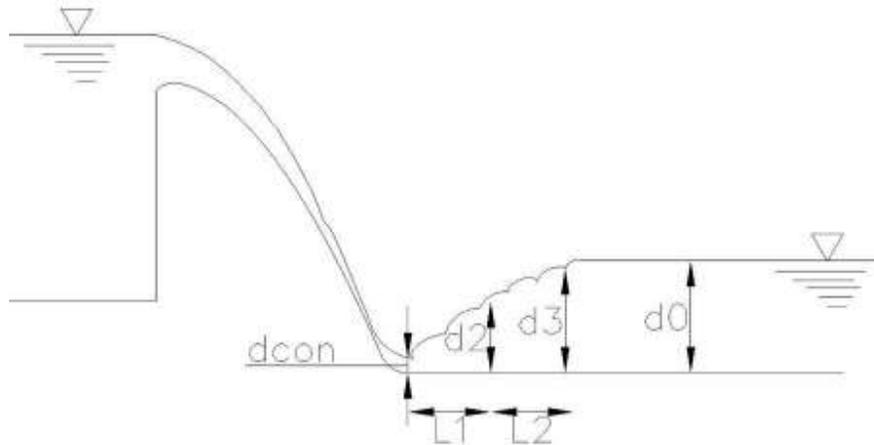


Figura 2.3. Tipos de resalto hidráulico – calados conjugados (d_2 y d_3).
(Fuente: OLADE, 1985)

Disipación de energía

a) Resalto hidráulico

La interrupción del flujo de un río usando un azud, provoca una diferencia de energía aguas arriba y aguas abajo; dicha diferencia puede provocar daños sobre las obras (erosionándolas, por ejemplo). Se busca entonces proteger el cauce, disipando la energía antes de que llegue a la zona no protegida [50].

La protección en el pie se encuentra en función de algunos factores como: altura del nivel de agua (respecto al lecho del río), caudal, condiciones hidráulicas del río, del tipo de material que existe en el cauce, materiales de la zona, etcétera. La disipación de energía mediante el resalto hidráulico es la que mejores resultados produce, la ecuación que se muestra a continuación se resuelve por aproximaciones sucesivas [50]:

$$\frac{Q}{d_{con} \cdot b_c} = k_p \cdot \sqrt{2 \cdot g |T_0 - d_{con}|} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.7)$$

El valor del coeficiente k_p de pérdidas puede tomarse:

$$k_p = \begin{cases} 0.85 - 0.95 & \text{(presencia de compuertas)} \\ 0.90 - 1.0 & \text{(azud sin compuertas)} \end{cases}$$

b) Tipos de resalto hidráulico

Las alturas d_2 y d_3 se denominan calados conjugados del resalto, se tiene entonces:

- Caso 1: $d_2 > d_{con}$, entonces $d_3 > d_0$; resalto rechazado, esta condición no es recomendable pues habría que proteger $L_1 + L_2$.
- Caso 2: $d_2 = d_{con}$, entonces $d_3 = d_0$; el resalto se forma al pie del vertedero y se necesita revestir únicamente L_2 .
- Caso 3: $d_2 < d_{con}$, entonces $d_3 < d_0$, resalto sumergido, se protege el tramo L_2 , este tipo de resalto es el más económico en cualquier diseño.

Para poder calcular los calados conjugados se utilizan las siguientes fórmulas:

$$d_3 = \frac{d_2}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot q^2}{g \cdot d_2^3}} \right] [m] \quad (2.8)$$

$$d_2 = \frac{d_3}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{8 \cdot q^2}{g \cdot d_3^3}} \right] [m] \quad (2.9)$$

donde:

$$q = \text{caudal unitario} = Q / b \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$g = \text{gravedad} = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Para el primer caso en que $d_3 > d_0$; es necesario sumergir el resalto, para esto es necesario profundizar el zampeado (delante al pie del azud) una profundidad e , lo suficiente para que la siguiente relación se cumpla $d_3 < d_0 + e$; esto significa que:

$k_{sca} \cdot d_3 = d_0 + e$, siendo k_{sca} un coeficiente de seguridad que toma el valor entre 1.10 y 1.20. El valor de e (profundidad del colchón de agua) que se forma al pie del azud, se puede calcular con la fórmula:

$$e_c = k_{sca} \cdot d_2 - d_0 \quad [m] \quad (2.10)$$

Otra manera de conseguir la sumersión del resalto es disponiendo el zampeado del azud en contrapendiente.

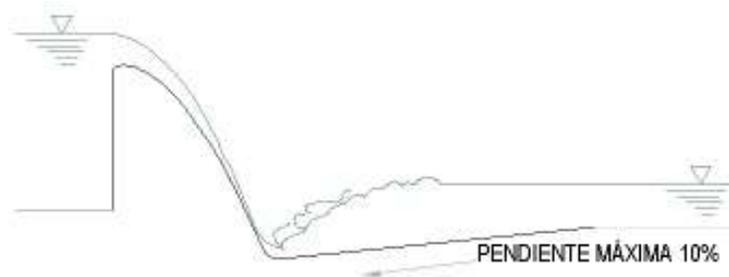


Figura 2.4. Sumersión del resalto hidráulico a contrapendiente.
(Fuente: OLADE, 1985)

c) Longitud del resalto

El resalto se forma cuando el zampeado cumple o tiene una longitud mínima, para esto se tienen algunas fórmulas experimentales:

$$L = 2.5 \cdot (1.9 \cdot d_2 - d_{con}) \quad [m] \quad (2.11)$$

$$L = K_{LR} \cdot (d_3 - d_2) \quad [m] \quad (2.12)$$

donde, para la ecuación 2.12:

K = coeficiente derivado de estudios laboratorio y experiencia en campo, $4.50 < K < 5.50$; el valor más bajo de K se aplica cuando $F_r > 10$ y el mayor cuando $F_r < 3$. Esto sucede porque para números de Froude bajos (supercríticos) el salto no se desarrolla completamente y puede llegar a ser inestable, esta es la principal dificultad para un diseño económico, dimensionadas sin un modelo físico de estudio.

d) Cálculo de la altura del diente al final del zampeado

$$h_d = 0.08 \cdot H^{2/3} \cdot P \quad [m] \quad (2.13)$$

e) Obras de protección de aguas abajo del colchón

De acuerdo con el Bureau of Reclamation la expresión que se muestra a continuación permite saber el tamaño del material que se debe usar para la protección en la zona de aguas abajo del zampeado.

$$D_m \geq \frac{1.40}{\Delta} \left(\frac{v_a^2}{2 \cdot g} \right) \quad \Leftarrow \quad \Delta = \frac{\gamma_{sol} - \gamma_w}{\gamma_w} \quad (2.14)$$

donde:

D_m = diámetro medio del material con el que se debe proteger el cauce [m]

v_{aa} = velocidad en condiciones uniformes aguas abajo [m/s]

γ_{sol} = peso específico del material [kg/m³]

γ_{agua} = peso específico del agua [kg/m³]

f) Profundidad de protección aguas abajo del colchón

Se encuentra en función directa del material que se tiene en el lecho.

$$d_s = [1.75 a 2.25] \cdot 1.34 \cdot \left(\frac{q^2}{1.76 \sqrt{d_m}} \right)^{1/3} \quad [m] \quad (2.15)$$

donde:

d_m = diámetro medio de las partículas existente en el lecho del río [m]

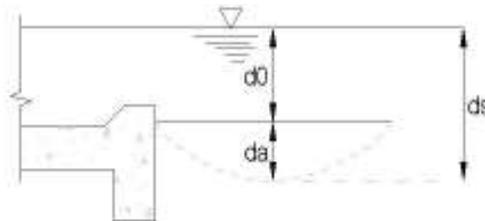


Figura 2.5. Protección aguas abajo del colchón de aguas.

(Fuente: OLADE, 1985)

g) Longitud de la protección aguas abajo del colchón

Como su propio nombre lo indica es la protección que se dará al lecho del río, aguas abajo del mismo.

$$L_c = [1.50 a 2.0] \cdot d_s \quad [m] \quad (2.16)$$

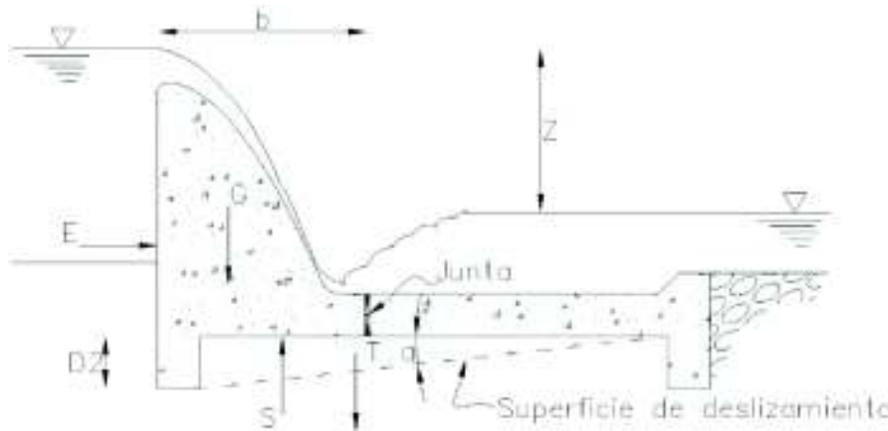


Figura 2.6. Cargas externas actuando sobre el azud.

(Fuente: Propia)

Estabilidad

Habitualmente el lecho del río se encuentra conformado por arena, grava o incluso arcilla, resultando así muy poco frecuente el caso de azudes apoyados en roca. Es por este motivo que es necesario comprobar la estabilidad del azud, en otras palabras, debe revisarse el efecto que las fuerzas a las que está sometida la estructura no produzcan hundimientos, deslizamientos o volcamientos [50], de la *Figura 2.6* se tiene:

E = empuje hidrostático [Ton]

G = peso del azud hasta la junta [Ton]

S = subpresión, debida al flujo del agua bajo el azud, a mayor diferencia de nivel (z) existe un mayor valor de subpresión. Así mismo, si existe un mayor recorrido de las líneas de corriente, el valor de S será menor [Ton]

T = peso de la tierra, ubicada sobre el plano (superficie) de deslizamiento [Ton]

Para un predimensionamiento, Popov (Construcciones Hidráulicas, Moscú) recomienda que la relación entre el ancho del azud b y la carga Z que actúe sobre el mismo, se encuentre dentro de los rangos que se muestran en la *Tabla 2.4*. Una vez que se realice el pre-dimensionamiento es necesario comprobar la estabilidad del mismo. Es muy habitual que el azud se encuentre separado del zameado a través de una junta de construcción, es por este motivo que el cálculo de estabilidad se lo realiza de forma individual [50].

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, las principales fuerzas consideradas son el empuje del agua E , el peso propio del azud G y la subpresión S . En este sentido, se debe aclarar que debido a la forma característica del azud, el agua pasa por encima de este sin ejercer ninguna presión, es así que no se considera al agua que pasa sobre el vertedero, dentro del cálculo [50].

Tabla 2.4. Relación ancho vs. carga en un azud.

Material del cauce	b/z
Arcillas	2,75 - 3,00
Franco arcilloso	2,50 - 2,75
Limo y arena	2,25 - 2,50
Grava y canto rodado	2,00 - 2,25

(Fuente: Popov, 1950)

a) Estabilidad del deslizamiento

De manera general, el coeficiente de estabilidad al deslizamiento resulta de la relación entre las fuerzas que se oponen al empuje generado por el agua (principalmente), así tenemos:

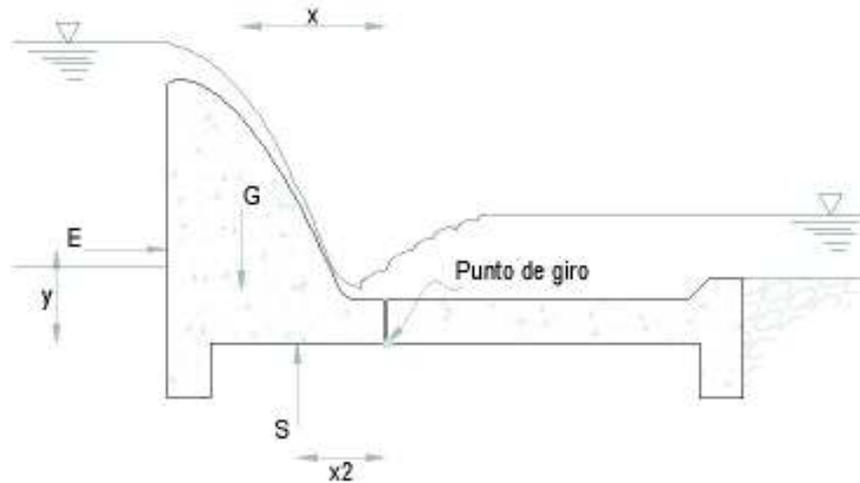


Figura 2.7. Cargas externas actuando sobre el azud.
(Fuente: Propia)

Fuerzas que se oponen al deslizamiento

Todas aquellas fuerzas que contrarrestan el empuje del agua y la componente en el sentido horizontal de la subpresión.

$$G \cdot \text{sen}(\alpha) + T \cdot \text{sen}(\alpha) + f \cdot [G \cdot \text{cos}(\alpha) + T \cdot \text{cos}(\alpha) + E \cdot \text{sen}(\alpha) - S \cdot \text{cos}(\alpha)]$$

Tabla 2.5. Coeficiente de fricción (hormigón sobre diversos tipos de suelo).

Suelo	f
Roca	0,60 - 0,70
Grava	0,50 - 0,60
Arena	0,40 - 0,50
Limo	0,30 - 0,40
Arcilla	0,20 - 0,30

(Fuente: Popov, 1950)

Fuerzas a favor del deslizamiento

Las fuerzas que favorecen al movimiento (deslizamiento), el empuje del agua *E* y la componente horizontal de la Subpresión *S*. El equilibrio de estos dos grupos de fuerzas da como resultado el factor de deslizamiento:

$$K_d = \frac{G \cdot \text{sen}(\alpha) + T \cdot \text{sen}(\alpha) + f \cdot \Sigma N}{S \cdot \text{sen}(\alpha) + E \cdot \cos(\alpha)} \geq 1.20 \quad (2.17a)$$

El análisis deberá hacerse para distintos valores de α ; hasta encontrar el valor de K_d (mayor que 1.20). Nótese que en caso de no cumplirse la condición anterior habría que aumentar la profundidad del dentellón (D_2).

b) Estabilidad al volcamiento

Un azud que soporta el deslizamiento es estable, pero además, debe comprobarse también la estabilidad al volcamiento. El coeficiente K_v , denominado coeficiente de estabilidad al volcamiento, se define así:

$$K_v = \frac{G \cdot x}{E \cdot y + S \cdot x_2} = [1.30 \text{ a } 1.50] \quad (2.17b)$$

c) Esfuerzo portante del suelo

$$\eta_s = \frac{\Sigma N}{A} + \frac{6 \cdot \Sigma M_0}{A \cdot b} \leq \eta_{adm} \quad (2.17c)$$

donde:

η_s = esfuerzo portante calculado del suelo [Ton/m²]

ΣN = sumatoria de las fuerzas verticales [Ton]

ΣM_0 = sumatoria de momentos, respecto al centro de la fundación [Ton-m]

A = Área de la fundación [m²]

b = ancho de la fundación [m]

El valor que se obtiene debe ser comparado con la capacidad portante del suelo.

Sedimentadores

Una alternativa debido al bajo caudal que transporta el canal es la no construcción del desripador y desarenador por separado, sino reemplazar las dos estructuras por una sola cámara sedimentadora que ejecute estas dos funciones simultáneamente [51].

Ventajas

El beneficio más importante, que se tiene de separar los sólidos suspendidos en el agua, es que se eliminan los perjuicios que la presencia de estos conlleva hacia las obras civiles y turbomaquinaria. Algunos de estos perjuicios son [51]:

- Aumentar la rugosidad de los canales de conducción con su correspondiente decremento de velocidad.
- Disminuir la sección de los canales debido al azolvamiento del fondo.

- Presentar azolvamiento en tanques de reserva y tanques de presión, disminuyendo la capacidad (volumen) y eficiencia de los mismos.
- Ocasionar erosión por abrasión en los conductos de presión, aumentando notablemente su rugosidad.
- Disminuir la eficiencia de las turbinas a causa del desgaste.

Recomendaciones

- El diámetro de las partículas más pequeñas a ser retenidas debe estar comprendido entre 0.10 a 0.40 [mm].
- Con el objetivo de poder eliminar los sedimentos del fondo, es necesario la presencia de una compuerta que se conecte con el canal de desfogue.
- La gradiente o pendiente del fondo debe variar entre el 2.0 a 6.0 % para conseguir una velocidad alta de lavado, que pueda principalmente arrastrar sólidos (ejemplo: piedras).
- El coeficiente de rugosidad debido a la presencia de sedimentos en el fondo es de 0.020
- En el caso de minicentrales no es necesario construir un canal directo debido al tamaño de las obras.
- La sección transversal de la cámara sedimentadora debe ser preferentemente rectangular, tomando en consideración las siguientes relaciones:

$$\text{profundidad media / ancho} \geq 1.50$$

$$\text{largo / ancho} \geq 4.0$$

- La velocidad de circulación debe tener un valor de entre 0.10 a 0.40 [m/s].
- La longitud de la cámara debe cumplir con:

$$L_{cs} \geq \frac{h_{mcs} \cdot v_{cs}}{w_s} \quad [m]$$

donde:

$$h_{mcs} = \text{profundidad media [m]}$$

$$v_{cs} = \text{velocidad de circulación [m/s]}$$

$$w_s = \text{velocidad de sedimentación [m/s]}$$

- La eficiencia del sedimentador (k_s) se encuentra en función de la importancia de la obra, variando entre 1.20 a 1.50
- La velocidad de circulación del agua deberá ser menor a 1.0 [m/s], cuando exista un vertedero a la salida de la cámara.
- El área superior de la cámara debe ser:

$$A_{scs} \geq \frac{Q_{pcs}}{w_s} \quad [m^2] \quad (2.18)$$

donde:

Q_{pcs} = caudal de paso [m^3/s]

w_s = velocidad de sedimentación [m/s]

Procedimiento de diseño

- 1) Velocidad de sedimentación.- se encuentra en función directa del diámetro de las partículas a remover (d) y de la temperatura del agua (T).
- 2) Ancho de la cámara:

$$Q_{pcs} = a_{cs} \cdot v_{cs} \rightarrow b_{cs} = \frac{Q}{v \cdot h} \quad [m] \quad (2.19)$$

- 3) Longitud de la cámara

$$L_{cs} = \frac{k_s \cdot v_{cs} \cdot h_{mcs}}{w_s} \quad [m] \quad (2.20)$$

- 4) Pérdidas

$$h_{fcs} = \frac{v_{cs}^2 \cdot n^2 \cdot L_{cs}}{R^{4/3}} \quad [m] \quad (2.21)$$

Condiciones de lavado

Producto de las tareas de mantenimiento de la central, las condiciones de lavado se producirán periódicamente. Para lograr este objetivo, es necesario interrumpir el funcionamiento de la central, esto debido a que no existen canales directos. Una vez que la compuerta de entrada a la tubería de presión sea cerrada (accionando a su vez los dispositivos electromecánicos correspondientes), se puede habilitar las compuertas de las diferentes obras (en forma progresiva), hacia atrás del tanque de presión [51].

Durante el lavado se producirán altas velocidades lo que puede provocar erosión en las paredes y fondo, pero dicha velocidad se debe considerar sólo para los canales de conducción, esto debido a que en los sedimentadores el tiempo de exposición (revestimiento soportando altas velocidades) es muy corto en relación con el tiempo de funcionamiento de la central. Es necesario entonces, evaluar el calado en condiciones de lavado a través de la ecuación de Manning [51]:

$$Q_l = \frac{b_{cs} \cdot h_l}{n} \frac{(b_{cs} \cdot h_l)^{2/3}}{(b_{cs} + 2 \cdot h_l)^{2/3}} \cdot J^{1/2} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.22)$$

donde

$Q_l =$ caudal en condiciones de lavado [m^3/s] = $Q_l = 1.20 Q_d$

$h_l =$ calado en condiciones de lavado [m]

A fin de conocer la capacidad de arrastre de los sedimentadores resulta apropiado emplear el criterio del esfuerzo cortante [51]:

$$d = \frac{\sigma_c \cdot \gamma_{agua} \cdot R \cdot J}{7.1} \quad [m] \quad (2.23)$$

donde:

$d =$ diámetro de la partícula de mayor tamaño a ser arrastrada [m]

$\sigma_c =$ esfuerzo cortante [N/m^2]

$\gamma_{agua} =$ peso específico del agua = 9 800 [N/m^3]

$R =$ radio hidráulico [m]

$J =$ pendiente del fondo [-]

2.3.2. Obras de conducción

Transiciones

En todo cambio de sección transversal, será necesario una transición. El objetivo fundamental de la transición es variar la forma de la corriente, provocando la uniformización del flujo (con una longitud eficiente), en otras palabras una distribución plana de velocidades; además sirve para evitar la menor pérdida de energía. Se entiende entonces que la variación de la sección transversal debe ser gradual, evitando dejar aristas vivas [51].

Las transiciones rectas son recomendadas debido a la facilidad constructiva principalmente, adicional a esto se tiene que las pérdidas ocasionadas no son mayores. En este caso el ángulo de divergencia no debe ser mayor a 12.50° [51].

Procedimiento de diseño

1) Longitud de la transición (L_t):

$$L_t = \frac{B_1 - B_2}{2 \cdot \tan \alpha_t} \quad [m] \quad (2.24)$$

donde:

$B_1 =$ ancho mayor (sedimentador) [m]

$B_2 =$ ancho menor (canal) [m]

$\alpha_t =$ ángulo de divergencia [$^\circ$]

2) Pérdida de nivel de agua (h_{ft}):

$$h_{ft} = k_t \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (2.25)$$

donde:

k_t = coeficiente = 1.30 (transición recta)

v_2 = velocidad en el canal [m/s]

v_1 = velocidad en el sedimentador [m/s]

Canal de conducción

El objetivo de la conducción es transportar el agua desde la toma en el río (canal) hasta el Tanque de Presión; dicha conducción puede hacerse a gravedad (canales o tuberías) o a presión. La primera opción es más económica, adicionalmente cabe destacar que para pequeños caudales, del orden de los 30 [l/s] o menos, la conducción a través de tubería es recomendable [51].

Recomendaciones [51]

- La sección transversal debe ser trapezoidal o rectangular, siendo estas últimas las recomendadas para obras en general como el caso de mini o micro centrales hidroeléctricas.
- La inclinación de los taludes (1/m) depende del material en que se excava el canal, el valor de "m" puede variar entre 0.0 (rectangular) y 1.5 (trapezoidal).
- En el caso de canales de pequeña magnitud, el diseño hidráulico se lo realiza considerando que el flujo es permanente – uniforme, utilizando la ecuación de Manning.
- Con el objetivo de evitar la sedimentación y erosión, la velocidad admisible del agua debe estar entre 0.70 a 2.50 [m/s]. Para el caso de pequeños canales de hormigón se puede llegar a velocidades de 10.0 [m/s].
- Para canales de hormigón se recomienda utilizar 0.016 como valor para el coeficiente de Manning.
- A fin de evitar pérdidas excesivas por evaporación, es recomendable emplear un calado mínimo de 25 [cm].
- Por razones constructivas el ancho mínimo es de 25 [cm]. A este valor debe añadirse el espesor del revestimiento para la determinación del ancho de la zanja.
- Por razones económicas las secciones menos anchas y más profundas se prefieren. Normalmente b/d varía entre 0.80 y 1.30; el valor más empleado b/d=1.0

- A fin de garantizar que el régimen sea subcrítico, la pendiente del canal puede variar entre valores de 0.0005 y 0.01; adicionalmente a esto, de preferencia la pendiente será única.
- Adicional al calado, la profundidad del canal debe tener una altura de seguridad, misma que puede variar entre el 5.0 y el 30.0 % del calado; incrementándose cuanto mayor es el caudal y la velocidad.
- En las zonas donde existan peligros de deslizamientos localizados, se recomienda el uso de canales rectangulares, con losetas armadas de hormigón de 5.0 [cm] de espesor.
- Las pérdidas por infiltración deben ser despreciables, para esto se debe revestir el canal con materiales como: hormigón (de mayor uso), plástico, materiales asfálticos, terrocemento. Este último tiene buenas propiedades mecánicas, bajo costo y durabilidad.

Procedimiento de diseño [51]

- 1) Trazado: es muy similar al de una vía (carretera), con la única diferencia que siempre tienen pendiente positiva. Se parte desde la cota inicial y se siguen las curvas de nivel; deben procurarse conducciones cortas, evitando curvas pronunciadas y gradientes fuertes. Como parte del trazado debe considerarse todas las obras necesarias tales como: cunetas, pasos de agua, drenes, aliviaderos, etc.
- 2) Diseño hidráulico: se utiliza la pendiente obtenida del trazado, y la ecuación de Manning:

$$Q = \frac{A}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

- 3) Revestimiento: se tomará un valor equivalente al 6.0% del calado, pero siempre mayor a 10 [cm].
- 4) Curvas horizontales: para unir dos alineaciones, se lo hará a través de una curva circular de radio "r", así:

$$\frac{r}{b_{cc}} > 3.0$$

Por efecto de la curvatura, se presenta la fuerza centrífuga, haciendo que la superficie del agua se incline, subiendo en la parte cóncava de la curva; por este motivo, la altura de esta pared del canal debe elevarse.

$$\tan(\alpha_c) = \frac{v^2}{r \cdot g} \quad \rightarrow \quad x = \tan(\alpha_c) \cdot b_{cc}$$

donde:

$\tan(\alpha_c)$ = pendiente transversal de la superficie de agua

x = sobre elevación del agua [m]

b_{cc} = ancho del canal [m]

Con el fin de no producir una alteración al flujo, se recomienda dar un pequeño peralte al fondo del canal, mismo que tendrá un ángulo α . Esta inclinación del fondo debe hacerse en forma gradual, en función del radio de curvatura. Sin embargo, es conveniente mencionar que el peralte que se dé al canal, es válido para una sola velocidad, y los disturbios en el flujo se producirán de todos modos con caudales diferentes al de diseño [51].

2.3.3. Sistemas de presión

Tanque de presión

El caudal de agua que viene por el canal es constante, sin embargo el caudal consumido por la planta varía en función de la carga. Así tenemos que en las horas pico se consume la totalidad del caudal; el resto del tiempo el caudal que llega a través del canal es mayor que el necesario para la generación eléctrica, es entonces óptimo que el nivel de agua en el tanque de presión debe estar sobre el vertedero de excesos [50].

Es decir que el canal tiene a la entrada un calado d_1 (constante), y a la salida un calado d_2 (variable) los casos probables se listan a continuación [50]:

- 1) la cota al final del canal es igual a la de la entrada, o sea $d_2 = d_1 + i.L$. Es entonces entendible que el nivel del agua es horizontal y $Q = 0$.
- 2) los dos caudales son iguales $d_1 = d_2$ por ende, la línea del fondo y del agua son paralelas, la gradiente hidráulica es igual a la geométrica; y el caudal es similar al del diseño $Q = Q_0$.
- 3) Si la cota de agua en el tanque baja del valor anterior; el flujo en el canal se hace acelerado y la superficie del agua en el canal sigue una curva de remanso D_2 . El caudal aumenta ($Q > Q_0$) hasta llegar a un valor máximo, cuando $d_2 = d_{CR}$ (d_{CR} : calado crítico). En ese momento el caudal no puede aumentar más aunque la cota del agua en el tanque disminuya por debajo del valor indicado. Debido a que el caudal máximo es mayor que aquel que entra al canal, el tanque comienza a vaciarse. Siendo además, la diferencia entre el caudal máximo y el normal muy pequeña, debido a la gran curvatura y por lo tanto pequeña longitud de la curva

formada. Este caso no debe producirse, ya que la planta se encuentra diseñada para un caudal máximo igual a Q_0 .

- 4) Existe un caso intermedio, en el que el nivel del agua se encuentra entre los casos 1 & 2, la superficie del agua sigue una curva D_1 y el flujo es retardado, el caudal es por lo tanto inferior al de diseño. Por ende, si la demanda de la planta aumenta (caudal máximo Q_0) y el caudal del canal es $Q < Q_0$, durante un lapso de tiempo la diferencia de caudales $Q - Q_0$, será suministrada con el vaciado del tanque. Se trata entonces de darle al tanque de presión un volumen lo bastante grande, para que pueda mantener el caudal en la tubería de presión; durante el tiempo en que el flujo dentro del canal aumenta y pasa de Q a Q_0 .

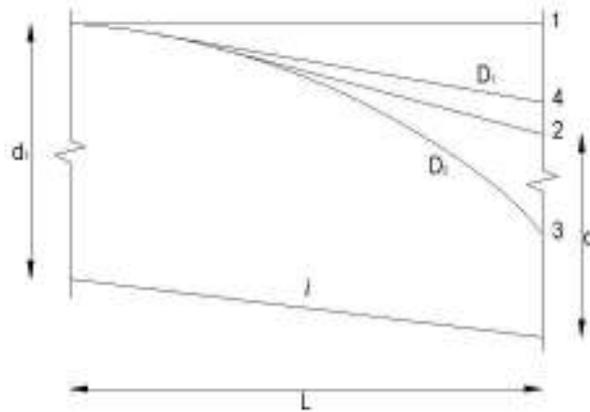


Figura 2.8. Calado a la entrada (d_1) y salida (d_2) del tanque de carga.
(Fuente: Propia)

Procedimiento de diseño [51]

- i. *Volumen útil del tanque.*- Se considera como volumen útil del tanque, al volumen necesario que el tanque de presión debe tener por encima del nivel mínimo aceptable de agua. Teóricamente se debe escoger entre el mayor de los que se proponen a continuación, no obstante algunas veces se obtienen valores muy elevados, por lo que se adopta un volumen que cumpla con las condiciones de sumergencia de la tubería de presión en el diseño geométrico.
- a) un volumen que considera un vaciado hipotético de la tubería de presión:

$$V_{\text{útil}} = \frac{F \cdot Q_d \cdot V_t}{v_t \cdot A_t} \quad (2.26a)$$

donde:

F = factor que considera una fracción del volumen que puede llegar por la conducción del tanque

Q_d = caudal de diseño [m^3/s]

V_t = volumen de la tubería de presión [m^3]

v_t = velocidad en la tubería de presión [m/s]

A_t = área de la tubería de presión [m²]

b) un volumen necesario para una demanda instantánea de la central

$$V_{\text{útil}} = \frac{0.693 \cdot A_c \cdot v_0^2}{i_{cc} \cdot g} \quad [m^3] \quad (2.26b)$$

donde:

A_c = sección transversal del canal [m²]

v_0 = velocidad media en el canal de conducción [m/s]

i_{cc} = pendiente del canal de conducción [-]

g = gravedad [m/s²]

c) un volumen tomando en cuenta el tiempo de desalojo de las aguas del tanque de presión ($t=3.0$ [min])

$$V_{\text{útil}} = 180 \cdot Q_d \quad [m^3] \quad (2.26c)$$

ii. *Vertedero de paso*.- el estanque amortiguador de llegada y el reservorio, deben comunicarse a través de un vertedero sumergido que se diseña con la fórmula de Bazin-Villemonte (ver *obras de captación*)

iii. *Sedimentador*.- el reservorio del tanque de presión se diseñará como un sedimentador, con el objeto de asegurar la eliminación de cualquier partícula que sea arrastrada a través del canal de conducción (ver *obras de captación – sedimentador*).

iv. *Pérdidas* se evalúan de igual manera que en el sedimentador (ver *obras de captación - sedimentador*).

Vertedero de paso

Para diseñar el vertedero de paso se debe hallar el nivel del agua en el estanque de llegada, para lo cual se evalúan las pérdidas de energía en el punto en que el canal desemboca en el primero, usando la fórmula empleada para cambios de sección [51]:

$$h_{fe} = K \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad [m] \quad (2.27)$$

donde:

K = factor que depende de la velocidad y tipo de ensanchamiento

v_{cc} = velocidad en el canal de conducción [m/s]

Cámara de carga

Es la estructura que facilita el ingreso del agua a la tubería de presión [51].

Procedimiento de diseño [51]

- i. Altura de seguridad (h_s).- se tomará el mayor valor de las siguientes:
 - a) altura de sumergencia (h'_s).- es la altura necesaria para evitar la entrada de aire a la tubería

$$h'_s = \frac{k_{su} \cdot v_t^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (2.28a)$$

donde:

k_{su} = factor que está entre 2 y 3

v_t = velocidad del agua en la tubería de presión [m/s]

- b) formación de vórtices.- es importante calcular una altura mínima de agua sobre la tubería, para evitar la formación de vórtices. Según Redoy-Pickford se tienen las siguientes alturas:

$$h'_{sc} = \frac{v_t}{\sqrt{g \cdot \phi_t}} \cdot \phi_t \quad [m] \quad (2.28b)$$

donde:

h'_{sc} = altura de sumergencia crítica

$v_t / \sqrt{g \cdot \phi_t}$ = número de Froude especial, definido del flujo de entrada

ϕ_t = diámetro de la tubería de presión [m]

y

$$h'_{SR} = \left(mR + \frac{v_t}{g \cdot \phi_t} \right) \cdot \phi_t \quad [m] \quad (2.28c)$$

donde:

h'_{SR} = altura de sumergencia requerida [m]

mR = factor de diseño que se toma igual a 0.50

- ii. Altura sobre el fondo (h_F).- es la altura que se tiene entre el fondo de la cámara de carga y la parte baja de la tubería de presión, se recomienda el siguiente valor:

$$h_F = 0.30 \cdot h_s \quad [m] \quad (2.28d)$$

- iii. Altura total de la cámara (H_T)

$$h_T = h_s + \varphi_t + h_F \quad [m] \quad (2.28e)$$

- iv. Nivel del agua.- la cota a la que llegará el agua en la cámara de carga puede ser calculada con la fórmula para orificios sumergidos, y aplicándola a la rejilla del tanque de presión.

Entrada de aire

La tubería de presión y las turbinas no admiten la entrada de aire (perjudicial para el funcionamiento), motivo por el cual se intenta evitarla. En un gran número de ocasiones en el tanque de presión junto a la entrada de la tubería de presión se forman remolinos por cuyo embudo ingresa el aire, para evitar este fenómeno, el agua debe estar a una cierta altura (mínima) sobre la tubería. Según Gómez Navarro (Saltos de agua y presas de embalse, Madrid, 1964) el valor mínimo sobre la tubería a la cual debe ubicarse el agua es [50]:

$$h_{sa} = \frac{10 \cdot v_t^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (2.29a)$$

Aplicando Bernoulli se tiene:

$$h_{sa} = \frac{3}{2} \frac{v_t^2}{2 \cdot g} \quad [m] \quad (2.29b)$$

donde:

v_t = velocidad en la tubería de presión [m/s]

Normalmente la velocidad en la tubería varía entre $2.0 \text{ [m/s]} \leq v_t \leq 8.0 \text{ [m/s]}$, tenemos que la altura puede variar entre $0.31 \text{ [m]} \leq h_{sa} \leq 4.90 \text{ [m]}$, en la práctica se recomienda que h sea superior 1.0 [m]. Un estudio muy completo acerca de la formación de remolinos, Polikovski y Perelman determinaron que la no formación depende de [50]:

$$h_{sa} > 0.50 \cdot \varphi_t \cdot \left(\frac{v_t}{\sqrt{g \cdot \varphi_t}} \right) \quad [m] \quad (2.29c)$$

donde:

φ_t = diámetro de la tubería de presión a la entrada [m]

Rejillas

A fin de evitar la entrada de materiales flotantes en la tubería de presión, se instalan rejillas finas entre la tubería y el tanque de carga (presión). Las rejillas se elaboran generalmente de pletinas de hierro de 50 x 5 mm ó de 60 x 6 mm (sección) unidas mediante varillas de acero. Cuando las dimensiones son grandes, se colocarán apoyos intermedios (perfiles de acero) las rejillas se instalan en paneles de 0.50 [m] de ancho,

aunque a veces llegan a tener hasta 3.0 [m]. La separación dependerá del tipo de turbina, de acuerdo con Sokolov D.Y. (Aprovechamiento de energía hidráulica, Moscú, 1965) recomienda la separación entre barrotes en función del tipo de turbina [50] (ver *Tabla 2.6*).

Tabla 2.6. Separación entre barrotes.

<i>turbina</i>	<i>Separación [mm]</i>	
	<i>desde</i>	<i>hasta</i>
de Hélice	50	200
Francis	32	100
Pelton	20	65

(Fuente: Sokolov, 1965)

La limpieza de las rejillas se hace por medio de rastrillos especiales y para facilitarla, dichas rejillas deberán estar inclinadas con la horizontal en un ángulo *A*. Este valor depende de la forma en cómo se va a realizar la limpieza [50].

Tabla 2.7. Angulo de inclinación (*A_r*) de la rejilla.

<i>Ángulo A</i> [°]	<i>Tipo de</i> <i>limpieza</i>
50 – 55	a mano
70 – 76	mecánica

(Fuente: Krochin, 1968)

Las pérdidas que se producen en las rejillas se calculan mediante la fórmula propuesta por Kirschmer:

$$h_{fr} = k_r \left(\frac{\varphi_b}{e_b} \right)^{4/3} \frac{v_r^2}{2 \cdot g} \text{Sen}(A_r) \quad [m] \quad (2.30a)$$

donde:

\varnothing_b = grueso del barrote [m]

e_b = separación entre barrotes [m]

v_r = velocidad de aproximación. Este valor habitualmente se toma entre (0.50 – 1.20) [m/s]; en obras grandes se admite hasta 2.50 [m/s]

k_r = coeficiente que varía según la forma de la sección transversal del barrote. Para pletinas comunes de sección rectangular $k_r = 2.42$. Si se redondean las esquinas de la parte frontal de las pletinas este valor baja a 1.83

Esta fórmula es válida, si la rejilla está colocada perpendicularmente a la dirección del flujo; cuando este último cambia de dirección las pérdidas crecen considerablemente. Así para una inclinación de 60° el valor de las pérdidas puede incrementarse hasta diez veces [50].

El Bureau of Reclamation de los Estados Unidos, propone otra fórmula [50]:

$$h_{fr} = 1.32 \left(\frac{\varphi_b \cdot v_{rd}}{e_b + \varphi_b} \right) \text{Sen}(A_r) \cdot [\text{Sec}(C)]^{13/8} \quad [m] \quad (2.30b)$$

donde:

h_{fr} = pérdidas en las rejillas [in]

φ_b = grueso del barroto [in]

v_{rd} = velocidad después de la rejilla [ft/s]

e_b = separación entre barrotes [in]

C = ángulo entre la dirección del flujo antes de la rejilla y la normal a la misma.

Este ángulo debe ser menor a 90°.

Tubería de presión

Cálculo del diámetro

Un estudio económico determinará el diámetro necesario para la tubería de presión. A mayor diámetro las pérdidas hidráulicas (en la tubería) son menores y mayor es la potencia que se puede obtener del salto o diferencia de alturas [50]. Así se tiene:

$$P_t = g \cdot Q \cdot (h_b - h_{fh}) \cdot \varepsilon \quad [kW] \quad (2.31)$$

donde:

P_t = potencia teórica [kW]

Q = caudal, flujo de agua [m³/s]

h_b = altura bruta de la caída, disponible para la turbina/generador [m]

h_{fh} = pérdida hidráulica [m]

ε = eficiencia total del sistema turbina/generador

Así mismo mientras menor es el diámetro, menos cuesta la tubería; por ende, es necesario realizar el cálculo con varios diámetros dentro de un margen admisible de velocidades, estableciendo costos de la tubería y las pérdidas de energía por concepto de resistencias hidráulicas. La suma de los dos valores da como resultado una curva, cuyo mínimo corresponde al diámetro más conveniente en términos económicos [50].

Este cálculo es trabajoso, pues se deben tomar en cuenta factores de carga variable, considerar la eficiencia de la planta, establecer el costo futuro de la energía, etcétera.

Una evaluación analítica muy refinada no es justificable, pues varios datos considerados son inciertos. Por esta razón se han desarrollado algunas fórmulas que son lo suficientemente exactas para un diseño preliminar. Así se tiene también que según Mannesman Röhren Werke el diámetro más económico está dado por [50]:

- Para la altura de caída $H < 100$ [m]

$$\varphi_{te} = \sqrt[7]{0.052 \cdot Q^3} \quad [mm] \quad (2.32a)$$

- Para altura de caída $H > 100$ [m]

$$\varphi_{te} = \sqrt[7]{\frac{5.2 \cdot Q^3}{H}} \quad [mm] \quad (2.32b)$$

donde:

Q = caudal [m^3/s]

h = altura de caída bruta [m] $\Rightarrow H = h + h_1$

h_1 = sobrepresión debida al golpe de ariete = $h_1 = \frac{0.15 \cdot L_t \cdot v_t}{t_c}$ [m]

L_t = longitud de la tubería [m]

v_t = velocidad del agua [m/s]

t_c = tiempo de cierre de la válvula de la turbina [s] = $t_c > \frac{L_t}{500}$

Por otro lado, existe también la posibilidad de calcular el valor del diámetro de la tubería, en función de un análisis económico en términos del monto de capital invertido y el valor de capitalización de la pérdidas de energía, así según el estudio hecho por Hahlbusch (1982) establece que se puede computar un diámetro económico con una seguridad de cerca del $\pm 10\%$ a través de:

$$\varphi_{te} = 0.52 \cdot H_n^{-0.17} \left(\frac{P}{H_n} \right)^{0.43} \quad [mm] \quad (2.32c)$$

donde:

P = es la capacidad nominal de la planta [kW]

H_n = es la carga nominal [m]

\varnothing_{te} = diámetro económico [m]

Las anualidades de amortización se calculan mediante la fórmula [50]:

$$a_m = \frac{C_i \cdot r \cdot (1+r)^{na}}{(1+r)^{na} - 1} \quad [USD] \quad (2.33)$$

donde:

C_i = costo inicial = [USD]

r = interés expresado como tanto por uno [%]

n_a = número de años en que se paga la deuda [u]

El espesor de la tubería se encuentra definido por [50]:

$$e_t = \frac{1.25 \cdot \gamma_{agua} \cdot h_{agua} \cdot \varphi_{int}}{2 \cdot S} \pm e_0 \quad [mm] \quad (2.34)$$

donde:

γ_{agua} = densidad del agua [ton/m³]

h_{agua} = carga de agua [m]

φ_{int} = diámetro interior de la tubería [mm]

S = esfuerzo de trabajo del material (frecuentemente acero) [kg/cm²]

Instalación de tubería [51]

La instalación de las tuberías de presión puede realizarse de dos maneras:

- 1) al aire libre
- 2) enterradas.

Los pilares de soporte, los anclajes y los bloques de empuje cumplen la misma función básica: dar el peso necesario para contrarrestar las fuerzas del fluido que podrían hacer provocar desplazamientos en la tubería, y provocar daños en la misma [48].

Tabla 2.8. Espaciamiento entre apoyos [m] para tubería de acero comercial.

espesor	diámetro				
	100	200	300	400	500
	[mm]				
2	2.0	2.0	2.5	3.0	3.0
4	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0
6	4.0	4.5	5.0	6.0	6.0

(Fuente: ITDG-Perú, 1995)

El soporte de tubería sostiene el peso de esta última y del agua que contiene. Los anclajes sirven para mantener en tierra a la tubería, así como para fijarla y evitar los movimientos laterales. El bloque de empuje se usa en codos de tuberías enterradas a fin de transmitir las fuerzas al suelo. Los apoyos o soportes deben construirse de manera tal que permitan el movimiento longitudinal de la tubería al contraerse o dilatarse debido a

cambios de temperatura. Los soportes tienen que ser construidos sobre suelo firme y no en un relleno. La superficie de contacto del apoyo con el suelo de cimentación debe estar calculada para soportar el peso sin exceder el límite de capacidad de resistencia del suelo. Además, es necesario hacer canaletas de drenaje a lo largo de la tubería para evitar la erosión de los cimientos de los soportes [48].

Espaciamiento de soportes

Se debe calcular el máximo espaciamiento entre los soportes de la tubería, para que la deformación de ésta se encuentre dentro de los límites establecidos [48].

Tuberías de acero

Lo importante en este caso es el sistema de unión. Para cualquier método de acoplamiento flexible se requiere de un soporte por pieza. En el caso de bridas que tengan norma ISO, las tuberías pueden ser consideradas como una sola pieza [48].

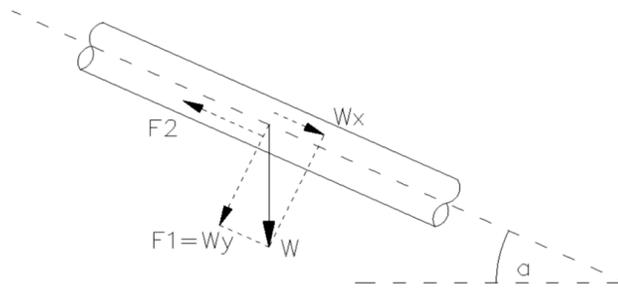


Figura 2.9. Fuerzas que intervienen en los apoyos.
(Fuente: Propia)

Cálculo de apoyos [48]

a) Fuerzas que intervienen

W = peso de la tubería más peso del agua, por unidad de longitud

W_x = fuerza longitudinal, paralela al tubo

W_y = fuerza perpendicular al tubo

$F_1 = W_y$ = componente del peso del tubo con agua por unidad de longitud perpendicular al tubo

F_2 = fuerza de fricción entre el tubo y el apoyo, originada por W_y .

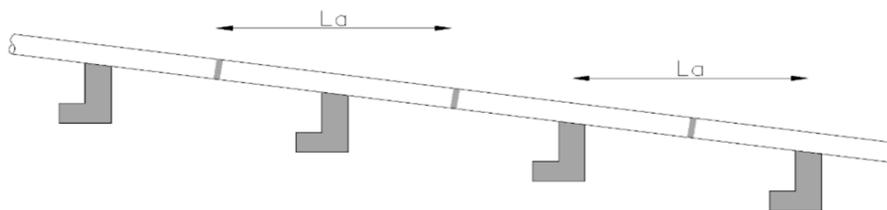


Figura 2.10. Distancia entre apoyos o puntos medios (L_a).
(Fuente: Propia)

b) Cálculo de las fuerzas

$$F_1 = (W_t + W_a) \cdot L_a \cdot (\alpha) \quad [\text{Ton}] \quad (2.35a)$$

$$F_2 = \mu \cdot F_1 \quad [\text{Ton}] \quad (2.35b)$$

donde:

W_t = peso de la tubería por unidad de longitud [Ton/m]

W_a = peso del agua en la tubería por unidad de longitud [Ton/m]

μ = coeficiente de fricción entre la tubería y hormigón (acero y hormigón)
[0.50 – 0.60]

L_a = distancia entre los apoyos o entre los puntos medios de 2 tramos consecutivos [m]

α_i = ángulo de inclinación de la tubería, respecto de la horizontal [°]

c) Deflexiones

$$\Delta = \frac{5}{384} \frac{W \cdot L_a^4}{E \cdot I} < \frac{L_a}{360} \quad [mm] \quad (2.36)$$

donde:

E = Módulo de elasticidad del material de la tubería [Ton/m²]

I = Momento de inercia de la sección [m⁴]

finalmente, la estabilidad del apoyo debe cumplir con:

$$S_{base} = \frac{R_y}{A} \cdot \left(1 \pm \frac{6 \cdot e}{b} \right) < S_{adm} \quad \left[\frac{\text{Ton}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.37)$$

donde:

R_y = reacción vertical del suelo contra el apoyo [Ton]

b_a = largo de la base del apoyo [m]

A_a = área de la base del apoyo [m²]

e = excentricidad de la reacción vertical [m] => $e = x - \frac{b}{2}$

x = distancia de R_x al punto de referencia [m]

R_x = reacción horizontal del suelo contra el apoyo [Ton]

Cálculo de anclajes

Los anclajes son bloques de hormigón que envuelven a la tubería de presión con el propósito de fijarla al terreno; por esta razón, deben resistir cualquier fuerza que la tubería ejerza sobre ellos. Con frecuencia, estos cambios se ubican en aquellos lugares donde hay cambios de dirección, pendiente, o donde existen cambios de sección [48].

Al diseñar los anclajes, es necesario tener en cuenta los cambios de pendiente; en función de esta última se pueden clasificar o existen dos tipos de anclajes: hacia afuera y hacia adentro [48].

Los anclajes hacia adentro influyen favorablemente en su estabilidad, ya que los esfuerzos debidos a la desviación del movimiento del agua actúan contra el terreno. En cambio, en los anclajes hacia afuera, los esfuerzos actúan en el otro sentido: en dirección al aire o hacia fuera del terreno [48].

En este último caso, es importante conocer bien la magnitud de los ángulos y el tipo de suelo donde se ubican. En ocasiones habrá que añadir a la tubería otros elementos de fijación (armaduras, anillos, etcétera) que garanticen que el hormigón no se desprenda por encima del tubo. Las fuerzas que actúan sobre los anclajes son [48]:

- a) Componente del peso de la tubería con agua, perpendicular al eje de la tubería
Esta fuerza es similar a la fuerza F_1 considerada para los apoyos. Para el cálculo del anclaje, deben considerarse los dos tramos de tubería: el que está aguas arriba y el que se encuentra aguas abajo del anclaje.

$$F_1 = (W_t + W_a) \cdot L_1 \cdot \cos(\alpha_{AA}) \quad [Ton] \quad (2.38a)$$

donde:

L_1 = distancia del anclaje al punto medio del tramo considerado [m]

α_{AA} = ángulo de inclinación del tramo de tubería analizado, aguas arriba del anclaje [°]

β_{aa} = Ídem, en el caso del tramo de tubería aguas abajo del anclaje [°]

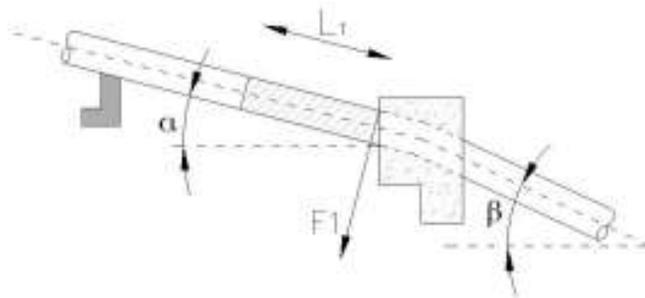


Figura 2.11. Cálculo de la fuerza F_1 .
(Fuente: Propia)

- b) Fuerza de fricción entre la tubería y los apoyos
Esta fuerza existe sólo en el caso de que existan uno o más apoyos entre el anclaje y la junta de dilatación.

$$F_2 = \mu \cdot (W_t + W_a) \cdot L_2 \cdot \cos(\alpha_{AA}) \quad [Ton] \quad (2.38b)$$

donde:

L_2 = longitud de la tubería sujeta a movimiento [m]

α_{AA} = ángulo de inclinación de la tubería aguas arriba del anclaje [°]

β_{aa} = ángulo de inclinación de la tubería aguas abajo del anclaje [°]

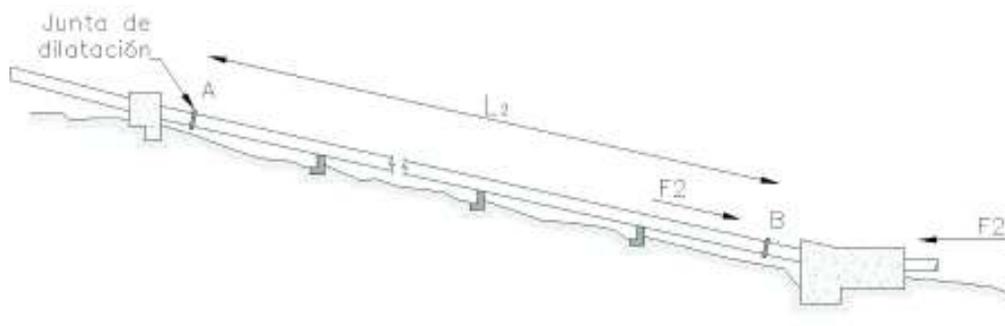


Figura 2.12. Cálculo de la fuerza F_2 .
(Fuente: Propia)

c) Fuerza en los cambios de dirección debido a la presión hidrostática

$$F_3 = 1.6 \times 10^3 \cdot h_{ta} \cdot \varphi_{int}^2 \cdot \text{sen} \left(\frac{\beta_{aa} - \alpha_{AA}}{2} \right) \quad [\text{Ton}] \quad (2.38c)$$

donde:

h_{ta} = presión estática en la tubería a la altura del anclaje [Ton/m²]

φ_{int} = diámetro interno de la tubería [m]

α_{AA} = ángulo de inclinación de la tubería con respecto a la horizontal en el tramo aguas arriba del anclaje [°]

β_{aa} = ángulo de inclinación de la tubería respecto de la horizontal, aguas abajo del anclaje [°]

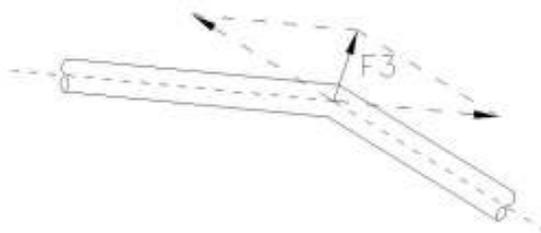


Figura 2.13. Cálculo de la fuerza F_3 .
(Fuente: Propia)

d) Componente del peso de la tubería paralela al eje de la misma

El tramo de tubería aguas arriba del anclaje, ejercerá un empuje sobre este último; mientras que el tramo aguas abajo del anclaje ejercerá una fuerza en dirección de a pendiente del terreno.

$$F_4 = W_t \cdot L_4 \cdot \text{sen}(\alpha_{AA}) \quad [\text{Ton}] \quad (2.38d)$$

donde:

L_4 = es la longitud de tubería a considerar en cada tramo. Generalmente, es el tramo entre la junta de dilatación y el anclaje. [m]

α_{AA} = ángulo de inclinación aguas arriba de la tubería (para el tramo de aguas abajo del anclaje se usa β_{aa}) [°]

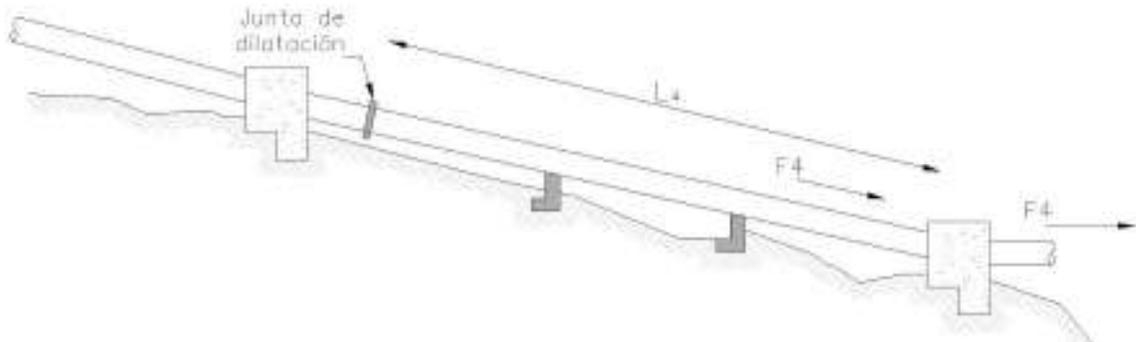


Figura 2.14. Cálculo de la fuerza F_4 .
(Fuente: Propia)

e) Fuerza debida a cambios de temperatura en la tubería

Esta fuerza se origina cuando la tubería no tiene juntas de dilatación y cuando esta se encuentra en la superficie.

$$F_5 = 31 \cdot \varphi_t \cdot e_t \cdot E \cdot a_t \cdot \Delta T \quad [\text{Ton}] \quad (2.38e)$$

donde:

φ_t = diámetro del tubo [m]

e_t = espesor de la pared del tubo [m]

a_t = coeficiente de dilatación lineal de la tubería [°C⁻¹]

ΔT = máxima variación de la temperatura [°C]

E = módulo de elasticidad de Young [Ton/m²]

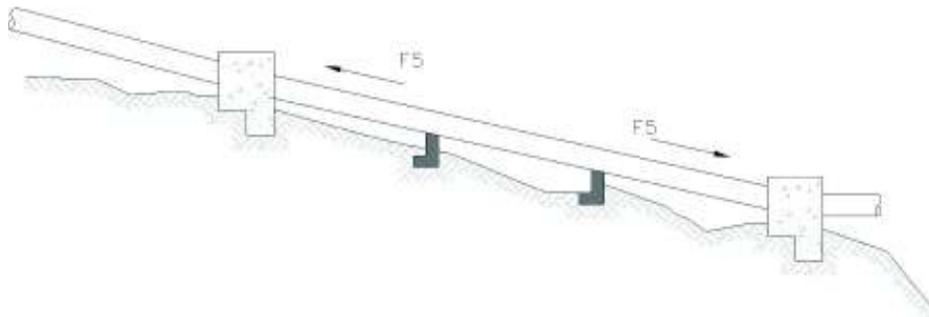


Figura 2.15. Cálculo de la fuerza F_5 .
(Fuente: Propia)

f) Fuerza de fricción en la junta de dilatación

Esta fuerza se origina entre la empaquetadura y las partes de la junta de dilatación, cuando se contrae o se dilata la tubería.

$$F_6 = 3.1 \cdot \varphi_{int} \cdot C \quad [Ton] \quad (2.38f)$$

donde:

\varnothing_{int} = diámetro interior de la tubería [m]

C = fricción en la junta de expansión por unidad de longitud de circunferencia (valor aproximado: $F_6 = 10 \cdot \varnothing_{int}$) [Ton/m]

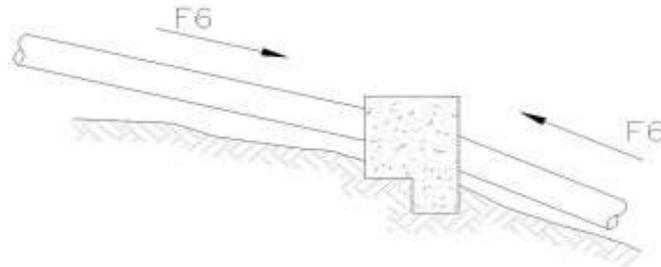


Figura 2.16. Cálculo de la fuerza F_6 .
(Fuente: Propia)

- g) Fuerza debida a la presión hidrostática dentro de las juntas de expansión
Esta fuerza es debido a la presión hidrostática que trata de separar en dos la junta de dilatación.

$$F_7 = 3.1 \cdot h_{ta} \cdot \varphi_{int} \cdot e_t \quad [Ton] \quad (2.38g)$$

donde:

h_{ta} = presión estática en la tubería a la altura del anclaje [Ton/m²]

\varnothing_{int} = diámetro interior de la tubería [m]

e_t = espesor de la pared de la tubería [m]

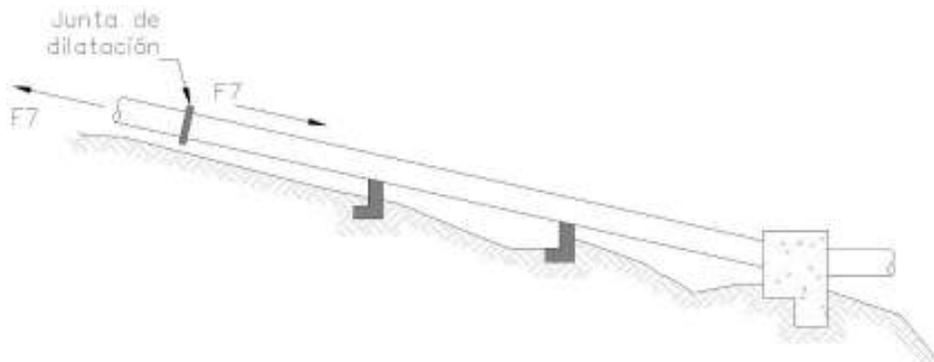


Figura 2.17. Cálculo de la fuerza F_7 .
(Fuente: Propia)

- h) Fuerza debida al cambio de dirección de la cantidad de movimiento
En los codos o cambios de pendientes, la velocidad del agua cambia de dirección. Ello ocasiona una fuerza resultante sobre el codo, la cual tiene la misma dirección y sentido que F_3 . Generalmente, la magnitud de esta fuerza es mínima, por lo que no se toma en cuenta.

$$F_8 = 250 \left(\frac{Q_d}{\varphi_t} \right)^2 \cdot \text{sen} \left(\frac{\beta_{aa} - \alpha_{AA}}{2} \right) \quad [\text{Ton}] \quad (2.38h)$$

donde:

Q_d = caudal de diseño [m³/s]

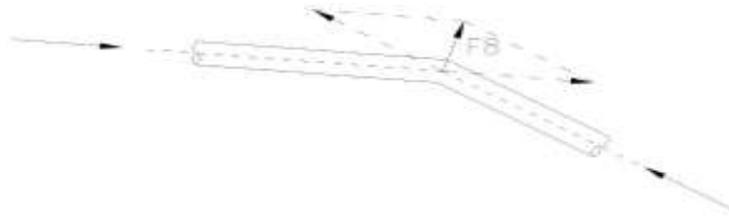


Figura 2.18. Cálculo de la fuerza F_8 .
(Fuente: Propia)

i) Fuerza debida al cambio de diámetro (reducción)

Esta fuerza actúa en el sentido de la reducción, es decir, hacia la tubería de menor diámetro.

$$F_9 = 1 \times 10^3 \cdot H_{tr} \cdot \Delta A \quad [\text{Ton}] \quad (2.38i)$$

donde:

H_{tr} = presión estática en la tubería a la altura de la reducción [Ton/m²]

ΔA = cambio de las áreas de las tuberías [m²]

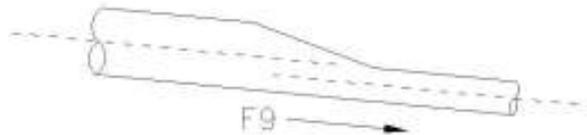


Figura 2.19. Cálculo de la fuerza F_9 .
(Fuente: Propia)

2.3.4. Casa de máquinas

Equipamiento mecánico - turbinas

En función del salto (grande o pequeño) y del caudal (variable o constante, alto o bajo), es más conveniente usar un tipo u otro de turbina. Esto es lo que nos indica el rango de utilización. Además, se debe tener en cuenta la curva de rendimiento de la turbina, que varía según sea el caudal de funcionamiento. Así, el tipo de turbina a emplear [52]:

- Kaplan.- Saltos pequeños y caudales variables
- Francis.- Saltos más elevados y variaciones de caudal moderadas
- Pelton.- Grandes saltos, independientemente de la variación del caudal

También varía el rendimiento en función del salto donde vayamos a instalar la minicentral. Generalmente, esta variación es despreciable, pero conviene analizarla, ya que para

obtener una estimación correcta de la energía producida en un aprovechamiento hay que analizar el rendimiento de la turbina en cada régimen de funcionamiento [52].

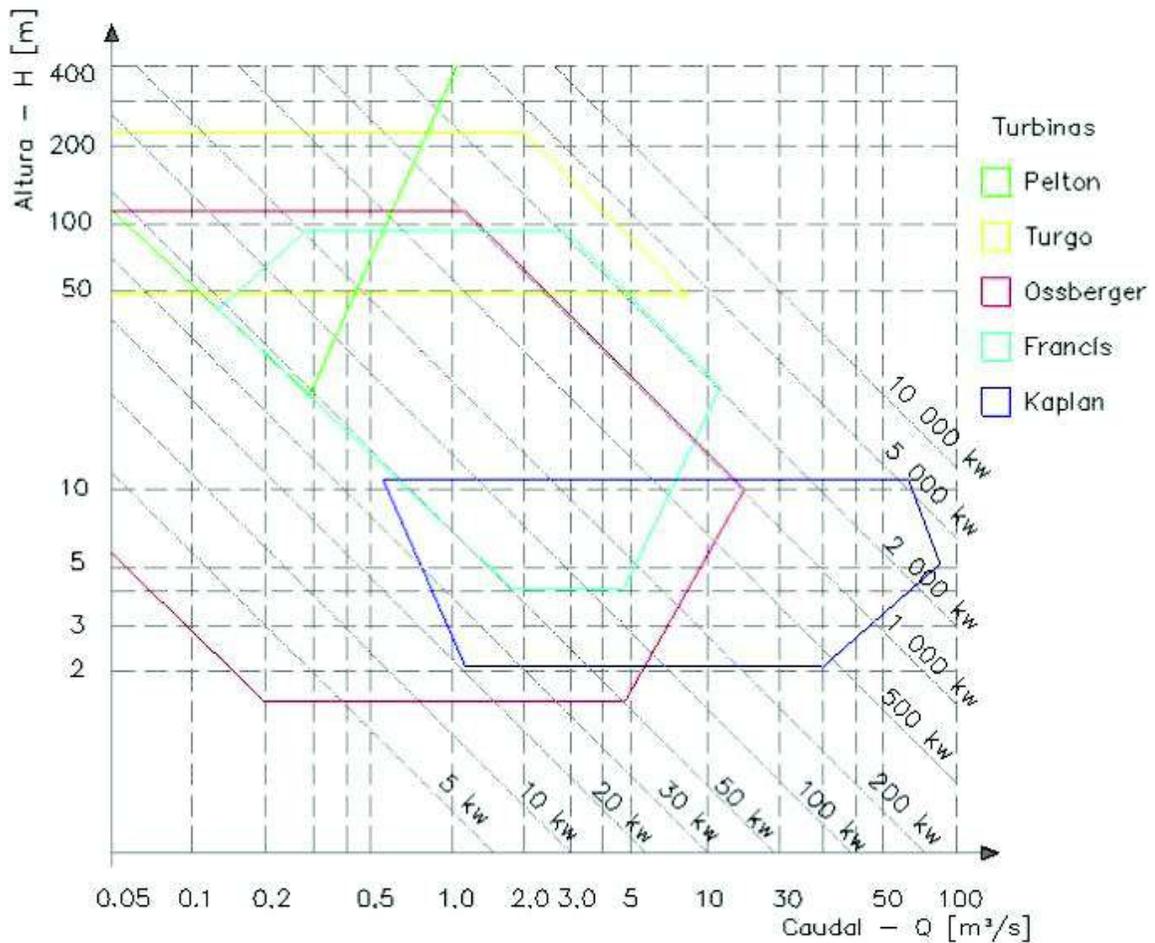


Figura 2.20. Campo de utilización de los diversos tipos de turbinas.
(Fuente: IDAE, 2006)

Área - Casa de máquinas

En la *Figura 2.21* se presenta una gráfica que permite determinar el área necesaria para la casa de máquinas de una pequeña central hidroeléctrica, esta se encuentra en función de los datos de caudal y caída o salto.

2.4. Análisis económico

2.4.1. Cronograma de construcción

El proceso de implementación de una minicentral hidroeléctrica debe ser debidamente planificado, en base a un orden de prioridades de actividades que habrán de ser desarrolladas, así como también en cuanto al tiempo que se debe ocupar en cada una de estas [51].

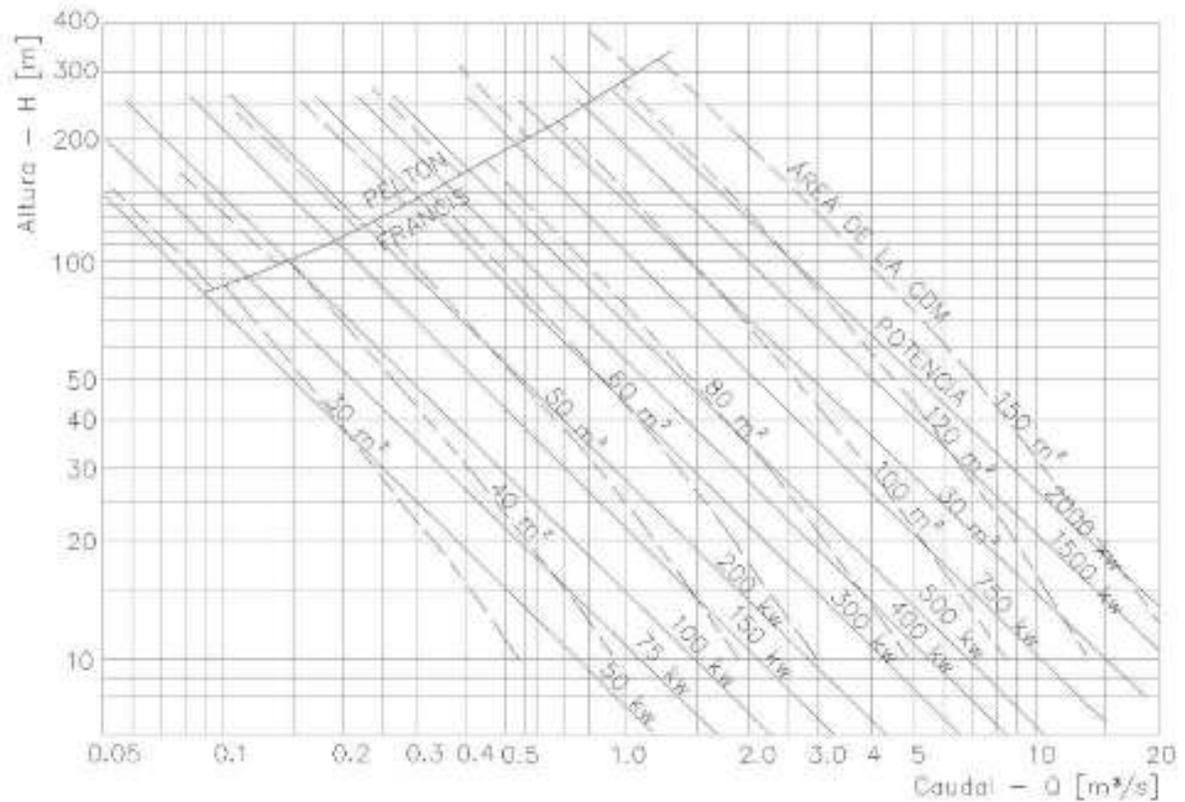


Figura 2.21. Área necesaria para casa de máquinas en una P.C.H..
(Fuente: Nozaki)

Las actividades a desarrollarse dentro del proceso de construcción, aplicables al presente estudio se muestran a continuación:

- A) Planificación de la construcción
- B) Capacitación de la población
- C) Adquisición de materiales
- D) Senderos para construcción y mantenimiento
- E) Replanteo de obras
- F) Desvío del cause y obras de conducción
- G) Sedimentador
- H) Tanque de presión
- I) Aliviaderos y canales de limpieza
- J) Tubería de presión
- K) Casa de máquinas
- L) Instalación del equipamiento
- M) Pruebas y ajustes

2.4.2. Presupuesto estimativo de obra

El presupuesto de obra se estima o realiza determinando las cantidades y precios unitarios de los diferentes rubros que intervienen en la construcción de un proyecto [51]. Con el objeto de evaluar el presente estudio, se han considerado únicamente los rubros más significativos: excavación a cielo abierto, volumen de hormigón, acero de refuerzo, tubería de presión.

2.4.3. Evaluación económica del proyecto

Existen diferentes procedimientos para realizar el análisis económico de los proyectos. El impulso primordial de todos estos procedimientos económicos es que el análisis de un proyecto singular, ha de establecer cuantitativamente si el proyecto ha de dejar al auspiciante en una posición económica mejor o peor, dado el costo básico de los fondos y las suposiciones relativas (definir la rentabilidad de la inversión). Se puede aplicar un procedimiento analítico para establecer la viabilidad económica de un solo proyecto, el mismo consiste en aplicar lo siguiente [51]:

- 1) las suposiciones concernientes al costo de los fondos, escalamiento y otras variables.
- 2) los beneficios del proyecto
- 3) los costos del proyecto
- 4) el beneficio neto actualizado (B.N.A.)
- 5) la relación costo/beneficio (C/B)
- 6) la tasa interna de retorno (T.I.R.)
- 7) ejecución de un análisis de sensibilidad

Los resultados que se pueden obtener al actualizar los valores mediante el uso de varias tasas de descuento, usualmente se encuentran en los tres tipos de indicadores ya mencionados (B.N.A., C/B, T.I.R.) [51].

Suposiciones básicas

Ciertas suposiciones básicas comunes al análisis de la mayoría de los proyectos deben ser establecidos antes de realizar el estudio; mismas que se detallan a continuación [51]:

1. *Vida útil del proyecto*: el periodo de tiempo cubierto por el análisis es importante para efectos de evaluación económica y financiera. Para esta última (evaluación financiera) el periodo de análisis es generalmente el periodo de financiación; consecuentemente los préstamos son amortizados y se considera el flujo de efectivos durante el periodo de financiación. Se estima que la duración útil del

presente es de 50 años, aunque como ya se mencionó históricamente este valor es superado con facilidad.

2. *Tasa de actualización*: es el tipo de descuento que se usa en los cálculos del valor actual. La magnitud del tipo de descuento afecta directa y significativamente los resultados del análisis económico y es importante escoger un tipo de descuento apropiado. En general el tipo de descuento se relaciona al costo de la oportunidad para utilizar el dinero en otras actividades diferentes a la que se contempla.
3. *Hipótesis de inflación*: inflación es el porcentaje de aumento en general de los niveles de precios. El porcentaje del escalamiento real es el porcentaje de aumento anual en un costo y es independiente de la inflación y adicional a ésta. El escalamiento real resulta como consecuencia del agotamiento de la fuente de recursos, aumento de demanda y otros factores.

El análisis económico debe dar cuenta del escalamiento real cuando sea aplicable, debido a que el objetivo que se pretende en el análisis económico de un proyecto hidroeléctrico de esta naturaleza, es evaluar y comparar alternativas, los cálculos se realizan en moneda dura, es decir no se justifica considerar la inflación [51].

Beneficios del proyecto

Los beneficios de la construcción de una minicentral hidroeléctrica se derivan de numerosas fuentes y abarcan tanto beneficios monetarios como aquellos de índole social que no pueden ser cuantificados [51].

Beneficios sociales

Los beneficios que comúnmente se derivan del uso rural de la hidroelectricidad son [51]:

- 1) Incremento de la productividad en áreas rurales, por la reducción de los costos de la energía, lo que hace que se incremente la rentabilidad de pequeñas haciendas, agroindustrias y comercio.
- 2) Mejoras en el nivel de vida de los hogares de la población involucrada.
- 3) Contribución a disminuir y desanimar la migración de las áreas rurales a las ciudades.

Beneficios de la producción de la MiniCentral

Los proyectos que producen ingresos, generan ganancias por la venta de electricidad y éstos a su vez representan sus beneficios. El problema de estimar los beneficios del proyecto para una minicentral hidroeléctrica descentralizada, es complicado debido a que

generalmente se basa en la voluntad de los consumidores de pagar dicha electricidad [51].

Las minicentrales hidroeléctricas frecuentemente son centrales de pasada, es decir trabajan siempre con un caudal constante, sin la presencia de un reservorio o embalse; los beneficios anuales están constituidos por los ingresos totales anuales, concepto de la venta de la energía, estos se determinan mediante [51]:

$$B_{p.v.e.} = P_g \cdot C_t \cdot \#_h \left[\frac{\$}{\text{año}} \right] \quad (2.39)$$

donde:

$B_{p.v.e.}$ = beneficios anuales por venta de energía [\$/año]

P_g = potencia generada [kW]

C = costo del kW.h [\$/kW.h]

$\#_h$ = número de horas que trabaja la central al año

Costos del proyecto

Los costos del proyecto son aquellos que a través del tiempo son necesarios para construir y operar la minicentral hidroeléctrica. Los costos que deben ser definidos para efectos de realizar la *evaluación económica del proyecto* son [51]:

- costo total del capital invertido (costo de inversión)
- costos anuales de operación y mantenimiento

Costo total del capital invertido

El costo total de inversión de un proyecto ($C.Tot$) es el que considera los costos directos e indirectos (expresados como porcentaje del costo directo), estos intervienen en la ejecución de la obra, se tiene entonces:

$$\text{Costo Total} = \text{Costos Directos} + \text{Costos Indirectos}$$

$$C.Tot = CD + CIA + CImp + Cr + CE$$

$$C.Tot = (1 + X\% + Y\% + Z\% + Q\%) \cdot CD \quad (2.40)$$

donde:

1. *Costos directos (CD)*: son los que se emplean directamente en la obra y su equipamiento; se pagan por volúmenes de obra o por unidades de equipo y a veces en base a sumas globales.
2. *Costos de ingeniería y administración (CIA)*

$$CIA = (X\%) \cdot CD$$

- Ingeniería: 4% - 6%
- Administración: 5% - 8%

3. *Costos por imprevistos* (C_{imp}): depende del nivel de estudios

$$C_{imp} = (Y\%) \cdot CD$$

- a) Preinversión: - Inventario: >30%
 - Prefactibilidad: 20% - 25%
 - Factibilidad: 15% - 20%
- b) Inversión: - Diseño o licitación: 10% - 15%
 - Construcción: 5% - 10%

4. *Costos de intereses durante la construcción* (C_r):

$$C_r = (Z\%) \cdot CD$$

5. *Costos de escalamiento* (CE)

$$CE = (Q\%) \cdot CD$$

No se considera el escalamiento para fines de evaluación, ya que el estudio se realiza en términos de moneda constante.

Costos de operación y mantenimiento

Se definen como los gastos realizados anualmente durante la vida útil del proyecto. Se los puede expresar como un porcentaje de la inversión total del proyecto [51].

$$C_{Op\&M} = \%_{Op\&M} \cdot CTot \quad (2.41)$$

2.4.4. Beneficio neto actualizado (B.N.A.)

También conocido como valor neto presente, es la diferencia entre el total de beneficios menos el total de los costos durante todo el periodo de vida útil del proyecto, incluyendo construcción y operación, pero actualizados a una misma tasa de descuento [51].

$$B.N.A. = B - C \quad (2.42)$$

El resultado es por lo tanto, una cifra monetaria que significa que a una determinada tasa de descuento, el proyecto origina un saldo positivo o negativo como resultado final de su realización. El criterio para decidir destacar un proyecto es el de rehusarlo, si el B.N.A. es igual o menor que cero [51].

2.4.5. Relación beneficio / costo (B/C)

La relación B/C, viene a ser la división u cociente de los beneficios entre los costos, actualizados a una misma tasa de descuento, el resultado es por lo tanto un número. Si su valor es mayor que uno, significa que los beneficios que origina el proyecto son mayores que los costos, y si el resultado es menor que uno, los costos son mayores que los beneficios. En consecuencia, la relación B/C da una idea de la proporción que existe entre los beneficios y los costos [51].

2.4.6. Tasa interna de retorno (T.I.R)

La T.I.R. se puede definir como aquella tasa mediante la cual los costos igualan a los beneficios, y por lo tanto representa el tipo de interés o rendimiento para el que se cumple que los beneficios que se van obteniendo del hecho de haber realizado la inversión, solamente cubren dicha inversión y por lo tanto no se obtiene ninguna utilidad. Se puede entender entonces que T.I.R. es la tasa de interés o la tasa de descuento para la cual se recupera el capital, es decir; el valor actualizado es igual a cero. Los proyectos que tienen T.I.R. mayores que las mínimas requeridas (12%) son los más recomendables, por lo que implican mayores beneficios [51].

La T.I.R. se encuentra sumando los valores presentes de los gastos y de los beneficios que se obtienen durante la construcción y explotación del proyecto, para diferentes tasas de interés y encontrando aquella tasa para la cual el valor presente de todos los gastos es igual al valor presente de todos los beneficios. Este análisis suele representarse gráficamente por medio de dos curvas que corresponden a los gastos y beneficios respectivamente. El punto de cruce de dichas curvas indicará el valor de la T.I.R. [51].

$$V_p = \frac{V_f}{(1+r)^n} \quad (2.43a)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{C_i}{(1+r')^n} \right] = \sum_{i=1}^{i=n} \left[\frac{B_i}{(1+r')^n} \right] \quad (2.43b)$$

donde:

r = tasa de interés [%]

V_p = valor presente [USD]

V_f = valor futuro [USD]

r' = T.I.R. [-]

C_i = gastos en el año "i" desde el inicio de la construcción [USD]

B_i = beneficios en el año "i" desde el inicio de la construcción [USD]

2.4.7. Análisis de sensibilidad

Se aplica a los criterios de toma de decisión de las inversiones tales como: la relación C/B, el B.N.A. o la T.I.R., podrá ser definido como la investigación del impacto de los criterios de decisión de las variaciones en los parámetros más importantes del proyecto, tomados uno por vez (% de costos y “r”) [51].

Este análisis es muy útil para examinar el grado al cual la viabilidad total del proyecto podría ser afectado por cambios en los parámetros cuyos valores pueden variar. Los resultados suelen expresarse de manera gráfica [51].

2.5. PAT

En una pequeña central hidroeléctrica, se tienen dos opciones al momento de seleccionar una turbomáquina, la primera es adquirir una turbina que se ajuste a las condiciones que se tienen en el proyecto; mientras que la segunda opción consiste en reutilizar o emplear una bomba en sentido inverso conocida también como PAT; para este último, se tiene:

- Mantener todas las dimensiones externas del rodete en el nuevo diseño. En definitiva, el parámetro de distribución del ángulo del álabe del rodete es el único que se puede modificar.
- Emplear los mismos componentes y verificar la eficiencia que tendrá la PAT.

En la metodología propuesta, se va a diseñar conceptualmente el rodete de la PAT, partiendo de dos parámetros hidráulicos: caudal de flujo y altura neta. Se busca entonces determinar la geometría en tres dimensiones del rodete de la turbina.

Se realiza un estudio de sensibilidad de los parámetros involucrados en la disminución de la erosión, y por otro lado la maximización de la eficiencia de la turbomáquina (PAT). Se realiza un mapeo de los efectos de cambiar un parámetro, así como el estudio de los efectos en conjunto de dos o más parámetros al mismo tiempo. La combinación de parámetros se selecciona sobre la base de los resultados del estudio de parámetro individual, pero se investigan únicamente las combinaciones más prometedoras. Seguido de esto, se realiza una optimización de la función objetivo empleando Matlab, software que permite relacionar el conjunto de parámetros involucrados y restricciones propias del rodete a diseñar, intentando maximizar la eficiencia del álabe. Finalmente, el diseño del rodete propuesto es validado a través del software comercial Ansys CFX, y se lo compara con los resultados que se tienen del funcionamiento en modo turbina, esto último mediante relaciones existentes descritas por varios autores.

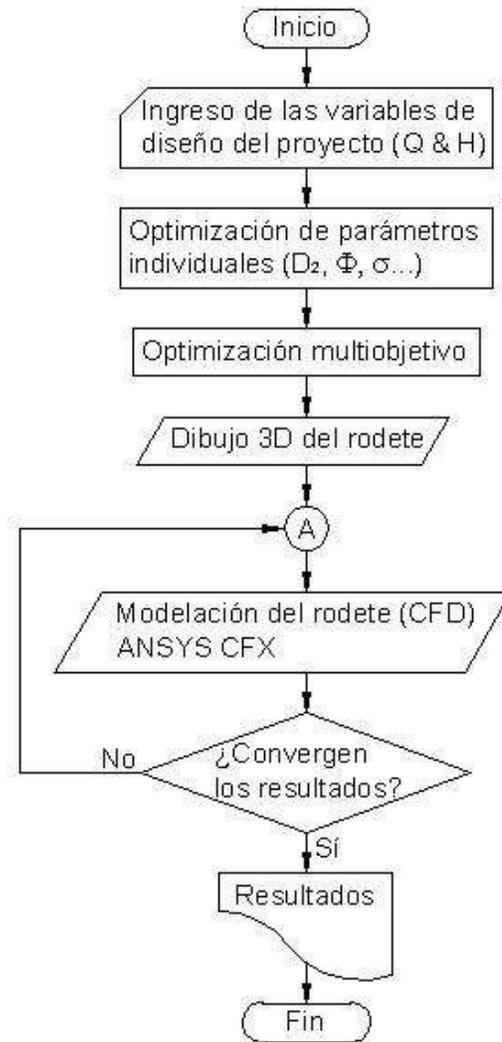


Figura 2.22. Algoritmo del proceso de diseño conceptual del rodete (PAT).
(Fuente: Propia)

2.6. Modelo general de erosión

Generalmente, el daño por erosión es considerado como la remoción gradual de material, causado por la repetitiva deformación y acciones de cortante. La arena erosiva es conocido también como desgaste abrasivo. Este tipo de desgaste puede dañar la capa de óxido en la zona de flujo en las superficies guías y hacer que ciertos sectores de estas superficies resulten desiguales, que pueden llegar a ser el origen de erosión por cavitación. La arena erosiva por lo tanto puede ser ambos un liberador y contribuyente que provoca daños que son observados en plantas eléctricas con un amplio transporte (en el flujo de agua) de contaminantes por desgaste. El actual mecanismo de desgaste por erosión no ha sido completamente entendido, por lo tanto; un simple, confiable y generalizado modelo cuantitativo para la erosión no puede ser desarrollado.

La expresión más común para el desgaste erosivo está basado en experiencias experimentales y éstas son generalmente expresadas como una función de los factores que se asocian con el desgaste erosivo. El desgaste hidroabrasivo es comunmente cuantificado por el significado de la tasa de desgaste W , definido por la pérdida de masa por unidad de tiempo y que generalmente se expresa como:

$$W = f(\text{propiedades de las partículas erosivas, material base y condiciones de operación})$$

Generalmente, esta expresión está dada como una función de velocidad, dureza del material, tamaño de partícula, y concentración. Bardal [45] describe la fórmula más general para la erosión pura como:

$$W = K_{mat} \cdot K_{env} \cdot c \cdot V^n \cdot f(\alpha) \quad (1.11a)$$

Donde,

W = tasa de erosión (pérdida de material) [mm/año]

K_{mat} = constante del material

K_{env} = constante dependiente de las condiciones ambientales

c = concentración de las partículas

$f(\alpha)$ = función del ángulo de choque (α) [°]

V = velocidad de la partícula

n = exponente de la velocidad

Los modelos que permiten simular el efecto de erosión son:

- Finnie's Model
- Bitter's Models
- Neilson and Gilchrist Model
- Tabakoff

2.7. Estudio de sensibilidad individual de los parámetros de diseño

Los cálculos que se describen más adelante se basan en los parámetros hidráulicos de caudal Q y caída neta H . En primera instancia se determinan los triángulos de velocidad tanto a la entrada como a la salida del rodete. Se asume que la componente de la velocidad tangencial a la salida del rodete $C_{u2} = 0$, es decir que la PAT trabaja en el punto de mejor eficiencia BEP. De las investigaciones realizadas por varios autores se tiene que la eficiencia se encuentra en función del diámetro y ángulo de salida del rodete, así como

también del número de vanos. Adicionalmente, se tiene que la variable predominante para la reducción del factor de erosión, es la velocidad relativa del rodete a la salida. Resulta conveniente entonces, analizar de manera individual las variables de diseño paramétrico, con el objetivo de verificar su influencia en el rendimiento global de la PAT.

En la Tabla 2.9 se enumeran las características para el análisis de sus efectos en el diseño paramétrico. Los datos para el diseño son caída parcial de 50.0 [m] y caudal de 0.167 [m³/s], la frecuencia empleada es de 50 [Hz], el número de álabes del rodete original es 8 [u].

Tabla 2.9. Rango de optimización de los parámetros de diseño hidráulico.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor de referencia	Rango de optimización
Diámetro de salida	D_2	[m]	0.34	0.30 – 0.50
Número de pares de polos en el generador	Z_p	[-]	2.00	2 – 12
Velocidad específica universal	Ω_s	[rad/s]	0.60	0.10 – 1.0
Radio eje del rodete	r_s	[m]	-	< 0.50 & $< D_2$
Radio ojo de ingreso al rodete	r_e		-	< 0.50 & $< r_s$
Coefficiente de flujo	Φ	[-]	-	0.05 – 0.20
Coefficiente de carga	Ψ	[-]	-	0.40 – 0.70

(Fuente: propia)

Uno de los factores que se requiere disminuir es la erosión, en el rodete de la PAT, provocada por la presencia de sedimentos, misma que se calcula en función de la velocidad relativa a través del rodete, el factor de erosión está definido por la ecuación (1.11):

$$Erosion\ factor = F_{KG} \cdot \left(\frac{C_{S,eq}}{C_{S,Ref}} \right) \cdot \left(\frac{W_{mix}}{W_{Ref}} \right)^3 \quad [-]$$

Con el objetivo de evitar la cavitación a la salida del rodete se debe cumplir con la relación de sumersión de la PAT definida en la ecuación (1.5); la NPSH se encuentra en función del número de velocidad, en otras palabras, se encuentran en función de las ecuaciones (1.6) y (1.4).

2.7.1. Efectos de la variación del diámetro de salida

La velocidad periférica de salida se define mediante la ecuación (2.44).

$$U_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot N}{60} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.44)$$

El coeficiente de flujo se determina a través de la ecuación (2.45). De acuerdo con varios autores (Yáñez y Bone) se debe considerar el diámetro reducido por cuestiones del espesor del álabe.

$$\Phi = \frac{Q}{\pi \cdot D_2 \cdot B_2 \cdot U_2} \quad [-] \quad (2.45)$$

La ecuación (2.46) define al coeficiente de forma en función del ángulo de salida del álabe y del número de hélices (álabes).

$$\sigma_F = 1 - \frac{[\sin(90 - \beta_2)]^{1/2}}{n_b^{0.70}} \quad [-] \quad (2.46)$$

El coeficiente de carga se obtiene a través de la ecuación (2.47), este se encuentra en función del coeficiente de flujo, de forma y del ángulo de salida del álabe.

$$\Psi = \sigma_F - \Phi \cdot \tan(\beta_2) \quad [-] \quad (2.47)$$

La función objetivo (eficiencia hidráulica) a ser optimizada se encuentra definida por la ecuación (2.48).

$$\eta = \frac{g \cdot H}{\Psi \cdot U_2^2} \quad [-] \quad (2.48)$$

2.7.2. Efectos de la variación de la relación entre los radios del eje y ojo del rodete

El radio de entrada en el ojo del rodete r_e , valor semejante al diámetro del extremo de los álabes a la entrada del rodete. Se debe determinar el radio a la salida del rodete, mismo que servirá de base para los demás cálculos, para esto es necesario partir de la ecuación (2.49).

$$\Omega_s = \frac{\Omega \cdot \sqrt{Q}}{(g \cdot \Delta H)^{3/4}} \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (2.49)$$

El ancho a la salida del rodete se define usando la ecuación (2.50).

$$b_2 = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot r_2^2 \cdot \Phi \cdot \varepsilon} \quad [m] \quad (2.50)$$

Utilizando la ecuación (2.51) se definen los radios del eje y del ojo del rodete.

$$\varphi_e = \frac{Q}{\pi \cdot (r_e^2 - r_s^2) \cdot \Omega \cdot r_e} \quad [-] \quad (2.51)$$

2.8. Implementación de técnicas de optimización multiobjetivo

El proceso de optimización que se utiliza a través del software MatLab es conocido como *genetic algorithm*, se emplea adicionalmente la herramienta *pattern search*. La función objetivo es maximizada y los parámetros de diseño son optimizados. En una primera parte se determina el diámetro de salida del rodete, y la eficiencia de la PAT; para finalmente empleando estos datos determinar el radio de entrada del rodete.

Los datos provenientes del diseño de referencia son caudal $Q = 0.167$ [m³/s], caída neta $H = 50.0$ [m], velocidad de rotación $N = 1\ 450$ [rpm], gravedad $g = 9.81$ [m/s²].

2.8.1. Método de variación de parámetros de entrada y salida del álabe

Para el presente caso se escogen como variables de decisión el diámetro de salida y el número de álabes. La optimización multiobjetivo conforma la primera parte del presente estudio, entonces las funciones objetivo son: velocidad periférica a la salida, ancho a la salida del rodete, eficiencia del álabe y factor de erosión; mismas que corresponden a las ecuaciones (2.52), (2.53), (2.54) y (2.55), respectivamente.

- Variables de decisión:

$$x(1) = D_2 = \text{diámetro de salida [m]}$$

$$x(2) = n_b = \text{número de álabes [u]}$$

- Funciones objetivo:

$$y(1) = U_2 = \text{velocidad periférica a la salida [m/2]}$$

$$y(2) = B_2 = \text{ancho a la salida del rodete [m]}$$

$$y(3) = \eta_b = \text{eficiencia del álabe [%]}$$

$$y(4) = E_f = \text{factor de erosión [-]}$$

$$\text{mín } y(1) = \frac{\pi \cdot x(1) \cdot N}{60} \quad (2.52)$$

$$\text{mín } y(2) = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot \left(\frac{x(1)}{2}\right) \cdot \Phi \cdot \varepsilon} \quad (2.53)$$

$$m\acute{a}x \ y(3) = \frac{g \cdot H}{\left[1 - \frac{[\sin(90 - \beta_2)]^{1/2}}{x(2)^{0.70}} - \frac{Q \cdot \tan(\beta_2)}{\pi \cdot x(1) \cdot B_2 \cdot y(1)} \right]} \quad (2.54)$$

$$m\acute{i}n \ y(4) = F_{KG} \cdot \left(\frac{C_{S,eq}}{C_{S,Ref}} \right) \cdot \left(\frac{W_{mix}}{W_{Ref}} \right)^3 \quad (2.55)$$

- Restricciones de desigualdad

$$0.30[m] \leq x(1) \leq 0.50[m]$$

$$x(2) > 0[u]$$

2.9. Simulación numérica en Ansys CFX del diseño propuesto

Usando los datos obtenidos durante el proceso de parametrización, se desarrolla un modelo de tres dimensiones compatible con Ansys. En los párrafos siguientes, se describe la malla generada y las condiciones de borde.

2.9.1. Mallado

La malla es generada empleando la función ATM, a través del software Ansys y su herramienta de optimización “TurboGrid”, esta última permite entre otras cosas obtener una transición suave entre los volúmenes de control pequeños y aquellos que resultan más grandes.

Los parámetros utilizados para la generación de la malla se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10. Parámetros utilizados para la generación de la malla.

Parámetros	Tipo	Valor
Método	Target Passage Mesh Size	
Número total de nodos	Fine	670 000
Factor de razón		1.25
Especificación del tamaño del elemento de pared	y+	Reynold: 50

(Fuente: propia)

2.9.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de borde se generan a partir de la herramienta “Turbo Mode” de Ansys CFX. Los valores y tipos asignados se muestran en la Tabla 211.

Tabla 2.11. Parámetros utilizados para las condiciones de borde.

Parámetros	Tipo	Valor	Unidad
Tipo de máquina	Turbina radial		
Tipo de análisis	Estado estable		
Tipo de componente	Rotativo	1 450	[rpm]
Fluido y partículas	Agua, Arena		
Morfología del fluido	Fluido continuo		
Presión de referencia		1	[atm]
Modelo de turbulencia	SST $k - \omega$		
Condiciones de entrada y salida	P-Total de entrada, flujo	20.46	[atm]
	de masa de salida	167	[kg/s]
Modelo de erosión	Tabakoff		
Densidad de las partículas		2 650	[kg/m ³]
Masa molar de las partículas		1	[kg/kmol]
Morfología de las partículas	Transporte de partículas en el fluido		
Distribución del diámetro de las partículas	Diámetro específico	0.1	[mm]
Factor de forma de las partículas		1	[-]
Factor de superficie de las partículas		1	[-]
Flujo de partículas		0.7	[kg/s]

(Fuente: propia)

2.9.3. Validación de la simulación numérica

Todas y cada una de las simulaciones CFD deben ser verificadas con el objetivo de que los resultados obtenidos sean lo más aproximados a la realidad. Se debe trabajar con diferentes calidades de malla hasta que las simulaciones tengan una diferencia mínima, en otras palabras, independencia de malla.

Para optimizar los recursos (tiempo, hardware y software) se realizan una aproximación ocupando una malla gruesa. Así para la simulación definitiva, se afina la malla y se obtienen los resultados correspondientes.

2.10. Calibración del modelo

2.10.1. Características turbomáquina

La turbomáquina que se ha seleccionado tomando en cuenta el caudal y caída que se tienen en la zona, tiene las siguientes características:

La marca de bombas seleccionada es Calpeda, de la serie NMS4 modelo 150/400:

Electro bombas que cumplen con la regulación Europea N° 547/2012

Carcasa - Hierro fundido (GJL 200 EN 1561)

Abrazadera de cierre hidráulico - Hierro fundido (GJL 200 EN 1561)

Rodete - Hierro fundido (GJL 200 EN 1561)

Eje – AISI 430

Sello mecánico – (Carbón – cerámico - NBR)

Contrabridas – Acero Fe 430B UNI 7070

Potencia 75.0 kW

Motor – motor de inducción de 4 – polos

Velocidad de rotación $n = 1\,450$ rpm

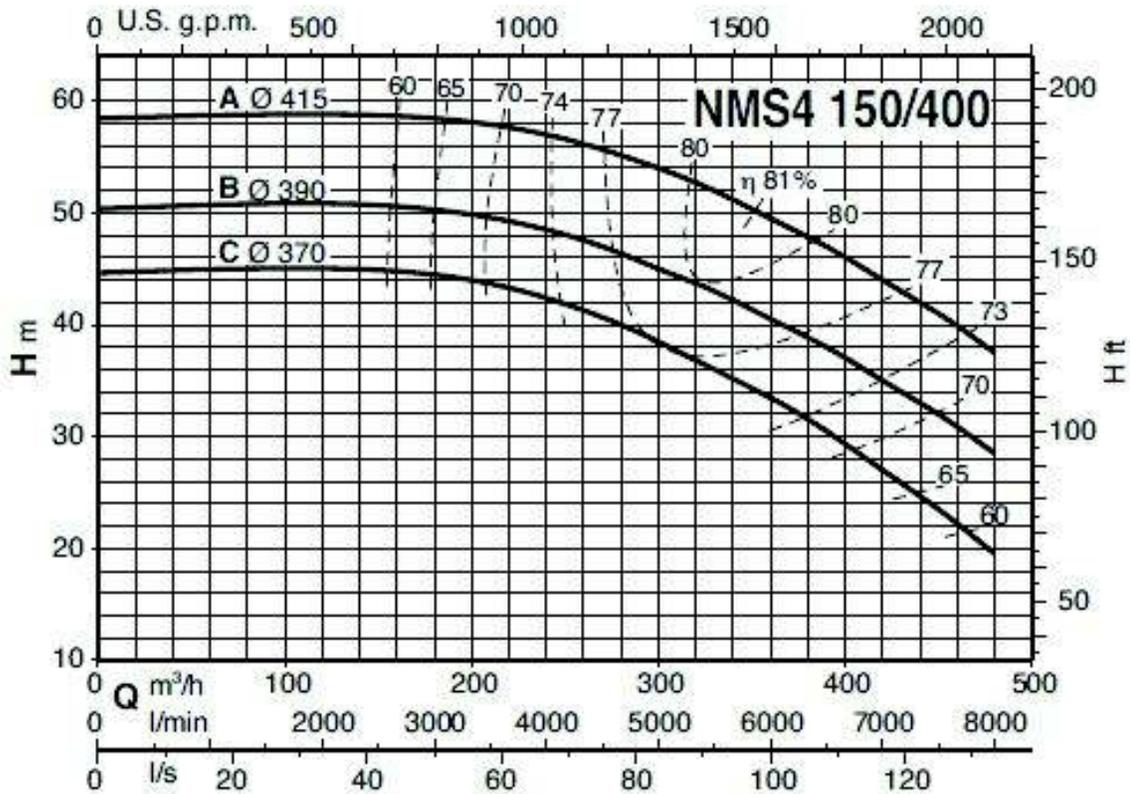


Figura 2.23. Curva característica caudal vs. Altura.
(Fuente: Catálogo Calpeda)

2.10.2. Modelo numérico

La calibración del modelo se lleva a cabo ingresando los valores geométricos del álabe y por ende del rodete, parámetros del fluido y ciertos parámetros mecánicos de la bomba (por ejemplo, velocidad de rotación, caudal, etcétera). Una vez que el modelo fue idealizado se llevaron a cabo algunas pruebas entre las que se encuentran el ir variando

el caudal entregado por la bomba manteniendo constante la presión a la entrada del rodete. En la *Tabla 2.12* se muestran los resultados de calibración del modelo propuesto.

Tabla 2.12. Calibración del modelo – presión.

mass flow rate [kg/s]	total pressure (1) [Pa]	total pressure (2)	height [m]
1.0	1.276E+06	8.801E+05	40.4
2.0	1.373E+06	9.222E+05	46.0
4.0	1.260E+06	8.087E+05	46.0
8.0	1.251E+06	6.935E+05	56.8
12.5	1.252E+06	6.937E+05	56.9

* (1) inlet & (2) outlet

** static pressure 8.0 [bar]

mass flow rate [kg/s]	total pressure (1) [Pa]	total pressure (2)	height [m]
1.0	1.475E+06	1.080E+06	40.3
2.0	1.468E+06	1.054E+06	42.2
4.0	1.461E+06	1.011E+06	45.9
8.0	1.451E+06	9.390E+05	52.2
12.5	1.452E+06	8.922E+05	57.1

* (1) inlet & (2) outlet

** static pressure 10.0 [bar]

mass flow rate [kg/s]	total pressure (1) [Pa]	total pressure (2)	height [m]
1.0	1.673E+06	1.279E+06	40.2
2.0	1.671E+06	1.251E+06	42.8
4.0	1.663E+06	1.212E+06	46.0
8.0	1.654E+06	1.142E+06	52.2
12.5	1.652E+06	1.089E+06	57.4

* (1) inlet & (2) outlet

** static pressure 12.0 [bar]

mass flow rate [kg/s]	total pressure (1) [Pa]	total pressure (2)	height [m]
1.0	2.472E+06	2.112E+06	36.7
2.0	2.472E+06	2.112E+06	36.7
4.0	2.451E+06	1.942E+06	51.9
8.0	2.451E+06	1.942E+06	51.9
12.5	2.448E+06	1.886E+06	57.3

* (1) inlet & (2) outlet

** static pressure 20.0 [bar]

(Fuente: propia)

Con estos valores que se encuentran cercanos a los valores del funcionamiento entregados por el fabricante; se procede a emplear el modelo para el modo turbina.

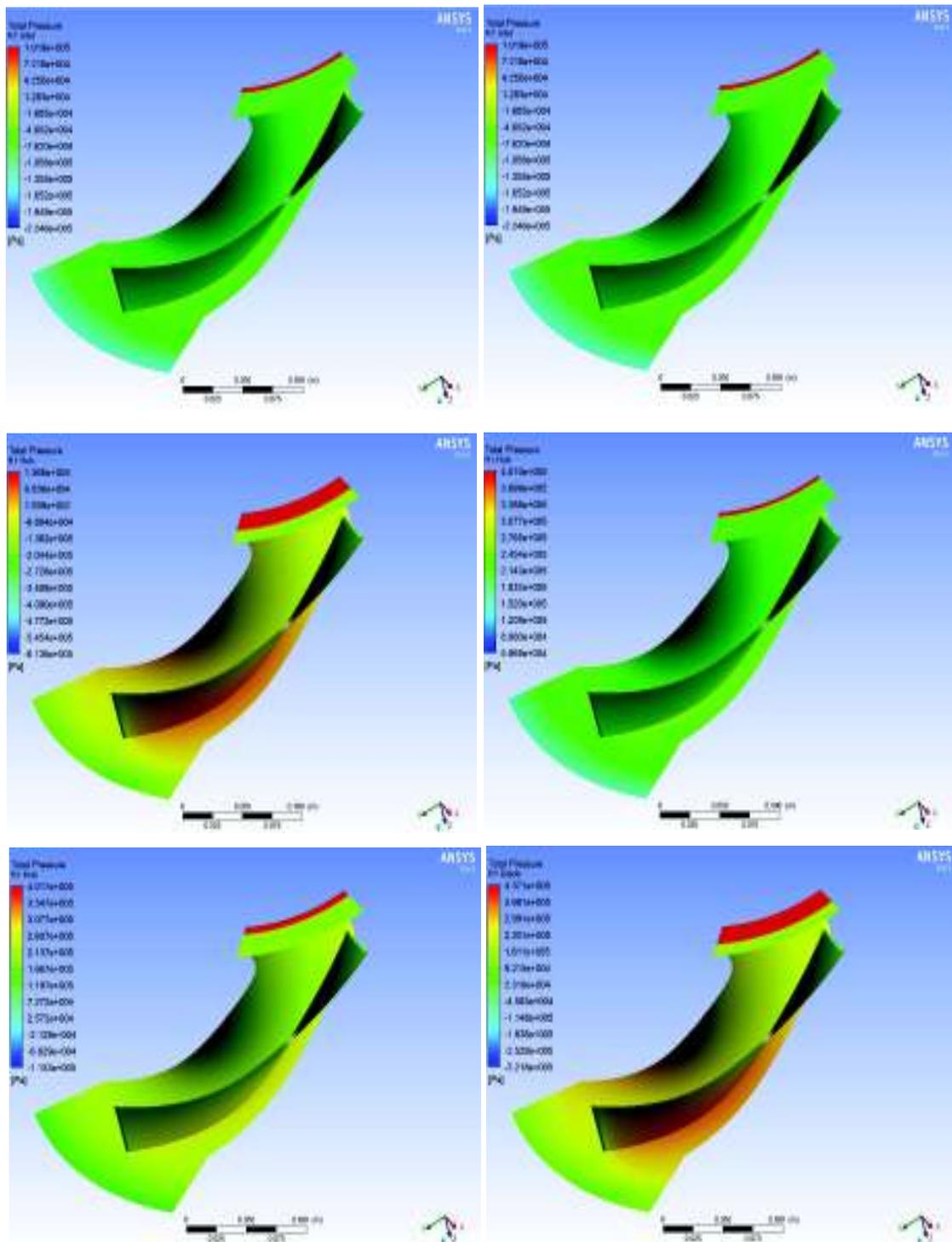


Figura 2.24 Calibración del modelo - rodete (PAT).
(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez que se han revisado los diferentes criterios y procedimientos necesarios con el fin de definir tanto las obras civiles como el equipo mecánico (turbina), se dispone de la información necesaria para el diseño de todas las obras que constituirán o conformarán la Minicentral Quilindaña. Antes de presentar los datos definitivos, se consideraron algunas alternativas, las mismas que fueron desechadas según el avance del estudio.

En la primera parte se presentan los caudales medios, a través de la curva de duración general, inmediatamente después se muestran las tres alternativas a través del uso de caudales diferentes: Q95%, Q75% y Q30%. En estos casos se procede a comparar el valor de las diferentes obras hidráulicas necesarias para la minicentral.

Finalmente, se presentan los resultados y la interpretación, obtenidos del proceso de diseño conceptual propuesto, así como los resultados y su discusión respectiva respecto de la validación efectuada en CFD.

3.1. Obras Civiles

3.1.1. Topografía y cartografía

Una vez que se ha recorrido, evaluado el terreno y las características geomorfológicas se observa que la zona tiene un relieve propio del páramo de la región andina del Ecuador. El lugar donde se propone ubicar el proyecto, es una de las partes más altas de la zona (4 000 m.s.n.m.), las elevaciones del lugar llegan a superar los 4200 m.s.n.m.; así en el caso de la punta del volcán Quilindaña llega a los 4 876 m.s.n.m.; una parte de los deshielos de este alimenta a las lagunas de Yuracocha y Verdecocha.

La información cartográfica utilizada para el estudio del presente proyecto, fue la carta topográfica del IGM: Cotopaxi, Ecuador 3991 IV J721 Edition 1-NIMA (IGM) en escala 1:50 000; se usó además información disponible en páginas de internet tales como: www.google.co.uk/maps/ y www.heywhatsthat.com.

De acuerdo a la información topográfica existente, así como también de un análisis visual de la zona, las principales características de los diferentes sitios de la minicentral son:

1. *Captación*: esta obra hidráulica se emplaza en la cota 4 040 m.s.n.m; localizada en una formación natural que tiene poca pendiente transversal. La pendiente del

canal de riego es muy poco pronunciada, estimándose que debe encontrarse en un valor aproximado de 0.85%.

2. *Conducción*: los canales de conducción se realizan a través de canales que finalizan en la cota 4 000 m.s.n.m. sitio en donde se ubicará el tanque de presión. Esta conducción tendrá una longitud aproximada de 3.0 [km], con una pendiente longitudinal 0.76%.
3. *Tanque de presión*: la ubicación de esta obra hidráulica se encuentra en un lugar cuya pendiente transversal es pequeña, en la cota 4 000 m.s.n.m.
4. *Tubería de presión*: la pendiente transversal del terreno es aproximadamente 1/3; con lo cual el trazado de la tubería es uniforme.
5. *Casa de máquinas*: el lugar en donde se localizará, es un sitio con una pendiente pronunciada, cercano a una ladera; en la cota 3 800 m.s.n.m.

Planos topográficos y cortes

Los planos se encuentran en el *Anexo 5*.

3.1.2. Curva de duración general

La curva de duración general de caudales (CDG) fue obtenida para las cuencas hidrográficas para el período (1971 – 2013). A continuación se muestran las cuencas en estudio:

Cuenca hidrográfica en estudio (del río Yanahurco)

Se ubica al oeste de la provincia de Napo en el límite con la provincia de Cotopaxi. Esta cuenca alta tiene como punto de interés a la estación (H722) río Yanahurco D.J. Valle que es afluente del río Chalupas, cuenca de cabecera del sistema hidrográfico del río Napo. El río Yanahurco nace en las inmediaciones de la población Saniacunga, a una altitud de 4 000 metros. Paralelamente, el río Valle tiene su origen en los macizos montañosos vecinos. Los pisos altitudinales que se presentan en la cuenca fluctúan entre los 4 000 y 3 590 m.s.n.m., lo que permite afirmar la existencia de elevaciones importantes. Tiene un área de drenaje de 78.5 km² y la longitud del cauce principal es de 15.7 km. En el *Anexo 2* se muestran los datos de los caudales mensuales que se obtuvieron en el periodo de tiempo antes mencionado.

Cuenca hidrográfica en estudio (canal de riego Quilindaña)

El presente proyecto se encuentra ubicado en la zona centro del país, sobre las coordenadas geográficas S 0°46'48.8" y W 78°19'45", aproximadamente a 5.0 km al oeste del sector conocido como Pansache, al oeste de la provincia de Napo en el límite con la provincia de Cotopaxi. El área de drenaje es de 5.63 km² y la longitud del cauce principal es de 6.10 km.

A continuación se muestran los resultados una vez que se correlacionaron ambas cuencas, que no es más que la relación entre las áreas de dos cuencas y los caudales medios mensuales que registra la estación H722 – Yanahurco DJ Valle:

Tabla 3.1. Curva de duración general – datos.

Q_m	Q_{m-o}	#_orden	T	P
[m ³ /s]	[l/s]	[-]	[años]	[%]
0.18	225.08	1	44	2.27
0.16	224.57	2	22	4.55
0.15	223.55	3	15	6.82
0.20	204.16	4	11	9.09
0.22	198.87	5	9	11.36
0.22	192.01	6	7	13.64
0.17	182.15	7	6	15.91
0.15	180.09	8	6	18.18
0.08	179.52	9	5	20.45
0.13	177.23	10	4	22.73
0.09	174.96	11	4	25.00
0.17	172.58	12	4	27.27
0.15	167.51	13	3	29.55
0.14	167.51	14	3	31.82
0.14	165.93	15	3	34.09
0.11	165.69	16	3	36.36
0.11	163.82	17	3	38.64
0.15	162.54	18	2	40.91
0.17	157.13	19	2	43.18
0.12	149.74	20	2	45.45
0.13	149.13	21	2	47.73
0.14	147.23	22	2	50.00

Q_m	Q_{m-o}	#_orden	T	P
[m ³ /s]	[l/s]	[-]	[años]	[%]
0.12	145.60	23	2	52.27
0.17	144.95	24	2	54.55
0.08	143.97	25	2	56.82
0.13	140.93	26	2	59.09
0.16	139.72	27	2	61.36
0.18	139.01	28	2	63.64
0.23	134.14	29	2	65.91
0.18	133.91	30	1	68.18
0.12	129.99	31	1	70.45
0.13	127.18	32	1	72.73
0.12	124.99	33	1	75.00
0.16	124.66	34	1	77.27
0.14	124.18	35	1	79.55
0.19	121.28	36	1	81.82
0.17	118.07	37	1	84.09
0.18	116.16	38	1	86.36
0.12	106.00	39	1	88.64
0.14	105.45	40	1	90.91
0.20	82.38	41	1	93.18
0.14	80.07	42	1	95.45
0.17	78.19	43	1	97.73

(Fuente: propia)

Se obtiene entonces la curva de duración general, misma que se puede apreciar en la *Figura 3.1.*; siendo este el punto de partida para el cálculo de la minicentral hidroeléctrica Quilindaña. Los caudales que se van a emplear entonces son:

- $Q_{95\%} = 80.0$ [l/s]
- $Q_{75\%} = 125.0$ [l/s]

- $Q_{30\%} = 167.0 \text{ [l/s]}$

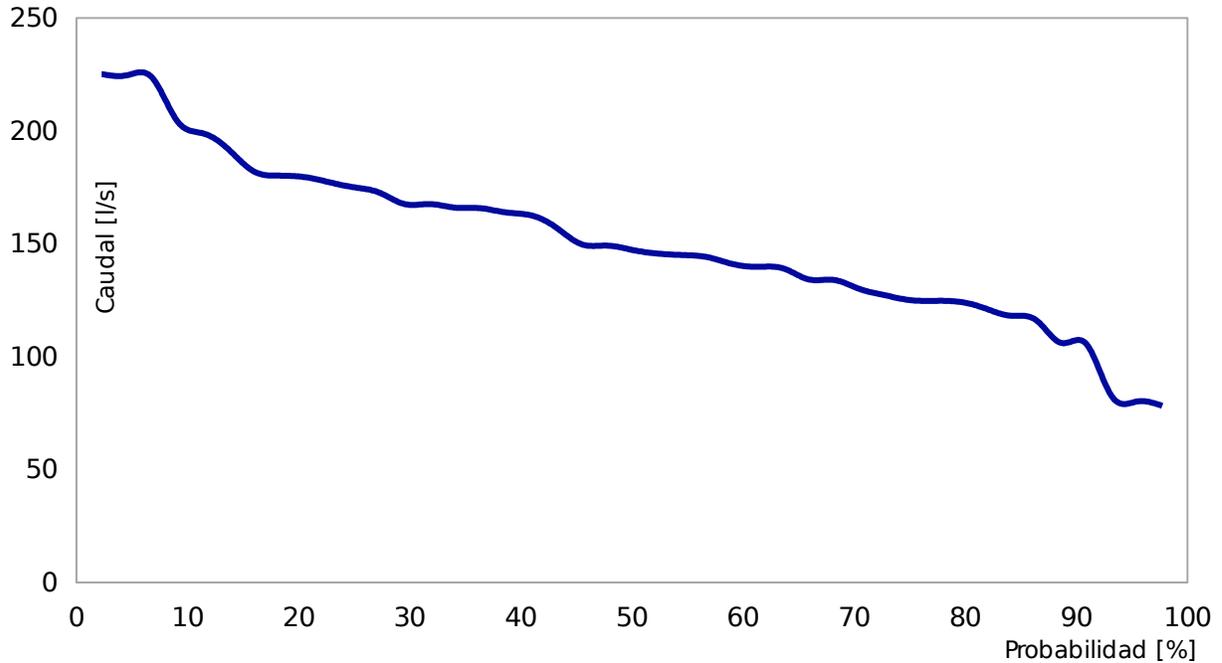


Figura 3.1. Curva de duración general.
(Fuente: Propia)

3.1.3. Canal de conducción

Se prevé desviar el flujo del canal a la altura del cerro El Morro en las coordenadas (S 0°48'29" - O 78°23'37"), y desviarlo a través de un canal hacia el sitio donde se emplazará el desarenador y el tanque de presión, en las coordenadas (S 0°48'49" - O 78°24'46").

		<i>caudal</i>		
		<i>95%</i>	<i>75%</i>	<i>30%</i>
L	[m]	3250		
J	[-]	0.0076		
n		0.016		
Q	[m³/s]	0.080	0.125	0.167
b	[m]	0.40		
h		0.17	0.25	0.29
h'		0.15		
H		0.32	0.40	0.44
		0.35	0.40	0.45

La geometría y características del canal de conducción para los diferentes caudales se muestran a continuación, nótese que los valores de geometría no se diferencian en mayor proporción. Así entonces el valor del ancho del canal se define de 40 cm, mientras

que el alto es de 35 cm, 40 cm, y 45 cm (aproximadamente) para el Q95%, Q75% y Q30% respectivamente.

3.1.4. Sedimentador

Como ya se mencionó anteriormente, una alternativa a la construcción de un desripador y sedimentador por separado, es construir una estructura capaz de ejecutar ambas funciones en una sola cámara; a continuación se muestran los resultados:

		<i>caudal</i>		
		95%	75%	30%
d_p	[mm]	0.40		
T	[°C]	5.00		
j	[%]	6.00		
v	[m/s]	0.10		
w	[cm/s]	3.79		
k	[-]	1.20		
h/b	≥ 1.5	1.54	0.92	0.77
l/b	≥ 4.0	5.02	3.01	2.51
b		0.70	1.16	1.40
h	[m]	2.00		
$L \geq$		1.08		
L		3.41		
		3.50		

Los resultados de evaluar las pérdidas fueron:

		<i>caudal</i>		
		95%	75%	30%
n	[-]	0.020		
A_h	[m ²]	2.15		
P_h		4.15		
R_h	[m]	0.52		
h_f		0.00058		

Las características hidráulicas obtenidas durante el lavado son:

3.1.5. Tanque de presión

Es la conexión necesaria entre la conducción a flujo libre (canal de conducción) y la conducción a presión (tubería de presión).

1. Se calcula el volumen útil del tanque, así:

opción a		caudal		
		95%	75%	30%
$V_{\text{útil}}$	[m ³]	27.17		
F	[-]	0.60		
Q	[m ³ /s]	0.080	0.125	0.167
V_{tu}	[m ³]	45.29		
v_t	[m/s]	1.06	1.77	2.12
A_t	[m ²]	0.07		
\emptyset	[mm]	300		
L	[m]	640.67		

opción b		caudal		
		95%	75%	30%
$V_{\text{útil}}$	[m ³]	0.77	1.46	1.82
A	[m ²]	0.07	0.10	0.11
v_o	[m/s]	1.11	1.26	1.31
I	[-]	0.0076	0.0076	0.0076

opción c		caudal		
		95%	75%	30%
$V_{\text{útil}}$	[m ³]	13.50	22.50	27.00
Q	[m ³ /s]	0.080	0.125	0.167

Tenemos entonces, que el caso más crítico se presenta, para los tres caudales, cuando se considera un vaciado hipotético de la tubería de presión:

$$V_{\text{útil}} = 27.17 [m^3]$$

2. Se determina las dimensiones de un vertedero sumergido a través del cual deben comunicarse el estanque amortiguador de llegada y el reservorio, para esto se calcula el nivel del agua en el estanque de llegada:

pérdidas E		caudal		
		95%	75%	30%
h_t	[m]	0.06	0.08	0.09
K	[-]	1.00	1.00	1.00
v	[m/s]	1.11	1.26	1.31
$v^2/2g$	[m]	0.06	0.08	0.09
cota solera canal	[msnm]	4002.78	4002.78	4002.78
cota canal	[m]	0.17	0.25	0.29
cota agua canal		4002.95	4003.03	4003.07
cota L.E. canal		4003.01	4003.11	4003.15
cota L.E. estanque		4002.95	4003.03	4003.07
cota agua estanque		4002.95	4003.03	4003.07

Ahora se procede a diseñar el vertedero de paso

vertedero S		caudal		
		95%	75%	30%
b		0.56	0.94	1.13
h_n		0.20	0.20	0.20
z	[m]	0.05	0.05	0.05
H		0.25	0.25	0.25
P₁		0.80	0.80	0.80
k₀		2.03	2.03	2.03
k_s	[-]	0.62	0.62	0.62
k_r		0.85	0.85	0.85
Q	[m ³ /s]	0.080	0.125	0.167
v	[m/s]	0.66	0.66	0.66

3. Reservoirio del tanque, calculado como si se tratase de un sedimentador, con el objetivo de eliminar cualquier partícula, que pudiera haber sido arrastrada por el canal de conducción. Así mismo se evalúan las pérdidas en este sector.

reservorio (S)		caudal		
		95%	75%	30%
d_p	[mm]	0.4		
T	[°C]	5.0		
j	[%]	6.0		
b		0.70	1.16	1.40
h	[m]	2.00		
L		1.08		
L		3.50	3.50	3.50
v	[m/s]	0.10		
w	[cm/s]	3.79		
k	[-]	1.20		
A_s	[m ²]	1.98	3.30	3.96
		7.00		

perdidas R		caudal		
		95%	75%	30%
n	[-]	0.020	0.020	0.020
A_h	[m ²]	2.15	2.15	2.15
P_h		4.15	4.15	4.15
R_h	[m]	0.52	0.52	0.52
h_f		0.0006	0.0006	0.0006

Condiciones de lavado

Se empleará el mismo proceso que se utilizó en el cálculo de los sedimentadores, a excepción del cálculo de la *capacidad de arrastre*, mismo que no aplica a la presente estructura hidráulica.

Rejilla del tanque de presión

1. Base y altura.- se asume una velocidad de aproximación adecuada y se determina el área en base a la ecuación de continuidad

condiciones L		caudal		
		95%	75%	30%
Q_d	[m ³ /s]	0.080	0.125	0.167
Q_l		0.090	0.150	0.180
b	[m]	2.0	2.0	2.0
n	[-]	0.020	0.020	0.020
j	[%]	6.0	6.0	6.0
v	[m/s]	1.28	1.57	1.68
h_l	[m]	0.04	0.05	0.05

2. Barrotes.- ver rejillas en toma directa

rejilla		caudal		
		95%	75%	30%
t	[m]	0.04	0.04	0.04
a	[°]	20	20	20
\emptyset	[mm]	13	13	13
v	[m/s]	0.6	0.6	0.6
Q	[m ³ /s]	0.080	0.125	0.167
A	[m ²]	0.13	0.21	0.25
H		0.4	0.4	0.4
B_1	[m]	0.31	0.52	0.63
N_1		8	13	16
N_2	[u]	7	12	15
B_2		0.41	0.68	0.84
B_3	[m]	0.45	0.90	0.90
recalculando				
B_1	[m]	0.36	0.74	0.71
A	[m ²]	0.14	0.30	0.28

Cámara de carga

Es la estructura que facilita el ingreso del agua a la tubería de presión.

Se calculan:

- 1) altura de seguridad,
- 2) altura sobre el fondo y
- 3) altura total de la cámara

cámara C		caudal		
		95%	75%	30%
Q	[m³/s]	0.080	0.125	0.167
Ø_t	[mm]	200	200	200
A_t	[m²]	0.031	0.031	0.031
v_t	[m/s]	2.39	2.39	2.39
K	[-]	2.2	2.2	2.2
h'_s	[m]	0.64	0.64	0.64
h'_{SC}		0.34	0.34	0.34
mR	[-]	0.5	0.5	0.5
h'_{SR}	[m]	0.34	0.34	0.34
h_s		0.64	0.64	0.64
h_F		0.19	0.19	0.19
h_T		1.03	1.03	1.03

4) Nivel del agua: la cota a la que llegará el agua en la cámara de carga

nivel de agua		caudal		
		95%	75%	30%
Q	[m³/s]	0.080	0.125	0.167
μ	[-]	0.60	0.60	0.60
A₀	[m²]	0.14	0.30	0.28
cota del agua en la Cámara de Carga		4002.91	4003.00	4003.03
cota de la solera de la Cámara de Carga		4001.88	4001.97	4001.99
cota de la Tubería de Presión (base)		4002.00	4002.00	4002.00
h	[m]	4002.20	4002.20	4002.20
h_F		0.04	0.02	0.04
h_T		0.20	0.20	0.20
		0.91	1.00	1.03

3.1.6. Tubería de presión

diametro T		caudal		
		95%	75%	30%
Q	[m³/s]	0.080	0.125	0.167
f_{int}	[mm]	200	250	300
A	[m²]	0.03	0.05	0.07
V	[m/s]	2.55	2.55	2.36
P	[kW]	108.58	178.00	248.07
P_P		20.80	24.17	21.82
e	[mm]	4.77	5.32	5.90
a	[USD]	16226.8	22567.6	30005.1
Per_{AP}		7289.8	8468.7	7647.5
Total		23516.5	31036.2	37652.6

Es uno de los componentes básicos de una minicentral hidroeléctrica, ya que a través de esta fluye el agua a presión desde la cámara de carga hacia la(s) turbina(s). El diámetro debe ser determinado en base a un estudio económico, siendo el de mayor conveniencia aquel que hace mínima la suma de las anualidades del capital necesario para la adquisición de la tubería y el valor anual de las pérdidas de energía y potencia que se producen en la tubería.

1) los valores calculados, correspondiente a los diámetros de tubería más económicos para cada caudal característico, se muestran en la parte superior.

2) se muestra en la parte inferior los resultados para un mismo diámetro de tubería:

diametro T		caudal		
		95%	75%	30%
Q	[m³/s]	0.080	0.125	0.167
Ø_{int}	[mm]	300	300	300
A	[m²]	0.07	0.07	0.07
V	[m/s]	1.13	1.77	2.36
P		126.24	192.37	248.07
P_p	[kW]	2.42	9.17	21.82
e	[mm]	6.08	6.00	5.90
a		30942.4	30546.9	30005.1
Per_{AP}	[USD]	847.1	3212.7	7647.5
Total		31789.5	33759.6	37652.6

En el *Anexo 3* se muestran a detalle todos los cálculos realizados y en el *Anexo 5* los planos correspondientes.

3.1.7. Anclajes y apoyos

En una instalación de tubería de presión es necesario e indispensable la construcción de bloques de anclaje, los mismos que tienen por objetivo absorber los esfuerzos producidos por la tubería en ciertos puntos, tales como: cambios de dirección (codos, tees, yees), en válvulas y en terminales. Al construir los accesorios los anclajes, se evita que por efecto de las sollicitaciones la línea instalada se mueva o vibre, afectándose o fallando sus accesorios. Los bloques a diseñarse serán de hormigón armado y la tubería se sujetará con abrazaderas como en los bloques de apoyo.

En los planos: PHQ-E03-TP-01A & PHQ-E03-TP-01A (ver *Anexo 5*) se muestra el recorrido de la tubería, junto con los anclajes y apoyos típicos. A continuación se muestran algunos de los resultados del diseño de apoyos y anclajes.

anclaje #	α [°]	H [m]	F_1	F_2	F_3	F_4	F_6	F_7	F_8	pedestal				base				dilatador		contraer		
										A	L	H	A	L	H	A	L	H	L _a	L _{a1}	L _{a2}	S _{base}
1	38.23	40.0	275.33	247.79	-871.40	1845.75	3000	223.20	-11.72	1.15	1.50	1.60	1.15	2.25	1.60	0	0.75	0.80	0.07	0.46	0.41	
2	20.83	80.0	327.59	294.83	-454.13	1845.75	3000	446.40	-3.05	1.15	1.50	1.60	1.15	2.25	1.60	0	0.75	0.76	0.14	0.38	0.51	
3	16.31	120.0	336.39	302.75	252.55	1845.75	3000	669.60	1.13	1.15	1.50	1.60	1.15	2.25	1.60	0	0.75	0.77	0.16	0.36	0.57	3.0
4	17.98	160.0	333.37	300.03	-1083.82	1845.75	3000	892.80	-3.64	1.15	1.50	1.60	1.15	2.25	1.60	0	0.75	0.87	0.00	0.43	0.43	
5	12.59	200.0	342.06	307.86	-3157.77	1845.75	3000	1116.00	-8.49	1.75	1.25	2.00	1.75	2.00	1.25	0.28	0.47	0.65	0.01	0.52	0.09	

apoyo típico	α [°]	F_1	F_2	L_a [m]	Δ_{adm} [mm]	Δ	base				pedestal				sopORTE			
							L	A	H	L	A	H	L	A	H	L	A	H
1	38.23	0.24	0.12			1.73	0.90	0.90	0.40	0.45	0.45	0.60	0.45	0.45	0.35	1.20	1.93	
2	20.83	0.28	0.14			1.73	0.90	0.90	0.40	0.45	0.45	0.60	0.45	0.45	0.17	0.87	2.40	
3	16.31	0.29	0.14	5.0	13.89	1.73	0.90	0.90	0.40	0.30	0.30	0.60	0.30	0.30	0.09	0.90	1.95	30.0
4	17.98	0.29	0.14			1.73	0.90	0.90	0.40	0.30	0.30	0.60	0.30	0.30	0.10	0.82	2.01	
5	12.59	0.29	0.15			1.73	0.90	0.90	0.40	0.30	0.30	0.60	0.30	0.30	0.07	1.08	1.81	

3.1.8. Turbina

Las turbinas son máquinas que transforman la energía hidráulica (presión y velocidad), en energía mecánica (rotación de un eje). Para el presente estudio se prevé instalar una turbina Francis, misma que se encuentra del grupo “Turbinas de re-acción”.

3.1.9. Casa de máquinas

Para el presente estudio el área de la casa de máquinas debe estar cercana a los 50 m², este valor se obtuvo en función de la información obtenida de proyectos similares. En el plano PHQ-E04-CDM-01A (ver *Anexo 5*), se puede observar la distribución arquitectónica de dicha estructura.

3.2. Análisis económico

Una vez que se han determinado las diferentes estructuras necesarias para la producción hidroeléctrica, se definen los costos del proyecto; como ya se mencionó anteriormente estos son necesarios durante el tiempo de construcción y operación de la minicentral hidroeléctrica. Así tenemos que el costo total de inversión es:

- Costo directo obras civiles = U.S.D. 193 458.20
- Costo total obras civiles = U.S.D. 259 488.50
- Costo equipo electromecánico = U.S.D. 82 002.20
- Costo total de inversión (C. Tot.) = U.S.D. 341 490.80

mientras que los costos por concepto de operación y mantenimiento son:

$$C(\text{Op \& M}) = 1\% \text{ C. Tot.} = 0.01 \times 341\,490.80 = \text{U.S.D. } 3\,414.90$$

Con los datos actuales se recomienda un diseño para el caudal más alto $Q = 0.167$ [m³/s], mismo que tiene una probabilidad de ocurrencia del 30% durante el transcurso de un año. Es necesario tomar en cuenta que los valores del análisis económico pueden variar por diversos motivos, uno de ellos es la distribución que se dé a la tubería de presión, esta última se encuentra en función del tipo de turbina a usar y del material propio que conforma la tubería.

En el *Anexo 4* se muestran algunos de los resultados previos al análisis de sensibilidad.

3.3. Sensibilidad de los parámetros de diseño

3.3.1. Efectos de la variación del flujo de descarga

En la Figura 3.2 se muestra la variación de la eficiencia del rodete en función del caudal.

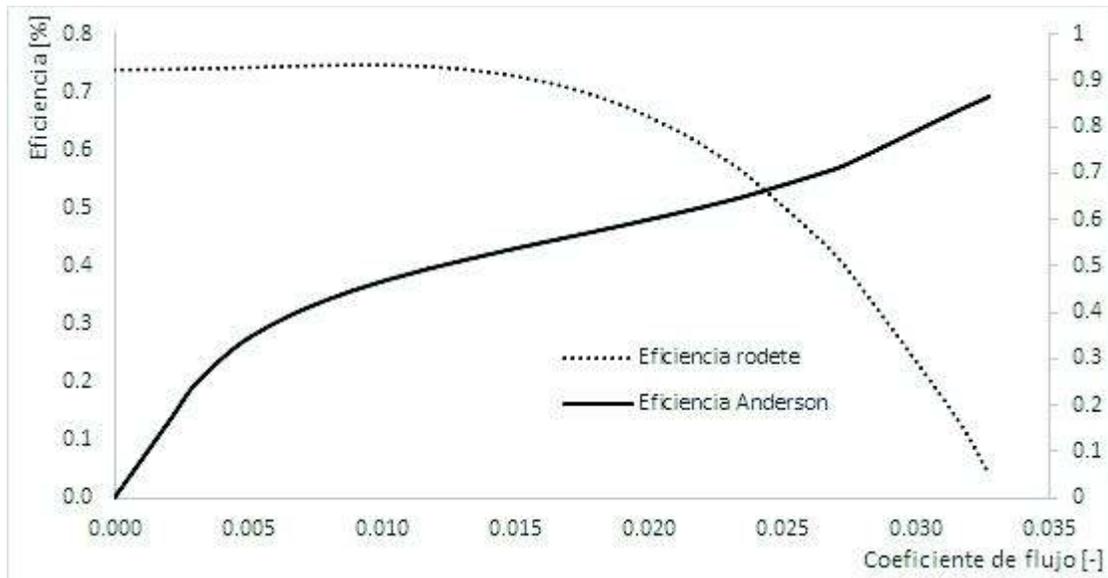


Figura 3.2. Efectos sobre eficiencia en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

Como se puede apreciar en la gráfica un aumento en el caudal hace que la eficiencia del rodete disminuya. Esto se debe a que la altura neta (carga) disminuye a la par del aumento del flujo, según la literatura consultada este comportamiento se debe a que al estar funcionando en modo turbina la bomba sigue manteniendo sus características de diseño.

En la Figura 3.3 se muestra la variación que tiene tanto la altura, como la potencia en función de la variación del flujo o caudal. Se puede notar que esta forma de la curva se debe a las características propias de la turbomáquina, en donde a medida que el caudal aumenta la altura disminuye requiriendo un aumento en el consumo.

En su diseño como PAT se toma en cuenta esta característica debido a que la altura disponible para generar cierta potencia se encuentra determinada por la respectiva curva de carga (coeficiente de carga).

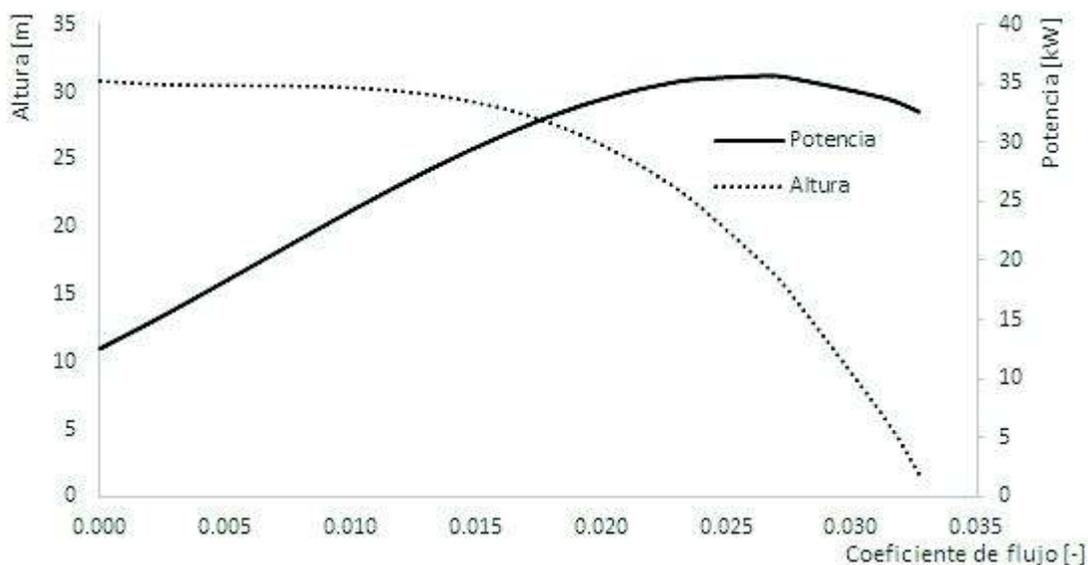


Figura 3.3. Efectos sobre altura y potencia en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.4 muestra la variación del factor de erosión y la eficiencia en función del coeficiente de descarga. Se evidencia que a caudales mayores el factor de erosión aumenta y la eficiencia disminuye.

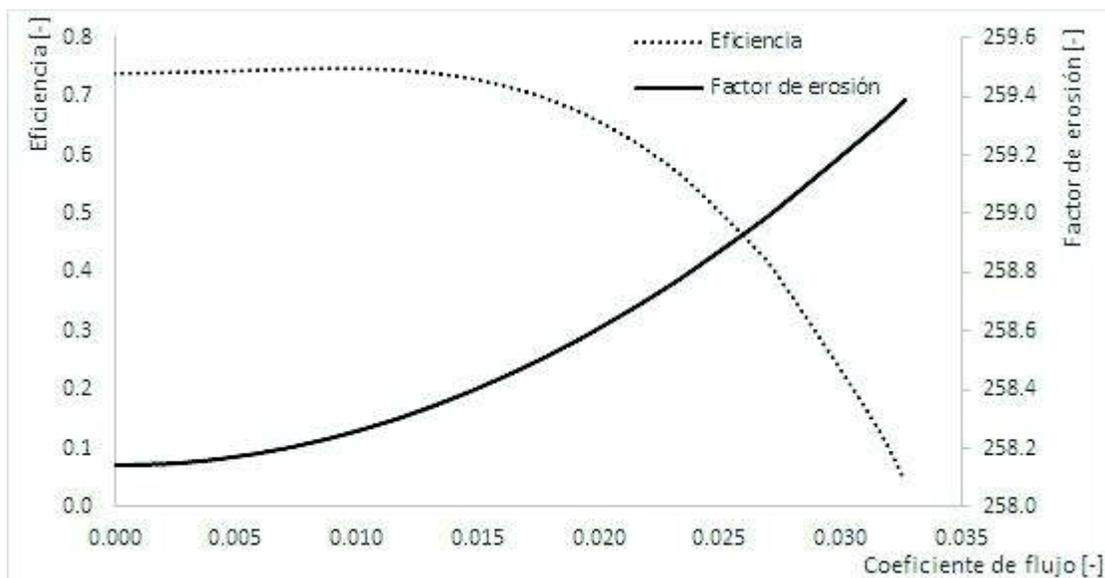


Figura 3.4. Eficiencia y Factor de erosión en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

La altura a la cual trabajaría la bomba en modo turbina tiene una tendencia similar a la que se muestra en la figura anterior, motivo por el cual no se muestra nuevamente. La potencia tiene una tendencia creciente, esto debido a que se encuentra en función directa del caudal, esto se puede observar en la Figura 3.5.

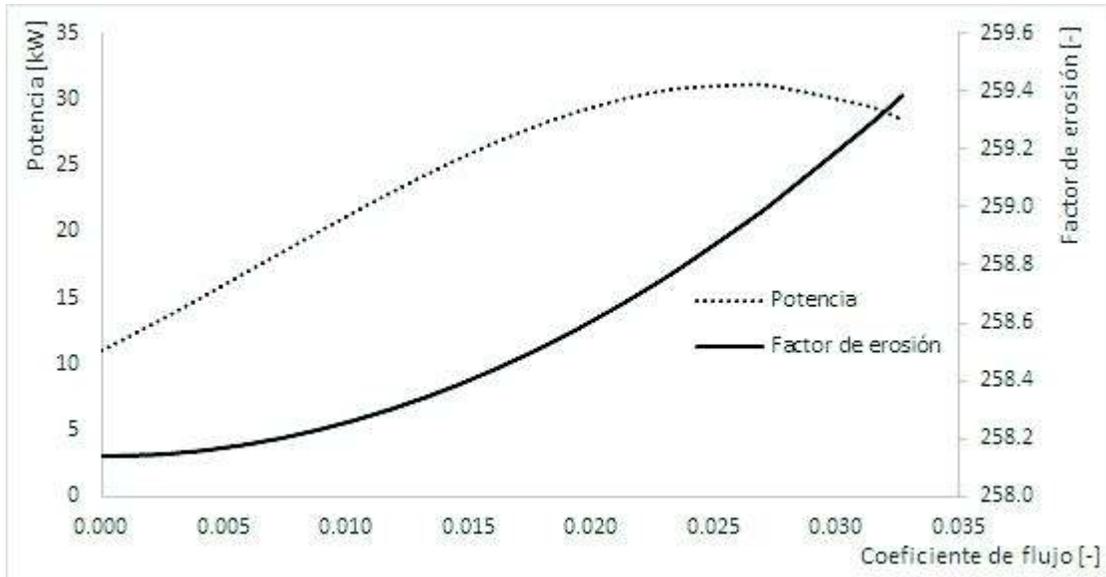


Figura 3.5. Potencia y Factor de erosión en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

La variación de las velocidades específica y axial, mientras se incrementa el coeficiente de flujo se muestran en la Figura 3.6; se evidencia que en ambos casos tienen una tendencia creciente.

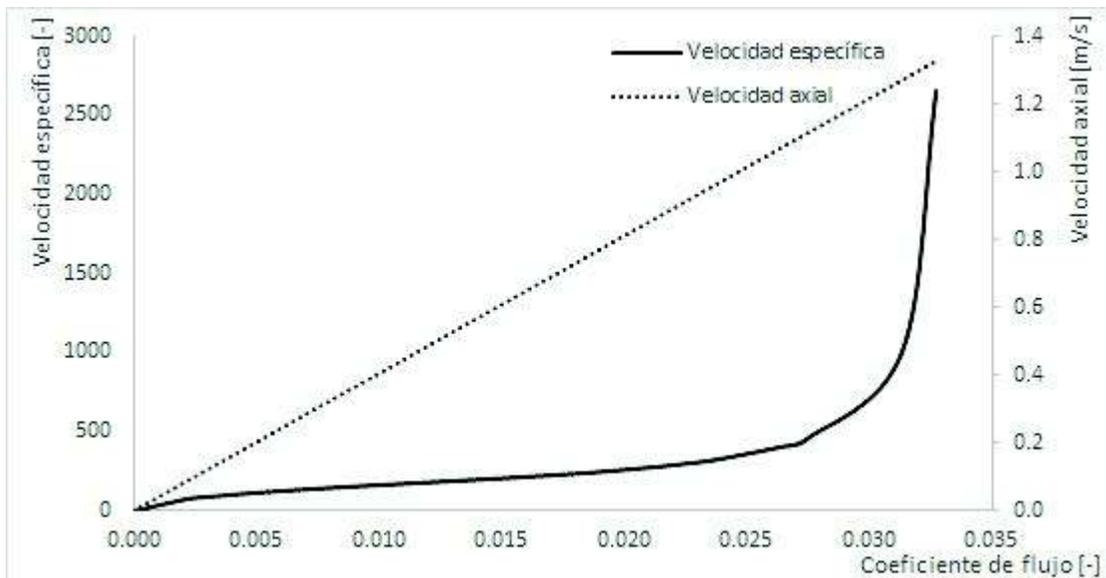


Figura 3.6. Velocidad específica y axial en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.7 muestra como varían las componentes de la velocidad (tangencial, absoluta y relativa) a la entrada del rodete. La tendencia de la velocidad es decreciente, en otras palabras, a un mayor caudal la velocidad disminuye.

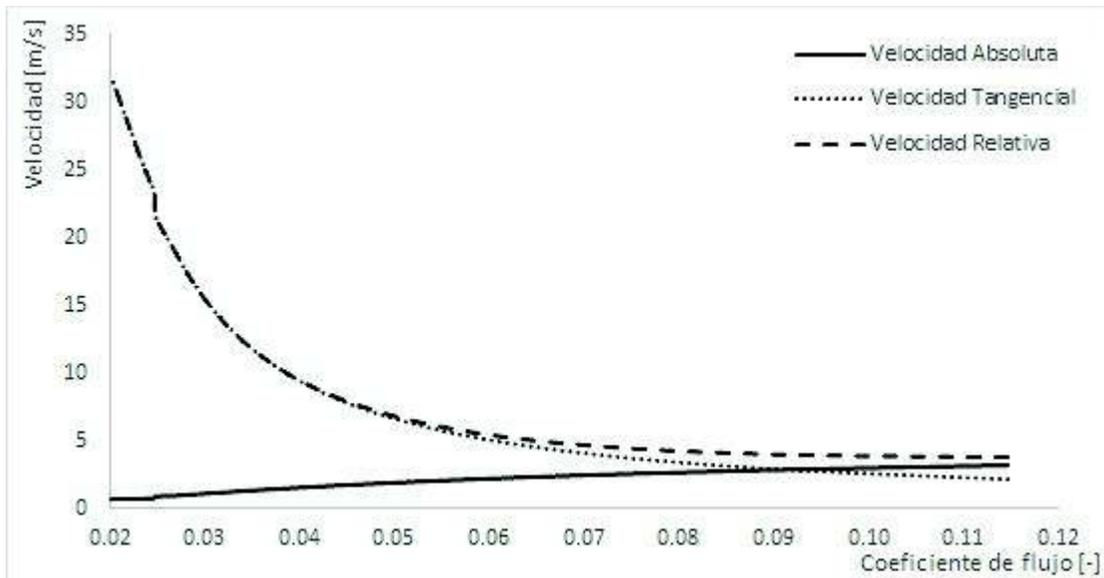


Figura 3.7. Componentes de la velocidad a la entrada del rodete en función del coeficiente de flujo. (Fuente: Propia)

La velocidad específica y altura (carga neta) varían en función del caudal, como se muestra en la Figura 3.8. La altura disminuye por las características propias de la turbomáquina, la velocidad específica muestra un crecimiento debido a que se encuentra en función del caudal, altura y velocidad de rotación.

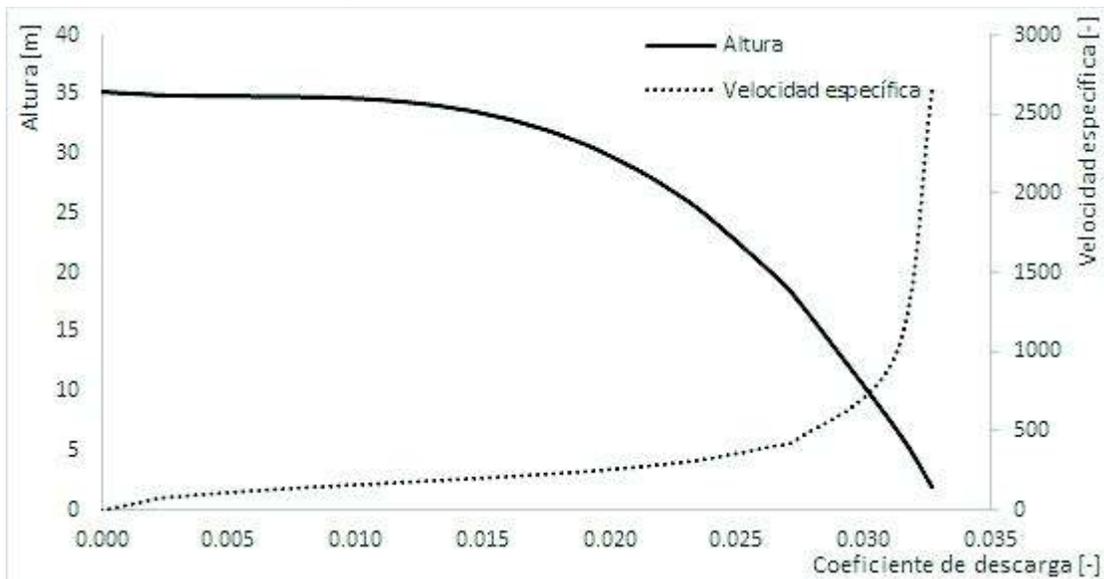


Figura 3.8. Altura y Velocidad específica en función del coeficiente de descarga. (Fuente: Propia)

La Figura 3.9 muestra la variación entre la velocidad absoluta a la salida y el factor de erosión en función del coeficiente de descarga (caudal). La tendencia de la velocidad absoluta a la salida del rodete es decreciente debido a que se encuentra en función

inversa al caudal; mientras que el factor de erosión marca siempre un crecimiento debido a que se encuentra en relación directa con el caudal y el radio a la entrada al rodete.

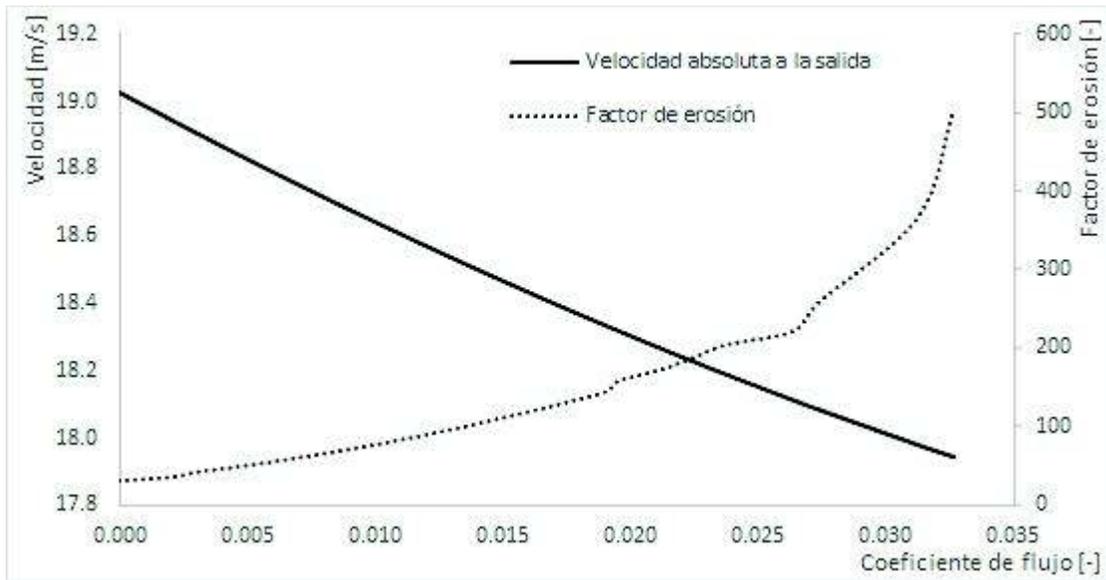


Figura 3.9. Velocidad absoluta y factor de erosión en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

Como se puede verificar en la Figura 3.10 la relación directa entre el factor de erosión y el radio de entrada al rodete, en ambos casos se muestra una marcada tendencia creciente.

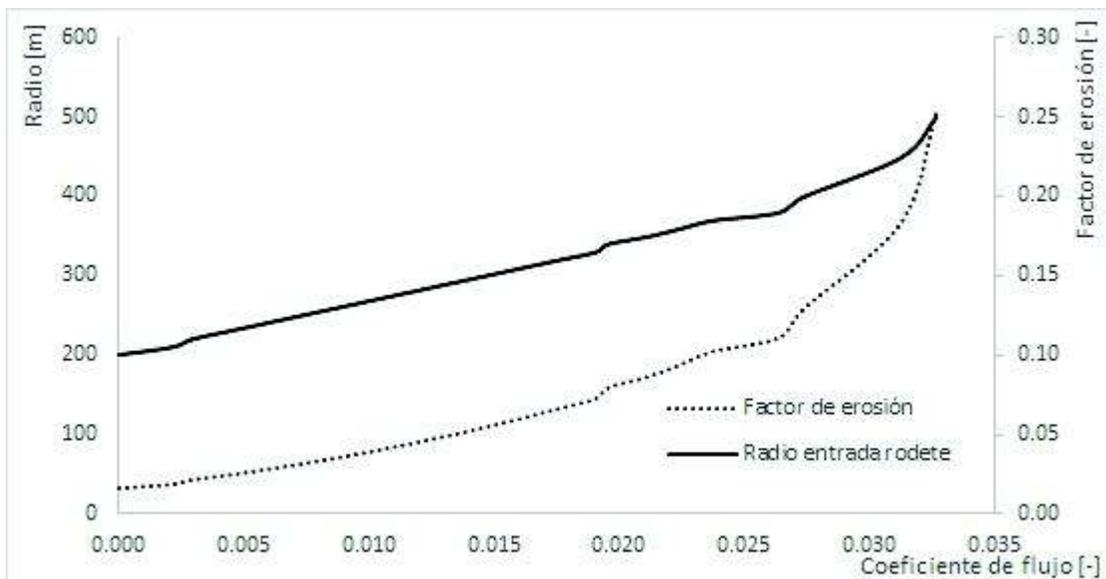


Figura 3.10. Radio de entrada al rodete y factor de erosión en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.11 muestra la variación del tanto de la velocidad tangencial a la salida del rodete y el factor de erosión, en función del caudal (coeficiente de flujo), nótese que ambas tienen una tendencia decreciente debido a que el coeficiente de flujo se encuentra en función inversa a la velocidad de rotación de la turbomáquina.

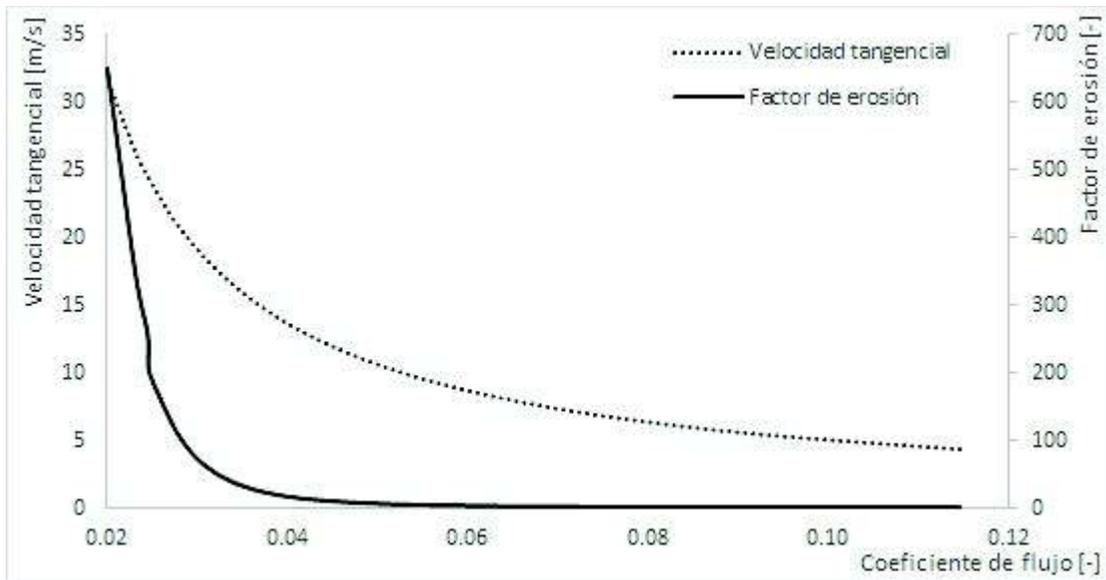


Figura 3.11. Velocidad tangencial a la salida del rodete y factor de erosión en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.12 se muestra la variación de las velocidades tangenciales tanto a la entrada como a la salida del rodete en función (en ambos casos) del coeficiente de flujo. La tendencia es decreciente debido a que el coeficiente de flujo o descarga se encuentra en función inversa a la velocidad de rotación de la turbomáquina; mientras que para las velocidades tangenciales la relación con la velocidad de rotación es directa.

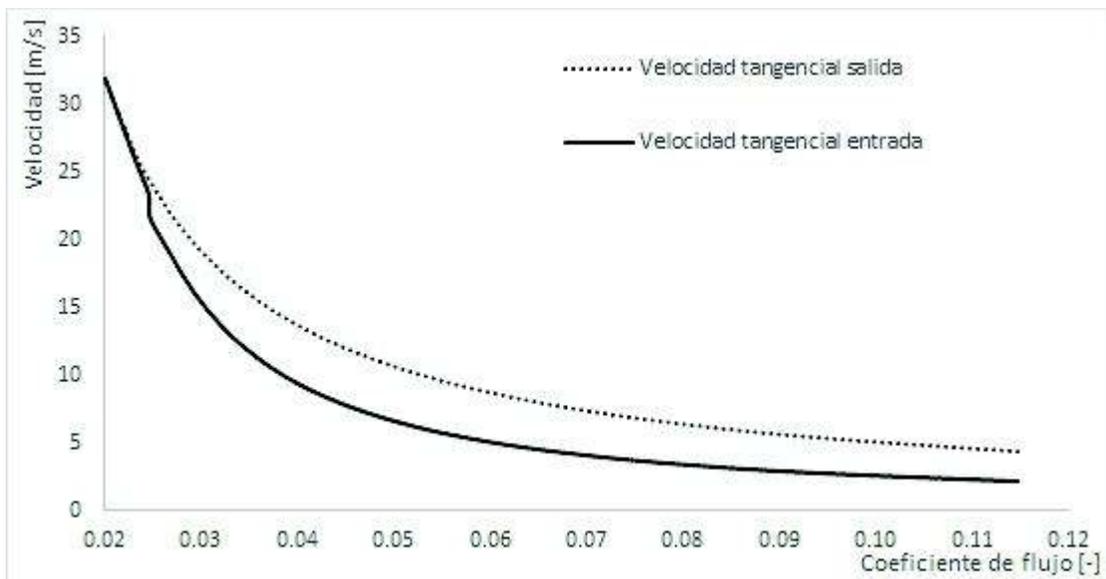


Figura 3.12. Velocidad tangencial a la entrada y salida en función del coeficiente de flujo.
(Fuente: Propia)

3.3.2. Efectos de la variación de la altura o carga disponible

Cuando se modifica o varía la altura (carga) disponible, la tendencia de la eficiencia cambia, esto se puede observar en la Figura 3.13.

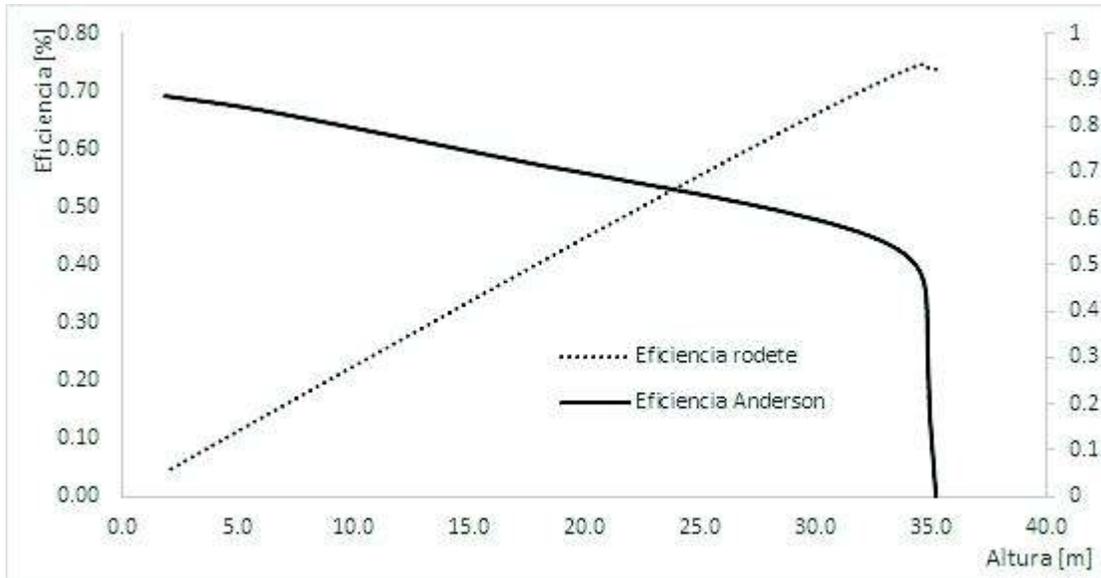


Figura 3.13. Eficiencia en función de la altura.
(Fuente: Propia)

La potencia tiene una curva similar a la que se mostró anteriormente, cuando el caudal varía; por otra parte, el factor de erosión cambia su tendencia, ya que se encuentra en relación directa con el caudal y la altura.

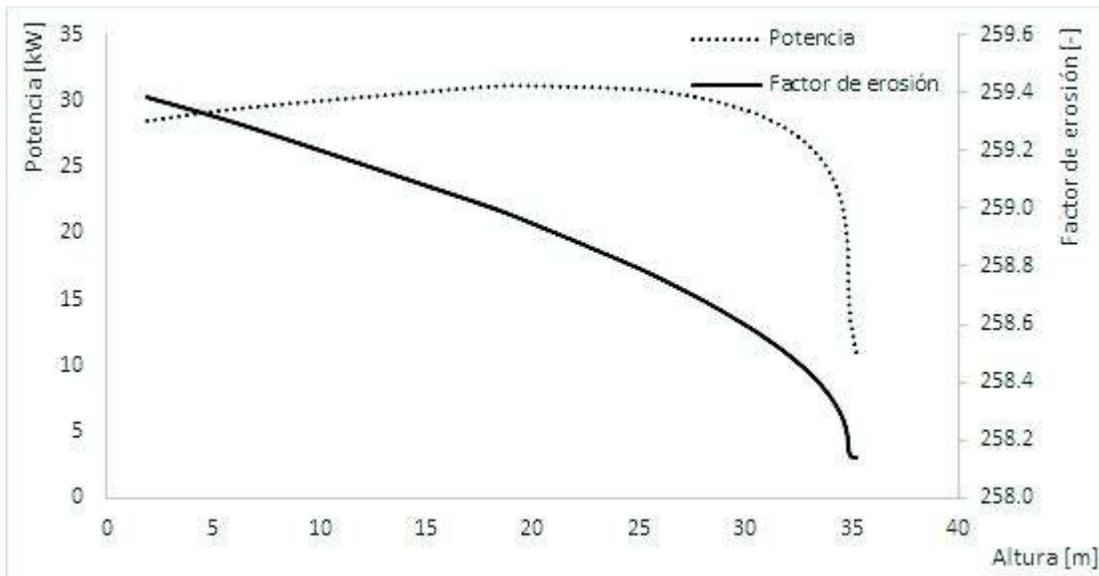


Figura 3.14. Potencia y Factor de erosión en función de la altura.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.15 muestra el cambio de las velocidades tangenciales a la entrada y salida del rodete (PAT), en función de la altura, de tendencia creciente debido a la relación directa con la velocidad de rotación.

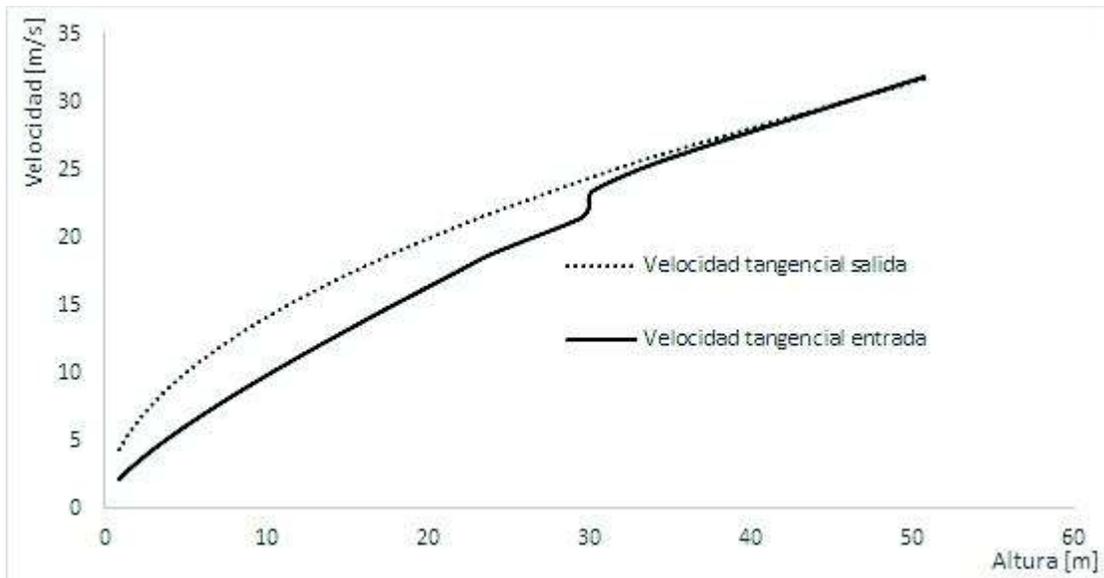


Figura 3.15. Velocidad tangencial a la entrada y salida del rodete en función de la altura.
(Fuente: Propia)

A continuación, se muestra la variación de la velocidad axial a la entrada del rodete y del factor de erosión, nótese que esta variación es decreciente debido a que en ambos casos se encuentran en función directa del caudal y este último a su vez con la altura.

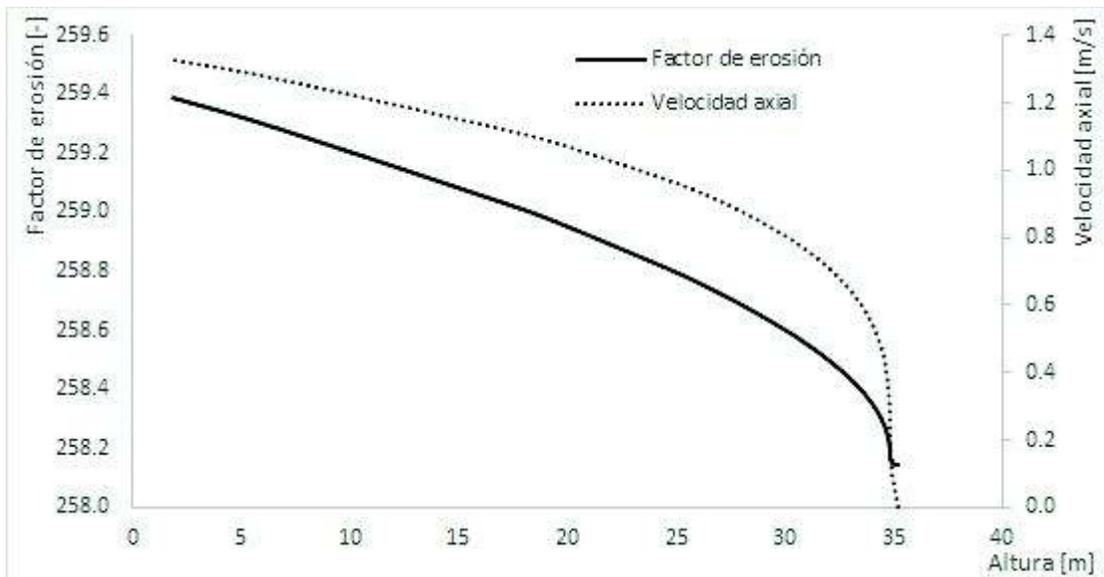


Figura 3.16. Factor de erosión y velocidad axial a la entrada en función de la altura.
(Fuente: Propia)

Complementando a la gráfica anterior, se presenta la Figura 3.17 con la variación de la velocidad específica y axial, modificando la altura. Nótese que tanto las velocidades como la altura se encuentran en función del caudal.

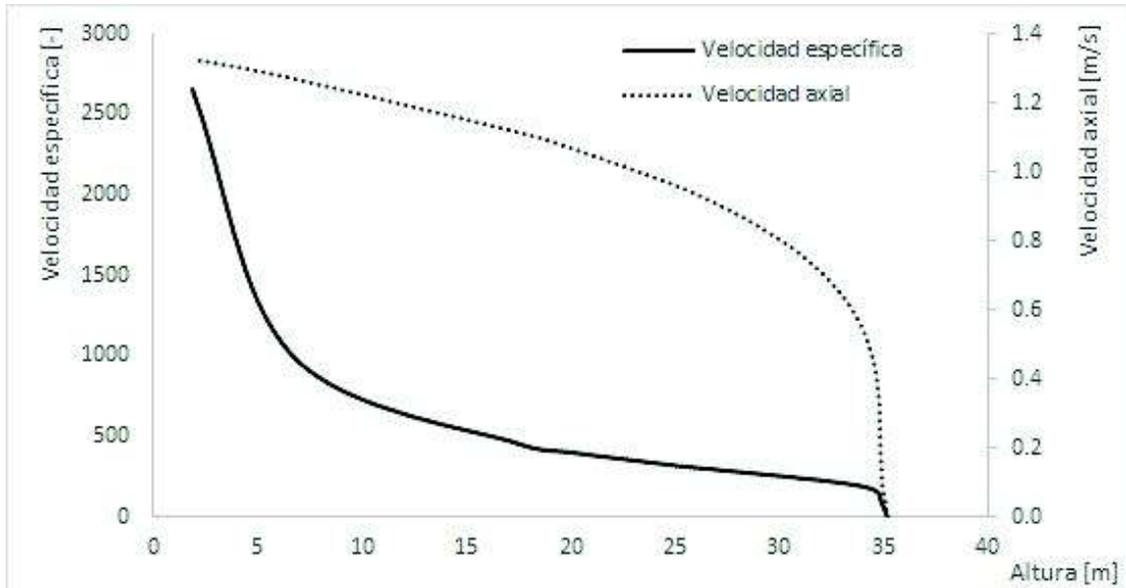


Figura 3.17. Velocidad específica y axial en función de la altura.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.18 se muestra como varían las componentes de la velocidad a la entrada del rodete, mientras se modifica la altura. Se puede apreciar que la velocidad absoluta es decreciente debido a que tiene una relación inversa del radio de entrada al rodete; mientras que la velocidad tangencial se encuentra en relación directa con la velocidad de rotación y el radio de entrada al rodete.

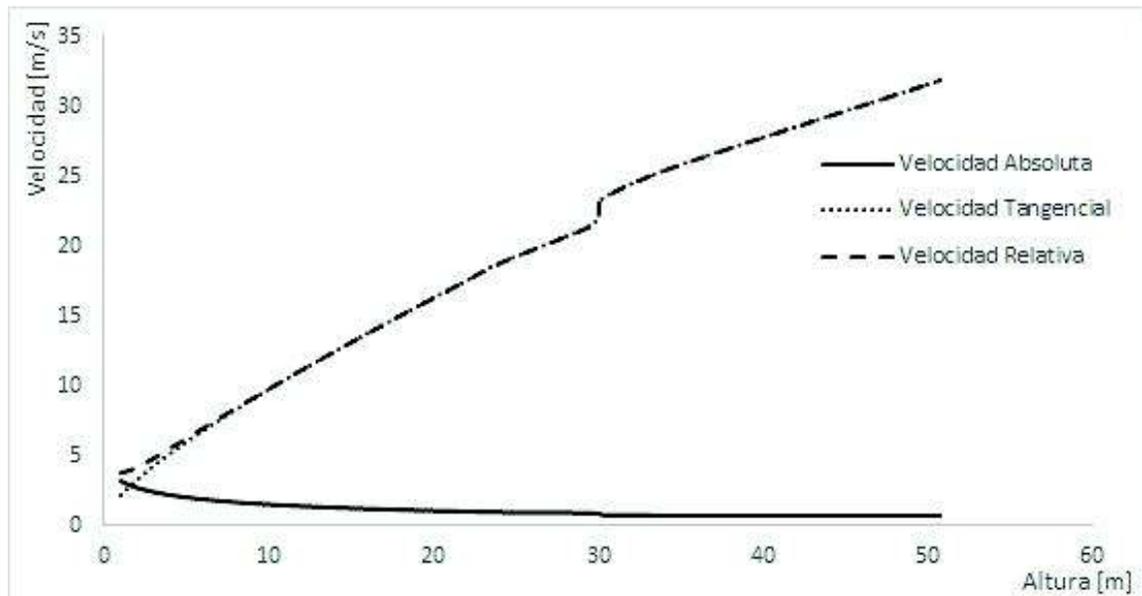


Figura 3.18. Componentes de la velocidad a la entrada del rodete en función de la altura.
(Fuente: Propia)

3.3.3. Efectos de la variación del diámetro de salida del rodete

La Figura 3.19 muestra la variación tanto de la altura como de la potencia en relación con el diámetro de salida del rodete. Nótese que la altura es decreciente, mientras que la potencia marca una tendencia creciente.

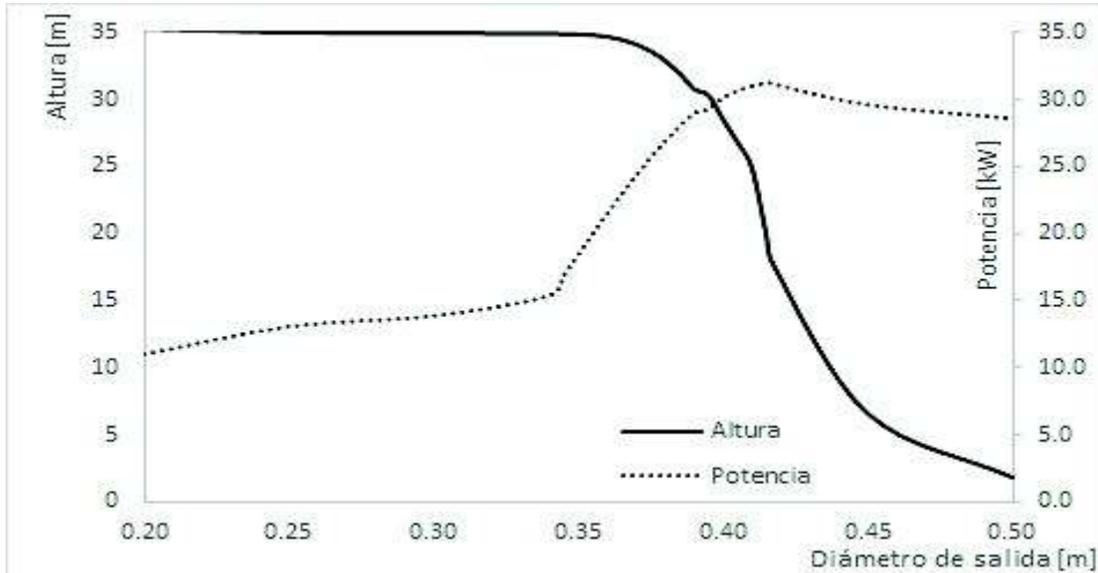


Figura 3.19. Altura y Potencia en función del diámetro de salida.

(Fuente: Propia)

A manera de complemento de la gráfica anterior se muestra a continuación la variación de la altura o carga neta y el factor de erosión, en función del diámetro de salida.

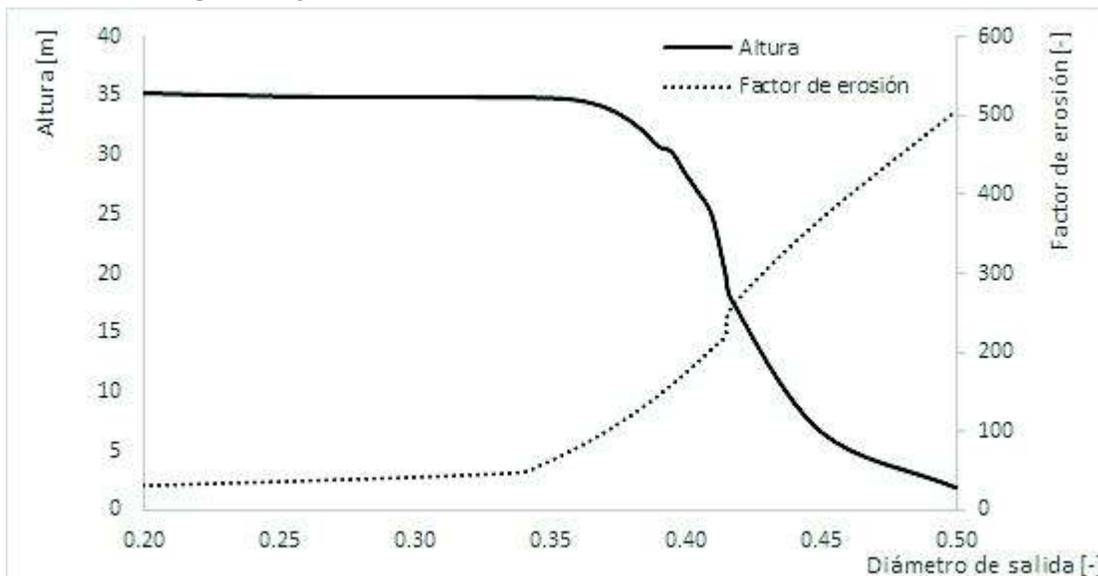


Figura 3.20. Altura y Factor de erosión en función del diámetro de salida.

(Fuente: Propia)

La Figura 3.21 muestra el cambio en la eficiencia y el factor de erosión, en función del diámetro de salida. Al modificar el diámetro de salida se alteran también la eficiencia y el

factor de erosión, estos se encuentran en función de la velocidad del flujo (velocidad tangencial).

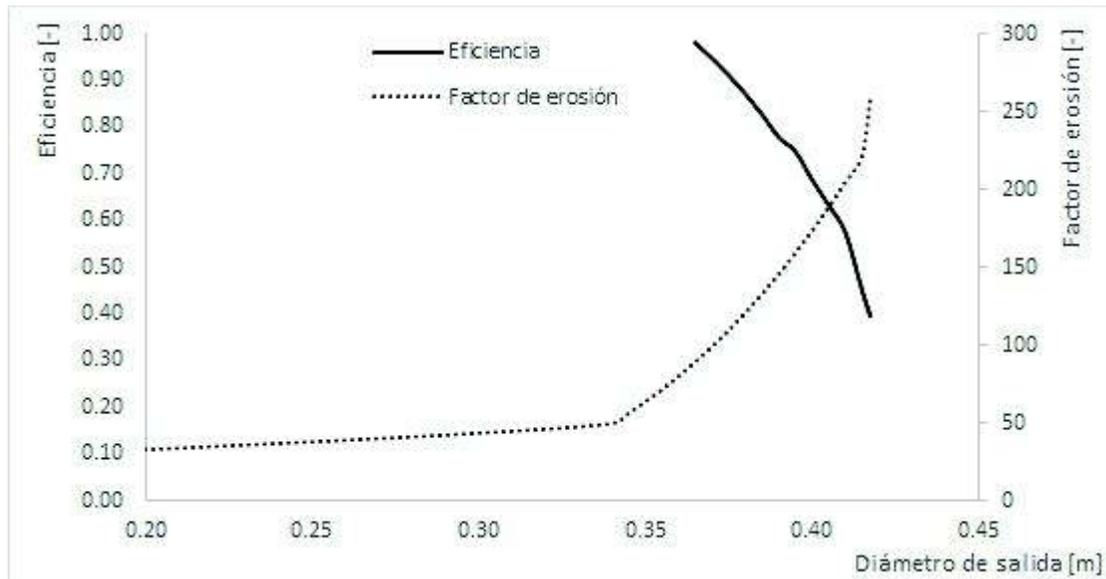


Figura 3.21. Eficiencia y Factor de erosión en función del diámetro de salida.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.22 muestra, complementando la gráfica anterior, como varían las velocidades tangenciales tanto a la entrada y salida del rodete.

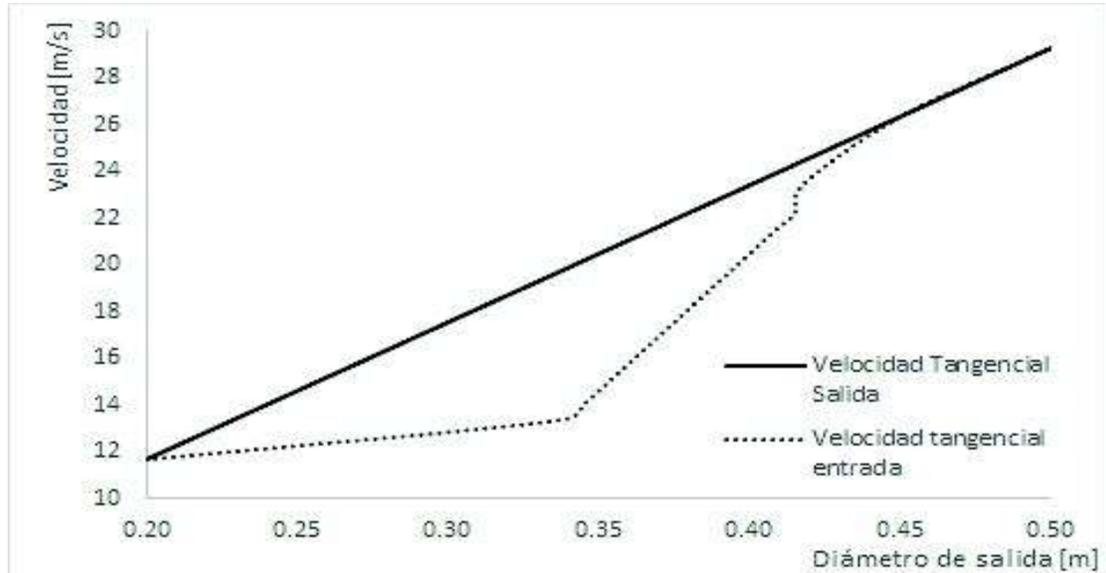


Figura 3.22. Velocidad Tangencial en función del diámetro de salida.
(Fuente: Propia)

3.3.4. Efectos de la variación del número de álabes del rodete

Al modificar el número de álabes que conforman el álabe se tiene que se afecta de manera directa a la eficiencia y velocidad absoluta a la salida del rodete. En la Figura

3.23 se muestra la tendencia que marca la eficiencia y velocidad absoluta en función del número de álabes.

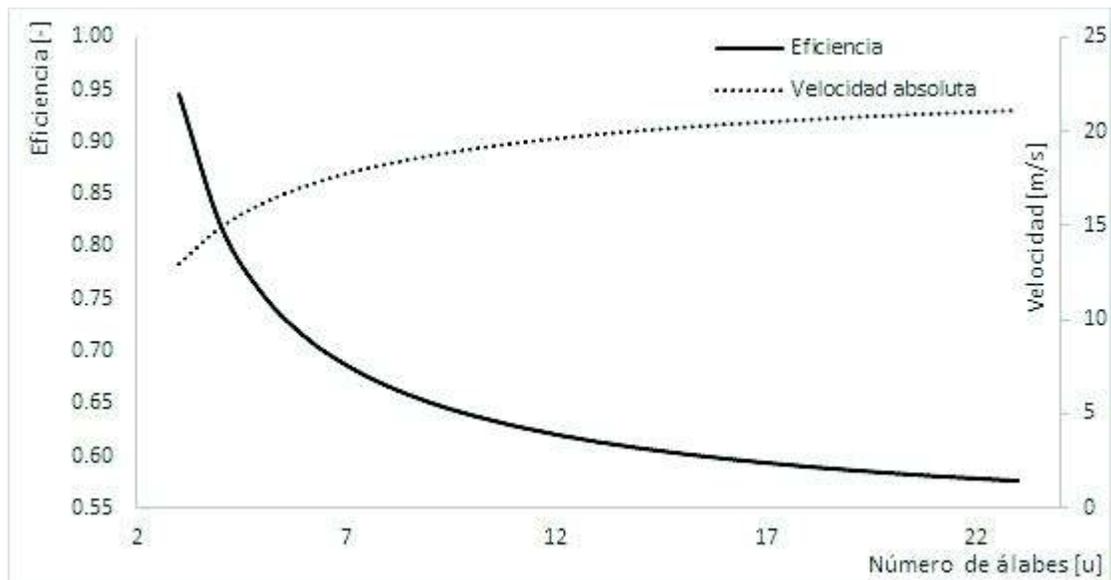


Figura 3.23. Eficiencia y Velocidad absoluta en función del número de álabes.
(Fuente: Propia)

3.3.5. Función objetivo

La función objetivo tiene que relacionar la velocidad y ancho a la salida del rodete, el factor de erosión y la eficiencia del álabe. Las variables de decisión son en primera instancia el diámetro de salida y el número de álabes del rodete.

Del análisis de sensibilidad se optó como variables de decisión al diámetro de salida, el ángulo de salida del álabe y número de álabes. Las funciones objetivo entonces son dos, minimizar el factor de erosión y maximizar la eficiencia del álabe. Los resultados que se obtuvieron son bastante satisfactorios, al compararlos con los estudios de la literatura de libre acceso.

Para la optimización se va a trabajar con diversas funciones objetivo, que tiene relación directa; así se seleccionan entonces cuatro funciones objetivo, se busca minimizar: la velocidad tangencial a la salida del rodete, el ancho a la salida del rodete, así como el factor de erosión y maximizar el rendimiento del rodete.

3.4. Optimización multiobjetivo para álabes de PAT

El proceso de optimización mediante algoritmos genéticos se empleó el software comercial MatLab. En el *Anexo 1* se muestran los resultados arrojados por el programa durante el proceso de optimización. Una característica particular, de este método, para el presente caso es que en cada nuevo intento la familia de resultados se modifica.

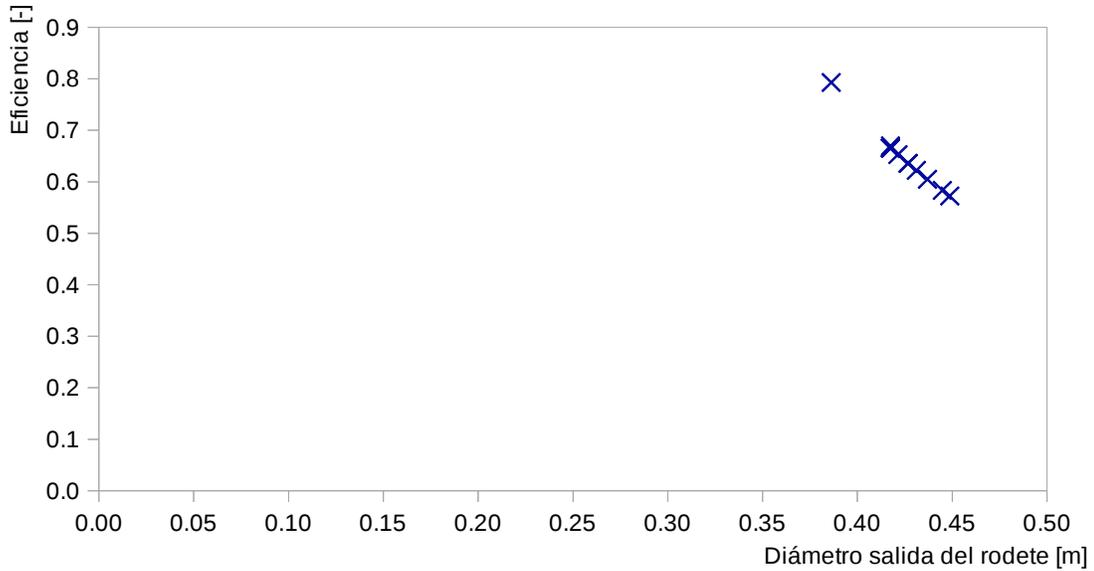


Figura 3.24. Frente de Pareto para el intento 1.
(Fuente: Propia)

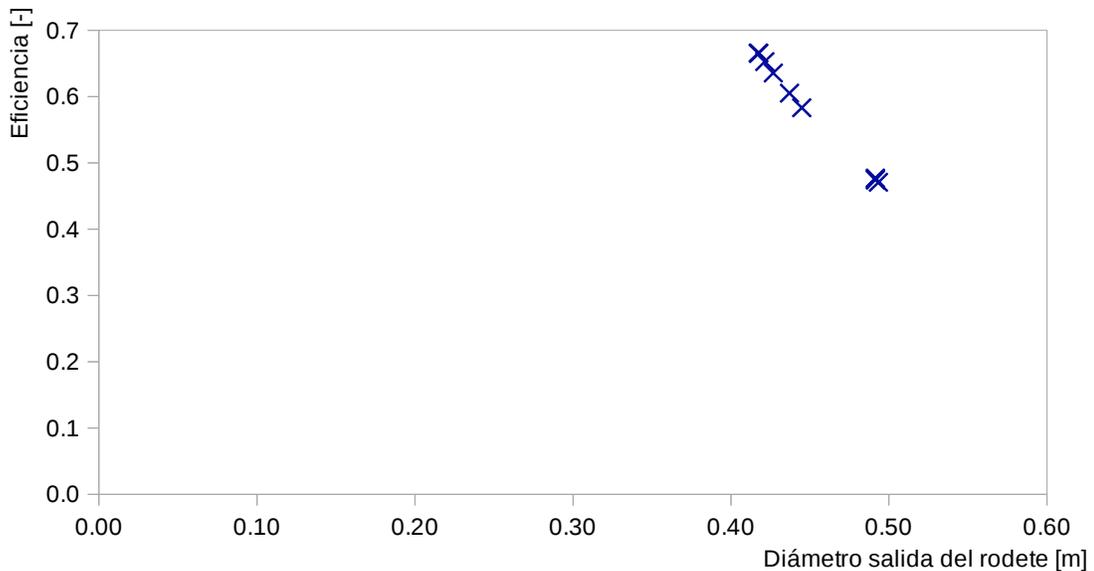


Figura 3.25. Frente de Pareto para el intento 2.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 4.2 del *Anexo 1* se obtiene una familia de resultados que varía de acuerdo a la repetición ejecutada. Comparando dichos resultados, se tiene que los valores óptimos, coinciden en varias repeticiones. Los factores que influyen directamente son aquellos que se encuentran en relación directa con el desempeño de la turbina, entre estos el diámetro, ancho y ángulo de salida del rodete, número de álabes y altura de caída neta. En la Figura 3.24 se muestran los resultados obtenidos, también conocido como Frente de Pareto, para la eficiencia del rodete. Se tienen combinaciones que permiten obtener

una eficiencia superior al valor seleccionado, en este caso el valor del diámetro es menor a 0.40 [m]. En la Figura 3.25 se muestra un nuevo frente de Pareto, es decir un nuevo intento. Para este caso el valor óptimo seleccionado en el intento 1 se confirma, el valor escogido se repite en las nuevas generaciones.

3.5. Simulación numérica en Ansys CFX del diseño propuesto

Existen diversas alternativas para trasladar los resultados de la optimización, hacia un modelo 3D en Ansys. El primero es dibujar mediante el software comercial AutoCAD y un subprograma hecho en Visual Basic; una segunda alternativa consiste en utilizar el paquete BladeGen y exportarlo a TurboGrid, ambos dentro del propio Ansys. En la Figura 3.26 se muestra la forma del álabe luego de ejecutar el programa en Visual Basic.

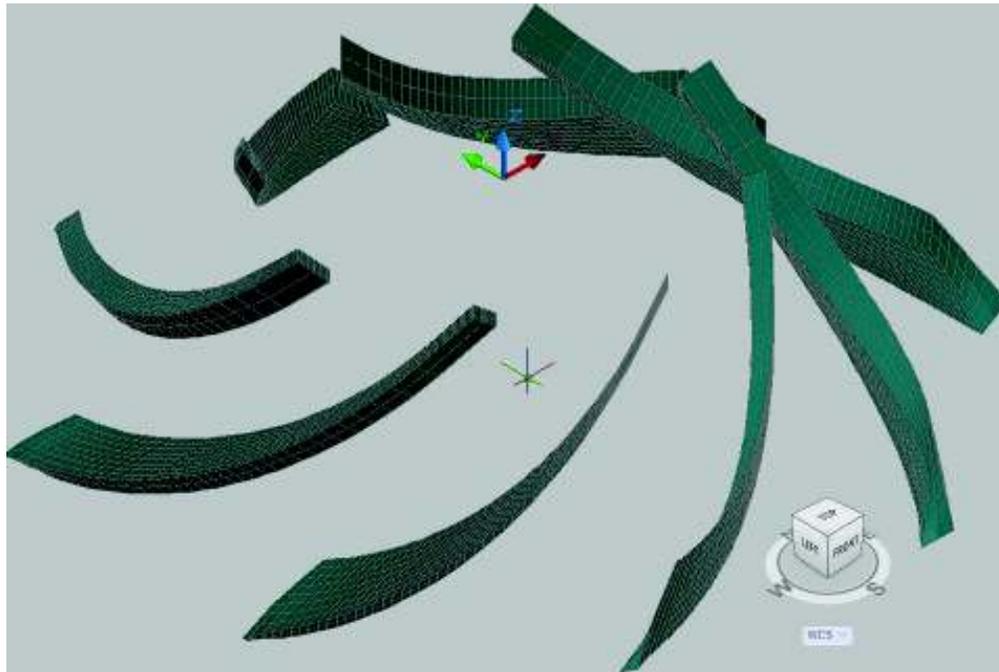


Figura 3.26. Geometría de los álaves – vista isométrica.
(Fuente: Propia)

El tamaño de la malla media es de aproximadamente 323 777 nodos, la variación de los resultados es insignificante al afinar la malla. Para el modelo final, el número de nodos es 674 256, mientras que el número de elementos de forma hexahédrica es de 345 540. De acuerdo con varias investigaciones, los resultados se consideran confiables a partir de los 250 000 nodos para turbinas hidráulicas, mientras que para el caso de PAT's este valor es variable y función del tamaño del rodete para casos similares al presente trabajo este valor es de 270 000.

Dependiendo del modelo empleado, las condiciones de borde se aplicarán para todo el rodete o para un álabe, este último para el caso de emplear la herramienta BladeGen (ver Figuras 3.27 & 3.28). Es conveniente especificar el flujo de masa en la entrada de la PAT y la presión estática a la salida.

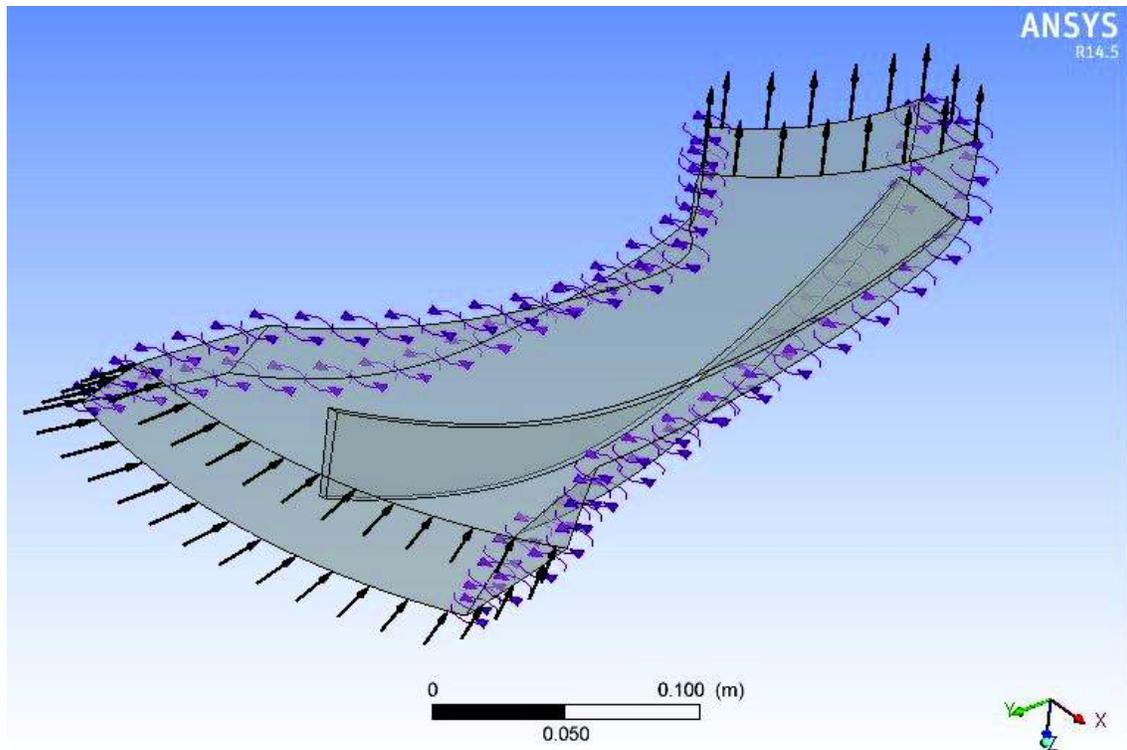


Figura 3.27. Geometría modelo propuesto Ansys – álabe.
(Fuente: Propia)

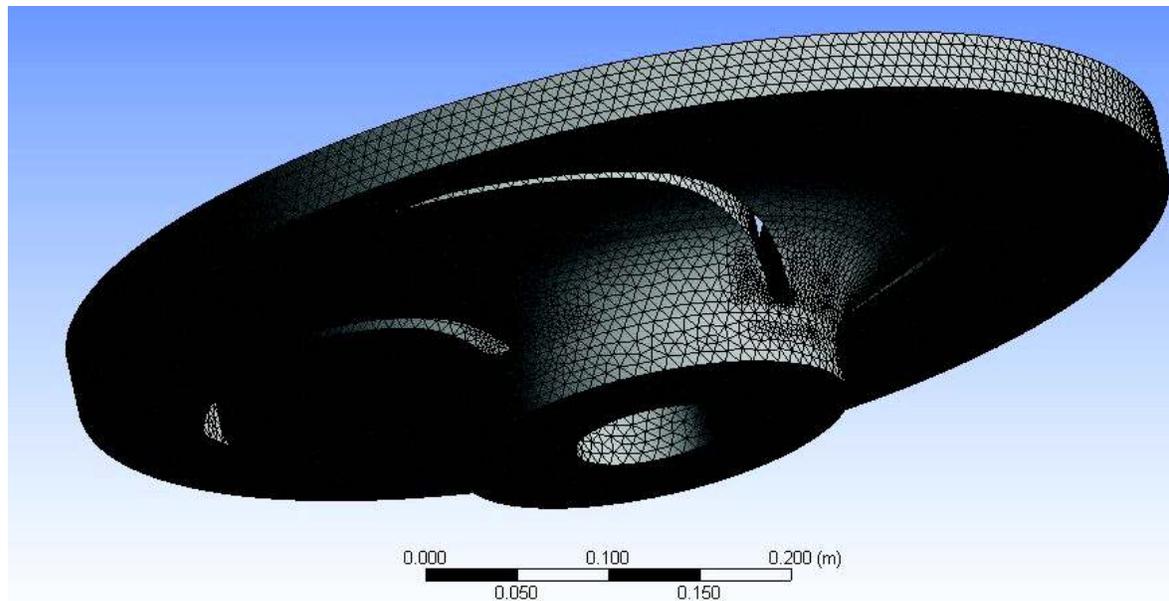


Figura 3.28. Geometría modelo propuesto Ansys – vista isométrica.
(Fuente: Propia)

Algunos de los resultados que se obtuvieron en Ansys CFD se muestran en las Figuras 3.29 a 3.34.

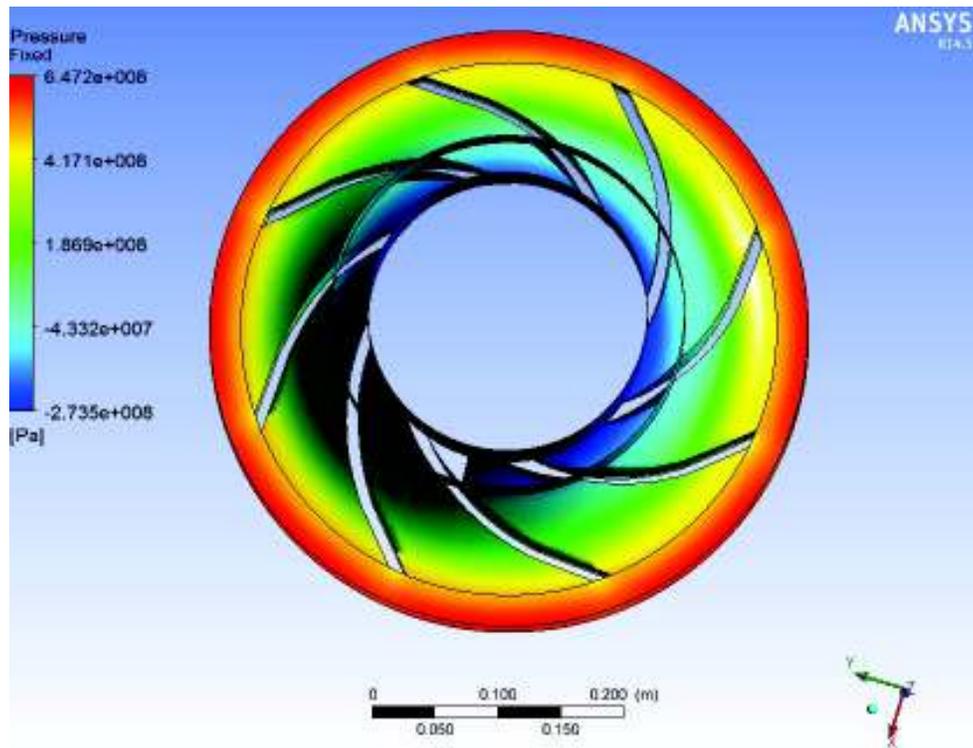


Figura 3.29. Presión dentro del fluido.
(Fuente: Propia)

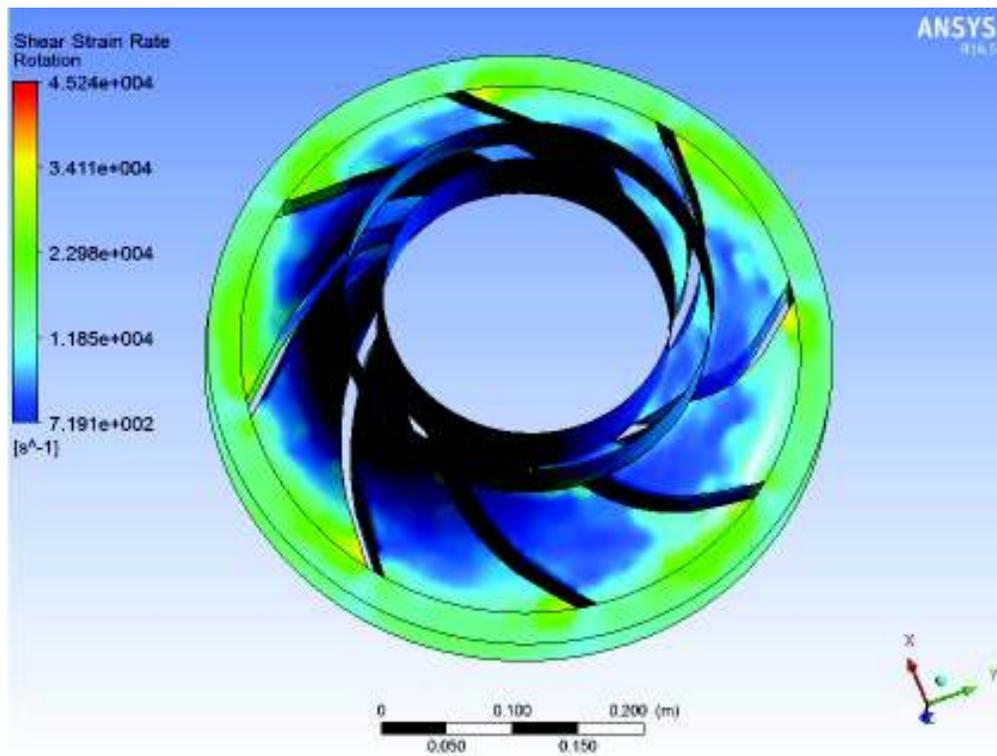


Figura 3.30. Esfuerzo cortante en el fluido.
(Fuente: Propia)

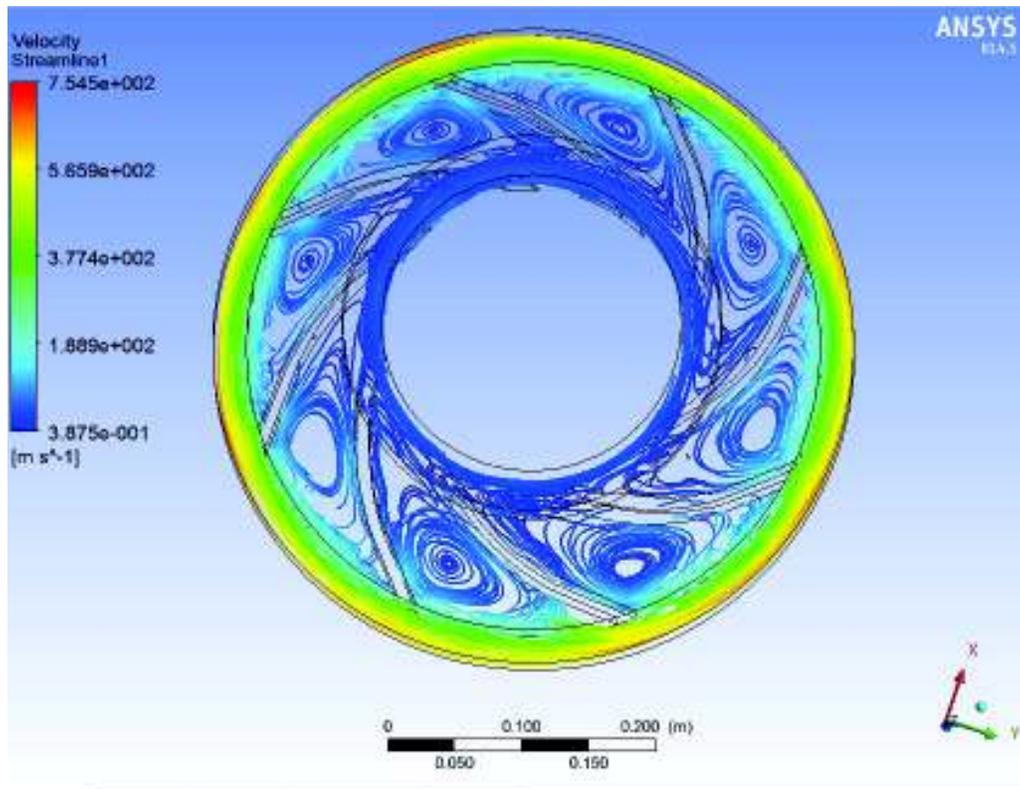


Figura 3.31. Líneas de flujo (variable: velocidad).
(Fuente: Propia)

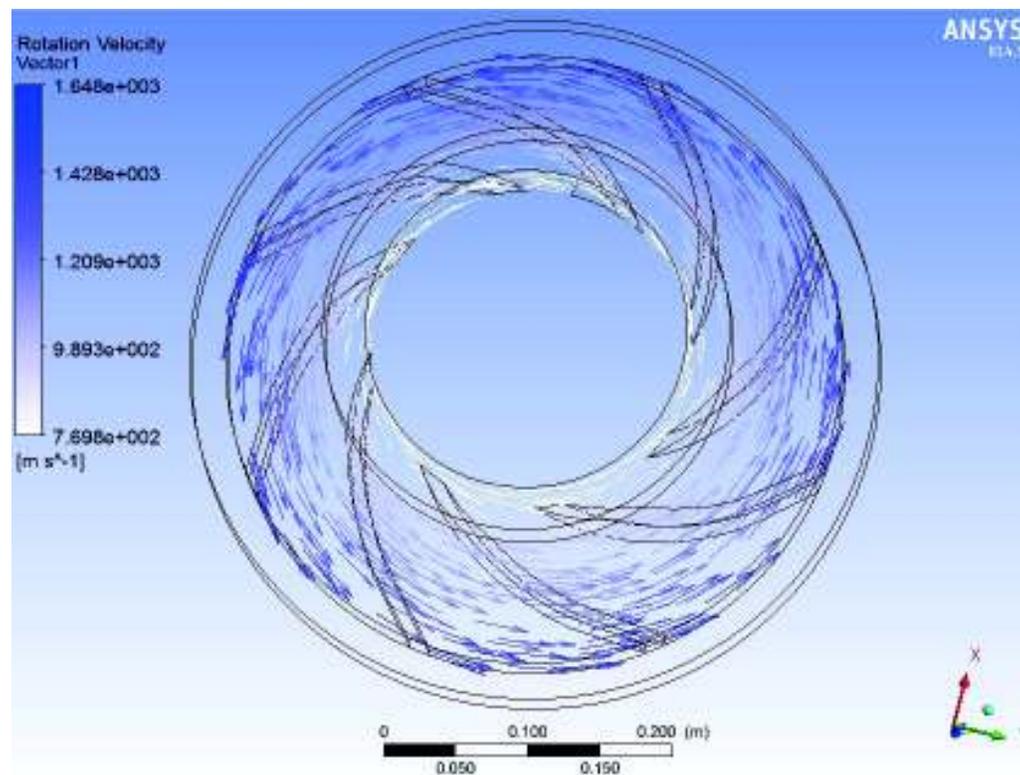


Figura 3.32. Líneas de flujo en el rodete.
(Fuente: Propia)

El flujo de sedimentos y la erosión que estos provocan se grafican a continuación.

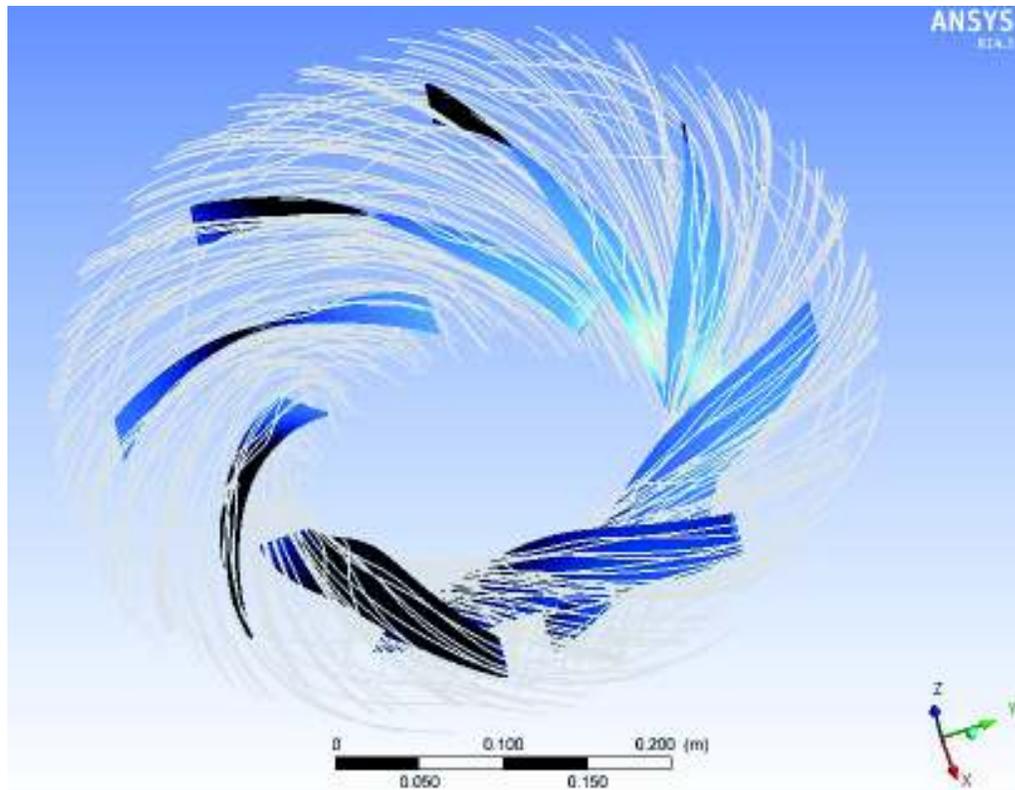


Figura 3.33. Flujo de sedimentos en el rodete.
(Fuente: Propia)

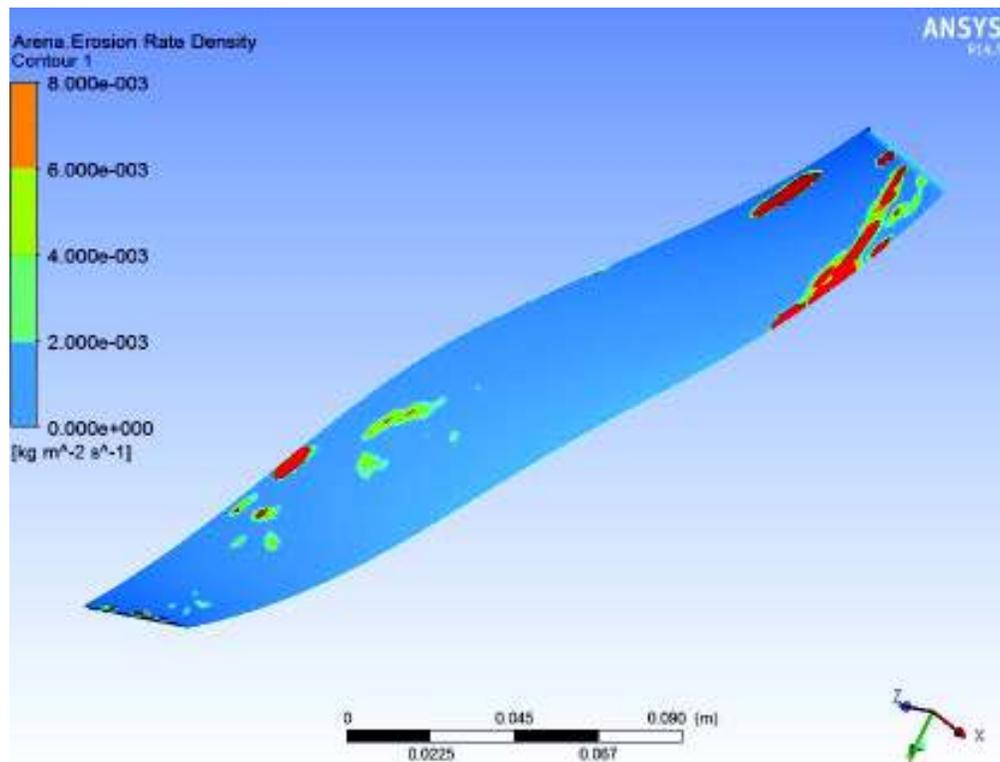


Figura 3.34. Erosión en uno de los álabes del rodete.
(Fuente: Propia)

Los impactos técnicos y económicos de la erosión, han sido desarrollados en turbinas hidráulicas a través de procesos de desgaste causados por materia sedimentaria suspendida y cavitación, ambos se manifiestan en dos vías. El primero, desarrollo de un proceso encaminado hacia un descenso de las propiedades energéticas de las turbinas (una reducción en la eficiencia y, en ciertos casos, en la capacidad de generación), con una caída asociada a la entrega de energía eléctrica. En segundo lugar, el proceso necesita trabajos de reparación dirigida a remover las consecuencias de la erosión en la composición de los diferentes elementos de las turbinas hidráulicas en la zona de paso del flujo; tal servicio de mantenimiento requerirá un considerable monto de trabajo y gastos en material.

La eficiencia de una turbina desgastada sufre un descenso, en comparación con una turbina reparada luego de instalar un rodete nuevo, entre el 12 y 14% dentro de los límites del rango operacional de potencia. La disminución de la eficiencia y la reducción de la potencia eléctrica puede ser contabilizado con suficiente seguridad, encontrándose cercano al 6 a 7% del valor total de potencia entregada. Asumiendo que el total de energía eléctrica generada por la hidroeléctrica entre periodos de reparación (cerca de 12 000 h) es igual a 2.4 millones de Kw.h, se puede estimar que la subproducción, a través del deterioro de la calidad de la turbina, suma cerca de 150 000 Kw.h.

Modelar y predecir la erosión hidro - abrasiva se encuentra en constante cambio debido a los múltiples parámetros que este proceso envuelve y sus complejas interacciones. Ecuaciones semi - empíricas y modelos de simulación numérica necesitan calibración y validación basada en datos que deben y necesitan ser adquiridos de las plantas hidroeléctricas y laboratorios. Dentro de la planificación y diseño de las plantas de generación hidroeléctricas con respecto al manejo de sedimentos y mitigación de la erosión en turbinas, las experiencias en operación son una importante fuente de información. Técnicas de medición probadas se encuentran disponibles para el monitoreo en tiempo real de concentración de sedimentos suspendidos (SSC, por sus siglas en inglés), tamaño de partículas, erosión de la turbina, y eficiencia, con alta resolución. Semejante información del monitoreo sirve como una base confiable para la toma de decisiones tanto en operación como en mantenimiento. Por lo tanto, en función de evaluar la intensidad de erosión en máquinas hidráulicas operando en un río cargado de sedimentos, es totalmente obligatorio conocer la composición mineralógica del material sedimentario que se encuentra definido por la estructura geológica del lecho del río.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1. Resumen

La optimización multi – objetivo de los parámetros geométricos del álabe de la PAT, muestra los siguientes resultados:

<i>Parámetro</i>		<i>resultado</i>	<i>unidad</i>
<i>Número de álabes</i>	n_b	8.0	[u]
<i>Ancho salida rodete</i>	b_2	43.12	[mm]
<i>Diámetro salida rodete</i>	D_2	417.44	[mm]
<i>Altura</i>	H	30.00	[m]
<i>Velocidad tangencial salida rodete</i>	U_2	24.47	[m/s]
<i>Velocidad de rotación</i>	N	1 120	[rpm]
<i>Coeficiente de carga</i>	Ψ	0.74	[-]
<i>Coeficiente de flujo</i>	Φ	0.0369	[-]
<i>Coeficiente de forma</i>	σ_F	0.77	[-]
<i>Eficiencia</i>	η	66.23	[%]

Para un segundo intento los resultados se presentan a continuación:

<i>Parámetro</i>		<i>resultado</i>	<i>unidad</i>
<i>Número de álabes</i>	n_b	7.0	[u]
<i>Ancho salida rodete</i>	b_2	68.75	[mm]
<i>Diámetro salida rodete</i>	D_2	491.37	[mm]
<i>Altura</i>	H	30.00	[m]
<i>Velocidad tangencial salida rodete</i>	U_2	21.74	[m/s]
<i>Velocidad de rotación</i>	N	1 120	[rpm]
<i>Coeficiente de carga</i>	Ψ	0.71	[-]
<i>Coeficiente de flujo</i>	Φ	0.01	[-]
<i>Coeficiente de forma</i>	σ_F	0.72	[-]
<i>Eficiencia</i>	η	87.59	[%]

Los resultados de la simulación a través del método CFD, muestran una eficiencia del rodete propuesto del 87.59% y un factor de erosión de 8.0×10^{-3} [kg/m²s], lo cual pone en evidencia la necesidad de estudios experimentales a fin de establecer una correlación entre los datos numéricos y los experimentales.

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron a través de la aplicación de criterios de varios autores, para establecer los valores de referencia en el comportamiento de las PAT.

	Autor	Stepanoff	Alatorre-Frenk	Shama	Schmiedl	Grover	Hergt
η_b : eficiencia modo bomba		0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
η_t : eficiencia modo turbina		0.88	0.85	0.88	0.94	0.77	0.88
H_b : altura modo bomba	[m]	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
H_t : altura modo turbina		34.25	36.44	35.17	43.62	80.58	105.87
Q_b : caudal modo bomba		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Q_t : caudal modo turbina	[m ³ /s]	0.11	0.11	0.11	0.16	0.24	0.16
N_{sb} : velocidad específica modo bomba		962.00			0.35	0.35	0.35
N_{st} : velocidad específica modo turbina		842.65			0.31	0.31	0.31

	Autor	Childs	NMHP	Williams	McClaskey	BUTU	Krivichenko
η_b : eficiencia modo bomba		0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
η_t : eficiencia modo turbina		0.88	0.88	0.88	0.88	0.85	0.70
H_b : altura modo bomba	[m]	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
H_t : altura modo turbina		34.25	41.40	60.00	34.25	36.44	46.80
Q_b : caudal modo bomba		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Q_t : caudal modo turbina	[m ³ /s]	0.11	0.13	0.17	0.11	0.11	0.09

4.2. Conclusiones

Una vez que se ha evaluado el proyecto de riego del cual parte el presente estudio y haciendo uso de la información disponible para determinar las dimensiones de las diversas estructuras hidráulicas necesarias para la generación hidroeléctrica se tiene que:

- Actualmente en Ecuador, no existen estudios respecto al uso de bombas funcionando en sentido inverso, y de sus potenciales aplicaciones en diversos proyectos.
- El estudio hidrológico determina un caudal de diseño $Q_{90\%}$ de 80.0 [l/s]; pero además, dado que las diferencias en dimensiones de las estructuras hidráulicas (obras civiles) es cercano al 30% comparado con el $Q_{30\%}$ de 167.0 [l/s]; se opta por este último como valor mandatorio para dimensionar las estructuras antes mencionadas.
- Una vez que se obtuvieron los resultados definitivos, la potencia instalada es cercana a los 200 [kW].
- El uso de PATs en lugar de turbinas permite una reducción en el costo total del proyecto para el presente estudio dicha disminución es cercana al 40%.

Empleando algoritmos genéticos, una técnica de optimización multiobjetivo, se evalúan tres funciones objetivo relacionadas principalmente a la geometría del rodete, de este modo se calcularon un conjunto de parámetros a la salida de los álabes principalmente. Se busca disminuir el efecto de erosión y maximizar la eficiencia del rodete de la bomba funcionando como turbina (PAT). Estos resultados dan paso a un modelo en tres dimensiones, usado más adelante para la simulación CFD a través del software de diseño Ansys CFX. Una vez que se ha realizado el trabajo antes mencionado las conclusiones son:

- A través de la optimización del perfil del álabe, el rendimiento óptimo no solo se mejoró para el modo turbina sino también para el funcionamiento original de la turbomáquina (modo bomba); es entonces un tema de mucha importancia para la industria de fabricación de este tipo de máquinas; además de ampliar el conocimiento e información disponibles respecto del funcionamiento de estas turbomáquinas.
- Existe un sin número de potenciales lugares en donde se puede usar las PATs, tales como: sistemas de suministro de agua potable, sistemas de riego, aplicaciones industriales, uso de aguas residuales, etcétera. Incrementando de ese modo la eficiencia energética de sistemas existentes a través de la instalación de PATs, en lugar de reducir la elevada presión en los sistemas de conducción, esto provee una prometedora estrategia de manejo de los diversos sistemas de conducción del líquido vital. En este sentido, existen dos factores importantes en el diseño de cada sistema, a saber: 1) se requiere

una precisa predicción de las diferentes condiciones de operación, que tomen en cuenta las diversas características de desempeño de la máquina (bomba) cuando funcione como turbina, y 2) las características detalladas del sistema a fin de generar la máxima energía disponible.

- El análisis del flujo en las turbomáquinas es con frecuencia una tarea complicada, ya que dicho análisis reviste una alta complejidad, esto debido a que el flujo es turbulento y de tres dimensiones. Es en este sentido que las aproximaciones a través del análisis CFD tienen una muy amplia aplicación en bombas y turbinas, la simulación numérica permite predecir el desempeño y analizar efectos como la erosión o cavitación (condiciones pasivas de diseño).

- La eficiencia del rodete es del 87.59%, para las condiciones específicas del proyecto de diseño (caudal y caída neta).

- El modelo empleado incluye parámetros hidráulicos del álabe de una bomba funcionando como turbina. Fundamentalmente los datos de entrada son caudal y altura.

- A través de la optimización multiobjetivo se buscó maximizar la eficiencia del rodete. Determinándose el diámetro y ancho de salida del rodete, ángulo del álabe y número de álabes.

- La dureza del material sedimentario llevada a través del flujo tiene un significado preponderante. En una gran cantidad de investigaciones se expone esto, para todos los materiales sólidos suspendidos en el agua, solo dichas partículas pueden ser realmente peligrosas para el mecanismo, ya que poseen una dureza mayor que la de los materiales usados para la fabricación de los componentes por donde transita el fluido.

- Erosión hidro-abrasiva puede ser mitigada a través de una reducción de la carga de sedimentos, mejorando los materiales y diseño de la turbina (rodete), en particular aplicando revestimientos duros. Si bien esto no previene totalmente contra los daños producto de la erosión, los costos producto de la erosión y las pérdidas en la generación eléctrica pueden ser disminuidas.

- Técnicas de medición probadas se encuentran disponibles para el monitoreo en tiempo real de concentración de sedimentos suspendidos (SSC, por sus siglas en inglés), tamaño de partículas, erosión de la turbina, y eficiencia, con alta resolución. Semejante información del monitoreo sirve como una base confiable para la toma de decisiones tanto en operación como en mantenimiento. Por lo tanto, en función de evaluar la intensidad de erosión en máquinas hidráulicas operando en un río cargado de sedimentos, es totalmente obligatorio conocer la composición mineralógica del material sedimentario que se encuentra definido por la estructura geológica del lecho del río.

- La erosión por sedimentos es uno de los problemas técnicos más importantes que experimentan las estaciones de generación hidroeléctrica y las plantas de bombeo que son empleadas en la derivación de flujo líquido, en varios sectores industriales y agrícolas. La selección de nuevos materiales para la construcción de bombas funcionando como turbinas depende del entendimiento de la relación entre la cantidad de erosión por sedimentos y la concentración de sedimentos en el agua.

4.3. Trabajos futuros

- Trabajos futuros en el campo del análisis computacional (CFD) pueden mejorar la predicción del comportamiento de las bombas funcionando en sentido inverso.
- Con el objetivo de mejorar los resultados de la predicción, se requiere una mejor calidad del mallado y variar los modelos de turbulencia.
- Los trabajos futuros se deben concentrar en realizar mejoras en las predicciones numéricas e incluir datos experimentales, esto último a través del ensayo de bombas con velocidades específicas diferentes.
- La metodología debe ser complementada con un análisis estructural del rodete, con el fin de determinar el espesor correcto de los álabes y su correcta disposición.
- Es necesario ampliar los estudios de las diversas fuentes hídricas para este tipo de proyectos de generación en pequeña escala, con el fin de obtener valores mucho más confiables, en cuanto a sedimentos se refiere (tipo, cantidad y forma de las partículas).
- Hasta el momento se han logrado importantes mejoras para mitigar la erosión hidro-abrasiva. Nuevas investigaciones analíticas, de laboratorio, campo y numéricas son recomendadas para fomentar futuros desarrollos en este campo interdisciplinario.

Referencias Bibliográficas

- [1] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Balance energético nacional, 2015
- [2] J.C. Vega y S. Ramírez, Fuentes de Energía, Renovables y No Renovables, Alfaomega, 2014
- [3] H. Nautiyal, Varun y A. Kumar, << CFD Analysis on Pumps Working as Turbines >>, HydroNepal, Nepal, vol. 6, 2010
- [4] S. Rawal y J. T. Kshirsagar, << Numerical simulation on a pump operating in a turbine mode >>, Proceedings of the twenty-third international pumps users symposium, India, 2007
- [5] O. Audisio, << Bombas utilizadas como turbinas >>, Laboratorio de máquinas hidráulicas, Argentina, 2003
- [6] I. Karassik, J. Messina, P. Cooper y Ch. Heald, Pump Handbook, McGraw-Hill, 2005
- [7] C. Sert, << Fluid Mechanics - Turbomachinery >>, 2017
- [8] R. Ragoth y M. Nataraj, << Parametric study and optimization of centrifugal pump >>, Journal of Mechanical and Production Engineering, India, vol. 2, pp. 87-97, 2012
- [9] E. Bacharoudis, A. Filios, M. Mentzos y D. Margaris, << Parametric study of a centrifugal pump impeller >>, The Open Mechanical Engineering Journal, Greece, vol. 2, pp. 75-83, 2008
- [10] G. Biswas, S Sarkar y S. Som, << Fluid machinery >>, NPTEL, 2006
- [11] K. Gjørseter, Hydraulic design of Francis turbine exposed to sediment erosion, Noruega: Master thesis at Norwegian University of Science and Technology, 2011
- [12] F. Coz, T. Sánchez y otros, Manual de Mini y Micro Centrales Hidráulicas, ITDG-PERÚ, 1995
- [13] IEC 62364, << Hydraulic Machines - Guide for dealing with hydro - abrasive erosion in Kaplan, Francis and Pelton turbines >>, International Electrotechnical Commission, 2012
- [14] B. Thapa, Sand erosion in hydraulic machinery, Trondheim: Doctoral thesis at Norwegian University of Science and Technology, 2004
- [15] B. Thaoa, R. Shrestha, P Dhakal y B.S. Thapa, Aquatic Ecosystem Health & Management, 2005
- [16] G. Truscott, A literature survey on abrasive wear in hydraulic machinery, pp. 29-50, 1972
- [17] B.S. Thapa, B. Thapa y O.G. Dahlhaug, Corrent research in hydraulic turbines for handling sediments, pp. 62-69, Elsevier, 2012

- [18] M. Eltvik, Sediment erosion in Francis turbines, Noruega: Doctoral theseis at Norwegian University of Science and Technology, 2013
- [19] De Weck O., << Multiobjective optimization: history and promise >>, Dept. of Aeronautics, Engineering System Division, Massachusetts Institute of Technology, 2004
- [20] Pietersz J., Optimization of the Preliminary Design of a Radial Compressor, Netherlands: Master of Science Thesis, 2010
- [21] Amouzgar K., Multi-Objective Optimization using Genetic Algorithms, Master thesis, 2012
- [22] T. Weise, Global Optimization Algorithms - Theory and Application, Thomas Weise, 2009
- [23] A. Williams, << The turbine performance of centrifugal pumps: a comparison of prediction methods >>, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. vol. 208, pp. pp. 59-66, 1994
- [24] S. Yang, S. Derakhshan y F. Kong, << Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance >>, Renewable Energy, vol. vol. 48, pp. pp. 507-513, 2012
- [25] P. Singh y F. Nestmann, << Internal hydraulic analysis of impeller rounding in centrifugal pumps as turbines >>, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. vol. 35, pp. pp. 121-134, 2011
- [26] S. Derakhshan, B. Mohammadi y A. Nourbakhsh, << Efficiency improvement of centrifugal reverse pumps >>, Journal of fluids engineering, vol. 131, 2009
- [27] S. Derakhshan y A. Nourbakhsh, << Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation, >>, Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 32, pp. 1620-1627, 2008
- [28] A. Rodrigues, P. Singh, A. Williams, F. Nestmann y E. Lai, << Hydraulic analysis of a pumps as a turbine with CFD and experimental data >>, IMechE seminar computational fluid dynamics for fluid machinery, 2003
- [29] S. Natanasabapathi y J. Kshirsagar, << Pump as Turbine-An Experience With CFX-5.6 >>, Corporate research and engineering division, India, 2004
- [30] H. Nautiyal, V. Kumar y A. Thakur, << CFD analysis on pumps working as turbines >>, HydroNepal: Journal of Water, Energy and Environment, vol. 6, pp. 35-37, 2010
- [31] R. Barrio, J. Fernández, J. Parrondo y E. Blanco, << Performance prediction of a centrifugal pump working in direct and reverse mode using Computational Fluid Dynamics >>, in International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada - Spain, 2010

- [32] O. Ferracota, A. Carravetta y H. Ramos, << CFD and comparison for a pump as turbine: mesh reliability and performance concerns >>, *Int J Energy Environ*, vol. 2, pp. 39-48, 2011
- [33] T. Agarwal, << Review of Pump as Turbine (PAT) for Micro-Hydropower >>, *International Journal of Emerging Technology and Advanced engineering*, vol. 2, pp. 163-168, 2012
- [34] W. C. Schleicher, *Design Optimization of a Portable Turbine*, Lehigh University: Doctor of Philosophy, 2015
- [35] J. A. Maza y M. García, *Hidrodinámica, bases para hidráulica fluvial*, Instituto de Ingeniería (UNAM), 2012
- [36] C. Mataix, *Mecánica de Fluídos y Máquinas Hidráulicas*, Ediciones del Castillo S.A., 1986
- [37] J. Gülich, << Centrifugal Pumps >>, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, Alemania - Berlín, 2008
- [38] G. Vetter y R. Kießling, << Verschleißverhalten von Pumpenwerkstoffen bei hydroabrasiver Strahlbeanspruchung >>, *Konstruktion*, vol. 47, pp. 186-190, 1995
- [39] S. Miao, J. Yang, G. Shi y T. Wang, *Blade profile optimization of pumps as turbine*, School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou - China, 2015
- [40] M. Rossi y M. Renzi, *Analytical prediction models for evaluating pump – as – turbines (PaTs) performance*, Libera Università di Bolzano, Piazza Università, Bolzano - Italia, 2017
- [41] H. Nautiyal, Varun, A. Kumar y S. Yadav, *Experimental investigation of centrifugal pump working as turbine for small hydropower systems*, Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology, Hamirpur - India, 2011
- [42] X. Ye, H. Li y Y. Yang, *Hydraulic performance of a low specific speed centrifugal pump with Spanwise-Slotted Blades*, Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang – China, 2013
- [43] E. Frosina, D. Buono y A. Senatore, *A performance prediction method for pumps as turbines (PAT) using a CFD modeling approach*, Department of Industrial Engineering, University of Naples Federico II, Naples - Italia, 2016
- [44] T. Agarwal, *Experimental analysis of silt erosion in pump as turbine*, India: Master of Technology in Alternate Hydro Energy Systems, Indian Institute of Technology Roorkee, India, 2012
- [45] E. Bardal, *Korrosjon og Korrosjonsvern*, Tapir, Trondheim (in Norwegian), 1985.
- [46] Viejo y Alonso, *Energía Hidroeléctrica*, Limusa, 1977.

- [47] Asian Institute of Technology Bangkok, Small Hydropower for Asian Rural Development, NRECA, 1983.
- [48] ITDG – Perú, Manual de mini y microcentrales hidráulicas, ITDG, 1995.
- [49] OLADE, Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, Bucaramanga: BID, 1985.
- [50] S. Krochin, Diseño hidráulico, Quito: Editorial Universitaria, 1968.
- [51] E. Gordón, Estudio de la minicentral hidroeléctrica Molleturo, Quito: Tesis de pregrado de Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 1990.
- [52] IDAE, Minicentrales hidroeléctricas, Instituto para la Diversificación y ahorro de la energía, 2006.

ANEXO I

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO

A continuación se muestra la familia de resultados, que a través del algoritmo de optimización (GA) de MatLab se obtienen de las variables de decisión, donde: $x(1)$ es el diámetro de salida y $x(2)$ es el número de álabes.

N.º	$x(1)$ [m]	$x(2)$ [u]
1	0.4174419	7.9940848
2	0.4174419	7.9940848
3	0.4174419	7.9823660
4	0.4174419	7.9823660
5	0.4311138	7.9823660
6	0.4174419	7.9940848
7	0.4174419	7.9823660
8	0.4486919	7.9823660
9	0.4174419	7.9823660
10	0.4174419	7.9823660
11	0.4174419	7.9823660
12	0.4174419	7.9823660
13	0.4174419	7.9940848
14	0.4174419	7.9823660
15	0.4174419	7.9823660
16	0.4174419	7.9823660
17	0.4174419	7.9940848
18	0.4174419	7.9940848
19	0.4174419	7.9823660
20	0.4174419	7.9823660
21	0.4174419	7.9823660
22	0.4174419	7.9823660
23	0.4174419	7.9823660
24	0.4174419	7.9823660
25	0.4174419	7.9794363
26	0.4174419	7.9940848
27	0.4174419	7.9823660
28	0.4174419	7.9823660
29	0.4174419	7.9823660
30	0.3861919	7.9823660
31	0.4267193	7.9794363

N.º	x(1) [m]	x(2) [u]
32	0.4174419	7.9823660
33	0.4174419	7.9823660
34	0.4267193	7.9823660
35	0.4174419	7.9823660
36	0.4213482	7.9823660
37	0.4369732	7.9823660
38	0.4447857	7.9198660
39	0.4174419	7.9823660
40	0.4174419	7.9823660
41	0.4174419	7.9198660
42	0.4174419	7.9823660
43	0.4174419	7.9823660
44	0.4174419	7.9823660
45	0.4174419	7.9823660

De manera similar se obtuvieron también la familia de resultados de las funciones objetivo, donde: y(1) es la velocidad periférica a la salida, y(2) ancho a la salida del rodete, y(3) eficiencia del álabe, y(4) es el factor de erosión.

N.º	y(1) [m/s]	y(2) [m]	y(3) [-]	y(4) [-]
1	24.4704219791	0.043116482	0.660153	222.0184057312
2	24.4704219791	0.043116482	0.660117	222.1893730096
3	24.4704219791	0.043116482	0.660270	222.3604290702
4	24.4704219791	0.045069607	0.659020	222.5315739352
5	24.4860469791	0.043116482	0.658549	222.7028076268
6	24.4001094791	0.043116482	0.664047	222.8741301673
7	24.4704219791	0.043116482	0.660270	223.045541579
8	24.4547969791	0.043116482	0.659144	223.217041884
9	24.4704219791	0.043116482	0.660356	223.3886311047
10	24.4704219791	0.043116482	0.660270	223.5603092632
11	24.4704219791	0.043116482	0.660356	223.7320763819
12	24.4704219791	0.043116482	0.660356	223.9039324829
13	24.4704219791	0.043116482	0.660153	224.0758775885
14	24.4704219791	0.043116482	0.660270	224.247911721
15	24.4479610416	0.043116482	0.661492	224.4200349026
16	24.4704219791	0.043116482	0.660270	224.5922471556

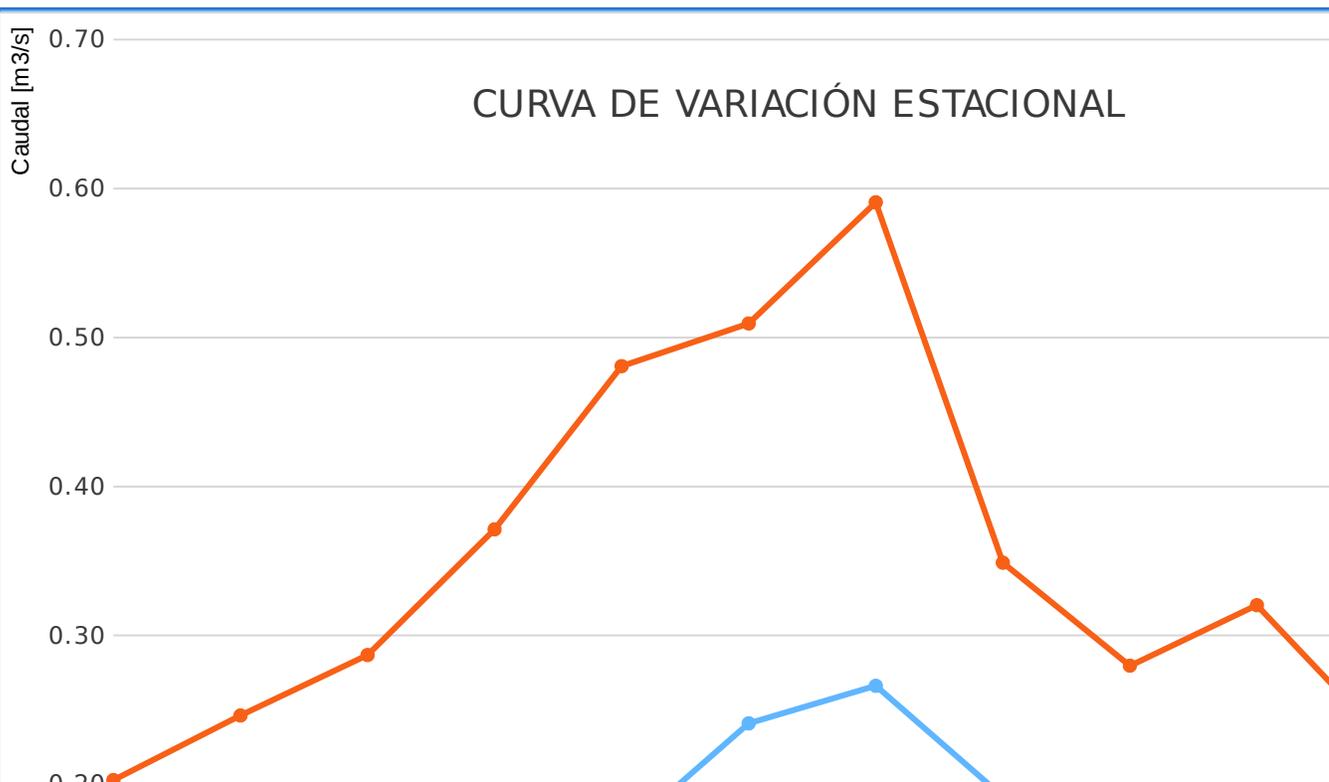
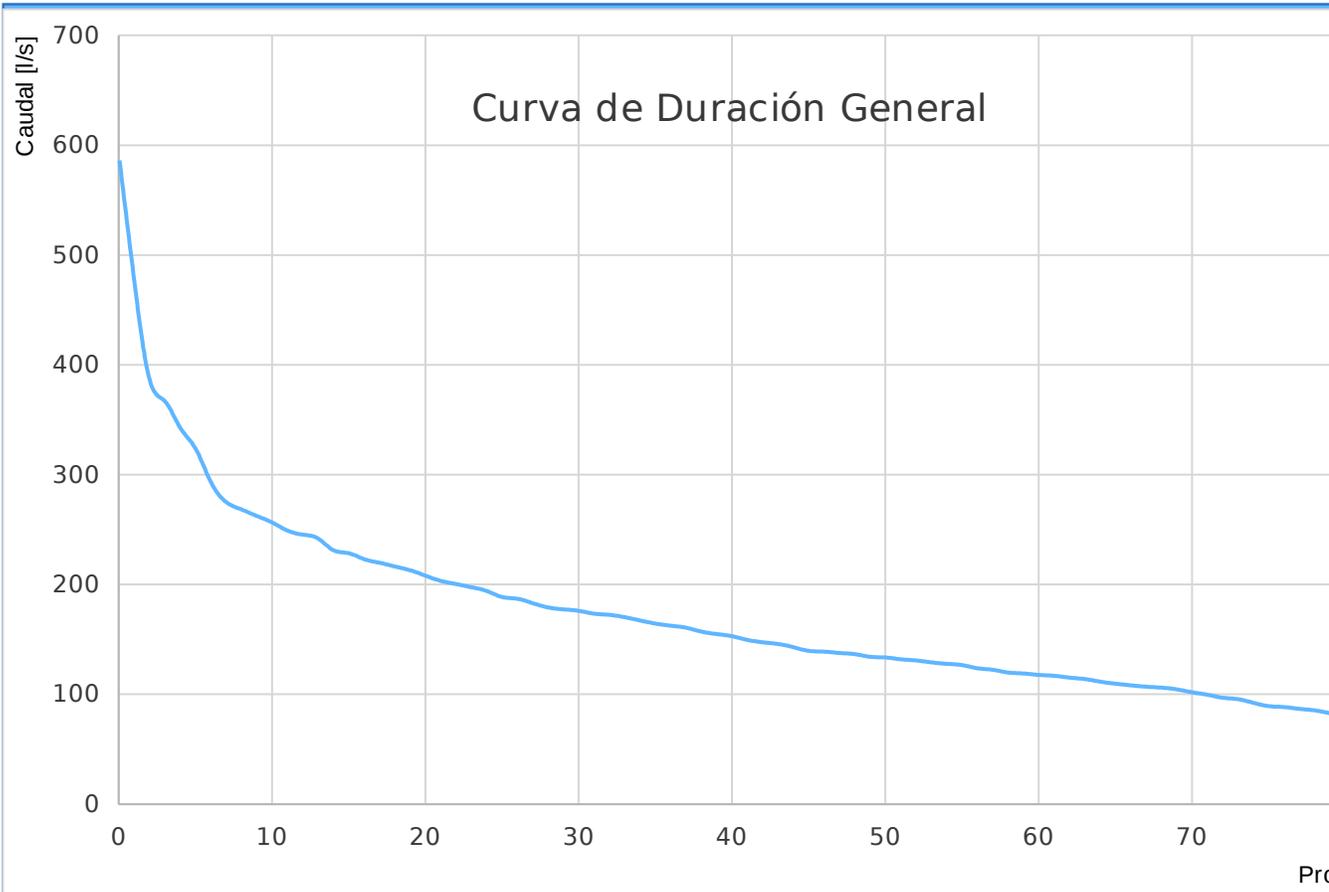
N.º	y(1) [m/s]	y(2) [m]	y(3) [-]	y(4) [-]
17	24.4704219791	0.043116482	0.660117	224.7645485022
18	24.4704219791	0.043116482	0.660049	224.9369389647
19	24.4704219791	0.045069607	0.659004	225.1094185652
20	24.4704219791	0.043116482	0.660270	225.2819873262
21	24.4704219791	0.043116482	0.660252	225.4546452698
22	24.4704219791	0.043116482	0.660270	225.6273924183
23	24.4547969791	0.045069607	0.659880	225.8002287939
24	24.4704219791	0.043116482	0.660270	225.9731544189
25	24.4479610416	0.043116482	0.661647	226.1461693156
26	24.4704219791	0.043116482	0.660117	226.3192735062
27	24.4704219791	0.043116482	0.660320	226.492467013
28	24.4704219791	0.043116482	0.660252	226.6657498583
29	24.4547969791	0.043116482	0.661201	226.8391220642
30	24.4704219791	0.043116482	0.662594	227.0125836531
31	24.4794551823	0.0455578882	0.657760	227.1861346473
32	24.4704219791	0.043116482	0.660252	227.3597750689
33	24.4704219791	0.043116482	0.660270	227.5335049403
34	24.4794551823	0.043116482	0.659128	227.7073242838
35	24.4704219791	0.043116482	0.660252	227.8812331215
36	24.4753047916	0.0519055445	0.655030	228.0552314757
37	24.4704219791	0.054835232	0.653161	228.2293193688
38	24.4743282291	0.043116482	0.659386	228.403496823
39	24.4704219791	0.086085232	0.646246	228.5777638606
40	24.4079219791	0.043116482	0.663712	228.7521205038
41	24.4704219791	0.043116482	0.661368	228.9265667749
42	24.4704219791	0.043116482	0.660338	229.1011026962
43	24.4704219791	0.043116482	0.660338	229.2757282899
44	24.4704219791	0.043116482	0.660252	229.4504435784
45	24.4704219791	0.043116482	0.660356	229.6252485838

ANEXO II

0.14	0.13	0.11	0.14	0.12	0.20	0.24	0.21	0.13	0.08	0.07	0.15	0.22	3
0.10	0.12	0.11	0.20	0.19	0.57	0.25	0.21	0.32	0.16	0.15	0.20	0.20	4
0.15	0.14	0.12	0.16	0.51	0.34	0.35	0.20	0.22	0.19	0.17	0.22	0.20	5
0.11	0.09	0.13	0.28	0.37	0.59	0.35	0.18	0.15	0.18	0.14	0.22	0.19	6
0.13	0.15	0.17	0.13	0.23	0.26	0.19	0.26	0.21	0.11	0.09	0.17	0.18	7
0.07	0.08	0.20	0.15	0.31	0.23	0.22	0.14	0.14	0.09	0.07	0.15	0.18	8
0.05	0.04	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.08	0.06	0.06	0.05	0.08	0.18	9
0.05	0.06	0.24	0.25	0.21	0.17	0.12	0.12	0.12	0.11	0.07	0.13	0.18	10
0.05	0.07	0.06	0.06	0.10	0.29	0.09	0.09	0.07	0.06	0.10	0.09	0.17	11
0.05	0.05	0.13	0.18	0.22	0.21	0.26	0.20	0.25	0.15	0.25	0.17	0.17	12
0.14	0.23	0.22	0.27	0.17	0.14	0.12	0.12	0.12	0.08	0.07	0.15	0.17	13
0.11	0.16	0.18	0.12	0.17	0.17	0.19	0.18	0.12	0.09	0.10	0.14	0.17	14
0.05	0.07	0.05	0.16	0.29	0.52	0.22	0.12	0.04	0.08	0.04	0.14	0.17	15
0.02	0.12	0.12	0.12	0.16	0.20	0.11	0.12	0.10	0.10	0.07	0.11	0.17	16
0.14	0.10	0.12	0.19	0.10	0.12	0.11	0.09	0.13	0.06	0.06	0.11	0.16	17
0.05	0.18	0.10	0.12	0.16	0.32	0.17	0.13	0.18	0.19	0.12	0.15	0.16	18
0.13	0.20	0.12	0.20	0.49	0.41	0.10	0.08	0.10	0.06	0.04	0.17	0.16	19
0.05	0.07	0.07	0.17	0.23	0.18	0.15	0.16	0.14	0.11	0.05	0.12	0.15	20
0.07	0.11	0.12	0.13	0.13	0.26	0.22	0.15	0.09	0.10	0.08	0.13	0.15	21
0.05	0.07	0.16	0.07	0.39	0.38	0.19	0.12	0.12	0.08	0.07	0.14	0.15	22
0.08	0.16	0.14	0.13	0.18	0.21	0.11	0.06	0.07	0.10	0.06	0.12	0.15	23
0.04	0.06	0.20	0.18	0.34	0.24	0.24	0.17	0.16	0.14	0.23	0.17	0.14	24
0.08	0.09	0.09	0.10	0.13	0.13	0.07	0.12	0.04	0.03	0.03	0.08	0.14	25
0.13	0.16	0.14	0.15	0.11	0.22	0.23	0.13	0.11	0.06	0.07	0.13	0.14	26
0.09	0.05	0.06	0.18	0.14	0.33	0.18	0.18	0.17	0.20	0.18	0.16	0.14	27
0.18	0.08	0.09	0.14	0.34	0.46	0.28	0.14	0.11	0.10	0.11	0.18	0.14	28
0.25	0.29	0.37	0.25	0.27	0.27	0.26	0.28	0.25	0.07	0.09	0.23	0.13	29
0.13	0.13	0.10	0.48	0.27	0.16	0.25	0.21	0.21	0.09	0.05	0.18	0.13	30
0.04	0.04	0.15	0.08	0.37	0.18	0.26	0.17	0.05	0.05	0.05	0.12	0.13	31
0.07	0.05	0.12	0.17	0.22	0.26	0.24	0.11	0.09	0.15	0.09	0.13	0.13	32
0.06	0.10	0.13	0.17	0.17	0.22	0.14	0.11	0.10	0.14	0.11	0.12	0.12	33
0.06	0.11	0.11	0.18	0.37	0.37	0.27	0.13	0.09	0.08	0.08	0.16	0.12	34
0.15	0.12	0.21	0.19	0.24	0.17	0.11	0.10	0.09	0.10	0.20	0.14	0.12	35
0.16	0.19	0.27	0.20	0.32	0.25	0.16	0.14	0.11	0.15	0.22	0.19	0.12	36
0.06	0.08	0.18	0.13	0.44	0.13	0.27	0.27	0.12	0.13	0.10	0.17	0.12	37
0.14	0.14	0.11	0.20	0.22	0.30	0.17	0.22	0.23	0.18	0.11	0.18	0.12	38
0.12	0.12	0.12	0.13	0.25	0.23	0.14	0.08	0.09	0.05	0.07	0.12	0.11	39
0.05	0.05	0.14	0.11	0.27	0.19	0.22	0.16	0.10	0.23	0.12	0.14	0.11	40
0.14	0.14	0.21	0.25	0.35	0.41	0.20	0.19	0.13	0.13	0.15	0.20	0.08	41
0.13	0.14	0.16	0.15	0.17	0.19	0.15	0.14	0.11	0.10	0.10	0.14	0.08	42
0.19	0.24	0.12	0.12	0.15	0.34	0.18	0.15	0.14	0.09	0.16	0.17	0.08	43
0.10	0.12	0.14	0.17	0.24	0.27	0.19	0.15	0.13	0.11	0.10	0.15		
0.25	0.29	0.37	0.48	0.51	0.59	0.35	0.28	0.32	0.23	0.25			
0.02	0.04	0.05	0.06	0.10	0.11	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03			
43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43			
0.05	0.06	0.06	0.07	0.11	0.12	0.07	0.05	0.06	0.05	0.05			
0.49	0.49	0.42	0.43	0.44	0.45	0.35	0.34	0.45	0.43	0.52			
0.68	0.87	1.43	2.18	0.77	1.11	0.24	0.52	1.06	0.55	1.03			



0.1	236	90	0.9	60
0.11	249	91	0.91	58
0.12	245	92	0.92	55
0.13	242	93	0.93	53
0.14	231	94	0.94	51
0.15	228	95	0.95	49
0.16	223	96	0.96	47
0.17	220	97	0.97	45
0.18	216	98	0.98	42
0.19	213	99	0.99	37
0.2	208	99.5	0.995	32
0.21	203			
0.22	200			
0.23	197			
0.24	194			
0.25	189			
0.26	187			
0.27	183			
0.28	179			
0.29	177			
0.3	176			
0.31	173			
0.32	172			
0.33	170			
0.34	167			
0.35	164			
0.36	162			
0.37	161			
0.38	157			
0.39	155			
0.4	153			
0.41	150			
0.42	147			
0.43	146			
0.44	143			
0.45	140			
0.46	139			
0.47	138			
0.48	137			
0.49	134			
0.5	133			
0.51	132			
0.52	131			
0.53	129			
0.54	128			
0.55	127			
0.56	124			
0.57	122			
0.58	120			
0.59	119			
0.6	118			
0.61	117			
0.62	115			
0.63	114			
0.64	112			
0.65	110			
0.66	108			
0.67	107			



ANEXO III

ANEXO IV

Análisis Precios Unitarios

ITEM	DESCRIPCIÓN:	EXCAVACIÓN A CIELO ABIERTO	CANTIDAD:
ESPECIF.			UNIDAD: m ³

CÓDIGO	1. MANO DE OBRA	#	HORAS	HORAS HOMBRE	COSTO	
					HORARIO	TOTAL
221101	Categ I: Peón	4	1.00	4.00	2.25	9.00
221301	Categ III: Alba/Carp/Fier	1	0.13	0.13	2.50	0.33
221501	Categ V: Maestro mayor	1	0.13	0.13	2.81	0.37
223007	Topógrafo	1	0.02	0.02	3.44	0.07
223002	Cadenero	2	0.02	0.04	2.50	0.10
SUBTOTAL 2:						9.86

CÓDIGO	2. EQUIPO	#	HORAS	HORAS MÁQUINA	COSTO	
					HORARIO	TOTAL
T0883792	Nivel wild Herramientas en general (3% M.D.)	1	0.02	0.02	1.09	0.0219
SUBTOTAL 2:						0.02185

3. RENDIMIENTO [m³/h]: 1.40 4. SUBTOTAL (1+2): 9.88
 5. PRECIO UNITARIO PARCIAL (4+3): 7.06

CÓDIGO	6. MATERIALES POR UNIDAD	#	UNIDAD	CONSUMO	COSTO	
					HORARIO	TOTAL
SUBTOTAL 6:						

7. COSTO UNITARIO DIRECTO (5+6): 7.06
 8. COSTO UNITARIO INDIRECTO (50% C.D.): 3.53
 9. PRECIO UNITARIO (7+8): 10.59

ITEM	DESCRIPCIÓN:	HOMIGÓN SIMPLE f _c =210	CANTIDAD:
ESPECIF.		[kg/cm ²] TRABAJOS A CIELO ABIERTO	UNIDAD: m ³

CÓDIGO	1. MANO DE OBRA	#	HORAS	HORAS HOMBRE	COSTO	
					HORARIO	TOTAL
221101	Categ I: Peón	4	1.00	4.00	2.25	9.00
221301	Categ III: Alba/Carp/Fier	1	0.80	0.80	2.50	2.00
221501	Categ V: Maestro mayor	1	1.00	1.00	2.81	2.81
SUBTOTAL 2:						13.81

CÓDIGO	2. EQUIPO	#	HORAS	HORAS MÁQUINA	COSTO	
					HORARIO	TOTAL

Análisis Precios Unitarios

PH602282	Hormigonera de 1 saco	1	0.80	0.80	3.75	3.00
PH582842	Vibrador (3 H.P.) (3% M.D.)	2	0.80	1.60	2.50	4.00
					SUBTOTAL 2:	7.00

3. RENDIMIENTO [m³/h]:	1.0	4. SUBTOTAL (1+2):	20.81
5. PRECIO UNITARIO PARCIAL (4+3):			20.81

CÓDIGO	6. MATERIALES POR UNIDAD	UNIDAD	CONSUMO	COSTO		
				HORARIO	TOTAL	
605	CEMENTO	kg	360.0	0.16	56.81	
1605	RIPIO	m³	1.10	6.67	7.34	
	ARENA	m³	0.40	6.67	2.67	
	ADITIVOS	kg	1.50	1.59	2.39	
	ENCOFRADOS	m²	2.00	4.92	9.84	
					SUBTOTAL 6:	79.038

7. COSTO UNITARIO DIRECTO (5+6):	99.85
8. COSTO UNITARIO INDIRECTO (50% C.D.):	49.93
9. PRECIO UNITARIO (7+8):	149.78

ITEM	DESCRIPCIÓN:	ACERO DE REFUERZO fy=4200	CANTIDAD:
ESPECIF.		kg/cm² TRABAJOS A CIELO ABIERTO	UNIDAD: kg

CÓDIGO	1. MANO DE OBRA	#	HORAS	HORAS HOMBRE	COSTO	
					HORARIO	TOTAL
221101	Categ I: Peón	2	1.00	2.00	2.25	4.50
221301	Categ II: Ayudante	3	1.00	3.00	2.38	7.13
221301	Categ III: Alba/Carp/Fier	2	1.00	2.00	2.50	5.00
221501	Categ V: Maestro mayor	1	1.00	1.00	2.81	2.81
					SUBTOTAL 2:	19.44

CÓDIGO	2. EQUIPO	#	HORAS	HORAS MÁQUINA	COSTO	
					HORARIO	TOTAL
HL580812	CORTADORA DE ACERO	1	1.00	1.00	0.095	0.10
						0.00
					SUBTOTAL 2:	0.10

3. RENDIMIENTO [kg/h]:	80.0	4. SUBTOTAL (1+2):	19.53
5. PRECIO UNITARIO PARCIAL (4+3):			0.24

CÓDIGO	6. MATERIALES POR UNIDAD	UNIDAD	CONSUMO	COSTO	
				HORARIO	TOTAL
1801	HIERRO EN VARILLAS	kg	1.01	0.80	0.81

Análisis Precios Unitarios

205 ALAMBRE DE AMARRE: #18	kg	0.02	0.73	0.01
				0.00
				0.00
				0.00
			SUBTOTAL 6:	0.82

7. COSTO UNITARIO DIRECTO (5+6):	1.07
8. COSTO UNITARIO INDIRECTO (50% C.D.):	0.53
9. PRECIO UNITARIO (7+8):	1.60

ITEM	DESCRIPCIÓN:	CANTIDAD:
ESPECIF.	TUBERÍA DE PRESIÓN (ACERO) SUMINISTRO E INSTALACIÓN TRABAJOS A CIELO ABIERTO	UNIDAD: kg

CÓDIGO	1. MANO DE OBRA	#	HORAS	HORAS HOMBRE	COSTO	
					HORARIO	TOTAL
221101	Categ I: Peón	2	1.00	2.00	2.25	4.50
221301	Categ III: Alba/Carp/Fier	1	1.00	1.00	2.50	2.50
241001	Capataz	1	1.00	1.00	2.81	2.81
231401	Chofer de 3ª clase	1	1.00	1.00	2.81	2.81
					SUBTOTAL 2:	12.63

CÓDIGO	2. EQUIPO	#	HORAS	HORAS MÁQUINA	COSTO	
					HORARIO	TOTAL
MS348082	CAMIÓN DE 6.0 Ton	1	0.25	0.25	7.1	1.78
					SUBTOTAL 2:	1.78

3. RENDIMIENTO [m/h]:	15.0	4. SUBTOTAL (1+2):	14.40
5. PRECIO UNITARIO PARCIAL (4+3):			0.96

CÓDIGO	6. MATERIALES POR UNIDAD	UNIDAD	CONSUMO	COSTO		
				HORARIO	TOTAL	
	TUBERÍA DE PRESIÓN	m	1.00	126.46	126.46	
	ANCLAJES, ACCESORIOS, ETC	S.G.	1.00	1.94	1.94	
					0.00	
					0.00	
					0.00	
					SUBTOTAL 6:	128.40

7. COSTO UNITARIO DIRECTO (5+6):	129.36
8. COSTO UNITARIO INDIRECTO (50% C.D.):	64.68
9. PRECIO UNITARIO (7+8):	194.04

TIR

r 0.02

r 0.04

r 0.06

Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

#	año	F.A. r = 0.02	gastos	ben.	valor actual gastos	ben.	#	año	F.A. r = 0.04	gastos	ben.	valor actual gastos	ben.	#	año	F.A. r = 0.06	gastos	ben.	valor actual gastos	ben.
1	2018	0.9804	341491	341491	334795	0	1	2018	0.9615	341491	341491	328357	0	1	2018	0.9434	341491	341491	322161	0
2	2019	0.9612	3415	8760	3282	8420	2	2019	0.9246	3415	8760	3157	8099	2	2019	0.8900	3415	8760	3039	7796
3	2020	0.9423	3415	8760	3218	8255	3	2020	0.8890	3415	8760	3036	7788	3	2020	0.8396	3415	8760	2867	7355
4	2021	0.9238	3415	8760	3155	8093	4	2021	0.8548	3415	8760	2919	7488	4	2021	0.7921	3415	8760	2705	6939
5	2022	0.9057	3415	8760	3093	7934	5	2022	0.8219	3415	8760	2807	7200	5	2022	0.7473	3415	8760	2552	6546
6	2023	0.8880	3415	8760	3032	7779	6	2023	0.7903	3415	8760	2699	6923	6	2023	0.7050	3415	8760	2407	6175
7	2024	0.8706	3415	8760	2973	7626	7	2024	0.7599	3415	8760	2595	6657	7	2024	0.6651	3415	8760	2271	5826
8	2025	0.8535	3415	8760	2915	7477	8	2025	0.7307	3415	8760	2495	6401	8	2025	0.6274	3415	8760	2143	5496
9	2026	0.8368	3415	8760	2857	7330	9	2026	0.7026	3415	8760	2399	6155	9	2026	0.5919	3415	8760	2021	5185
10	2027	0.8203	3415	8760	2801	7186	10	2027	0.6756	3415	8760	2307	5918	10	2027	0.5584	3415	8760	1907	4892
11	2028	0.8043	3415	8760	2746	7045	11	2028	0.6496	3415	8760	2218	5690	11	2028	0.5268	3415	8760	1799	4615
12	2029	0.7885	3415	8760	2693	6907	12	2029	0.6246	3415	8760	2133	5471	12	2029	0.4970	3415	8760	1697	4353
13	2030	0.7730	3415	8760	2640	6772	13	2030	0.6006	3415	8760	2051	5261	13	2030	0.4688	3415	8760	1601	4107
14	2031	0.7579	3415	8760	2588	6639	14	2031	0.5775	3415	8760	1972	5059	14	2031	0.4423	3415	8760	1510	3875
15	2032	0.7430	3415	8760	2537	6509	15	2032	0.5553	3415	8760	1896	4864	15	2032	0.4173	3415	8760	1425	3655
16	2033	0.7284	3415	8760	2488	6381	16	2033	0.5339	3415	8760	1823	4677	16	2033	0.3936	3415	8760	1344	3448
17	2034	0.7142	3415	8760	2439	6256	17	2034	0.5134	3415	8760	1753	4497	17	2034	0.3714	3415	8760	1268	3253
18	2035	0.7002	3415	8760	2391	6133	18	2035	0.4936	3415	8760	1686	4324	18	2035	0.3503	3415	8760	1196	3069
19	2036	0.6864	3415	8760	2344	6013	19	2036	0.4746	3415	8760	1621	4158	19	2036	0.3305	3415	8760	1129	2895
20	2037	0.6730	3415	8760	2298	5895	20	2037	0.4564	3415	8760	1559	3998	20	2037	0.3118	3415	8760	1065	2731
21	2038	0.6598	3415	8760	2253	5780	21	2038	0.4388	3415	8760	1499	3844	21	2038	0.2942	3415	8760	1005	2577
22	2039	0.6468	3415	8760	2209	5666	22	2039	0.4220	3415	8760	1441	3696	22	2039	0.2775	3415	8760	948	2431
23	2040	0.6342	3415	8760	2166	5555	23	2040	0.4057	3415	8760	1386	3554	23	2040	0.2618	3415	8760	894	2293
24	2041	0.6217	3415	8760	2123	5446	24	2041	0.3901	3415	8760	1332	3417	24	2041	0.2470	3415	8760	843	2164
25	2042	0.6095	3415	8760	2081	5339	25	2042	0.3751	3415	8760	1281	3286	25	2042	0.2330	3415	8760	796	2041
26	2043	0.5976	85417	8760	51044	5235	26	2043	0.3607	85417	8760	30809	3160	26	2043	0.2198	85417	8760	18776	1926
27	2044	0.5859	3415	8760	2001	5132	27	2044	0.3468	3415	8760	1184	3038	27	2044	0.2074	3415	8760	708	1817
28	2045	0.5744	3415	8760	1961	5032	28	2045	0.3335	3415	8760	1139	2921	28	2045	0.1956	3415	8760	668	1714
29	2046	0.5631	3415	8760	1923	4933	29	2046	0.3207	3415	8760	1095	2809	29	2046	0.1846	3415	8760	630	1617

TIR

5	2022	0.6806	3415	8760	2324	5962	5	2022	0.6209	3415	8760	2120	5439	5	2022	0.5674	3415	8760	1938	4971
6	2023	0.6302	3415	8760	2152	5520	6	2023	0.5645	3415	8760	1928	4945	6	2023	0.5066	3415	8760	1730	4438
7	2024	0.5835	3415	8760	1993	5111	7	2024	0.5132	3415	8760	1752	4495	7	2024	0.4523	3415	8760	1545	3963
8	2025	0.5403	3415	8760	1845	4733	8	2025	0.4665	3415	8760	1593	4087	8	2025	0.4039	3415	8760	1379	3538
9	2026	0.5002	3415	8760	1708	4382	9	2026	0.4241	3415	8760	1448	3715	9	2026	0.3606	3415	8760	1231	3159
10	2027	0.4632	3415	8760	1582	4058	10	2027	0.3855	3415	8760	1317	3377	10	2027	0.3220	3415	8760	1100	2820
11	2028	0.4289	3415	8760	1465	3757	11	2028	0.3505	3415	8760	1197	3070	11	2028	0.2875	3415	8760	982	2518
12	2029	0.3971	3415	8760	1356	3479	12	2029	0.3186	3415	8760	1088	2791	12	2029	0.2567	3415	8760	877	2248
13	2030	0.3677	3415	8760	1256	3221	13	2030	0.2897	3415	8760	989	2537	13	2030	0.2292	3415	8760	783	2008
14	2031	0.3405	3415	8760	1163	2982	14	2031	0.2633	3415	8760	899	2307	14	2031	0.2046	3415	8760	699	1792
15	2032	0.3152	3415	8760	1077	2762	15	2032	0.2394	3415	8760	818	2097	15	2032	0.1827	3415	8760	624	1600
16	2033	0.2919	3415	8760	997	2557	16	2033	0.2176	3415	8760	743	1906	16	2033	0.1631	3415	8760	557	1429
17	2034	0.2703	3415	8760	923	2368	17	2034	0.1978	3415	8760	676	1733	17	2034	0.1456	3415	8760	497	1276
18	2035	0.2502	3415	8760	855	2192	18	2035	0.1799	3415	8760	614	1576	18	2035	0.1300	3415	8760	444	1139
19	2036	0.2317	3415	8760	791	2030	19	2036	0.1635	3415	8760	558	1432	19	2036	0.1161	3415	8760	396	1017
20	2037	0.2145	3415	8760	733	1879	20	2037	0.1486	3415	8760	508	1302	20	2037	0.1037	3415	8760	354	908
21	2038	0.1987	3415	8760	678	1740	21	2038	0.1351	3415	8760	461	1184	21	2038	0.0926	3415	8760	316	811
22	2039	0.1839	3415	8760	628	1611	22	2039	0.1228	3415	8760	420	1076	22	2039	0.0826	3415	8760	282	724
23	2040	0.1703	3415	8760	582	1492	23	2040	0.1117	3415	8760	381	978	23	2040	0.0738	3415	8760	252	646
24	2041	0.1577	3415	8760	539	1381	24	2041	0.1015	3415	8760	347	889	24	2041	0.0659	3415	8760	225	577
25	2042	0.1460	3415	8760	499	1279	25	2042	0.0923	3415	8760	315	809	25	2042	0.0588	3415	8760	201	515
26	2043	0.1352	85417	8760	11549	1184	26	2043	0.0839	85417	8760	7167	735	26	2043	0.0525	85417	8760	4486	460
27	2044	0.1252	3415	8760	428	1097	27	2044	0.0763	3415	8760	260	668	27	2044	0.0469	3415	8760	160	411
28	2045	0.1159	3415	8760	396	1015	28	2045	0.0693	3415	8760	237	607	28	2045	0.0419	3415	8760	143	367
29	2046	0.1073	3415	8760	367	940	29	2046	0.0630	3415	8760	215	552	29	2046	0.0374	3415	8760	128	327
30	2047	0.0994	3415	8760	339	871	30	2047	0.0573	3415	8760	196	502	30	2047	0.0334	3415	8760	114	292
31	2048	0.0920	3415	8760	314	806	31	2048	0.0521	3415	8760	178	456	31	2048	0.0298	3415	8760	102	261
32	2049	0.0852	3415	8760	291	746	32	2049	0.0474	3415	8760	162	415	32	2049	0.0266	3415	8760	91	233
33	2050	0.0789	3415	8760	269	691	33	2050	0.0431	3415	8760	147	377	33	2050	0.0238	3415	8760	81	208
34	2051	0.0730	3415	8760	249	640	34	2051	0.0391	3415	8760	134	343	34	2051	0.0212	3415	8760	72	186
35	2052	0.0676	3415	8760	231	592	35	2052	0.0356	3415	8760	122	312	35	2052	0.0189	3415	8760	65	166
36	2053	0.0626	3415	8760	214	549	36	2053	0.0323	3415	8760	110	283	36	2053	0.0169	3415	8760	58	148
37	2054	0.0580	3415	8760	198	508	37	2054	0.0294	3415	8760	100	258	37	2054	0.0151	3415	8760	52	132
38	2055	0.0537	3415	8760	183	470	38	2055	0.0267	3415	8760	91	234	38	2055	0.0135	3415	8760	46	118

TIR

39	2056	0.0497	3415	8760	170	435	39	2056	0.0243	3415	8760	83	213	39	2056	0.0120	3415	8760	41	105
40	2057	0.0460	3415	8760	157	403	40	2057	0.0221	3415	8760	75	194	40	2057	0.0107	3415	8760	37	94
41	2058	0.0426	3415	8760	146	373	41	2058	0.0201	3415	8760	69	176	41	2058	0.0096	3415	8760	33	84
42	2059	0.0395	3415	8760	135	346	42	2059	0.0183	3415	8760	62	160	42	2059	0.0086	3415	8760	29	75
43	2060	0.0365	3415	8760	125	320	43	2060	0.0166	3415	8760	57	145	43	2060	0.0076	3415	8760	26	67
44	2061	0.0338	3415	8760	116	296	44	2061	0.0151	3415	8760	52	132	44	2061	0.0068	3415	8760	23	60
45	2062	0.0313	3415	8760	107	274	45	2062	0.0137	3415	8760	47	120	45	2062	0.0061	3415	8760	21	53
46	2063	0.0290	3415	8760	99	254	46	2063	0.0125	3415	8760	43	109	46	2063	0.0054	3415	8760	19	48
47	2064	0.0269	3415	8760	92	235	47	2064	0.0113	3415	8760	39	99	47	2064	0.0049	3415	8760	17	43
48	2065	0.0249	3415	8760	85	218	48	2065	0.0103	3415	8760	35	90	48	2065	0.0043	3415	8760	15	38
49	2066	0.0230	3415	8760	79	202	49	2066	0.0094	3415	8760	32	82	49	2066	0.0039	3415	8760	13	34
50	2067	0.0213	3415	8760	73	187	50	2067	0.0085	3415	8760	29	75	50	2067	0.0035	3415	8760	12	30
B - C		-266842	C/B	3.69	365896	99054	B - C		-269190	C/B	4.41	348080	78890	B - C		-269593	C/B	5.15	334519	64926
			B/C	0.27						B/C	0.23						B/C	0.19		

r 0.14

r 0.16

r 0.18

Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

#	año	F.A. r = 0.14	gastos	ben.	valor actual gastos	benef.	#	año	F.A. r = 0.16	gastos	ben.	valor actual gastos	benef.	#	año	F.A. r = 0.18	gastos	ben.	valor actual gastos	benef.
1	2018	0.8772	341491		299553	0	1	2018	0.8621	341491		294389	0	1	2018	0.8475	341491		289399	0
2	2019	0.7695	3415	8760	2628	6741	2	2019	0.7432	3415	8760	2538	6510	2	2019	0.7182	3415	8760	2453	6291
3	2020	0.6750	3415	8760	2305	5913	3	2020	0.6407	3415	8760	2188	5612	3	2020	0.6086	3415	8760	2078	5332
4	2021	0.5921	3415	8760	2022	5187	4	2021	0.5523	3415	8760	1886	4838	4	2021	0.5158	3415	8760	1761	4518
5	2022	0.5194	3415	8760	1774	4550	5	2022	0.4761	3415	8760	1626	4171	5	2022	0.4371	3415	8760	1493	3829
6	2023	0.4556	3415	8760	1556	3991	6	2023	0.4104	3415	8760	1402	3595	6	2023	0.3704	3415	8760	1265	3245
7	2024	0.3996	3415	8760	1365	3501	7	2024	0.3538	3415	8760	1208	3100	7	2024	0.3139	3415	8760	1072	2750
8	2025	0.3506	3415	8760	1197	3071	8	2025	0.3050	3415	8760	1042	2672	8	2025	0.2660	3415	8760	908	2330
9	2026	0.3075	3415	8760	1050	2694	9	2026	0.2630	3415	8760	898	2303	9	2026	0.2255	3415	8760	770	1975
10	2027	0.2697	3415	8760	921	2363	10	2027	0.2267	3415	8760	774	1986	10	2027	0.1911	3415	8760	652	1674
11	2028	0.2366	3415	8760	808	2073	11	2028	0.1954	3415	8760	667	1712	11	2028	0.1619	3415	8760	553	1418
12	2029	0.2076	3415	8760	709	1818	12	2029	0.1685	3415	8760	575	1476	12	2029	0.1372	3415	8760	469	1202
13	2030	0.1821	3415	8760	622	1595	13	2030	0.1452	3415	8760	496	1272	13	2030	0.1163	3415	8760	397	1019

TIR

14	2031	0.1597	3415	8760	545	1399	14	2031	0.1252	3415	8760	428	1097	14	2031	0.0985	3415	8760	337	863
15	2032	0.1401	3415	8760	478	1227	15	2032	0.1079	3415	8760	369	945	15	2032	0.0835	3415	8760	285	732
16	2033	0.1229	3415	8760	420	1077	16	2033	0.0930	3415	8760	318	815	16	2033	0.0708	3415	8760	242	620
17	2034	0.1078	3415	8760	368	944	17	2034	0.0802	3415	8760	274	703	17	2034	0.0600	3415	8760	205	525
18	2035	0.0946	3415	8760	323	828	18	2035	0.0691	3415	8760	236	606	18	2035	0.0508	3415	8760	174	445
19	2036	0.0829	3415	8760	283	727	19	2036	0.0596	3415	8760	204	522	19	2036	0.0431	3415	8760	147	377
20	2037	0.0728	3415	8760	248	637	20	2037	0.0514	3415	8760	175	450	20	2037	0.0365	3415	8760	125	320
21	2038	0.0638	3415	8760	218	559	21	2038	0.0443	3415	8760	151	388	21	2038	0.0309	3415	8760	106	271
22	2039	0.0560	3415	8760	191	490	22	2039	0.0382	3415	8760	130	335	22	2039	0.0262	3415	8760	90	230
23	2040	0.0491	3415	8760	168	430	23	2040	0.0329	3415	8760	112	288	23	2040	0.0222	3415	8760	76	195
24	2041	0.0431	3415	8760	147	377	24	2041	0.0284	3415	8760	97	249	24	2041	0.0188	3415	8760	64	165
25	2042	0.0378	3415	8760	129	331	25	2042	0.0245	3415	8760	84	214	25	2042	0.0160	3415	8760	54	140
26	2043	0.0331	85417	8760	2832	290	26	2043	0.0211	85417	8760	1802	185	26	2043	0.0135	85417	8760	1155	118
27	2044	0.0291	3415	8760	99	255	27	2044	0.0182	3415	8760	62	159	27	2044	0.0115	3415	8760	39	100
28	2045	0.0255	3415	8760	87	223	28	2045	0.0157	3415	8760	54	137	28	2045	0.0097	3415	8760	33	85
29	2046	0.0224	3415	8760	76	196	29	2046	0.0135	3415	8760	46	118	29	2046	0.0082	3415	8760	28	72
30	2047	0.0196	3415	8760	67	172	30	2047	0.0116	3415	8760	40	102	30	2047	0.0070	3415	8760	24	61
31	2048	0.0172	3415	8760	59	151	31	2048	0.0100	3415	8760	34	88	31	2048	0.0059	3415	8760	20	52
32	2049	0.0151	3415	8760	52	132	32	2049	0.0087	3415	8760	30	76	32	2049	0.0050	3415	8760	17	44
33	2050	0.0132	3415	8760	45	116	33	2050	0.0075	3415	8760	25	65	33	2050	0.0042	3415	8760	14	37
34	2051	0.0116	3415	8760	40	102	34	2051	0.0064	3415	8760	22	56	34	2051	0.0036	3415	8760	12	32
35	2052	0.0102	3415	8760	35	89	35	2052	0.0055	3415	8760	19	49	35	2052	0.0030	3415	8760	10	27
36	2053	0.0089	3415	8760	31	78	36	2053	0.0048	3415	8760	16	42	36	2053	0.0026	3415	8760	9	23
37	2054	0.0078	3415	8760	27	69	37	2054	0.0041	3415	8760	14	36	37	2054	0.0022	3415	8760	7	19
38	2055	0.0069	3415	8760	23	60	38	2055	0.0036	3415	8760	12	31	38	2055	0.0019	3415	8760	6	16
39	2056	0.0060	3415	8760	21	53	39	2056	0.0031	3415	8760	10	27	39	2056	0.0016	3415	8760	5	14
40	2057	0.0053	3415	8760	18	46	40	2057	0.0026	3415	8760	9	23	40	2057	0.0013	3415	8760	5	12
41	2058	0.0046	3415	8760	16	41	41	2058	0.0023	3415	8760	8	20	41	2058	0.0011	3415	8760	4	10
42	2059	0.0041	3415	8760	14	36	42	2059	0.0020	3415	8760	7	17	42	2059	0.0010	3415	8760	3	8
43	2060	0.0036	3415	8760	12	31	43	2060	0.0017	3415	8760	6	15	43	2060	0.0008	3415	8760	3	7
44	2061	0.0031	3415	8760	11	27	44	2061	0.0015	3415	8760	5	13	44	2061	0.0007	3415	8760	2	6
45	2062	0.0027	3415	8760	9	24	45	2062	0.0013	3415	8760	4	11	45	2062	0.0006	3415	8760	2	5
46	2063	0.0024	3415	8760	8	21	46	2063	0.0011	3415	8760	4	9	46	2063	0.0005	3415	8760	2	4
47	2064	0.0021	3415	8760	7	19	47	2064	0.0009	3415	8760	3	8	47	2064	0.0004	3415	8760	1	4

TIR

48	2065	0.0019	3415	8760	6	16	48	2065	0.0008	3415	8760	3	7	48	2065	0.0004	3415	8760	1	3
49	2066	0.0016	3415	8760	6	14	49	2066	0.0007	3415	8760	2	6	49	2066	0.0003	3415	8760	1	3
50	2067	0.0014	3415	8760	5	13	50	2067	0.0006	3415	8760	2	5	50	2067	0.0003	3415	8760	1	2
B - C		-268836	C/B	5.91	323633	54798	B - C		-267339	C/B	6.67	314505	47166	B - C		-265350	C/B	7.44	306581	41231
			B/C	0.17						B/C	0.15					B/C	0.13			

r 0.2

r 0.2

r 0.2

Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

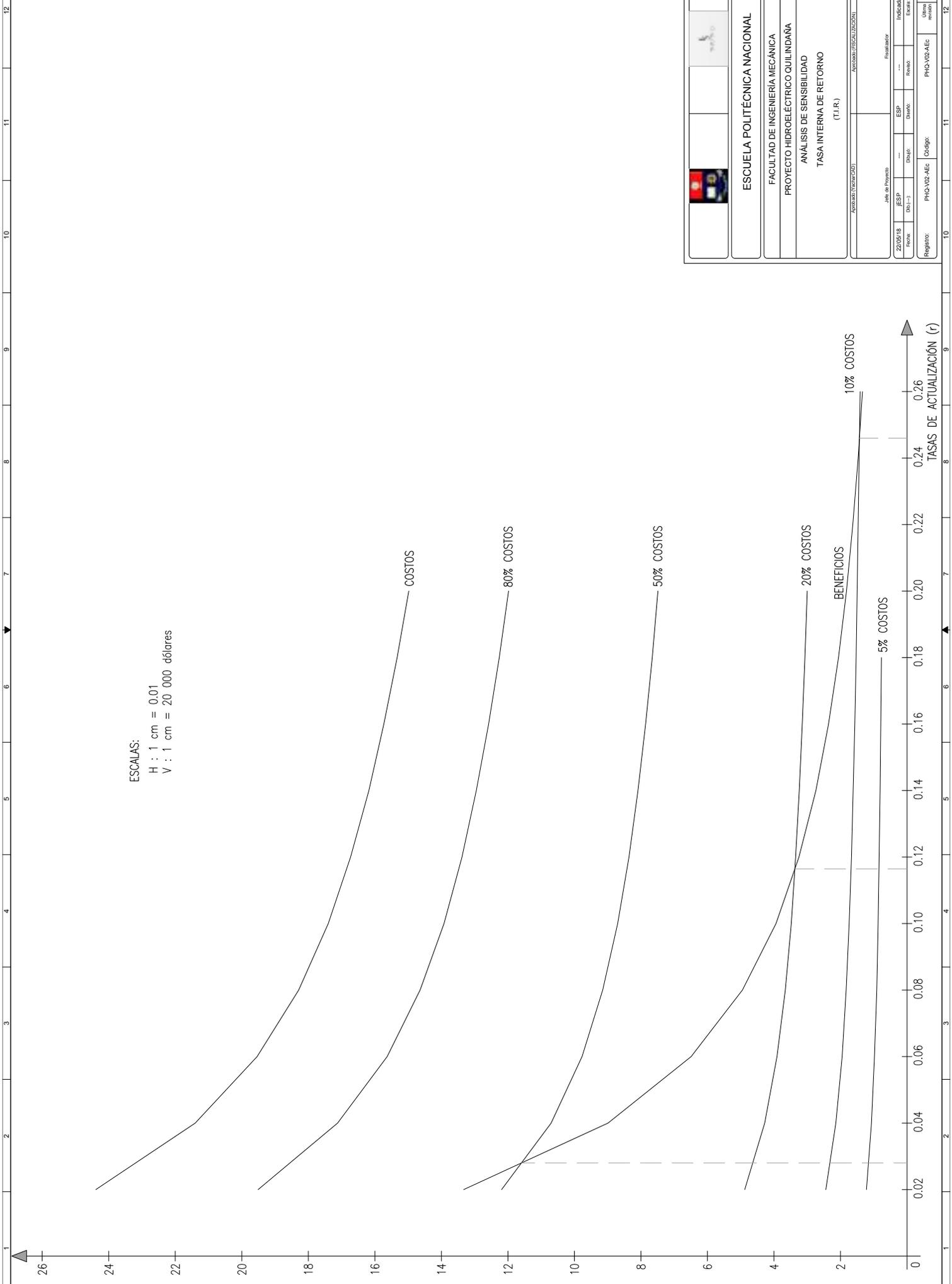
Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

Análisis de la Tasa Interna de Retorno T.I.R.

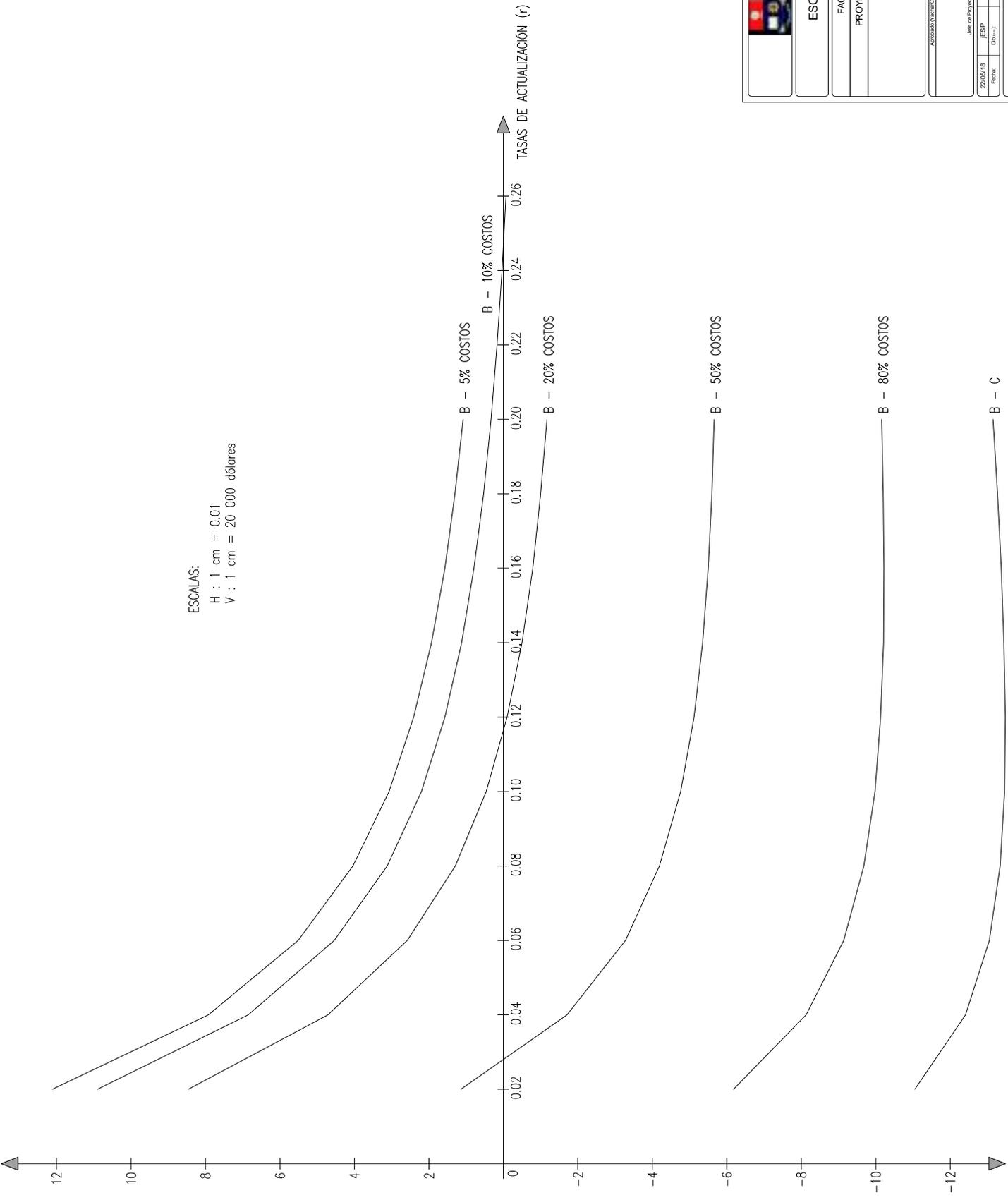
#	año	F.A. r = 0.2	gastos	ben.	valor actual gastos	benef.	#	año	F.A. r = 0.2	gastos	ben.	valor actual gastos	benef.	#	año	F.A. r = 0.2	gastos	ben.	valor actual gastos	benef.
1	2018	0.8333	341491		284576	0	22	2039	0.0181	3415	8760	62	159	43	2060	0.0004	3415	8760	1	3
2	2019	0.6944	3415	8760	2371	6083	23	2040	0.0151	3415	8760	52	132	44	2061	0.0003	3415	8760	1	3
3	2020	0.5787	3415	8760	1976	5069	24	2041	0.0126	3415	8760	43	110	45	2062	0.0003	3415	8760	1	2
4	2021	0.4823	3415	8760	1647	4225	25	2042	0.0105	3415	8760	36	92	46	2063	0.0002	3415	8760	1	2
5	2022	0.4019	3415	8760	1372	3520	26	2043	0.0087	85417	8760	746	77	47	2064	0.0002	3415	8760	1	2
6	2023	0.3349	3415	8760	1144	2934	27	2044	0.0073	3415	8760	25	64	48	2065	0.0002	3415	8760	1	1
7	2024	0.2791	3415	8760	953	2445	28	2045	0.0061	3415	8760	21	53	49	2066	0.0001	3415	8760	0	1
8	2025	0.2326	3415	8760	794	2037	29	2046	0.0051	3415	8760	17	44	50	2067	0.0001	3415	8760	0	1
9	2026	0.1938	3415	8760	662	1698	30	2047	0.0042	3415	8760	14	37							
10	2027	0.1615	3415	8760	552	1415	31	2048	0.0035	3415	8760	12	31	B - C		-263024	C/B	8.21	299519	36495
11	2028	0.1346	3415	8760	460	1179	32	2049	0.0029	3415	8760	10	26				B/C	0.12		
12	2029	0.1122	3415	8760	383	982	33	2050	0.0024	3415	8760	8	21							
13	2030	0.0935	3415	8760	319	819	34	2051	0.0020	3415	8760	7	18							
14	2031	0.0779	3415	8760	266	682	35	2052	0.0017	3415	8760	6	15							
15	2032	0.0649	3415	8760	222	569	36	2053	0.0014	3415	8760	5	12							
16	2033	0.0541	3415	8760	185	474	37	2054	0.0012	3415	8760	4	10							
17	2034	0.0451	3415	8760	154	395	38	2055	0.0010	3415	8760	3	9							
18	2035	0.0376	3415	8760	128	329	39	2056	0.0008	3415	8760	3	7							
19	2036	0.0313	3415	8760	107	274	40	2057	0.0007	3415	8760	2	6							
20	2037	0.0261	3415	8760	89	228	41	2058	0.0006	3415	8760	2	5							
21	2038	0.0217	3415	8760	74	190	42	2059	0.0005	3415	8760	2	4							

Análisis de sensibilidad

<i>r</i>											<i>T.I.R.</i>		
	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20		0.22	0.24
COSTOS	487758	428010	390790	365896	348080	334519	323633	314505	306581	299519	293099	287176	281650
80.0	390207	342408	312632	292717	278464	267615	258907	251604	245265	239615	234479	229741	225320
50.0	243879	214005	195395	182948	174040	167260	161817	157252	153290	149759	146550	143588	140825
20.0	97552	85602	78158	73179	69616	66904	64727	62901	61316	59904	58620	57435	56330
10.0	48776	42801	39079	36590	34808	33452	32363	31450	30658	29952	29310	28718	28165
5.0	24388	21400	19539	18295	17404	16726	16182	15725	15329	14976	14655	14359	14082
BENEF.	266683	179761	129810	99054	78890	64926	54798	47166	41231	36495	32636	29435	26740
B – C	-221076	-248249	-260980	-266842	-269190	-269593	-268836	-267339	-265350	-263024	-260463	-257741	-254910
B / C	0.547	0.420	0.332	0.271	0.227	0.194	0.169	0.150	0.134	0.122	0.111	0.102	0.095
B – 80% C	-123524	-162647	-182822	-193663	-199574	-202690	-204109	-204438	-204034	-203120	-201843	-200306	-198580
B / 80% C	0.683	0.525	0.415	0.338	0.283	0.243	0.212	0.187	0.168	0.152	0.139	0.128	0.119
B – 50% C	22803	-34244	-65585	-83894	-95150	-102334	-107019	-110087	-112060	-113264	-113914	-114153	-114085
B / 50% C	1.094	0.840	0.664	0.541	0.453	0.388	0.339	0.300	0.269	0.244	0.223	0.205	0.190
B – 20% C	169131	94159	51652	25875	9274	-1978	-9929	-15735	-20086	-23409	-25984	-28000	-29590
B / 20% C	2.734	2.100	1.661	1.354	1.133	0.970	0.847	0.750	0.672	0.609	0.557	0.512	0.475
B – 10% C	217907	136960	90731	62465	44082	31474	22435	15715	10572	6543	3326	717	-1425
B / 10% C	5.468	4.200	3.322	2.707	2.266	1.941	1.693	1.500	1.345	1.218	1.113	1.025	0.949
B – 5% C	242295	158360	110270	80759	61486	48200	38616	31440	25902	21519	17981	15076	12657
B / 5% C	10.935	8.400	6.643	5.414	4.533	3.882	3.386	2.999	2.690	2.437	2.227	2.050	1.899

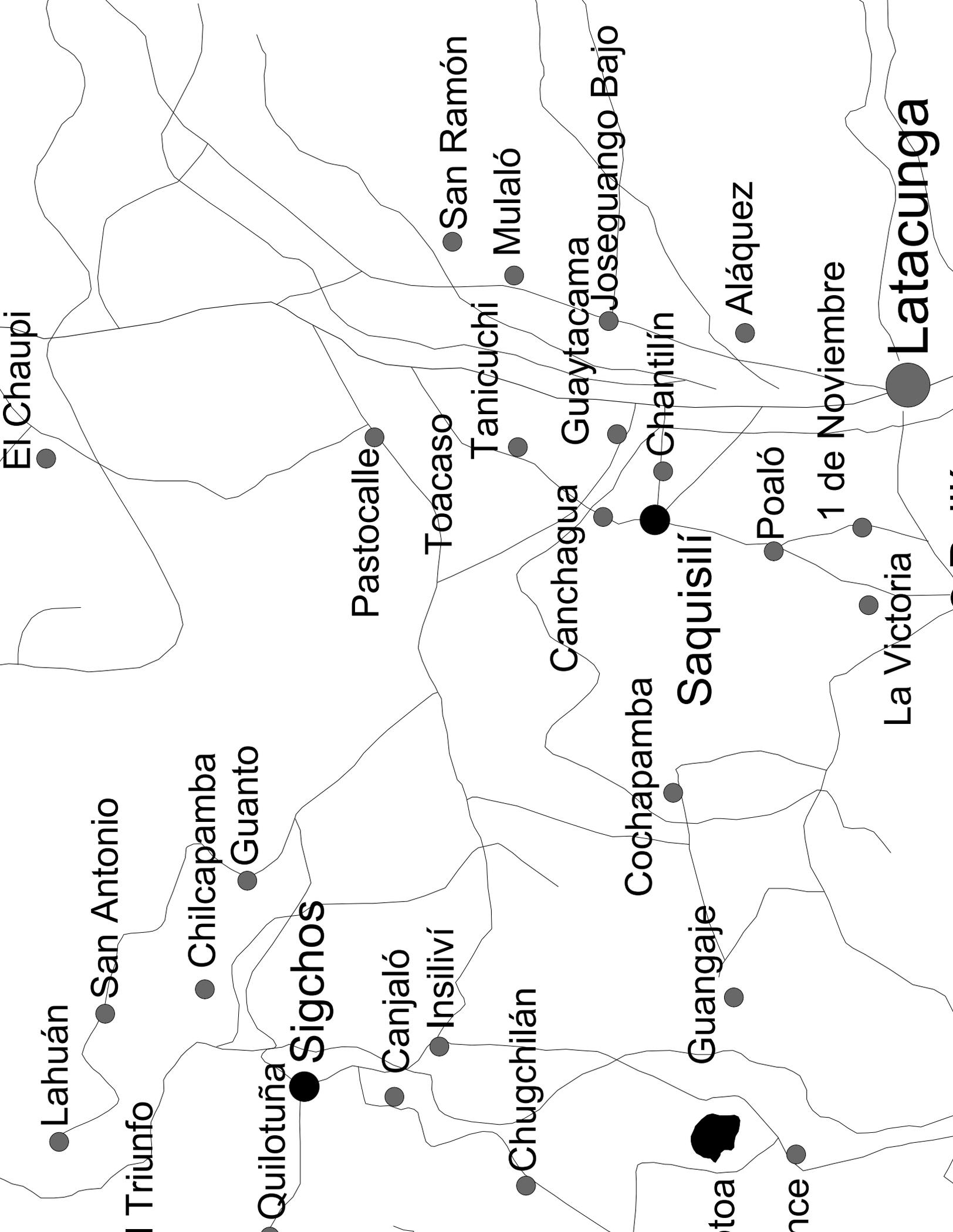


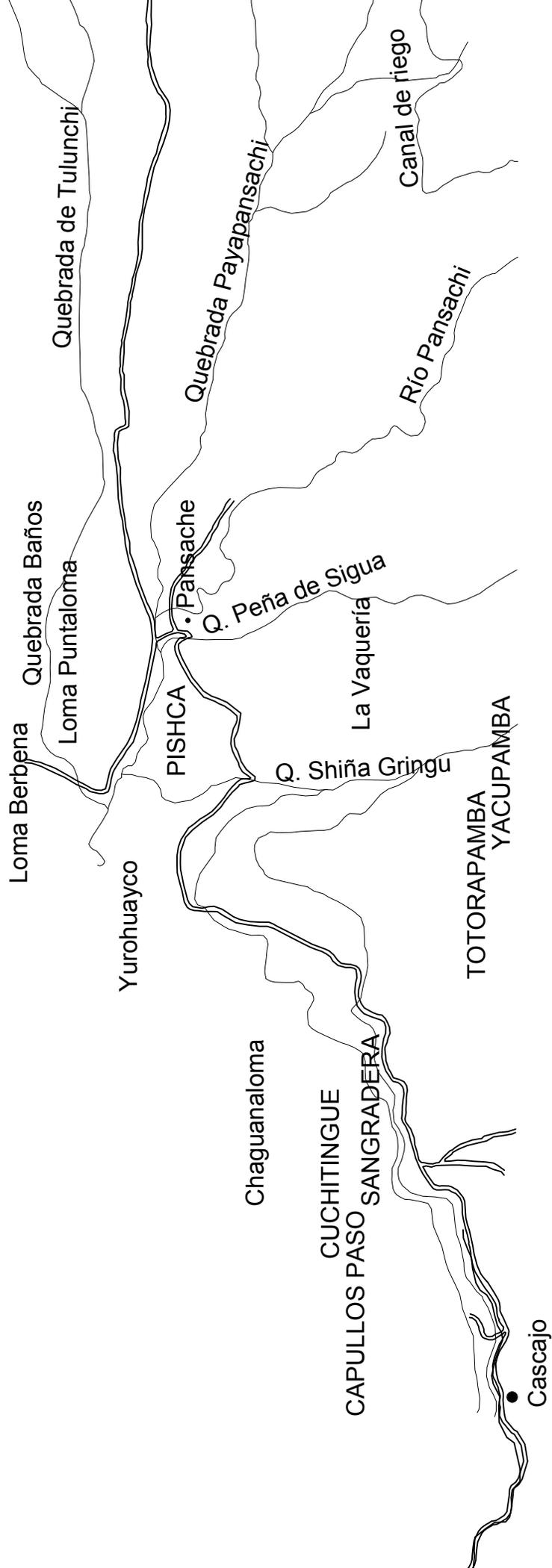
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL			
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA PROYECTO HIDROELÉCTRICO QUILINDAÑA ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD TASA INTERNA DE RETORNO (T.I.R.)			
Aprobado (Votación) Aprobado (Ejecución)		Jefe de Proyecto Evaluador	
Fecha	ESP	ESP	Indicada
Registro	Del(-)	Desde	Revisión
	PHO-VIG-AE-C	Código	PHO-VIG-AE-C
			Última edición
			A

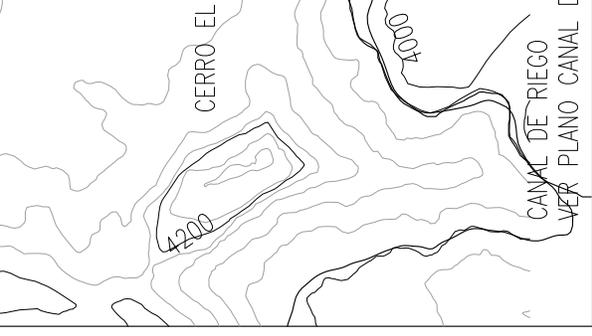
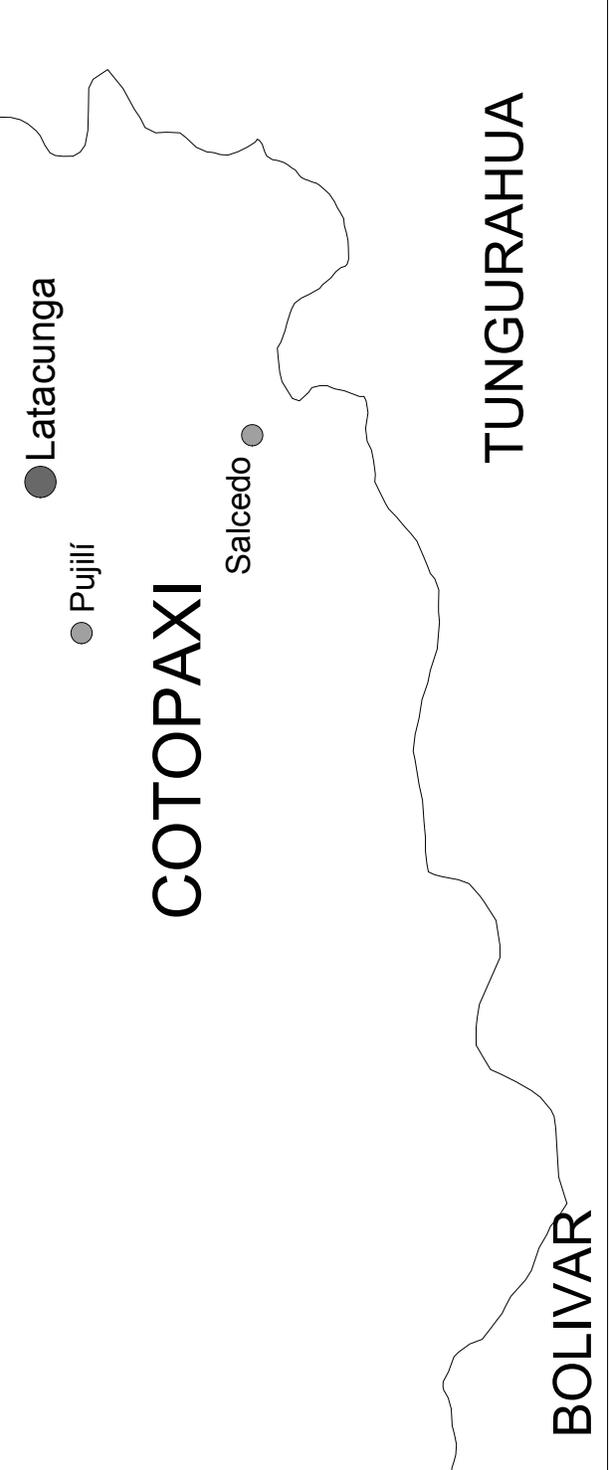


ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL			
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA			
PROYECTO HIDROELÉCTRICO QUILINDAÑA			
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD			
TASA INTERNA DE RETORNO (T.I.R.)			
Aprobado (VOTANTE CAD)		Aprobado (EVALUADOR)	
Fecha:		Evaluador:	
ZUS/18 Fecha:	ESP Dato:	ESP Dato:	Indicador Escala:
Registro: PHQ-V01-AEC	Código:	PHQ-V01-AEC	Última edición:
			A

ANEXO V





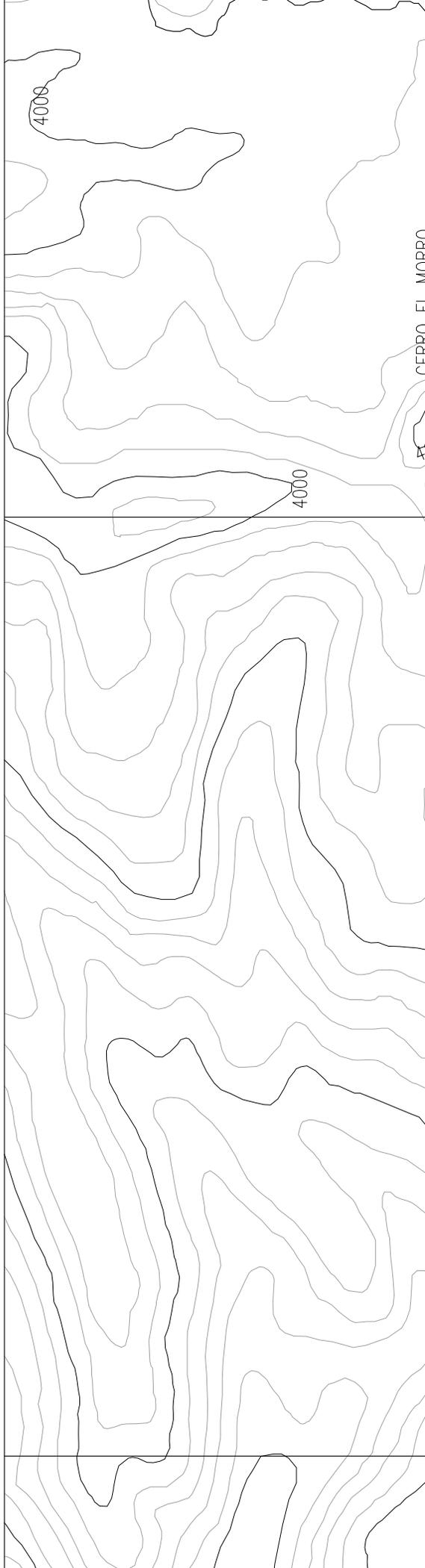


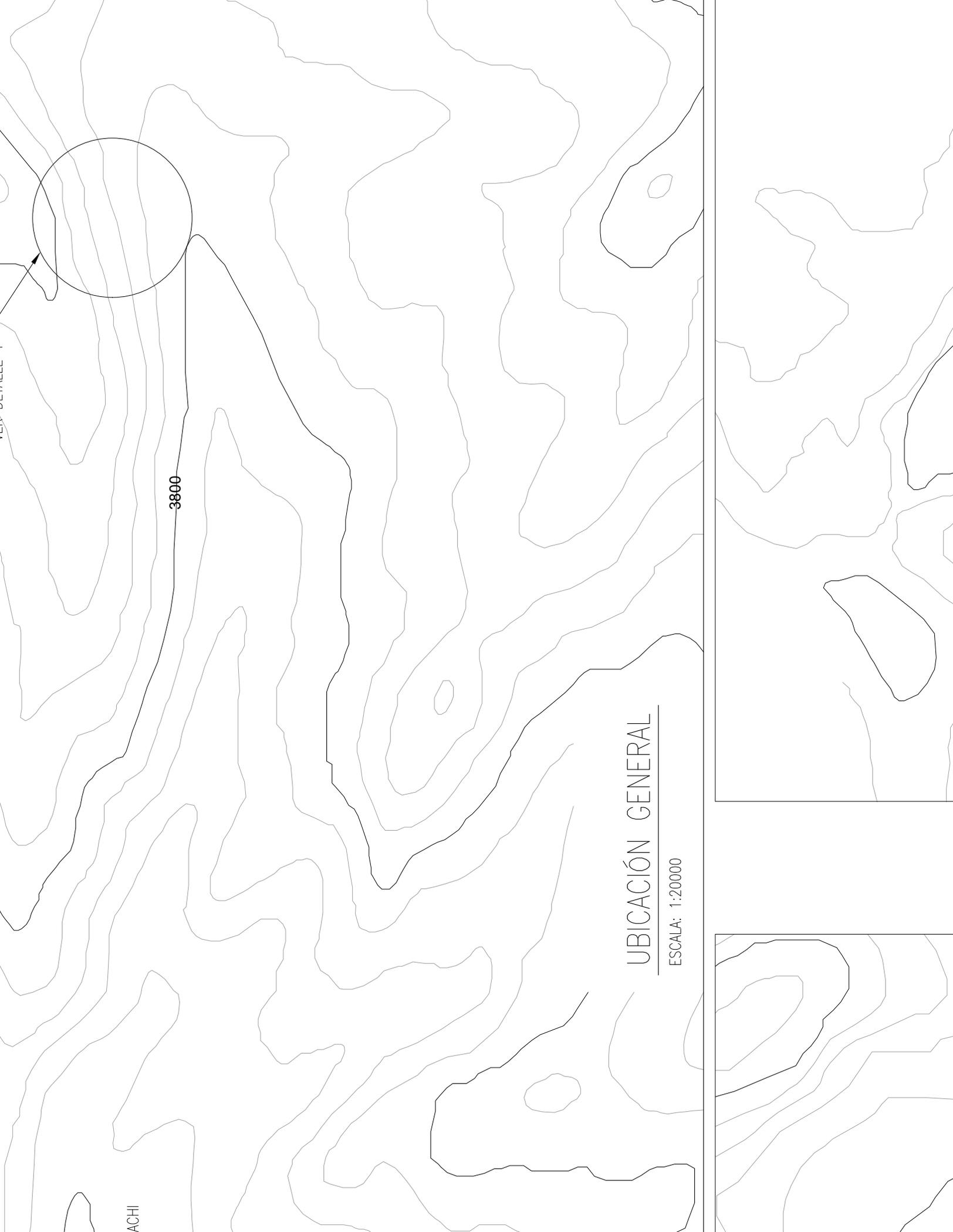
9°9'10"000

790000

785000

790000





ACHI

3800

UBICACIÓN GENERAL

ESCALA: 1:20000

Sector 07

PI = 5+334.88 [m]
Δ = 32.20 [°]
R = 229.18 [m]
PC = 5+268.73 [m]
PT = 5+397.53 [m]

Sector 06

PI = 5+104.22 [m]
Δ = 54.13 [°]
R = 229.18 [m]
PC = 4+987.11 [m]
PT = 5+203.64 [m]

Sector 05

PI = 4+680.17 [m]
Δ = 25.72 [°]
R = 229.18 [m]
PC = 4+627.85 [m]
PT = 4+730.72 [m]

Sector 04

PI = 4+563.24 [m]
Δ = 33.68 [°]
R = 228.27 [m]
PC = 4+494.14 [m]
PT = 4+628.34 [m]

Sector 03

PI = 4+318.35 [m]
Δ = 64.18 [°]
R = 115.17 [m]
PC = 4+246.12 [m]
PT = 4+375.14 [m]

Sector 02

PI = 4+167.13 [m]
Δ = 58.87 [°]
R = 114.59 [m]
PC = 4+102.48 [m]
PT = 4+220.21 [m]

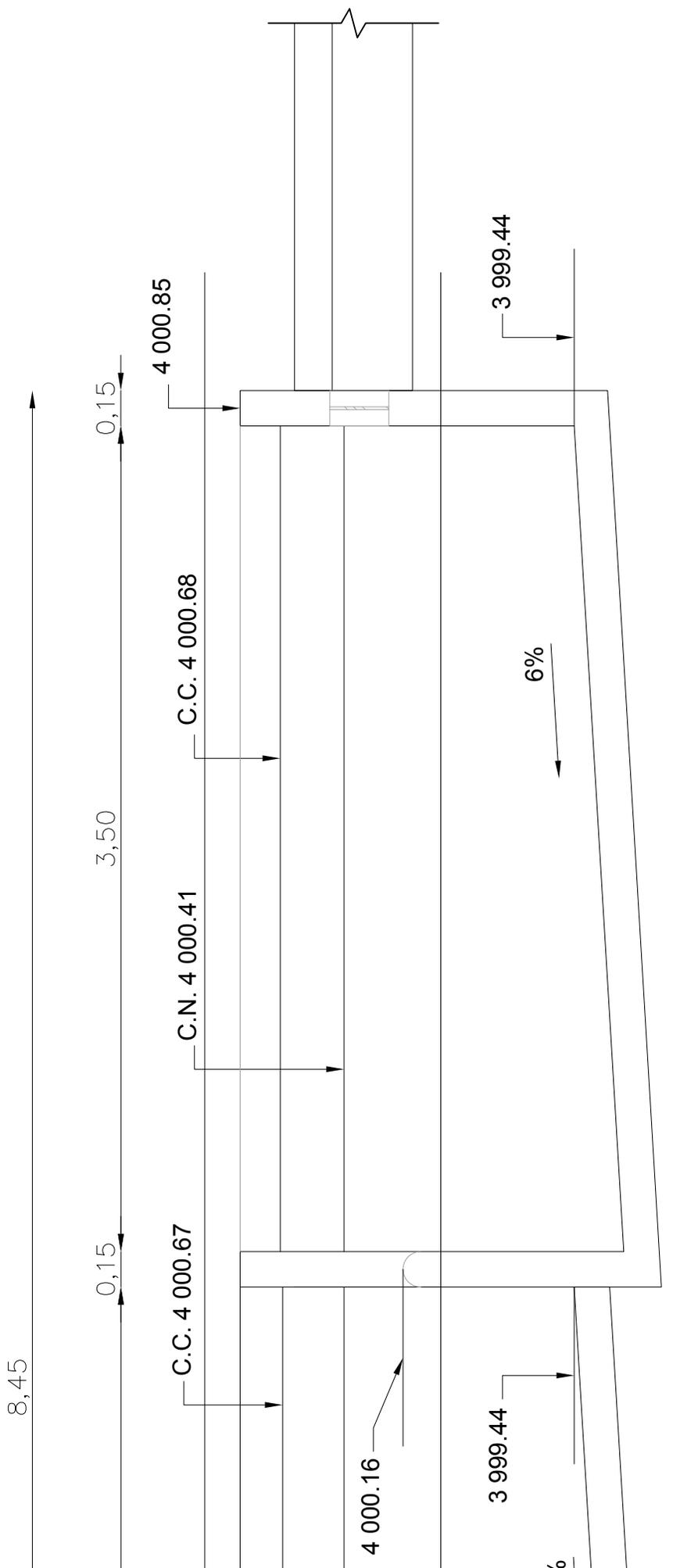
PI_{in} = 0 78°23'14"
= S 0°49'0"

PI = 4+049.34 [m]
Δ = 121.38 [°]
R = 114.59 [m]
PC = 3+845.21 [m]
PT = 4+087.98 [m]



PLANTA DEL TANQUE DE PRESIÓN

1:25



CORTE A - A

ESCALA: 1:25

0.000000

0.000000

0.000000

$L4 = 129.60$

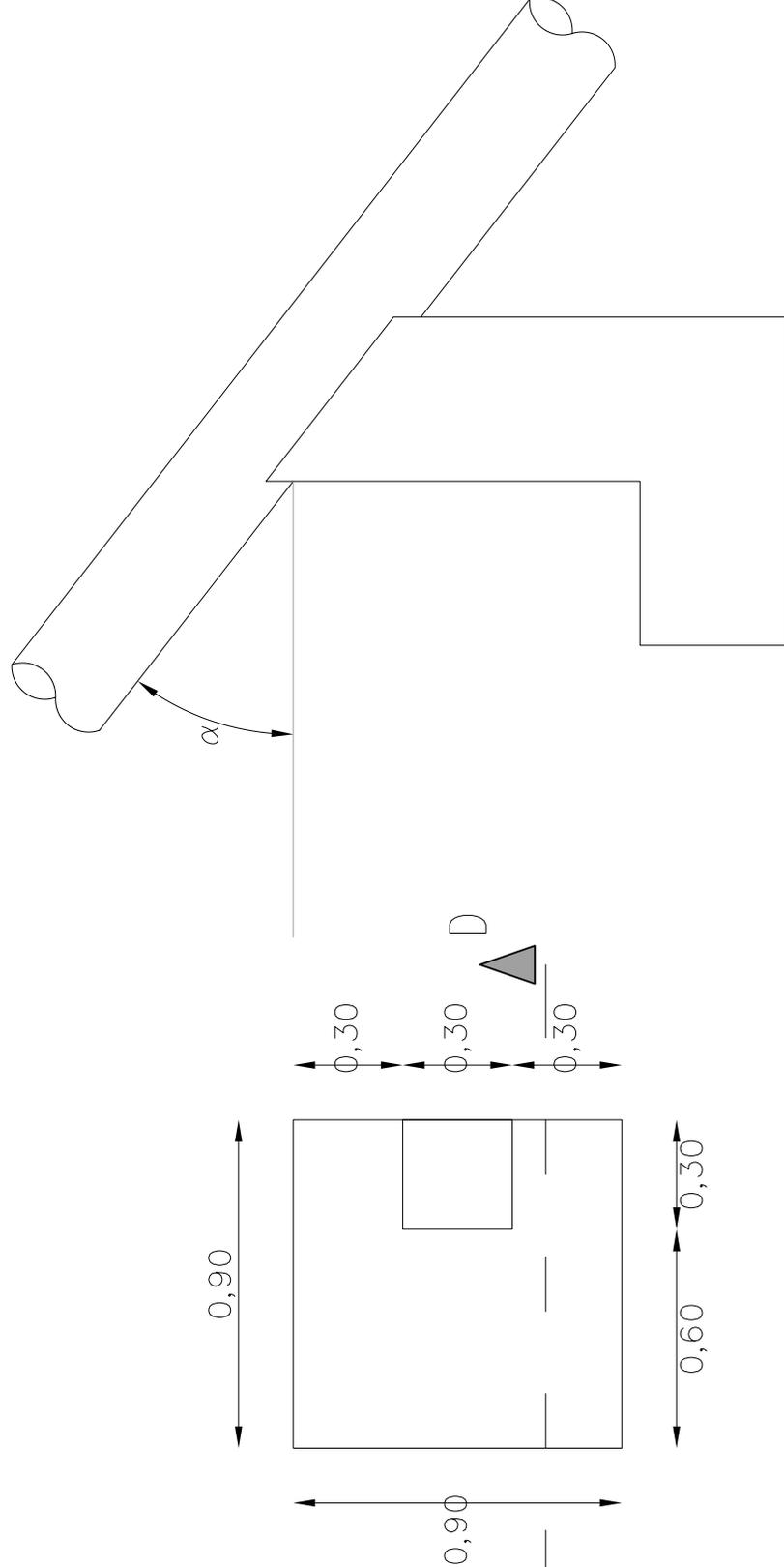
3839.54

PRESIÓN ADMISIBLE = 500 [m]



TUBERÍA EN ANCLAJE 3

ESCALA: 1:50

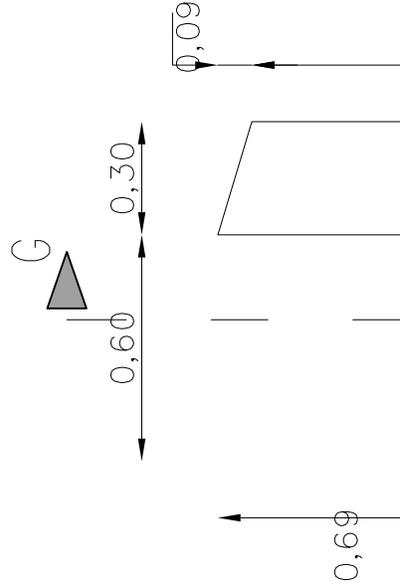


TUBERÍA EN ANCLAJE 2

ESCALA: 1:50

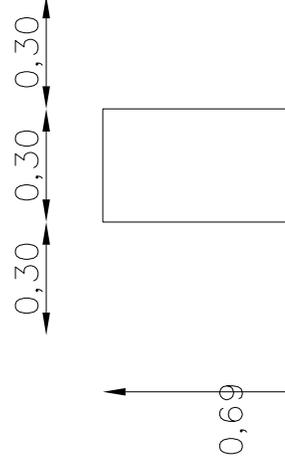
ANTA APOYOS TÍPICOS 3,4&5

ESCALA: 1:20



DISPOSICIÓN TÍPICA TUBERÍA

ESCALA: 1:20



ORDEN DE EMPASTADO