



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA TURBINAS TIPO PELTON, MEDIANTE UN ESTUDIO PARAMÉTRICO

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MASTER EN INGENIERÍA MECÁNICA MENCIÓN EN DISEÑO Y SIMULACIÓN**

SARMIENTO ROJAS JAVIER ALEXANDER

javier.sarmiento@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. HIDALGO DÍAZ VICTOR HUGO, D.Sc.

victor.hidalgo@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: Ing. VALENCIA TORRES ESTEBAN ALEJANDRO, Ph.D

esteban.valencia@epn.edu.ec

Quito, marzo 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Ingeniero SARMIENTO ROJAS JAVIER ALEXANDER, bajo mi supervisión.



Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D.Sc.
DIRECTOR DE PROYECTO



Ing. Esteban Valencia, PhD.

CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **SARMIENTO ROJAS JAVIER ALEXANDER**, 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 mis derechos 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.



Ing. Javier Alexander Sarmiento Rojas

DEDICATORIA

A la vida. A la ingeniería y a la voluntad humana.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida, por sus caminos, por el entendimiento y al conocimiento, por la ciencia la tecnología y el desarrollo. A la Escuela Politécnica Nacional y sus Docentes, su guía y su compromiso que son una luz en el camino.

A todas las personas que forman parte en mi vida. Al amor y a la ingeniería.

Javier Alexander Sarmiento Rojas.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	12
Pregunta de Investigación	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
Alcance	13
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1. Antecedentes.....	14
1.2. Estado del Arte de las turbinas tipo Pelton	17
1.2.1. Condiciones de Operación para Turbinas tipo Pelton:	19
1.2.2. Conversión de la energía en las turbinas tipo Pelton:	19
1.2.3. Triángulo de velocidades:.....	22
1.3. Estado del Arte de diseño paramétrico para turbinas tipo Pelton	24
1.3.1. Principales parámetros Característicos Hidromecánicos	25
1.3.2. Parámetros para Diseño de Turbinas tipo Pelton:.....	28
1.4. Estado del arte en Métodos de Diseño y Modelación Para Turbinas	34
2. METODOLOGÍA	37
2.1. Pasos empleados por Bilal Nasir en el Diseño de Turbinas Tipo Pelton.	37
2.2. Pasos empleados por Tilahun Nigussie, Abraham Engeda y Edessa Dribssa en el diseño de Turbinas tipo Pelton.	40
2.3. Pasos empleados por Zhang para el diseño de Turbinas Tipo Pelton.....	44
2.4. Pasos empleados por la OLADE para el diseño de Turbinas tipo Pelton.	46

2.5. Pasos empleados por Than Zaw Oo, Nyi Nyi y Cho Khaing para el diseño de Turbinas tipo Pelton.	53
2.6. Sensibilidad Individual de Parámetros de Diseño	58
2.6.1. Análisis comparativo de los parámetros empleados en los pasos de Diseño de Turbinas Pelton.....	58
2.7. Modelo paramétrico	69
2.7.1. Puntos principales del Análisis comparativo de los parámetros empleados en los pasos de Diseño de Turbinas Pelton	69
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
3.1. Resultados	73
3.1.1. Estudio de la sensibilidad de Parámetros en el Diseño de Turbinas Tipo Pelton	73
3.2. Validación del Modelo Paramétrico.....	83
3.2.1. Datos Obtenidos de la Central Hidroeléctrica	83
3.2.2. Datos Calculados a partir de los datos Obtenidos de la Central Hidroeléctrica Illuchi II, utilizando la Metodología Propuesta:	84
3.2. Discusión	85
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
4.1. Conclusiones	89
4.2. Recomendaciones	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS.....	93
ANEXO I: Programación en Matlab para el Estudio de sensibilidad de Parámetros en el Diseño de turbinas Tipo Pelton	94

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de Componentes en una Turbina tipo Pelton	16
Figura 1.2 Guía de Selección de Turbinas en función de la Altura y Caudal de Operación	17
Figura 1.3 Representación de la Fuerza de Impulso en los cucharones	20
Figura 1.4 Desplazamiento de Partículas en el triángulo de Velocidades	23
Figura 1.5 Triángulo de Velocidades.....	23
Figura 1.6 Estado del Arte Actual Turbina Tipo Pelton.....	24
Figura 1.7 Relación del ángulo de posición del cucharón	27
Figura 1.8 Criterio de Coincidencia	27
Figura 1.9 Dimensiones de un cucharón de una Turbina Pelton	29
Figura 1.10 Comparación de las Geometrías presentadas por Zhang (izquierda) y Solemslie (derecha).....	31
Figura 2.1 Geometría de la Turbina tipo Pelton.....	42
Figura 2.2 Dimensiones de diseño de los cucharones de la Turbina tipo Pelton a partir del PCD.....	43
Figura 2.3 Dimensiones de diseño de la parte posterior de los cucharones de la Turbina tipo Pelton a partir del PCD.....	43
Figura 2.4 Representación gráfica de los parámetros de los cucharones en las turbinas Pelton.	48
Figura 2.5 Representación gráfica de los ángulos de orientación de los cucharones en las turbinas Pelton. (Fuente: [6]).....	52
Figura 2.6 Planos de diseño de los cucharones en las turbinas Pelton.....	53
Figura 2.7 Planos de diseño de los cucharones en las turbinas Pelton.....	56
Figura 2.8 Flujo de cálculo para los parámetros agrupados e individuales.....	70
Figura 3.1 Variación de la Altura neta en relación a las pérdidas desde Altura en Bruto..	73
Figura 3.2 Variación de la Potencia de entrada en relación a la Altura neta.....	74
Figura 3.3 Velocidad específica Potencia de entrada en relación a la Altura neta.....	75
Figura 3.4 : Velocidad de la Turbina en relación a la Altura neta.	76
Figura 3.5 Diámetro del rodete en relación a la Altura neta.....	77
Figura 3.6 Diámetro del chorro en relación a la Altura neta.....	78
Figura 3.7 Ancho del cucharón en relación al diámetro del chorro.....	79
Figura 3.8 Largo del cucharón en relación al diámetro del chorro.....	80
Figura 3.9 Profundidad del cucharón en relación al diámetro del chorro.....	81
Figura 3.10 Ancho de la muesca en relación al diámetro del chorro	82
Figura 3.11 Profundidad de la muesca en relación al diámetro del chorro	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros geométricos en el diseño de cucharones	30
Tabla 1.2 Comparación de Parámetros presentados por Zhang y Solemslie	31
Tabla 1.3 Relación entre el número de inyectores, ancho de la cuchara y diámetro del chorro jet.....	32
Tabla 1.4 Etapas de Parametrización según autores Jair Yáñez, Solemnslie y Zhang	36
Tabla 2.1 Dimensiones de los cucharones en función del diámetro del chorro jet.....	48
Tabla 2.2 Número de cucharones en función de la relación de diámetro del rodete y diámetro del chorro jet	50
Tabla 2.3 Ángulos de talonamiento Y en función de la relación de diámetro del rodete y diámetro del chorro jet.	51
Tabla 2.4 Ángulos de orientación de la cuchara con respecto al giro del rodete en función de la relación de diámetro del rodete y diámetro del chorro jet.	51
Tabla 2.5 Número de cucharones aproximado en relación del diámetro del chorro jet.....	55
Tabla 2.6 Número de cucharones aproximado en relación del diámetro del chorro jet.....	57
Tabla 2.7 Ecuaciones de Altura Neta	58
Tabla 2.8 Ecuaciones de Potencia de Entrada.....	59
Tabla 2.9 Ecuaciones de Potencia de Entrada.....	59
Tabla 2.10 Ecuaciones de la Velocidad Específica	60
Tabla 2.11 Ecuaciones del Número de Inyectores.....	61
Tabla 2.12 Velocidad de la Turbina.....	61
Tabla 2.13 Velocidad del Chorro.....	62
Tabla 2.14 Ecuaciones del del rodete diámetro	63
Tabla 2.15 Ecuaciones del diámetro del chorro	64
Tabla 2.16 Ecuaciones del número de cucharas.....	65
Tabla 2.17 Ecuaciones del Ancho de la Cuchara.....	66
Tabla 2.18 Ecuaciones del Largo de cucharón	67
Tabla 2.19 Ecuaciones de la Profundidad del Cucharón.....	67
Tabla 2.20 Ecuaciones de la Profundidad de la Muesca.....	68
Tabla 2.21 Ecuaciones del Ancho de la Muesca.....	68
Tabla 2.22 Fórmulas para el cálculo de los parámetros dentro de la Metodología para el Diseño de Turbinas tipo Pelton	71
Tabla 2.23 Proceso Iterativo con número de Inyectores	72
Tabla 2.24 Número de cucharones en función de la relación de diámetro del rodete y diámetro del chorro jet	72
Tabla 3.1 Número de cucharones aproximado en relación del diámetro del chorro jet.....	79

Tabla 3.2 Datos Obtenidos	84
Tabla 3.3 Datos Geométricos Obtenidos	84
Tabla 3.4 Datos Obtenidos	85

RESUMEN

El presente documento tiene por objetivo desarrollar una metodología que permita obtener un diseño paramétrico para los cucharones y el rodete de las Turbinas Tipo Pelton, validado a través de los datos reales de la Central Hidroeléctrica Illuchi II. A partir de los datos de operación de las turbinas tipo Pelton se ha realizado un análisis de sensibilidad de parámetros relacionados al diseño geométrico bajo las condiciones de mayor eficiencia hidráulica, se ha investigado la consideración para los parámetros que intervienen en el desgaste durante la fase de diseño, y, mediante un análisis de rangos y ecuaciones recomendadas para el cálculo los parámetros determinados en el modelo se ha obtenido los ángulos para la máxima eficiencia hidráulica y la ubicación óptima de los cucharones en el rodete de la turbina tipo Pelton.

Este proceso termina con la validación de los resultados obtenidos y la elaboración del modelo de la Turbina Tipo Pelton.

Palabras clave: Turbina Pelton, cucharones, PCD, eficiencia hidráulica, diseño paramétrico.

ABSTRACT

The aim of this work is to develop a methodology that allows obtaining a parametric design for the buckets and the runner of the Pelton Turbines, validated through the real data of the Illuchi II Hydroelectric Power Plant. From the real operating data of the Pelton turbines, a sensitivity analysis of parameters related to the geometric design under the conditions of greater hydraulic efficiency has been carried out, the consideration for the parameters related to wear of Pelton Turbines during the phase of design, and through an analysis of ranges and recommended equations for the calculation of the parameters determined in the model, the geometry, performance angles for maximum hydraulic efficiency and the optimal location of the buckets in the impeller of the Pelton type turbine have been obtained. This process ends with the validation of the results obtained and the development of the Pelton Type Turbine model.

Keywords: Pelton turbine, Buckets, PCD, hydraulic efficiency, parametric design.

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA TURBINAS TIPO PELTON, MEDIANTE UN ESTUDIO PARAMÉTRICO

INTRODUCCIÓN

La demanda energética de la sociedad global ha incrementado rápidamente durante las últimas décadas y se prevé que esta tendencia continúe a medida que más países se industrialicen con el consecuente aumento del nivel de vida. El suministro primario de energía mundial está dominado actualmente por fuentes de energía no renovables como petróleo, carbón y gas natural [1].

Menos del 40% de hidroeléctricas en la producción mundial de energía utilizan turbinas tipo Pelton [2], debido a esto, la investigación científica se ha enfocado en otros tipos de turbinas.

La turbina Pelton es una tecnología utilizada para la generación de energía, patentada por primera vez en 1880. La información al respecto de la turbina Pelton, es de alguna forma escasa, la mayor cantidad de conocimiento sobre este tipo turbinas se mantiene principalmente dentro de las compañías comerciales [3].

A pesar de ser una tecnología ya desarrollada, existen pocas publicaciones sobre el método de diseño de turbinas Pelton. Considerando la edad de la tecnología, se podría asumir que todas las preguntas científicas alrededor de esta turbina se han respondido, pero este no es el caso. La tecnología ha experimentado muchas mejoras y la diferencia entre el estado del arte de la turbina y el diseño original de Lester A. Pelton es evidente. Sin embargo, la cantidad de investigación pública disponible con respecto al diseño de turbinas Pelton y los efectos del diseño en el flujo de agua a través de la turbina es limitado. Esto se debe a la alta competitividad propia de la naturaleza del negocio de energía hidroeléctrica y la confidencialidad resultante con respecto al conocimiento de cada competidor. Este sigilo es comprensible desde una perspectiva comercial, pero complica los esfuerzos de colaboración en el campo científico.

Debido a que el flujo en los cucharones de la turbina Pelton depende del diseño del cucharón, la investigación de los fenómenos de flujo no se puede hacer sin una comprensión y disponibilidad del diseño del cucharón [1]. La Comisión Internacional Electrotécnica (International Electrotechnical Commission "IEC", 2013) señala que existe

una falta de estudios científicos para una aproximación a coeficientes relacionados a turbinas Pelton y la erosión generada en este tipo de hidroturbinas [4].

En base a lo mencionado, se define la necesidad de desarrollar el estudio sobre la geometría de turbina Pelton, mediante una metodología de diseño, como base para futuras investigaciones acerca de los efectos del flujo y desgaste en las turbinas Tipo Pelton.

Pregunta de Investigación

¿Cómo afectan los parámetros de diseño en la eficiencia hidráulica de las Turbina tipo Pelton?

Objetivo general

Obtener una metodología de diseño para Turbinas tipo Pelton, mediante un estudio paramétrico.

Objetivos específicos

- Realizar una síntesis del estado del arte.
- Desarrollar una metodología para el diseño de una turbina tipo Pelton
- Validar el modelo realizado comparándolo con datos obtenidos de las centrales hidroeléctricas.
- Retroalimentar y optimizar el modelo a partir de la validación realizada.

Alcance

Elaborar una metodología que considere las características principales de los parámetros de diseño, y que a su vez considere globalmente a los parámetros que intervienen de forma más relevante en el desgaste por erosión por material particulado en las turbinas tipo Pelton, con la finalidad de llegar a un modelo paramétrico que permitirá optimizar los recursos en la etapa de diseño y mejorar las políticas de mantenimiento preventivo, generando un impacto en la reducción de costos de proyectos de Centrales Hidroeléctricas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

Una de las tecnologías renovables más antiguas y probadas es la producción de energía a través de turbinas hidráulicas. La tecnología transforma la energía de la velocidad y la presión del agua que fluye desde tierra alta a energía mecánica en forma de rotación y torque.

La energía hidráulica es un tipo de energía utilizada por más de 100 años en la generación de energía eléctrica, es uno de los tipos de producción de energía reutilizable más importantes y se prevé que su uso se expanda mundialmente construyendo nuevas estaciones o rehabilitando a las estaciones actuales [5].

La turbina Pelton es una máquina hidráulica perteneciente a las turbomáquinas que busca convertir la energía del flujo de corriente en electricidad para cabezas medianas a altas, esta tecnología fue patentada por primera vez en 1880 por Lester A. Pelton (1829 - 1908) en California.

Su diseño de corredor todavía se usa en gran parte hoy en día en la industria hidroeléctrica. En comparación con las turbinas Francis, las ruedas Pelton ofrecen grados de eficiencia de carga parcial particularmente favorables y se prefieren para caudales bajos. No tienen rival para alturas elevadas por encima de los 700 m, por lo que su aplicación es principalmente en las regiones de alta montaña de todo el mundo.

Esta turbina puede operar aprovechando saltos hasta más de 1000 metros, se conocen diseños de potencias de 130 MW por unidad y su eficiencia está comprendida entre 80% y 90% [5].

Su principal ventaja está dada por las elevadas eficiencias que se obtienen en su operación a bajas cargas parciales, ésta es una de las razones por la cual se favorece la utilización de Turbinas Pelton en proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, donde la principal característica de funcionamiento de los equipos electromecánicos, está dada por su operación bajo diversos porcentajes de carga, para satisfacer amplias variaciones de demanda energética durante el día y a través de los años de vida útil que se estime para la central [6].

Mientras que las primeras turbinas tipo Pelton se hacían de acero fundido o se fabricaban empernando los cucharones en una rueda, actualmente se fabrican mediante procesos de maquinado desde un disco de acero inoxidable, esto aumenta la resistencia a la fatiga y aumenta su vida útil. Mediante Métodos de Elementos Finitos (FEM), una aproximación a estos límites acorde al diseño y su capacidad de carga puede ser calculada.

La turbina Pelton es una turbina de acción o de chorro, tangencial y normalmente de eje horizontal. Está formada por una o varias entradas de agua al rodete. Los álabes que están situados sobre la periferia del rodete tienen forma de cuchara. La fuerza del impulso del agua es la responsable del giro de la turbina.

A pesar de la importancia de las turbinas tipo Pelton en dominio de energía de máquinas hidráulicas, existe información marginal en la literatura acerca de la teoría involucrada y el diseño [5].

A continuación, se describen los elementos principales de las turbinas tipo Pelton:

Distribuidor: Está constituido por uno o varios equipos de inyección de agua, cada uno de dichos equipos tiene como función dirigir convenientemente un chorro de agua cilíndrico y de sección uniforme sobre el rotor, también regula el caudal preciso que ha de fluir hacia el rotor, llegando incluso a cortarlo totalmente cuando sea necesario.

Tobera: Constituye una boquilla, con orificio circular, instalada al final de la cámara de distribución, contiene a la aguja o inyector que dirige el chorro de agua, tangencialmente hacia la periferia del rotor, de tal modo que la prolongación de la tobera forma un ángulo de 90° con los radios de rotor.

Rodete: Es la pieza clave donde se transforma la energía hidráulica del agua en energía mecánica y consta de los siguientes elementos:

Rueda motriz: Está unida rígidamente al eje por medio de chavetas y anclajes adecuados. Su periferia está mecanizada apropiadamente para ser soporte de los cangilones.

Cangilones: También denominados álabes, cucharones o palas. Están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua. Su forma es similar a la de una doble cuchara,

con una arista interior lo más afilada posible, de modo que divide al cangilón en dos partes simétricas.

Carcasa: Es la envoltura metálica que cubre los inyectores, el rotor y los otros elementos mecánicos de la turbina. Su función es evitar que el agua salpique al exterior.

Cámara de descarga: También conocida como tubería de descarga, es la zona por donde cae el agua libremente hacia el desagüé, después de haber movido el rotor.

En la Figura 1.1 se podrán observar los principales componentes dispuestos en una turbina tipo Pelton:

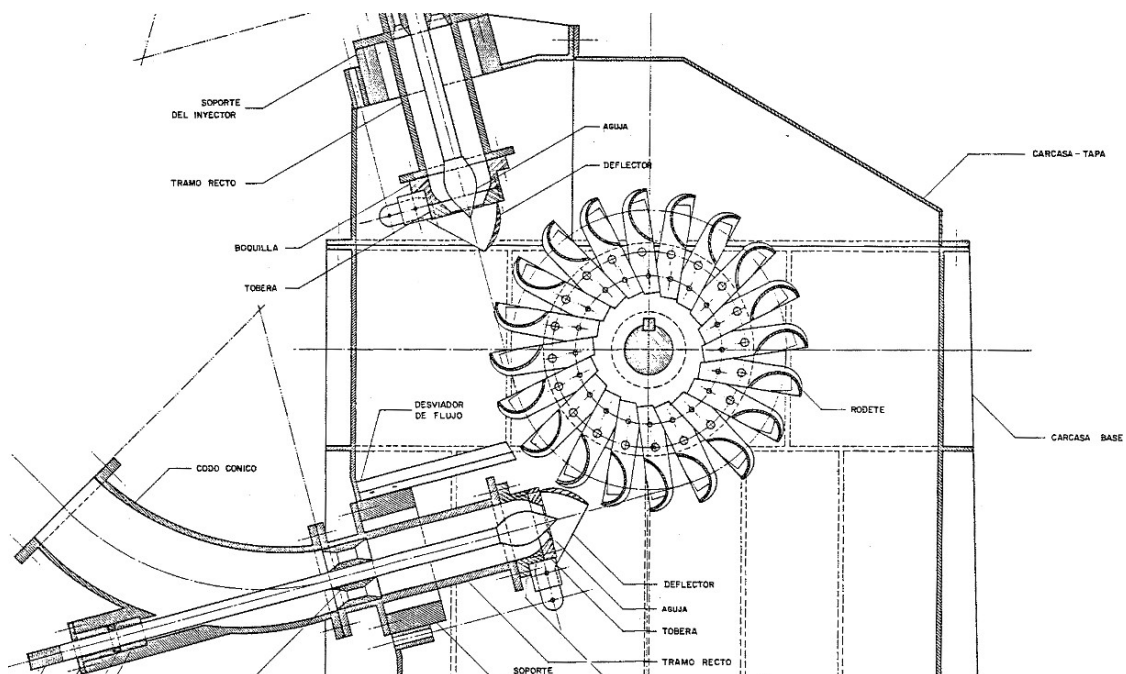


Figura 1.1. Esquema de Componentes en una Turbina tipo Pelton
(Fuente: [6])

En la Figura 1.2 se presenta el rango operativo para los diferentes tipos de turbinas:

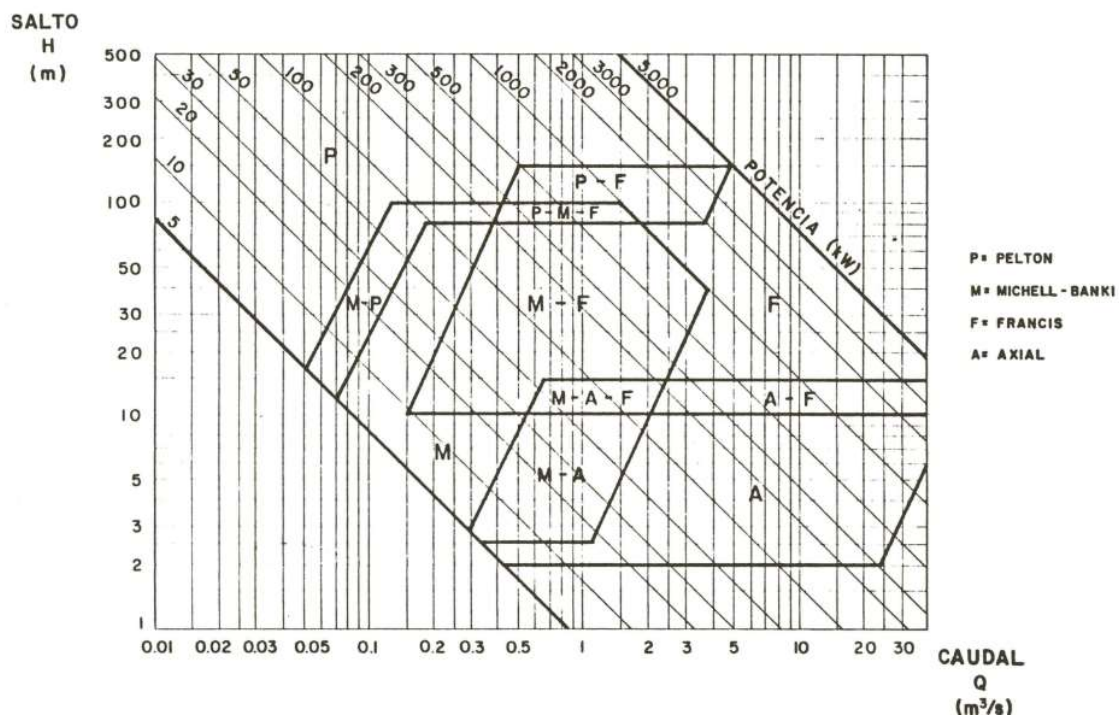


Figura 1.2 Guía de Selección de Turbinas en función de la Altura y Caudal de Operación (Fuente: [6])

1.2. Estado del Arte de las turbinas tipo Pelton

Hasta el final del siglo pasado, debido a la naturaleza del mercado de la generación eléctrica ha existido una falta de información acerca de las explicaciones hidromecánicas para este tipo de turbinas. La turbina Pelton consiste en una rueda en donde existen cucharones que reciben el flujo de agua direccionado a través de uno o más inyectores, en este proceso intervienen interacciones mecánicas e hidráulicas. Ambas categorías representan un amplio Estado del Arte en este tipo de tecnologías.

En la literatura sobre máquinas de fluidos como: Thomann (1931), Pfeleiderer y Petermann (1986), Quantz y Meerwarth (1963), Bohl (2004, 2005), Menny (2005), Giesecke y Mosonyi (2005) y Sigloch (2006), se pueden encontrar las condiciones generales de operación y las reglas básicas de diseño para las turbinas tipo Pelton. [5].

El autor Zhang realiza su trabajo experimental en relación a las turbinas tipo Pelton dentro de la compañía Andritz Hydro (antes VA TECH Hydro) en Suiza desde el 2004 al 2007 y recopila toda la teoría disponible hasta el año 2015, tomando las referencias mencionadas

en el párrafo anterior, y, su trabajo representa el apoyo ingenieril para el desarrollo de nuevos modelos y optimizaciones.

En base a lo expuesto, el año 2016, el autor Solemslie presenta su tesis doctoral relacionada a los métodos experimentales y diseño de turbinas tipo Pelton, la cual fue desarrollada en los Laboratorios de Generación de Energía hidráulica y Procesos de Ingeniería de la Universidad de Ciencia y Tecnología (NTNU) en Trondheim, Noruega; Este autor presenta el desarrollo de su investigación basándose en lo descrito por Zhang, y utilizando las curvas propuestas por Bézier para el desarrollo de su modelo de optimización y tema principal de tesis doctoral.

Los estudios realizados por los autores Zhang y Solemslie se han tomado como base para el presente estudio, siendo complementada por estudios adicionales en base a métodos teóricos y experimentales realizados por diferentes autores.

Así, en esta etapa se describe el procedimiento que se realizará y las condiciones que se tomarán en cuenta previo al diseño y dimensionamiento de la turbina Pelton.

Con el Estado del Arte actual, las nuevas turbinas construidas, así como aquellas recuperadas pueden alcanzar eficiencias hidráulicas alrededor del 90%, esto se logra mejorando la calidad del fluido jet, así como las optimizaciones operacionales entre el jet y los cucharones de la Turbina tipo Pelton.

La máxima eficiencia hidráulica debe ser alcanzada en el diseño del perfil de los cucharones, mientras que, por otro lado, los parámetros de seguridad y calidad, así como el tiempo de vida del material, deben ser asegurados [5].

Debido a que el desarrollo de la geometría de diseño contribuye a la optimización de tiempo computacional requerido posteriormente para optimizaciones en el contexto de la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), como fue presentado en el modelo de Solemslie, el presente trabajo toma las bases consideradas para el diseño, de tal forma que se pueda analizar la eficiencia hidráulica durante la fase de diseño de las turbinas Tipo Pelton.

1.2.1. Condiciones de Operación para Turbinas tipo Pelton:

Las principales condiciones de operación de las turbinas tipo Pelton son la altura neta o cabeza y el caudal, las cuales se describen a continuación:

Altura Neta: Esta depende de la geografía donde se ubicará la turbomáquina, se puede calcular la altura neta como:

$$H_n = H_g - H_{tl} \quad (1.1)$$

Donde H_g es la altura o cabeza bruta siendo la distancia vertical entre la superficie del nivel de agua y la admisión en la turbina. H_{tl} se define como el total de pérdidas existentes (por canal abierto, entrada, salida, compuerta etc.). Este valor es considerado, en base a la experiencia de operadores de Turbinas tipo Pelton, aproximadamente de 5 a 6% de la cabeza bruta. [16]

Caudal: Una cantidad que se la define como la cantidad de fluido que circula a través de una sección del ducto por unidad de tiempo. Este valor se lo puede calcular conociendo la velocidad (V_t) en y el área de la sección analizable (A_T).

$$Q = V_t * A_T \quad (1.2)$$

Una vez definidas ya las condiciones de funcionamiento, es necesario calcular las dimensiones principales como las variables cinéticas involucradas en el diseño de la turbomáquina. Para este propósito se utilizarán ecuaciones fundamentales y suposiciones útiles.

1.2.2. Conversión de la energía en las turbinas tipo Pelton:

Al tener una altura de agua se obtiene energía potencial, la cual, al moverse con un caudal de agua definido, desde la altura neta a través de las construcciones pertinentes hasta llegar al sistema de inyección en donde se convierte a la energía potencial en energía cinética en la forma de chorro a una velocidad jet a la altura de los cucharones de la turbina tipo Pelton.

Sin considerar las pérdidas por fricción en los inyectores, se utiliza la ecuación de acuerdo a Bernoulli para calcular la velocidad jet del chorro con la siguiente expresión, conocida típicamente como la fórmula de Torricelli:

$$C_0 = \sqrt{2gH_n} \quad (1.3)$$

Donde:

$C_0 =$ Velocidad jet

$g =$ gravedad

$H_n =$ Altura neta

Al llegar el agua disparada a velocidad jet hacia los cucharones comienza la interacción en donde la energía cinética se transforma en energía mecánica. Para el análisis de esta interacción se asume que existe movimiento de traslación únicamente, por lo que se considera la presencia de la fuerza de impulso como única fuerza efectiva. En el sistema representado en la Figura 1.3 se podrá observar la interacción mencionada:

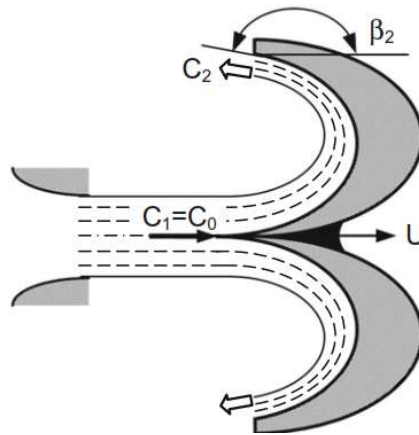


Figura 1.3 Representación de la Fuerza de Impulso en los cucharones
(Fuente: [5])

Donde:

$C_1 = C_0 =$ Velocidad jet

$C_2 =$ Velocidad de salida del cucharón

$U =$ Velocidad de Traslación

Y, además, aparece el siguiente término:

$\beta_2 =$ Ángulo de salida de agua del cucharón

Acorde a lo expuesto, si se considera el impulso, se podrá entonces obtener la velocidad relativa mediante la siguiente ecuación (1.4):

$$W_1 = C_1 - U \quad (1.4)$$

Donde:

$W_1 =$ Velocidad relativa en el punto 1

De acuerdo con la ley de conservación del momento, el cambio de la dirección del flujo está relacionado con una fuerza impulsiva externa que actúa perpendicular a la dirección del flujo. Esta fuerza corresponde a aquella generada por la presión debajo de la capa de agua. Para su determinación, se debe evaluar la diferencia de flujo de momento entre la entrada y la salida del cucharón móvil. Una vez que el flujo de chorro de agua sale por el punto 2 tendrá la velocidad relativa W_2 .

El componente de la fuerza total en la dirección del movimiento del cucharón se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F_{bucket} = \dot{M}_w (W_1 - W_2 \cos \beta_2) = \dot{M}_w W(1 - \cos \beta_2) \quad (1.5)$$

Donde:

$$W = W_1 - W_2 = \text{Velocidad relativa total}$$

$$\dot{M}_w = \rho W A_{jet} = \text{masa total de flujo de agua en el movimiento de los cucharones}$$

Además, se puede obtener \dot{M}_w mediante la siguiente fórmula:

$$\dot{M}_w = \frac{W}{C_0} \dot{M}_c \quad (1.6)$$

Donde:

$$\dot{M}_c = \rho C_0 A_{jet} = \text{tasa de flujo de agua en el movimiento de los cucharones}$$

Por lo que, el componente de la fuerza total en la dirección del movimiento del cucharón puede ser expresado de la siguiente forma:

$$F_{bucket} = \dot{M}_c \frac{W^2}{C_0} (1 - \cos \beta_2) \quad (1.7)$$

Con lo expuesto, se tiene que la Potencia recibida por los cucharones se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$P = \dot{M}_c \frac{W^2}{C_0} (1 - \cos \beta_2) \cdot U \quad (1.8)$$

El trabajo específico realizado por una unidad de masa se obtiene al cumplirse la siguiente condición:

$$\frac{U}{C_0} = 0.5 \quad (1.9)$$

En esta condición, se define a la eficiencia hidráulica mediante la siguiente fórmula:

$$\eta_h = 2k(1 - k)(1 - \cos \beta_2) \quad (1.10)$$

Donde:

$$k = \frac{U}{C_0} = \text{radio de velocidad}$$

En las condiciones: $k = 0.5$ y $\beta_2 = 180^\circ$, se obtiene la máxima eficiencia hidráulica.

Durante el desarrollo teórico de las ecuaciones presentadas, se obtiene que, la velocidad de salida para cumplir todas las condiciones teóricas debería ser igual a cero:

$$C_2 = 0 \quad (1.11)$$

En el diseño práctico de turbinas tipo Pelton, se conoce que el chorro de agua utilizado debe salir para dejar lugar para los siguientes cucharones, como una consecuencia para cumplir esta condición se ha considerado que el ángulo de salida de agua del cucharón tenga la siguiente configuración:

$$\beta_2 \sim 170^\circ \quad (1.12)$$

Es necesario entonces, el diseño en relación a la eficiencia máxima, la cual considera al ángulo de salida, mediante la siguiente fórmula:

$$\eta_{h,max} = 0.5(1 - \cos \beta_2) \quad (1.13)$$

1.2.3. Triángulo de velocidades:

El principio fundamental de una turbina Pelton establece que, para maximizar la energía extraída desde el flujo, la velocidad de rotación, u , debe ser la mitad de la velocidad de entrada, c_1 , entonces:

$$u = \frac{c_1}{2} \quad (1.14)$$

Esta condición define al Mejor Punto de Operación (Best Point of Operation). En la literatura, el principio operativo de las cucharas en las Turbinas tipo Pelton normalmente se ha descrito mediante una sola sección transversal a través del balde y el chorro en la posición en la que el chorro golpea a las cucharas con 90° .

La energía se extrae del agua como par en el eje de la turbina por el impulso del agua que actúa sobre el cubo de la turbina. Una pequeña cantidad de velocidad retiene el flujo para permitir el vaciado del balde para dirigir el agua que sale del balde lejos del siguiente balde. La interacción entre el agua y el lado posterior del siguiente cucharón conducirá a una reducción en el torque y, por lo tanto, a una menor producción de energía de la turbina. El cucharón acomoda esta velocidad de salida en un pequeño ángulo de salida, β_2 , como se ve en la Figura 1.4:

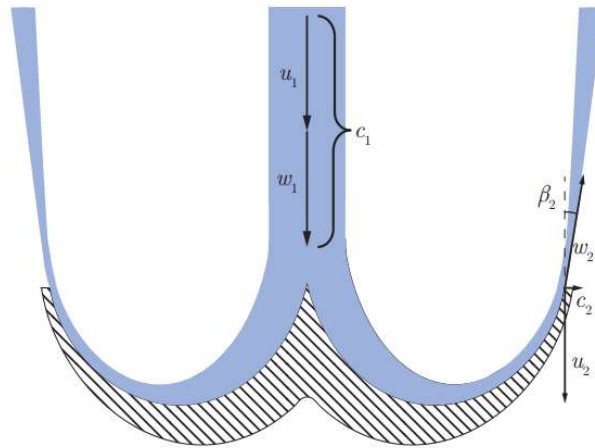


Figura 1.4 Desplazamiento de Partículas en el triángulo de Velocidades
(Fuente: [1])

Cuando el punto operativo se desvía del mejor punto de operación, el diagrama de velocidad de salida cambiará como se ve en la Figura 1.5. Este cambio en la relación entre la velocidad de entrada, c_1 , y la velocidad de rotación, u , conduce a un cambio en la velocidad relativa en el flujo, w_1 . Con una velocidad relativa constante, se puede suponer que la energía de velocidad retenida en el agua que sale de la turbina, c_2 , es directamente proporcional a la velocidad relativa como se muestra a continuación.

$$c_2 = w_1 - u \quad (1.15)$$

Los triángulos de velocidad correspondientes a las diferentes condiciones de operación, se muestra en la siguiente Figura 1.5:

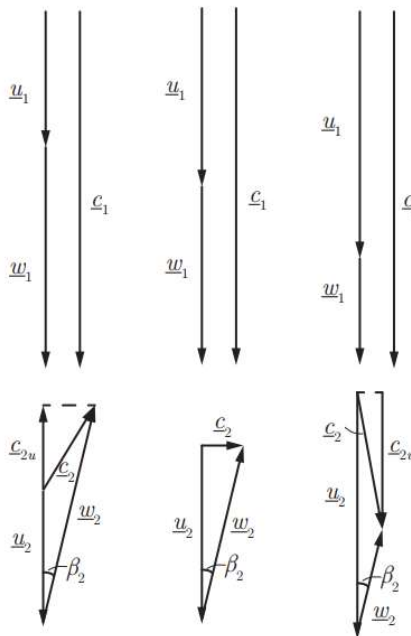


Figura 1.5 Triángulo de Velocidades
(Fuente: [1])

Mediante las consideraciones presentadas en esta sección se presenta en la Figura 1.6 correspondiente al Estado del Arte actual para la Turbina Tipo Pelton:

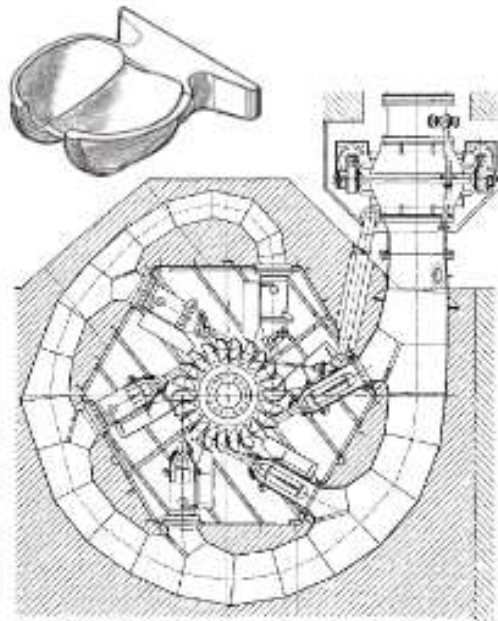


Figura 1.6 Estado del Arte Actual Turbina Tipo Pelton
(Fuente: [5])

1.3. Estado del Arte de diseño paramétrico para turbinas tipo Pelton

La publicación de los métodos y geometrías de diseño de turbinas son inexistentes, el estudio para desarrollar un método de diseño es un requisito actual [1].

Las complejas condiciones del flujo a la salida del jet y la interacción inestable entre el fluido jet y los cucharones requieren descripciones analíticas complejas, ya que el jet formado por el inyector es altamente dinámico y está sujeto a intercambio turbulento con el aire ambiental.

La mayor parte del conocimiento de la dinámica del agua en el jet ha sido obtenida casi exclusivamente por mediciones experimentales y casi específicamente por observaciones fotográficas de la forma y la distribución de la velocidad axial en el jet.

Para el estudio de las condiciones de flujo y para la interacción con los cucharones, los métodos experimentales han sido los más útiles para la investigación científica, seguido de la aplicación de métodos CFD.

La aplicación de métodos CFD para optimización en las turbinas Pelton comenzó a finales de 1990 y su uso ha aumentado desde entonces, centrándose principalmente en la interacción de los cucharones rotando y el flujo jet.

Es por esta razón que, para el diseño de turbinas tipo Pelton, con el propósito de alcanzar la máxima eficiencia hidráulica se han definido parámetros característicos y desde allí se definirán los parámetros geométricos necesarios para satisfacer los requerimientos del diseño.

1.3.1. Principales parámetros Característicos Hidromecánicos

Existen pocos parámetros adimensionales que funcionen como cantidades paramétricas en la especificación de las turbinas tipo Pelton y que sean relevantes para el diseño geométrico e hidráulico, los principales se detallan a continuación:

Coeficiente de Velocidad Periférica:

Se define como la relación entre la velocidad periférica en el círculo jet del rodete y la velocidad jet.

Se lo puede calcular mediante la expresión:

$$k_m = \frac{U_m}{c_0} = \frac{U_m}{\sqrt{2gH_n}} \quad (1.16)$$

Donde:

k_m = Coeficiente de Velocidad Periférica

U_m = Velocidad periférica

Este parámetro representa en la práctica a la eficiencia hidráulica. Se ha determinado que la máxima eficiencia hidráulica se obtiene cuando este valor se encuentra en el rango de 0,45 a 0,48.

Carga Volumétrica de los cucharones:

El espesor del chorro jet relativo al ancho del cucharón representa la carga volumétrica del cucharón adimensional.

Para un inyector, se lo expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\varphi_B = \left(\frac{d_0}{B}\right)^2 \quad (1.17)$$

Donde:

$\varphi_B =$ Carga volumétrica del cucharón

$d_0 =$ diámetro del chorro

$B =$ Ancho del cucharón

Este parámetro geométrico adimensional se utiliza para representar la razón de flujo y determinar el ancho del cucharón necesario.

En la práctica este parámetro toma valores entre 0,09 a 0,11, con el criterio de que, en la etapa de diseño, el diámetro jet no exceda un tercio del ancho del cucharón tanto en valores nominales o máximos de flujo.

Velocidad Específica:

Este parámetro geométrico toma en consideración la relación entre radios de la rueda y del chorro jet. Se especifica mediante la siguiente fórmula:

$$n_q = 2,63 k_m \sqrt{\varphi_B} \frac{B}{D_m} \quad (1.18)$$

Donde:

$n_q =$ Velocidad específica

$D_m =$ diámetro del rodete, desde el centro de cada cucharón hasta su opuesto

Ángulo de posición característica del cucharón:

Este ángulo determina la velocidad de escape de la Turbina Pelton. Se considera que las turbinas tipo Pelton mantienen geometrías similares entre turbinas, por lo que la relación entre la longitud del cucharón y el ancho del cucharón se encuentra entre 0,8 a 0,9.

Partiendo de la condición mencionada, se define al ángulo de posición característica del cucharón mediante la siguiente expresión:

$$\cos \alpha_o = \frac{1}{1+2N_q} \quad (1.19)$$

Y, se lo puede apreciar en la Figura 1.7:

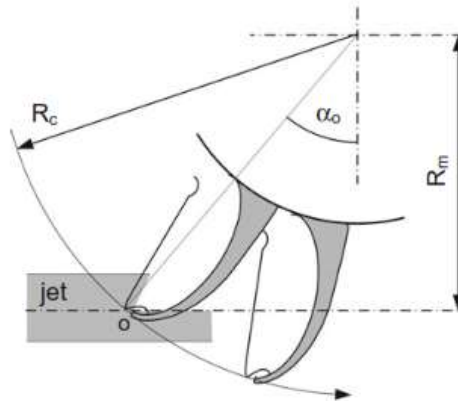


Figura 1.7 Relación del ángulo de posición del cucharón

(Fuente: [1])

Criterio de coincidencia en los cucharones

El ángulo de posición característica del cucharón es el parámetro analizado con el propósito de mantener la interacción de flujo entre el chorro jet y el rodete con los cucharones, se considera la condición de coincidencia que se muestra en la Figura 1.8 a continuación:

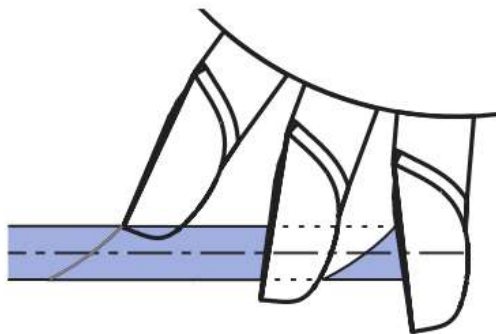


Figura 1.8 Criterio de Coincidencia

(Fuente: [5])

En esta condición se puede observar que los cucharones seguidos interactúan constantemente, mientras el uno completa su ciclo de carga, el siguiente cucharón empieza a interactuar con el jet desde el borde interior.

1.3.2. Parámetros para Diseño de Turbinas tipo Pelton:

En general, la mayoría de los pasos y las relaciones utilizadas para el diseño de Turbinas tipo Pelton consisten en una parametrización geométrica basada en distancias y ángulos que corresponden a parámetros de ingeniería hidráulica.

En el estudio realizado por Sobieszcanski-Sobieski y Haftka para el diseño de los cucharones utilizaron estudios complejos basados en las curvas matemáticas de Bezier, B-spline o Nurbs. De este análisis se determinó que no siempre es necesario tener una gran cantidad de parámetros para tener una gran diversidad de formas para el diseño [7].

En cambio, el planteamiento propuesto por Anagnostopoulos y Papantonis consiste en definir una curva de límite bidimensional del cubo y un punto más profundo para construir marcos intermedios y, por consiguiente, la superficie lateral por interpolación [8]. Según los autores, la construcción de toda la superficie interna del cubo se puede controlar mediante 19 variables geométricas, que son bastante pequeñas en cuanto a su complejidad.

Michalkova and Bastl propusieron una nueva metodología de parametrización geométrica que permitía controlar el ángulo de inclinación del cucharón a través del límite de la curva, con el fin controlar la velocidad tangencial del fluido durante el contacto con el cucharón [9]. Sin embargo, la solución solo puede definirse para casos muy particulares además se propuso una solución aproximada y se pudo reducir el número parámetros de control a 252.

En aplicaciones de curvas Beizer, Christian Vessaz y Loic Andolfatto realizaron un modelo paramétrico del cucharón de la turbina Pelton en función de curvas Bezier cubicas además de permitir una discretización sencilla del modelo para poder simularlo numéricamente [10]. Como resultado de esta investigación se logró reducir los parámetros a 21.

La principal limitación que se ha encontrado al analizar el comportamiento del fluido dentro de las turbinas es que varía con el mínimo cambio de geometría, y los métodos de aproximación analítica no son suficientes, por lo que se requieren modelos experimentales.

El presente estudio toma como base esta premisa para concentrarse en la primera parte, o en la parte fundamental de diseño, para analizar una metodología de diseño paramétrico en base a las diferentes conclusiones de la construcción de turbinas tipo Pelton.

Parámetros generales

Los siguientes parámetros se han definido para las etapas de diseño previo a la modelación en turbinas tipo Pelton:

Número de inyectores (jet)

Este parámetro según se lo determina basándose en factores como el espacio de instalación de la turbina y principalmente el caudal. Normalmente es un valor que se lo asume al inicio del diseño, se lo puede recalcular como una relación entre la capacidad de caudal (Q_t) y el caudal que pasará por cada inyector (Q_n).

Diámetro del chorro Jet

Este parámetro geométrico define el diámetro que debe tener el chorro, relaciona al caudal utilizado en el proyecto.

Velocidad rotor de la turbina

Es el parámetro que define la velocidad con la que el rodete de la turbina gira, relaciona el número de inyectores, el caudal, la altura neta y velocidad específica.

Parámetros geométricos

Una turbina es definida por varios parámetros geométricos relativos a las dimensiones de la turbina. En la siguiente figura se tienen los parámetros geométricos de la turbina:

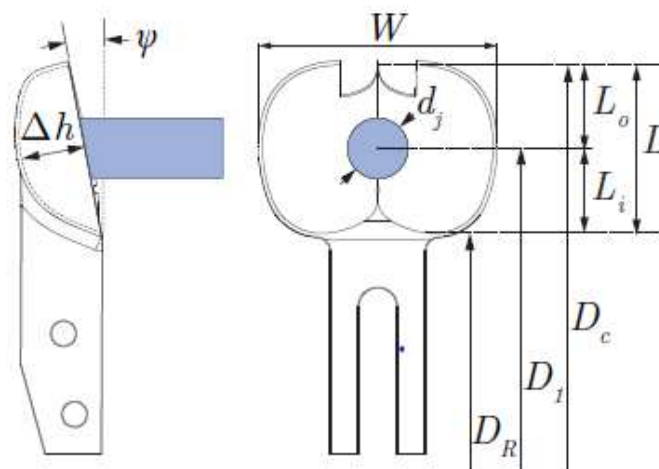


Figura 1.9 Dimensiones de un cucharón de una Turbina Pelton

(Fuente: [1])

A continuación, en la Tabla 1.1 se definen cada uno de los parámetros geométricos de la Figura 1.9

Tabla 1.1 Parámetros geométricos en el diseño de cucharones.

Parámetro	Descripción
Dc	Diámetro de punta
D1	Diámetro del impacto del chorro de agua del jet.
DR	Diámetro de la raíz.
Dj	Diámetro del jet.
W	Ancho total del cucharón
ψ	Ángulo de inclinación del cucharón
Δh	La profundidad del cubo en el diámetro del círculo de chorro
L	La longitud total de la superficie hidráulica del cucharón en la dirección radial
Li	Longitud de la superficie hidráulica dentro del diámetro del círculo de chorro
Lo	Longitud de la superficie hidráulica fuera del diámetro del círculo de chorro
N	Número total de cucharones.
N	Velocidad angular de la turbina
Z	Número de boquillas.

(Fuente: Elaboración propia de datos presentes en [1])

Debido a las diferentes fuentes bibliográficas, se presenta a continuación en la Tabla 1.2 una comparación de los parámetros y su respectiva nomenclatura, utilizados en el diseño de turbinas tipo Pelton mostrados en la Figura 1.10:

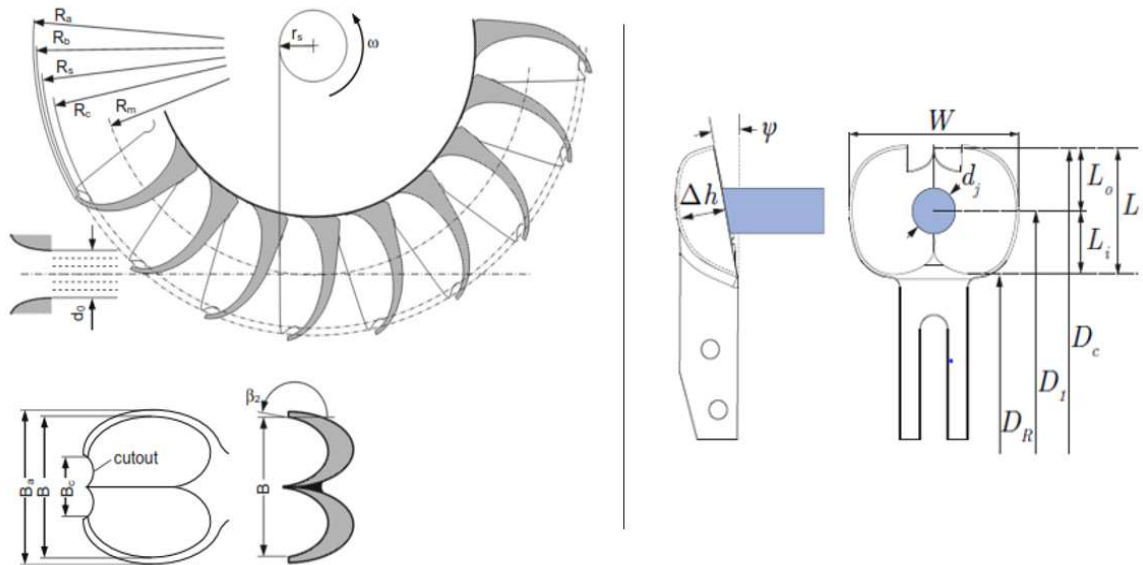


Figura 1.10 Comparación de las Geometrías presentadas por Zhang (izquierda) y Solemslie (derecha)

(Fuente: Elaboración propia)

Tabla 1.2 Comparación de Parámetros presentados por Zhang y Solemslie

Descripción del Parámetro	Nomenclatura – Zhang	Nomenclatura - Solemslie
Diámetro de punta	Da	Dc
Diámetro de la rueda jet - Hasta el punto de impacto del chorro de agua del jet.	Dm	D1
Diámetro de la raíz.	No se incluye	DR
Diámetro del jet.	Do	Dj
Ancho total del cucharón	Ba	W
Ángulo de inclinación del cucharón	No se incluye	ψ
La profundidad del cucharón en el diámetro del círculo de chorro jet	No se incluye	Δh
La longitud total de la superficie hidráulica del cucharón en la dirección radial	No se incluye	L
Longitud de la superficie hidráulica dentro del diámetro del círculo de chorro	No se incluye	Li
Longitud de la superficie hidráulica fuera del diámetro del círculo de chorro	No se incluye	Lo

(Fuente: Elaboración Propia)

Consideraciones experimentales sobre los parámetros geométricos

La variación de los parámetros geométricos es del interés en el presente estudio para la optimización del diseño.

Con base en la experiencia de diseño, fabricación y operación, se han obtenido las siguientes guías para el cálculo de los parámetros durante la etapa de Diseño de turbinas tipo Pelton:

Reglas generales definidas por Hermod Brekke y Arne Kjølle:

Los autores presentan relaciones entre los parámetros cuyo enfoque se centra en la transferencia de energía entre el chorro jet y los cucharones [11,12]. Las relaciones mencionadas son:

Ancho del cucharón vs diámetro del chorro.

El ancho del chorro depende del diámetro del chorro jet, y se define en base al número de inyectoros. Esta relación permite comprender la transferencia de energía en esta interacción y obtener los valores presentados en la Tabla 1.3 a continuación:

Tabla 1.3 Relación entre el número de inyectoros, ancho de la cuchara y diámetro del chorro jet

Z	W/dj
1	3,1
2-3	3,2
4-5	3,3
6	3,4

(Fuente: [1])

Longitudes del cucharón.

Las Longitudes presentadas antes, correspondientes a: L, Lo y Li, están relacionadas con el diámetro del chorro jet, de la siguiente manera.

- Longitud del cucharón L: $2,3 \text{ dj} \leq L \leq 2,7 \text{ dj}$
- Longitud exterior Lo: $1,3 \text{ dj} \leq Lo \leq 1,6 \text{ dj}$
- Longitud interior Li: $1,0 \text{ dj} \leq Li \leq 1,1 \text{ dj}$

Cálculo de los parámetros geométricos mediante dimensiones proporcionales

En el año 1988, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) emite un manual de diseño, estandarización y fabricación de equipos para centrales hidroeléctricas en donde establece las guías para el cálculo de los parámetros geométricos y ofrece planos para aproximaciones en el dimensionamiento de la turbina Tipo Pelton [6].

En el año 2000, el autor Thake presenta una guía para micro turbinas tipo Pelton en donde detalla las relaciones porcentuales de los parámetros geométricos de diseño con el Diámetro Jet del Rodete [3].

La información de ambos estudios, se presentará en el capítulo 2: Metodología.

Consideraciones para desgaste por erosión en Turbinas tipo Pelton:

Uno de los principales problemas en la operación de las turbinas tipo Pelton es la fatiga del material y las fisuras en la raíz, en donde el esfuerzo es máximo y se encuentra sometido a esfuerzos de corte, pero para el diseño de las turbinas tipo Pelton se deberá considerar además de la ingeniería mecánica tradicional, que uno de los aspectos más importantes en la operación de Turbinas tipo Pelton es la abrasión por arena en los cucharones, usualmente llamada desgaste hidro abrasivo o erosión hidro abrasiva. Este problema aumenta cuando el agua tiene un alto contenido de partículas de sedimentos y afecta generalmente a los cucharones e inyectores.

La presencia de sólidos contenidos en el agua que alimentan a las turbinas durante la operación, ocasiona que en el proceso se deba manejar una mezcla de agua y sedimentos en lugar de líquido monofásico, a pesar del avance tecnológico para evitar que las partículas sólidas ingresen.

Como un estándar de operación y construcción de Turbinas Tipo Pelton para evitar la erosión abrasiva por partículas de arena se incluye un reservorio previo para una sedimentación efectiva. En lugares en donde no se puede construir un reservorio previo con esta finalidad, se recomiendan ciclos de operación con paras durante el tiempo de mayor concentración de partículas en el agua [5].

Otra práctica altamente eficaz contra el desgaste y la abrasión, es el recubrimiento por pulverización térmica de la superficie interna de los cucharones de la turbina tipo Pelton con materiales duros que ha sido validado y aplicado cada vez más frecuentemente [13].

Es necesario que el recubrimiento cumpla criterios técnicos para evitar rugosidades que aumenten el efecto de fricción. El uso de recubrimiento se ha extendido de igual forma hacia los inyectores que se encuentran expuestos al desgaste por abrasión.

Entre el inyector y las cucharas, las velocidades relativas alcanzadas se encuentran en el orden de cientos de kilómetros por hora, dependiendo de la altura de agua utilizada, por lo que el impacto del flujo afecta a los revestimientos a largo plazo. Por lo general, el divisor de los cucharones es aquel que presenta un mayor desgaste, al recibir directamente el chorro jet. Esta condición genera un descenso en la eficiencia de la turbina al ocasionar el aumento de rugosidad en la superficie, y de turbulencia en el jet por la fricción en el fluido y ocasiona que la rueda Pelton deba parar para ser desarmada y reparada inclusive después de un corto tiempo de operación.

En este tipo de turbinas, a comparación de las turbinas Francis, se debe considerar la mayor velocidad de fluido alcanzada, en algunos ejemplos se puede comparar con facilidad que las velocidades alcanzadas en la turbina tipo Pelton son hasta 4 veces mayores que las de tipo Francis, lo que significa que las turbinas tipo Pelton poseen una energía cinética hasta 16 veces mayor que la turbina tipo Francis. Esta condición permite comprender cómo la erosión por partículas es un gran problema en la operación de turbinas tipo Pelton.

La erosión abrasiva en las turbinas tipo Pelton depende de la velocidad del fluido, tamaño, concentración y dureza de la partícula, y del material de los cucharones. Para evitar la erosión existen prácticas en operación y de protección a la superficie interna de los cucharones utilizando carbono de Tungsteno y material comercial denominado "Stellite" [13].

1.4. Estado del arte en Métodos de Diseño y Modelación Para Turbinas

A pesar de la importancia y larga historia de la turbina Pelton, la información para aplicaciones hidromecánicas actuales en esta especialidad de la ingeniería, es casi nula. En relación al desarrollo de la tecnología para el diseño y la fabricación de Turbinas, aquellas de tipo Francis han tenido un mayor desarrollo científico.

Los procesos de optimización apuntan a alcanzar la máxima eficiencia hidráulica. En este objetivo, los principales esfuerzos se han dirigido a la medición del flujo de agua en las

diferentes etapas del proceso y se han desarrollado en estudios experimentales como los de Bernstsen et al. (2001), Bekke (2005), Staubli y Hauser (2004) y Zhang et al. (2000 – 2003) [5].

Para la optimización mediante el uso de CFD y otras herramientas computacionales se han desarrollado los siguientes métodos:

Curvas Bézier.

Una curva de Bézier es una curva de orden n paramétrica formada por puntos de control, en 2 o 3 dimensiones. La forma cúbica de la curva de Bézier es continua con la derivada de segundo orden.

El uso de estas curvas es presentado por Solemslie para la optimización del diseño utilizando CFD.

Elipses rotadas.

La elipse o la sección elíptica deben cumplir con las condiciones necesarias que han sido definidas en función de parámetros en el cucharón, para esto se define el ángulo de rotación ϕ de la elipse, que se comporta como un parámetro de control, con el que se controla la profundidad del cucharón. En otras palabras, la rotación el ángulo debe ajustarse de acuerdo con la profundidad del cucharón dada, esta forma de cálculo es presentada por Zhang.

Para el estudio del presente tema, en la fase de recopilación bibliográfica se ha encontrado además de los estudios para la turbina tipo Pelton, presentados en el desarrollo de los puntos anteriores, se ha realizado en la Escuela Politécnica Nacional una metodología de diseño para turbinas tipo Francis en la tesis del Sr. Ing. Jair Yáñez [14], la cual es utilizada como estudio base por el Sr. Ing Edwin Bone para el desarrollo de una metodología de diseño paramétrico y optimización CFD para turbinas tipo Francis [15]. Como referencia se presenta a continuación una comparativa de los contenidos de la tesis de Modelo Paramétrico para la Turbina tipo Francis, con los principales exponentes de los fundamentos para el diseño de la turbina tipo Pelton en la Tabla 1.4:

Tabla 1.4 Etapas de Parametrización según autores Jair Yáñez, Solemslie y Zhang

Etapas de Parametrización	Jair Yáñez	Solemslie,2016	Zhang Z, 2016
Condiciones iniciales	X	X	X
Dimensiones principales	X	X	X
Parámetros de desempeño	X	-	-
Geometría del álabe o Cucharón	Método geométrico para compresores	Optimización por Curvas Bezier	Optimización por Elipses Rotadas

(Fuente: propia)

2. METODOLOGÍA

Una vez que se ha revisado el Estado del Arte se ha determinado que, para la etapa de diseño, se deberán evaluar los parámetros relacionados a la geometría que a su vez intervienen en la eficiencia hidráulica.

Para elaborar una metodología de diseño paramétrico para las turbinas tipo Pelton se ha recopilado una base de ejemplos prácticos en donde las ecuaciones teóricas han sido desarrolladas para satisfacer las condiciones de eficiencia máxima. Los pasos seguidos por cada autor se presentarán a continuación:

2.1. Pasos empleados por Bilal Nasir en el Diseño de Turbinas Tipo Pelton.

El autor Bilal Nasir, haciendo mención de la poca cantidad de información que puede ser obtenida para el diseño de turbinas tipo Pelton, y en base a su investigación [16], presenta en su trabajo los siguientes pasos sistemáticos para el diseño de turbinas tipo Pelton para generación micro hidráulica:

Preparar la información del sitio para la planta

a. Cálculo de la Altura Neta

$$H_n = H_g + H_d \quad (2.1)$$

Donde:

H_n = Altura neta la cual es la distancia vertical entre el nivel de la superficie del agua al ingreso a la turbina

H_d = Pérdida total de altura debido al canal abierto, estante para basura, entrada, compuerta y válvula

b. Cálculo del Caudal (Q)

El caudal puede ser calculado midiendo la velocidad del río y su área transversal. Entonces:

$$Q = Vr * Ar \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (2.2)$$

c. Cálculo de la Potencia de entrada de la Turbina (P_{ti})

La potencia de entrada de la turbina (Watt) puede ser calculada como:

$$P_{ti} = \rho * g * C_n^2 * H_n * Q_t \text{ (Watt)} \quad (2.3)$$

Donde:

P_{ti} = Potencia de entrada de la turbina

ρ = Densidad

C_n^2 = Coeficiente de descarga de la boquilla ($\cong 0,98$)

Q_t = Caudal de la turbina

d. Cálculo de la velocidad de la turbina (N)

La correlación entre la velocidad específica (N_s) y la altura neta (H_n) está dada por la turbina Pelton como:

$$N_s = 85,49 * \sqrt{n_j} / H_n^{0,243} \quad (2.4)$$

Donde:

N_s = Velocidad específica de la turbina

n_j = número de boquillas (jet) de la turbina

El n_j se puede calcular como:

$$n_j = \frac{Q_t}{Q_n} \quad (2.5)$$

Donde:

Q_n = Capacidad de caudal de cada boquilla ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Entonces la velocidad de la turbina (rpm) puede ser calculada como:

$$N = N_s * \frac{H_n^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{P_{ti}}} \quad (2.6)$$

e. Cálculo del diámetro de la rueda de la turbina Pelton (Dr)

Este diámetro es aquel calculado hasta el punto de impacto del chorro en los cucharones, en este punto el chorro de agua a través de la boquilla tiene una velocidad V_j en ($m \cdot s^{-1}$) y puede ser calculada como:

$$V_j = C_n * \sqrt{2 * g * H_n} \quad (m \cdot s^{-1}) \quad (2.7)$$

La velocidad tangencial de la rueda Pelton (V_{tr}) en ($m \cdot s^{-1}$) puede ser calculada como:

$$V_{tr} = W * R_r = \frac{\pi N Dr}{60} \quad (m \cdot s^{-1}) \quad (2.8)$$

Donde:

R_r = radio de la rueda

Dr = Diámetro de la rueda

N = velocidad de la rueda (rpm)

También la velocidad tangencial de la rueda puede ser dada como:

$$V_{tr} = X * V_j \quad (2.9)$$

Donde:

$X =$ radio de la velocidad tangencial de la rueda a la boquilla o a la velocidad del chorro

El diámetro primitivo de la rueda, o PCD – Pitch Circle Diameter, se calcula mediante:

$$D_r = \frac{60 * X}{\pi * N} * V_j \quad (2.10)$$

Para el diseño a la máxima eficiencia el radio X se encuentra entre 0,46 -0,47, por lo tanto, el diámetro de la rueda a la máxima eficiencia puede ser calculado como:

$$D_r = 38,6 * \sqrt{H_n / N} \quad (2.11)$$

f. Cálculo de las dimensiones de la boquilla

El caudal a través de cada boquilla (Q_n) puede ser calculado como:

$$Q_n = V_j * A_j \text{ (} m^3 \cdot s^{-1} \text{)} \quad (2.12)$$

El área de la boquilla (A_j) puede ser calculada como:

$$A_j = \pi * \frac{D_j^2}{4} \text{ (} m^2 \text{)} \quad (2.13)$$

Entonces de las ecuaciones (2.12) y (2.13) el diámetro de la boquilla (D_j) puede ser calculado como:

$$D_j = \sqrt{4 * Q_t / (\pi * n_j * V_j)} \text{ (} m \text{)} \quad (2.14)$$

Las salidas de las boquillas deben ubicarse lo más cerca posible de la rueda Pelton para evitar que el chorro se desvíe el diámetro diseñado.

El autor señala que la distancia entre la boquilla y el rodete debe ser 5% del diámetro del círculo de la “rueda Pelton”, más un espacio libre adicional de 3 (mm) para tener en cuenta los deflectores de emergencia como:

$$X_{nr} = 0,05 * D_r + D_t \text{ (} m \text{)} \quad (2.15)$$

Donde:

$D_r =$ diámetro de la rueda

$D_t =$ Espesor del deflector

Las distancias entre la boquilla y la cuchara teniendo en cuenta el espacio libre mínimo entre la boquilla y los cucharones está dada como:

$$X_{nb} = 0,625 * D_r \text{ (} m \text{)} \quad (2.16)$$

La distancia requerida en la instalación deberá ser más grande de lo calculado debido a inconsistencias en la fabricación de los cucharones y la necesidad de tener una mínima distancia de seguridad entre la boquilla y la rueda Pelton.

g. Cálculo de las dimensiones de la cuchara

El espesor axial de la cuchara puede ser calculado como:

$$B_w = 3,4 * D_j (m) \quad (2.17)$$

La longitud radial de la cuchara puede ser calculada como:

$$B_L = 3 * D_j (m) \quad (2.18)$$

La profundidad de la cuchara puede ser calculada como:

$$B_d = 1,2 * D_j (m) \quad (2.19)$$

El número de cucharones en cada rueda Pelton se pueden calcular como:

$$n_b = 15 + \frac{D_r}{2 * D_j} \quad (2.20)$$

La longitud del brazo del momento del cucharón se puede calcular como:

$$L_{ab} = 0,195 * D_r (m) \quad (2.21)$$

2.2. Pasos empleados por Tilahun Nigussie, Abraham Engeda y Edessa Dribssa en el diseño de Turbinas tipo Pelton.

Los mencionados autores se basan en los estudios de Zhang y Thake para el desarrollo de su trabajo, a continuación, se presentan los pasos utilizados para el desarrollo de la geometría de la turbina Pelton, en donde se considera como dato de inicio el caudal disponible para el diseño, luego se procede con el cálculo de los siguientes parámetros:

a. Cálculo de la altura neta (H_n)

$$H_n = H_g - H_l \quad (2.22)$$

Donde:

$H_n =$ *Altura neta*

$H_g =$ *Altura en bruto*

$H_l =$ *Pérdidas total por altura*

Para el cálculo de las pérdidas por altura, se sugiere considerar aproximadamente el 5% de la altura en bruto.

b. Cálculo del diámetro del jet

Considerando a la velocidad de salida de los inyectores, se tiene la siguiente expresión:

$$V_{jet} = K_N \sqrt{2gH_n} \quad (2.23)$$

Donde:

$$V_{jet} = \text{Velocidad del chorro} \left[\frac{m}{s} \right]$$

K_N = Coeficiente de velocidad de la tobera (aproximadamente 0,95 a 0,99)

H_n = Altura total en la tobera

Tomando en cuenta al área transversal de los inyectores, se puede obtener el caudal de la siguiente forma:

$$Q = A_{jet} \times V_{jet} \times \eta_{jet} = \pi \frac{d_{je}^2}{4} \times V_{jet} n_{jet} \quad (2.24)$$

Donde:

V_{jet} = Caudal

A_{jet} = Área de sección

V_{jet} = Velocidad del chorro

n_{jet} = Número de chorros

d_{jet} = Diámetro del chorro,

Por lo tanto, el diámetro del jet puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$d_{jet} = \frac{0,54}{H_n^{1/4}} \times \sqrt{\frac{Q}{n_{jet}}} \quad (2.25)$$

c. Cálculo del diámetro de la rueda

El diámetro considerado para el análisis es el del impacto del chorro del agua del jet. Este diámetro es conocido como diámetro primitivo o Pitch Circle Diameter PCD, en inglés. En la siguiente figura se indican las consideraciones para este diámetro:

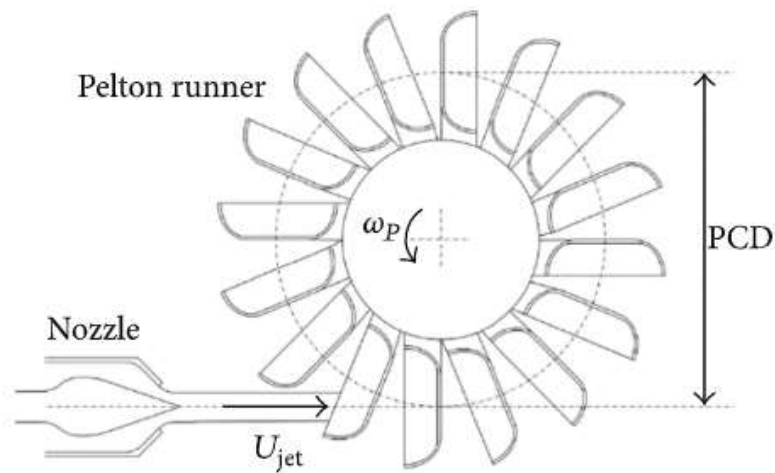


Figura 2.1 Geometría de la Turbina tipo Pelton

(Fuente: [17])

Para el cálculo de las dimensiones detalladas en la Figura 2.1, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$2\pi \frac{N}{60} * \frac{D}{2} = x * V_{jet} \quad (2.26)$$

Donde:

$$D = PCD$$

x = Relación entre el rodete y la velocidad del chorro

N = Velocidad rotacional del runner

La relación entre el rodete y el valor del chorro se considera ($x = 0,46$), para máxima potencia.

Sustituyendo V_{jet} y utilizando los valores para máxima eficiencia se tiene la siguiente expresión:

$$D = 37,7 \times \frac{\sqrt{H_n}}{N} \quad (2.27)$$

La metodología de Nigussie se basa en el autor Thake, el cual parte del Diámetro del rodete (PCD) como dato inicial. Una vez determinado el PCD, el autor recomienda el diseño de parámetros geométricos en base a una relación porcentual acorde a lo indicado en la siguiente figura:

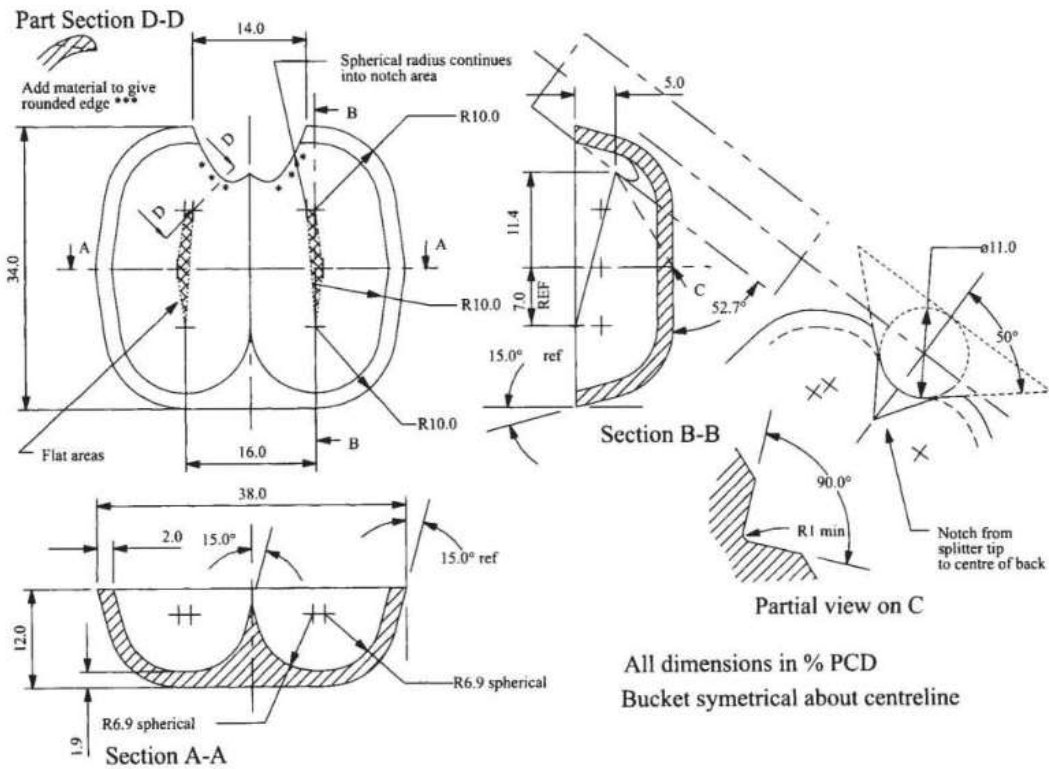


Figura 2.2 Dimensiones de diseño de los cucharones de la Turbina tipo Pelton a partir del PCD.

(Fuente: [3])

Como siguiente paso, se calculan de forma porcentual las dimensiones para la parte posterior del cucharón, acorde a la siguiente figura:

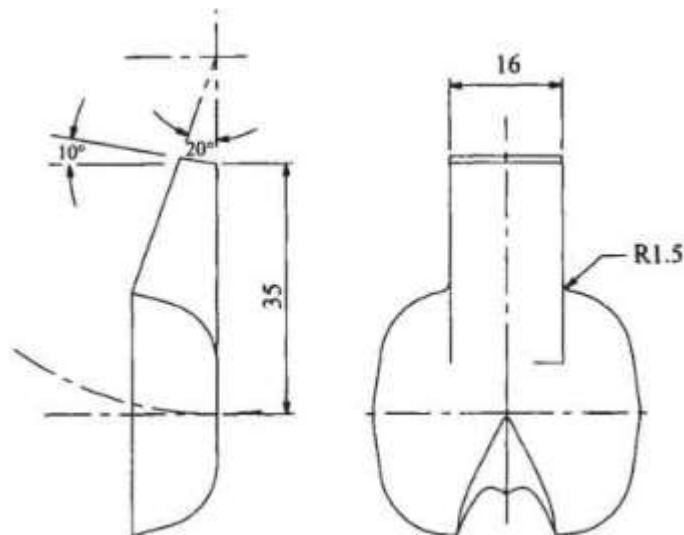


Figura 2.3 Dimensiones de diseño de la parte posterior de los cucharones de la Turbina tipo Pelton a partir del PCD.

(Fuente: [3])

Con fines de incluir en ecuaciones para su respectivo análisis, se indican a continuación las relaciones de cálculo para los parámetros expuestos:

a. Altura de la cuchara

$$h = 0,34 * D \quad (2.28)$$

b. Longitud de la cavidad

$$h1 = 5,6\% * D \quad (2.29)$$

c. Longitud del Punto de Impacto

$$h2 = 0,114 * D \quad (2.30)$$

d. Espesor de la apertura de la cuchara

$$a = 0,14 * D \quad (2.31)$$

e. Espesor de la Cuchara

$$t1 = 0,002 * D \quad (2.32)$$

f. Número aproximado de cucharas

$$Z = \frac{D}{2d} + 15 \quad (2.33)$$

g. Profundidad de la cuchara

$$t = 0,121 * D \quad (2.34)$$

h. Ancho de la Cuchara

$$b = 0,38 * D \quad (2.35)$$

2.3. Pasos empleados por Zhang para el diseño de Turbinas Tipo Pelton.

Acorde a lo expuesto en el Marco Teórico, el autor Zhang ha recopilado la base teórica para el diseño de turbinas Pelton, a continuación, se realiza una síntesis de los pasos recomendados para el diseño geométrico requerido:

El diseño de una turbina Pelton comienza con la determinación de la altura neta y el caudal disponible o deseado, esto determina la fuente de energía hidráulica disponible para el diseño y se podrán obtener las principales características que son:

1. Dimensionamiento de la rueda
2. Elección de velocidad rotacional
3. Determinación de número de inyectores

Para este fin, se han recopilado las siguientes indicaciones obtenidas en base a la operación práctica de las turbinas tipo Pelton, ayudando a establecer el procedimiento de diseño:

- Coeficiente de velocidad periférica k_m en el rango de 0,45-0,48
- Ancho de la cuchara aproximadamente 3 veces el diámetro del chorro a carga llena, caracterizado por: $B = 3d_o$ o $\varphi \approx 0,11$.
- La velocidad específica, la cual se refiere al caudal nominal del inyector es usualmente considerada: $n_q < 0,13$.
- La forma de la rueda se basa en la siguiente relación dada por $\frac{D_m}{B} > 3$

Por lo tanto:

a. Cálculo de la velocidad específica

Considerando el caudal total y el número de inyectores la ecuación de la velocidad específica se encuentra de la siguiente forma:

$$n_q = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{\sqrt{Z_{jet}} \cdot H^{3/4}} \quad (2.36)$$

Para una velocidad específica dada con $n_q < 0,13$, el número combinado de inyectores y velocidad rotacional de la turbina Pelton en la forma $\frac{n}{\sqrt{Z_{jet}}}$ es obtenible.

Con esta ecuación, diversas consideraciones de combinaciones de números de inyectores pueden ser analizadas. Y, si se asume o se tiene de dato la velocidad específica y el número de inyectores, la velocidad rotacional se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$n = \frac{n_q \cdot H^{3/4}}{\sqrt{Z_{jet}/Q}} \quad (2.37)$$

Para los siguientes parámetros, se presentan las fórmulas utilizadas para el cálculo acorde a lo presentado por el autor:

b. Cálculo del diámetro de la rueda

$$D_m = \frac{k_m \cdot \sqrt{2gH}}{\pi \cdot n} \quad (2.38)$$

Donde,

$$n = \text{velocidad acorde a la generación eléctrica} = \frac{f}{p}$$

$f = \text{Frecuencia local} - 60 \text{ Hz}$

$p = \text{número de pares de polos para el generador, está limitado a un mínimo de dos.}$

c. Cálculo del tamaño de la cuchara

$$\frac{B}{D_m} = \frac{n_q}{2,63 * k_m * \sqrt{\varphi}} \quad (2.39)$$

Donde,

B = ancho de la cuchara

D_m = diámetro de la rueda

Si se considera $\varphi = 0,11$ y $k_m = 0,475$, puntos de mayor eficiencia hidráulica, entonces:

$$B = 2,5 * n_q * D_m \quad (2.40)$$

d. Número de cucharas

$$N = 15 + \frac{0,62}{n_q} \quad (2.41)$$

2.4. Pasos empleados por la OLADE para el diseño de Turbinas tipo Pelton.

En 1988 la Organización Latinoamericana de Energía emite un manual de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas, la metodología utilizada se presenta a continuación:

a. Cálculo del número específico de revoluciones

El rango de aplicación de la turbina Pelton lo definen los números específicos de revoluciones N_q y N_s , que se obtienen mediante:

$$N_q = N * \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (2.42)$$

$$N_s = N * \frac{P^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (2.43)$$

Donde,

P = Potencia al freno de la turbina, en C.V

Q = Caudal Total que fluye por la turbina, en m³/s, equivalente a la sumatoria de los caudales que fluyen por las toberas.

H = Salto neto de la central, en metros.

N = es la velocidad de giro de turbina, en RPM

b. Cálculo del número de revoluciones

El número de revoluciones de una Turbina Pelton se determina mediante la fórmula:

$$N = \frac{84,54 * K_u' * H^{1/2}}{D_p} \quad (2.44)$$

Donde,

N= número óptimo de revoluciones de la turbina en RPM

H = número de salto neto aprovechable

Dp = diámetro de paso del rodete

Ku' =coeficiente de velocidad de rotación que se puede estimar utilizando la fórmula

$$Ku' = 0,49 - 0,0072 * \frac{Nq}{i^{1/2}} \quad (2.45)$$

Donde,

i = representa el número de toberas de la turbina

c. Cálculo de la Velocidad del chorro

Para calcular la velocidad del chorro de agua en la tobera queda se aplica la ecuación:

$$C_i = Kc * \sqrt{2gH} \quad (2.46)$$

Donde:

Kc= Coeficiente de velocidad de salida del agua de los inyectores, se puede estimar entre 0,97 a 0,98.

d. Diámetro de la Tobera

Para determinar el diámetro de la tobera que está en función del diámetro del chorro se puede utilizar:

$$d = \sqrt{\frac{4 Qo}{\pi * Kc * \sqrt{2 * g * H}}} \quad (2.47)$$

Donde,

d= es el diámetro de la sección del chorro expresado en metros

Qo = Es el caudal que fluirá por cada tobera de la turbina en $\frac{m^3}{s}$

Kc = coeficiente de velocidad de la tobera, estimado entre 0,97-0,98

g= gravedad, equivalente a 9,81 m /s²

H = Altura neta

En base a la experiencia práctica, otras alternativas para calcular el diámetro del chorro se presentan a continuación:

$$d = 0,545 * \left(\frac{Qo}{\sqrt{H}}\right)^{1/2} \quad (2.48)$$

$$\frac{Dp}{d} = \frac{75 * i^{1/2}}{Nq} - 1,12 \quad (2.49)$$

Donde

Dp = Diámetro primitivo (diámetro del rodete)

d = diámetro del chorro

Nq =número específico de revoluciones

i = número de toberas de la turbina

e. Cálculo de las dimensiones de la cuchara

Para conocer las dimensiones de las cucharas Pelton en función del diámetro del chorro se tiene la siguiente Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Dimensiones de los cucharones en función del diámetro del chorro jet

DIMENSIONES DE LAS CUCHARAS PELTON EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DEL CHORRO										
B	L	D	f	M	e	β_1	β_2	l	β_3	B4
2,5d a 4d	2,5d a 3,5d	0,85d a 1,3d	0,8d a 1,1d	1,0d a 1,2d	0,3d a 0,6d	10° a 30°	4° a 20°	1,6d a 1,7d	2° a 5°	0° a 20°

(Fuente: [6])

Estas dimensiones corresponden a lo indicado en el método gráfico detallado en la Figura 2.4:

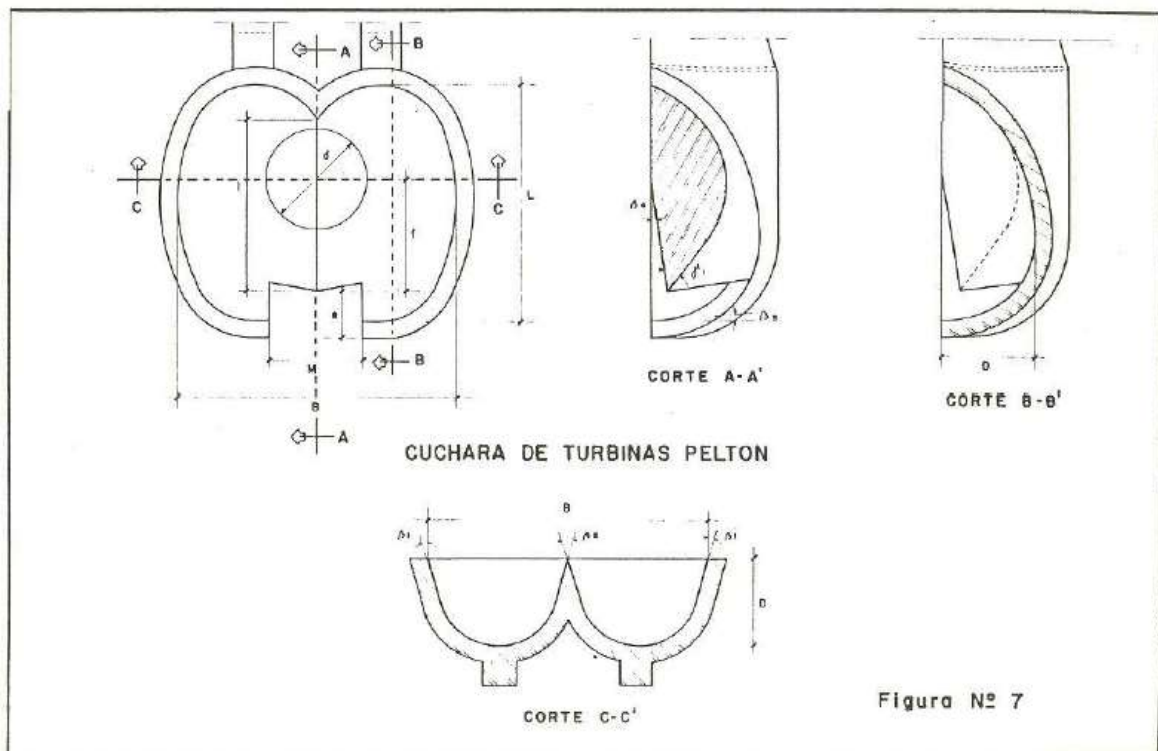


Figura Nº 7

Figura 2.4 Representación gráfica de los parámetros de los cucharones en las turbinas Pelton. (Fuente: [6])

f. Cálculo del número de cucharas

$$z = \frac{2 * \pi}{k_p * \left(\theta - 2 \left(\frac{D_a}{D_p} \right) K_u * \text{Sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)} \quad (2.50)$$

Donde,

z = número de cucharas

k_p = factor práctico que define el paso real de la cuchara y se toma dentro del rango comprendido entre 0,65 y 0,95.

θ = ángulo en radianes que se obtiene con la siguiente expresión:

$$\theta = z \text{ arc Cos} \left(\frac{D_p + d}{D_a} \right) \quad (2.51)$$

D_p = diámetro del rodete, en metros

D_a = diámetro de la circunferencia que describe la punta de la arista al rotar el rodete, expresado en metros. Se puede determinar aproximadamente con la fórmula:

$$D_a = D_p + 2 * f \quad (2.52)$$

f = dimensión de la cuchara desde el eje del chorro de agua hasta la punta de la arista, en metros

K_u = coeficiente de velocidad tangencial definido en 2.1

g. Cálculo del diámetro del Rodete

$$\frac{D_p}{d} = \frac{76 * i^{1/2}}{N_q} - 1,12 \quad (2.53)$$

Donde,

D_p = Diámetro de turbina Pelton

d = diámetro del chorro

N_q = número específico de revoluciones

h. Número de cucharas

$$Z = \frac{2 * \pi}{k_p \left(\theta - 2 \left(\frac{D_a}{D_p} \right) K_u * \text{Sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)} \quad (2.54)$$

Z = número de cucharas

K_p = factor práctico que define el paso real de la cuchara y se toma dentro del rango (0,65-0,85)

θ = es un ángulo en radianes que se obtiene:

$$\theta = 2 \text{ arcCos} \left(\frac{D_p + d}{D_a} \right) \quad (2.55)$$

D_p = diámetro del rodete

D_a = diámetro de la circunferencia que describe la punta de la arista al rotar el rodete (m).

Se determina:

$$Da = Dp + 2 * f \quad (2.56)$$

f = Dimensión de la cuchara desde el eje del chorro de agua hasta la punta de la arista en metros

Ku = coeficiente de velocidad tangencial, ver tabla anterior.

Se presenta además la siguiente Tabla 2.2 de número de cucharas a utilizar en función de la relación de Diámetro de Rodete y diámetro del chorro:

Tabla 2.2 Número de cucharones en función de la relación de diámetro del rodete y diámetro del chorro jet

NÚMERO DE CUCARASEN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DIÁMETRO DEL RODETE/DIÁMETRO DEL CHORRO			
Dp/d	Ku	NÚMERO DE CUCARAS	
		Z min	Z máx
15	0,471	21	27
14	0,469	21	26
13	0,466	20	25
14	0,463	20	24
11	0,460	19	24
10	0,456	18	23
9	0,451	18	22
8	0,445	17	22
7,5	0,441	17	21

(Fuente: [6])

i. Determinar la orientación de los cucharones

Para este propósito se define el diámetro Do (cuya circunferencia con centro en C, cuyas tangentes determinan la orientación de las aristas), mediante la siguiente relación:

$$\frac{Dp}{Do} = \frac{7,87 * \left(\frac{Dp}{d}\right)^{-2,6}}{Z} \quad (2.57)$$

Una vez definido el diámetro Do, se procede a determinar el ángulo de talonamiento Y que nos muestra la Tabla 2.3 que es formado por la arista del cucharón y la parte superior de esta del mismo cucharón. A continuación, se presentan los valores recomendados para el ángulo de talonamiento en relación a los diámetros del rodete y del chorro.

Tabla 2.3 Ángulos de talonamiento Y en función de la relación de diámetro del rodete y diámetro del chorro jet.

Dp/d	Número de Cucharas (Z)										
	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
15	38°	38°	37°	37°	36°	36°	35°	-	-	-	-
14	-	37°	37°	36°	35°	35°	34°	-	-	-	-
13	-	-	36°	36°	35°	34°	34°	33°	-	-	-
12	-	-	-	35°	34°	34°	33°	32°	-	-	-
11	-	-	-	35°	34°	33°	33°	32°	31°	-	-
10	-	-	-	-	34°	33°	32°	31°	30°	30°	-
9	-	-	-	-	-	32°	33°	32°	30°	30°	-
8	-	-	-	-	-	33°	34°	33°	31°	30°	29°
7,5	-	-	-	-	-	32°	34°	32°	31°	31°	29°

(Fuente: [6])

Finalmente se determina la orientación del borde de la cuchara con respecto al giro del rodete en base al análisis descrito anteriormente, se presentan los valores calculados en relación a los diámetros del rodete y del chorro jet en la tabla presentada a continuación:

Tabla 2.4 Ángulos de orientación de la cuchara con respecto al giro del rodete en función de la relación de diámetro del rodete y diámetro del chorro jet.

VALOR DEL ÁNGULO β_4 EN LA CUCHARA DEL RODETE											
Dp/d	Número de Cucharas (Z)										
	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
15	10°	9°	8°	7°	5°	5°	4°	-	-	-	-
14	-	10°	9°	8°	6°	6°	5°	-	-	-	-
13	-	-	11°	9°	8°	7°	6°	4°	-	-	-
12	-	-	-	11°	10°	9°	7°	6°	-	-	-
11	-	-	-	14°	12°	11°	9°	8°	6°	-	-
10	-	-	-	-	16°	14°	12°	11°	9°	7°	-
9	-	-	-	-	-	18°	16°	14°	12°	10°	-
8	-	-	-	-	-	25°	23°	20°	18°	15°	13°
7,5	-	-	-	-	-	30°	27°	27°	22°	19°	16°

(Fuente: [6])

La orientación de las cucharas y su ángulo de talonamiento son factores determinantes para obtener altas eficiencias en Turbinas Pelton, en la Figura 2.5 se observa la ubicación de los cucharones en base a los ángulos determinados:

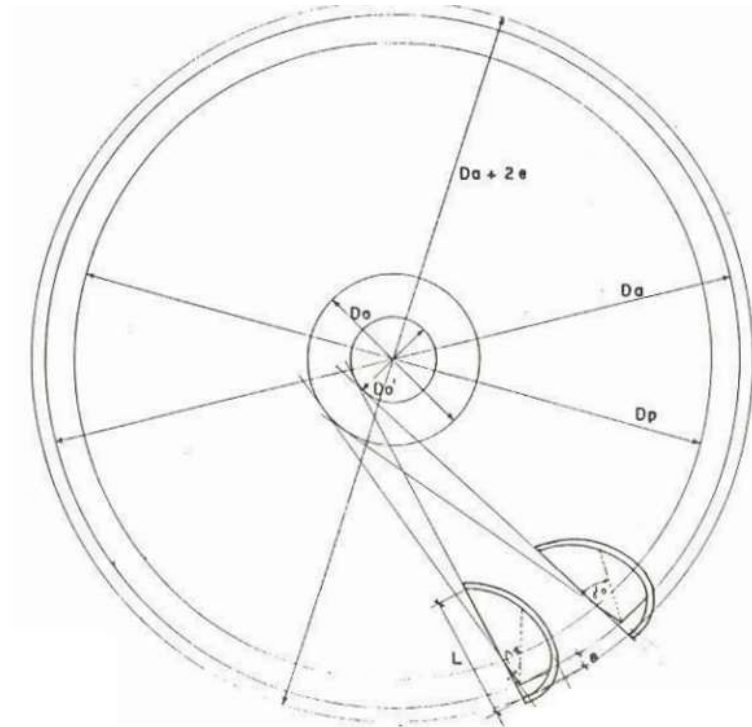


Figura 2.5 Representación gráfica de los ángulos de orientación de los cucharones en las turbinas Pelton. (Fuente: [6])

j. Diseño final de cucharones de Turbinas tipo Pelton

Para asegurar el dimensionamiento correcto de los parámetros que permitan alcanzar la más alta eficiencia, confiabilidad y evitar el desgaste excesivo de la punta de la arista del cucharón, se presenta a continuación el esquema para el diseño final de los cucharones de la turbina tipo Pelton:

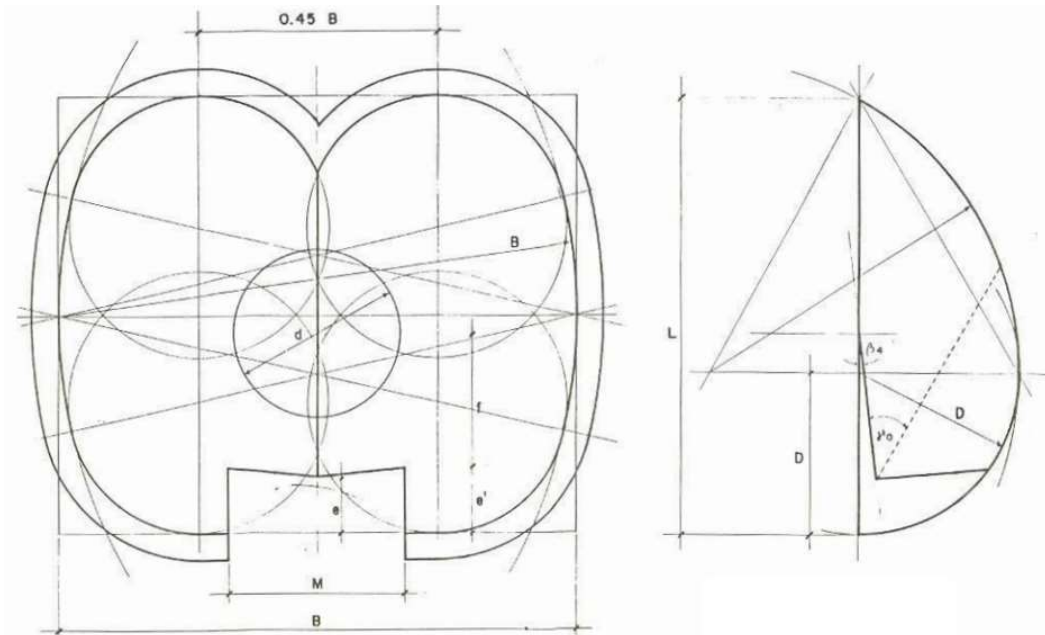


Figura 2.6 Planos de diseño de los cucharones en las turbinas Pelton.
(Fuente: [6])

2.5. Pasos empleados por Than Zaw Oo, Nyi Nyi y Cho Khaing para el diseño de Turbinas tipo Pelton.

En este estudio se definen las siguientes condiciones generales para el diseño de la Turbina Pelton[18]. Los parámetros definidos son:

- Potencia de salida esperada
- Altura efectiva
- Eficiencia General de la turbina
- Densidad
- Gravedad

a. Cálculo de la Potencia

Con los datos de entrada, el caudal Q se puede obtener de la ecuación de potencia:

$$P = \eta \rho g Q H \quad (2.58)$$

b. Determinación de la Velocidad Específica y de la Velocidad Rotacional

Una vez que se conozca la velocidad específica, las dimensiones fundamentales de la turbina pueden ser fácilmente estimadas. La velocidad específica de una turbina Pelton

con un solo jet fluctúa entre 8,5 a 30. La velocidad específica puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$N_s = \frac{85,49}{H^{0,245}} \quad (2.59)$$

La velocidad rotacional de la turbina está directamente ligada a su velocidad específica, caudal y altura neta. La velocidad rotacional se calcula de la siguiente forma:

$$N = \frac{N_s H^{5/4}}{\sqrt{P}} \quad (2.60)$$

c. Determinación de la velocidad de entrada y salida de la rueda Pelton

El chorro que emerge de la boquilla golpea el divisor simétricamente y se distribuye equitativamente en las dos mitades del cucharón. Por lo tanto, el ángulo de entrada del chorro es entre 1° a 3° pero en los cálculos casi siempre se asume como 0°.

En los valores prácticos de operación de las turbinas tipo Pelton la deflexión angular está limitada cerca de los 165° y el ángulo de salida como 15°.

La velocidad ideal del chorro jet es la siguiente:

$$V_1 = \sqrt{2gH} \quad (2.61)$$

Sin embargo, la velocidad del chorro es ligeramente menor debido a las pérdidas de fricción en la boquilla.

$$V_1 = C_v \sqrt{2gH} \quad (2.62)$$

El coeficiente de velocidad C_v varía desde 0,97 a 0,99, por lo que se puede estimar como 0,985.

d. Diámetro del “Pitch Circle” y del diámetro del Chorro

El diámetro “pitch circle” se refiere al diámetro primitivo de la rueda medida desde el centro de las cucharas en donde impacta el chorro de agua jet.

$$u = \frac{\pi DN}{60} \quad (2.63)$$

Donde,

u = velocidad tangencial de la rueda en el PCD

D = diámetro “pitch circle” de la rueda Pelton (m)

El diámetro del chorro es un parámetro importante en el diseño de la rueda Pelton y es determinado a la máxima carga usando la ecuación de continuidad por lo que se tiene:

$$d_o = 0,545 \sqrt{\frac{Q}{Z_o \sqrt{H}}} \quad (2.64)$$

Donde,

do= diámetro del chorro

Zo = número de boquillas

e. Número de Cucharas y radio de chorro

La relación del diámetro de “pitch circle” de la rueda Pelton al diámetro del chorro es también conocido como radio del chorro representado por la letra m y es un parámetro geométrico de tamaño para la turbina.

$$m = \frac{D}{d_o} = \text{Jet Ratio} \quad (2.65)$$

El número de cucharones es usualmente mayor a 15. Cierta ecuación empírica ha sido desarrollada para obtener el número de cucharas por el autor Taygun [18], la cual se presenta a continuación:

$$Z = 0,5m + 15 \quad (2.66)$$

El número aproximado de cucharas para una turbina Pelton también se puede determinar de acuerdo a lo presentado en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5 Número de cucharones aproximado en relación del diámetro del chorro jet.

Radio del Chorro	6	8	10	15	20	25
Número de cucharones	17-21	18-22	19-24	22-27	24-30	26-33

(Fuente: [18])

f. Dimensiones de la cuchara y diseño de Curvatura

En el diseño de una turbina Pelton, dos parámetros son importantes. Estos son: el radio del ancho del cucharón al diámetro del chorro y el radio del diámetro de la rueda al diámetro del chorro.

Si el ancho de la cuchara es muy pequeño en relación al diámetro del chorro, el fluido no es tan suavemente deflectado por las cucharas, en consecuencia, mucha energía es disipada en turbulencia y la eficiencia decae considerablemente. Si las cucharas son muy grandes, la fricción en las superficies es innecesariamente alta.

El valor óptimo del radio de la cuchara al diámetro del chorro en base a la experiencia de diseño y operación de este tipo de Turbinas se encuentra entre 2,8 a 4. [18]

En base a lo mencionado, acorde a la Figura 2.7 se podrán ver las dimensiones principales del cucharón:

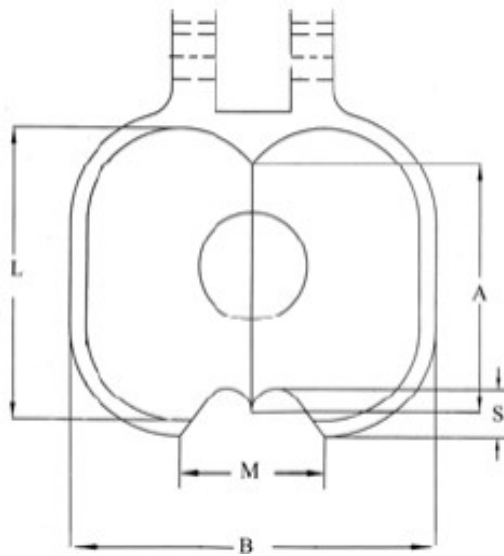


Figura 2.7 Planos de diseño de los cucharones en las turbinas Pelton
(Fuente: [6])

Para las dimensiones principales, se presentan en la siguiente tabla los valores correspondientes en relación al diámetro del chorro jet:

Tabla 2.6 Número de cucharones aproximado en relación del diámetro del chorro jet.

Parámetro	Mínimo Valor	Máximo Valor
Largo de la cuchara, L	2,28do	3,3do
Ancho de la cuchara, B	2,8do	4do
Profundidad de la muesca, S	0,44do	0,625do
Ancho de la muesca, M	1,12do	1,6do
Profundidad de la cuchara, E	0,8do	1,2do
Altura de la cuchara, A	1,75do	2,5do

(Fuente: [18])

Si se toma en consideración al ancho de la muesca del cucharón se tienen las siguientes consideraciones:

- El ancho de la muesca del cucharón es 0,36 veces el ancho de la cuchara, $M = 0,36B$
- El ancho de la muesca debe ser más largo que el diámetro del chorro y se puede obtener mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$M = 1,1 do + 5 \quad (2.67)$$

- Los demás parámetros de diseño, en relación al ancho de la cuchara se indican a continuación:

$$L = 0,82 B$$

$$S = 0,16B$$

$$E = 0,36 B$$

$$A = 0,64 B$$

Estos valores deben estar entre el máximo y mínimo valor respecto a la Tabla 2.6 anteriormente mostrada.

g. Eficiencia hidráulica

Se definió antes la siguiente relación (2.65):

$$m = \frac{D}{d_0} = \text{Jet Ratio}$$

Como un valor empírico se indica que, la relación entre el Diámetro PCD al diámetro Jet, deberá estar entre 11 y 15 para la máxima eficiencia hidráulica [18].

2.6. Sensibilidad Individual de Parámetros de Diseño

De los ejemplos prácticos recopilados, se presenta a continuación el análisis comparativo a partir de las ecuaciones desarrolladas y en base a las mismas el desarrollo del análisis de sensibilidad para cada parámetro:

2.6.1. Análisis comparativo de los parámetros empleados en los pasos de Diseño de Turbinas Pelton

Luego de la recopilación de aplicaciones prácticas y diseño de turbinas tipo Pelton en base al marco teórico y estado del arte para diseño de turbinas tipo Pelton, se presenta a continuación el análisis comparativo de la forma de cálculo para cada parámetro considerado:

2.6.1.1. Altura Neta

En la siguiente tabla se han recopilado las ecuaciones consideradas por cada autor para el cálculo de la Altura Neta:

Tabla 2.7 Ecuaciones de Altura Neta

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$H_n = H_g - H_d$	(2.68)
Nigussie, Egenda y Dribssa	$H_n = H_g - H_l$	(2.69)

(Fuente: [16, 17])

Análisis:

La forma para el cálculo de la Altura Neta no varía, las consideraciones para el porcentaje de pérdidas varían con 1% de diferencia, por lo que se observará el criterio de acuerdo a la calidad y sitio de la fabricación y montaje a realizarse.

2.6.1.2. Caudal

Las ecuaciones consideradas para el cálculo del caudal se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.8 Ecuaciones de Potencia de Entrada

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$Q = Vr * Ar (m^3/s)$	(2.70)
Nigussie, Egenda y Dribssa	$Q = A_{jet} \times V_{jet} \times \eta_{jet}$	(2.71)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$P = n\rho gQH$	(2.72)

(Fuente: [16,17,18])

Análisis:

Dependiendo de las variables geográficas y técnicas de medición para el Caudal se podrán considerar directamente las ecuaciones (2.70) y (2.71) ya que las variables a considerar son específicas. Por otro lado, la ecuación (2.72) requiere considerar la Potencia del proyecto y la Altura Neta, antes mencionada.

2.6.1.3. Potencia de Entrada

Para el cálculo de la Potencia de entrada, se presentan en la siguiente tabla las ecuaciones consideradas por cada autor:

Tabla 2.9 Ecuaciones de Potencia de Entrada

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$P_{ti} = \rho * g * C_n^2 * H_n * Q_t (Watt)$	(2.73)
OLADE	$P_T = \frac{P_g}{n_g * n_{tr}}$	(2.74)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$P = n\rho gQH$	(2.72)

(Fuente: [6,16,18])

Análisis:

Para el cálculo de la ecuación (2.74) se requieren parámetros específicos calculados previamente como lo presenta la OLADE, estos parámetros no intervienen bajo las consideraciones de diseño los demás autores, por lo que, en comparación con las ecuaciones (2.72) y (2.73), en donde se mantienen los parámetros geométricos relacionados con los cálculos previos permite observar la relación directa en el cálculo, razón por la cual serán considerados en el presente estudio.

2.6.1.4. Velocidad Específica

En la siguiente tabla se presentan las ecuaciones recopiladas para el cálculo de la Velocidad Específica:

Tabla 2.10 Ecuaciones de la Velocidad Específica

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$N_s = 85,49 * \sqrt{n_j} / H_n^{0,243}$	(2.75)
Zhang	$n_q = \frac{n * \sqrt{\dot{Q}}}{\sqrt{Z_{jet}} * H^{3/4}}$	(2.76)
	$n_q = 2,63 k_m \sqrt{\varphi_B} \frac{B}{D_m}$	(2.77)
OLADE	$N_q = N * \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$	(2.78)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$N_s = 85,49 / H_n^{0,245}$	(2.79)

(Fuente: [16,6,5,18])

Análisis:

Debido a las magnitudes físicas involucradas en los parámetros de cálculo, las relaciones presentadas para calcular la velocidad de acuerdo a cada autor varían, involucrando a diferentes consideraciones para los parámetros. La ecuación (2.78) presentada por la OLADE representa la ecuación de partida y de acuerdo a la definición del parámetro, que representa la relación existente en los diámetros del rodete y del chorro jet, por lo que es un parámetro geométrico que puede relacionarse entonces con la carga volumétrica de cada cucharón. La ecuación (2.77) desarrollada a partir de la ecuación (2.76) presenta los coeficientes prácticos y operacionales para el diseño de la Turbina tipo Pelton, al igual que la ecuación (2.75) por lo que podrán ser consideradas como referencia para el presente estudio, si bien la ecuación (2.79) presenta el mismo lineamiento no considera al número variable de inyectores, sino solo 1, por lo que no se considera para el presente estudio.

2.6.1.5. Número de Inyectores / Nozzles

A continuación, se presenta en la siguiente tabla la ecuación para el cálculo del número de inyectores:

Tabla 2.11 Ecuaciones del Número de Inyectores

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$n_j = \frac{Q_t}{Q_n}$	(2.80)

(Fuente: [16])

Análisis:

La ecuación (2.80) permite relacionar el dato opcional del diseño, en caso de requerir un caudal específico a considerarse por cada inyector. Los demás autores no consideran una ecuación sino un proceso de relación con los demás parámetros, asumiendo valores dentro de los cuadros recomendados.

2.6.1.6. Velocidad de la Turbina

Se presentan en la siguiente tabla las ecuaciones consideradas por cada autor, para el cálculo de la Velocidad de la Turbina:

Tabla 2.12 Velocidad de la Turbina

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$N = N_s * \frac{H_n^{5/4}}{\sqrt{P_{ti}}}$	(2.81)
Nigussie, Engeda & Dribssa	$2\pi \frac{N}{60} * \frac{D}{2} = x * V_{jet}$	(2.82)
Zhang	$n = \frac{n_q * H^{3/4}}{\sqrt{Q/Z_{jet}}}$	(2.83)
OLADE	$N = \frac{84,54 * Ku' * H^{1/2}}{Dp}$	(2.84)
	$Ku' = 0,49 - 0,0072 * \frac{N_q}{i^{1/2}}$	(2.85)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$N = \frac{N_s H^{5/4}}{\sqrt{P}}$	(2.86)

(Fuente: [5,6,16,17,18])

Análisis:

La ecuación (2.86) es exclusiva para diseños de turbinas tipo Pelton con un solo inyector, por lo que no se ha considerado para el presente análisis.

El desarrollo de la ecuación (2.84) hasta lo expresado en la ecuación (2.85) por la OLADE, requiere de forma adicional otro parámetro no considerado hasta el momento en el desarrollo de estudio, por lo que partiendo de la ecuación (2.82) se podrán obtener ecuaciones con valores operacionales y prácticos a considerar en la fase de diseño. En base a estas consideraciones y acorde a lo presentado en 2.6.1.4, para el presente estudio se ha considerado la velocidad específica acorde a Nasir Bilal (2.75) y Zhang (2.77), por lo que, siguiendo el lineamiento de parámetros empleados, se consideran a las ecuaciones (2.81) y (2.83) como aquellas apropiadas para el desarrollo del diseño.

2.6.1.7. Velocidad del chorro jet

Para el cálculo de la Velocidad del chorro jet, se presentan en la siguiente tabla las ecuaciones consideradas por cada autor:

Tabla 2.13 Velocidad del Chorro

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$V_j = Cn * \sqrt{2 * g * H_n} \text{ (m.s}^{-1}\text{)}$	(2.87)
Nigussie, Engeda & Dribssa	$V_{jet} = K_N \sqrt{2gH_n}$	(2.88)
Zhang	$C_o = \sqrt{2gH} \text{ [20]}$	(2.89)
OLADE	$C_i = Kc * \sqrt{2gH}$	(2.90)

(Fuente: [5,6,16,17])

Análisis:

La ecuación base para el estudio de la velocidad Jet es presentada como se detalla por Zhang (2.89), para las consideraciones prácticas los autores Bilal Nasir (2.87), Nigussie, Engeda & Dribssa (2.88) y la OLADE (2.90) consideran el coeficiente de velocidad de la tobera o inyector, por lo que serán empleadas para el presente estudio, para un diseño de más alta eficiencia se podrá considerar el valor para el coeficiente entre 0,97 y 0,98 [17].

2.6.1.8. Diámetro del Rodete

En la siguiente tabla se presentan las ecuaciones empleadas por cada autor para el cálculo del diámetro del rodete:

Tabla 2.14 Ecuaciones del diámetro del rodete

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$D_r = 38,6 * \sqrt{H_n/N}$	(2.91)
Nigussie, Engeda & Dribssa	$Dr = 37,7 * \frac{\sqrt{Hn}}{N}$	(2.92)
Zhang	$Dm = \frac{k_m * \sqrt{2gH}}{\pi * n}$ $km = 0,475$	(2.93)
OLADE	$\frac{Dp}{d} = \frac{76 * i^{1/2}}{Nq} - 1.12$	(2.94)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$u = \frac{\pi DN}{60}$	(2.95)

(Fuente: [5], [6], [16]–[18])

Análisis:

En base a lo detallado en el Marco Teórico del presente estudio, en la etapa de transformación de la energía entre el chorro jet y los cucharones se requiere asegurar que los parámetros involucrados se calculen alrededor de la mayor eficiencia hidráulica. En la ecuación (2.93) se presenta la forma teórica para el cálculo, en las ecuaciones (2.94) y (2.95) se presenta un desarrollo en base a parámetros no considerados en el presente estudio; mientras que los valores prácticos y operacionales han sido considerados directamente en las ecuaciones presentadas por los autores Bilal Nasir (2.91) y Nigussie, Engeda & Dribssa (2.92), en donde se especifica que la relación entre el rodete y la velocidad del chorro varía entre 0,46 -0,47 [16] por lo que las ecuaciones son consideradas para el cálculo del Diámetro del Rodete.

2.6.1.9. Diámetro del chorro

Para el cálculo del Diámetro del chorro se presentan en la siguiente tabla las ecuaciones utilizadas por cada autor:

Tabla 2.15 Ecuaciones del diámetro del chorro

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$D_j = \sqrt{4 * Q_t / (\pi * n_j * V_j)} (m)$	(2.96)
Nigussie, Engeda & Dribssa	$d_{jet} = \frac{0,54}{H_n^{1/4}} \times \sqrt{\frac{Q}{n_{jet}}}$	(2.97)
OLADE	$d = 0,545 * \left(\frac{Q}{n_{jet} \sqrt{H}} \right)^{1/2}$	(2.98)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$d_o = 0,545 \sqrt{\frac{Q}{Z_o \sqrt{H}}}$	(2.99)
Solemslie	$d_{jet} = \frac{Q}{Z \sqrt{2gH}}$	(2.100)

(Fuente: [1], [6], [16]–[18])

Análisis:

La ecuación fundamental es presentada por Bilal Nasir (2.96) y Solemslie la desarrolla a la ecuación (2.100). A partir de lo señalado, los autores: Nigussie, Engeda & Dribssa (2.97), OLADE (2.98), Zaw Oo, Nyi & Khaing (2.99) han desarrollado las ecuaciones presentadas para considerar el número de jets y la altura neta en lugar de la velocidad del jet, sin embargo, los parámetros utilizados son los mismos para todos los autores y el coeficiente varía de acuerdo a las consideraciones de cálculo y son consideradas para el presente estudio.

2.6.1.10. Número de Cucharas

En la siguiente tabla se presentan las ecuaciones recopiladas por autor, para el cálculo de número de cucharas:

Tabla 2.16 Ecuaciones del número de cucharas

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$n_b = 15 + \frac{D_r}{2 * D_j}$	(2.101)
Nigussie, Engeda & Dribssa	$Z = \frac{D}{2d} + 15$	(2.102)
Zhang	$N = 15 + \frac{0,62}{n_q}$	(2.103)
OLADE	$z = \frac{2 * \pi}{kp * \left(\theta - 2 \left(\frac{Da}{Dp} \right) Ku * Sen \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)}$	(2.104)
	$\theta = z \text{ arc Cos } \left(\frac{Dp + d}{Da} \right)$	(2.105)
	$Da = Dp + 2 * f$	(2.106)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$Z = 0,5m + 15 = \frac{D}{2do} + 15$	(2.107)
	$m = \frac{D}{do} = \text{jet ratio}$	(2.108)

(Fuente: [5], [6], [16]–[18])

Análisis:

Las fórmulas presentadas por la OLADE (2.104, 2.105 y 2.106) indican una distribución en base a parámetros que no se han considerado durante el presente estudio.

Según lo presentado por los autores Bilal Nasir (2.101), Nigussie, Engeda & Dribssa (2.102), y Zaw Oo, Nyi & Khaing (2.107): la ecuación empleada para el cálculo de este parámetro es la misma y además de acuerdo a la Tabla 2.5 presentada para el complemento de lo indicado por Zaw Oo, Nyi & Khaing (2.107), esta ecuación se utiliza para una referencia de fabricación y diseño basado en la experiencia de operadores de turbinas Tipo Pelton.

2.6.1.11. Ancho del cucharón

Las ecuaciones y rangos para el cálculo del Ancho del Cucharón se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.17 Ecuaciones del Ancho del Cucharón

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$B = 3,4 * do$	(2.109)
Nigussie, Engeda & Dribssa	$B = 0,38 * D$	(2.110)
Zhang	$\frac{B}{Dm} = \frac{n_q}{2.63 * k_m * \sqrt{\varphi}}$ $\varphi = 0.11$ $k_m = 0.45 - 0.48$	(2.111)
OLADE	$2.5 * d - 4 * d$	(2.112)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$2.8 * d - 4 * d$	(2.113)

(Fuente: [5], [6], [16]–[18])

Análisis:

En base a lo recopilado en el marco teórico, una vez que la energía cinética se transforma en energía mecánica en los cucharones, la geometría de los cucharones en base a la mayor eficiencia hidráulica debe ser considerada. Bajo esta premisa se considera que los rangos de diseño considerados en base a la experiencia de diseño y operación mencionada por Bilal Nasir (2.109), OLADE (2.112) y por los autores Zaw Oo, Nyi & Khaing (2.113), son los apropiados para determinar el rango de selección de valores para este parámetro, considerado entre los siguientes valores en relación del diámetro del chorro jet: $2,5d - 4d$. Si se requiere una aproximación para un valor y comenzar la iteración de valores, se podrá utilizar la ecuación (2.109)

2.6.1.12. Largo del cucharón

Las ecuaciones y rangos para el cálculo del Largo del Cucharón se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.18 Ecuaciones del Largo de cucharón

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$B_L = 3 * D_j$	(2.114)
Nigussie, Engeda & Dribssa	$h_2 = 0,34 * D$	(2.115)
Solemnslie	$L = \frac{(D_c - D_r)}{2}$	(2.116)
OLADE	$2.5 * d - 3.5 * d$	(2.117)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$2.28 * d - 3.3 * d$	(2.118)

(Fuente: [1], [6], [16]–[18])

Análisis:

Este parámetro mantiene el objetivo de la transformación de la energía cinética en energía mecánica, para obtener valores para los procesos iterativos de diseño se considera previamente al diámetro del chorro jet, por lo que se aceptará en el presente estudio el rango señalado por los autores Zaw Oo, Nyi & Khaing (2.118) y por la OLADE (2.117), entre los siguientes valores en relación del diámetro del chorro jet: 2,5d – 3,3d

Si se requiere un valor inicial como referencia, se podrá utilizar la ecuación (2.114)

2.6.1.13. Profundidad del Cucharón

Las ecuaciones y rangos para el cálculo de la Profundidad del Cucharón se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.19 Ecuaciones de la Profundidad del Cucharón

Autor	Ecuación	Referencia
Nasir Bilal	$B_d = 1,2 * D_j (m)$	(2.119)
Nigussie, Engeda & Dribssa	$t = 0,121 * D$	(2.120)
OLADE	$0.85 * d - 1.3 * d$	(2.121)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$0.8 * d - 1.2 * d$	(2.122)

(Fuente: [6], [16]–[18])

Análisis:

Este parámetro se relaciona directamente con el punto de contacto entre el chorro jet y el cucharón, por lo que la consideración de este parámetro como lo señalan la OLADE (2.121) y los autores Zaw Oo, Nyi & Khaing (2.122) en el rango comprendido entre 0,8d a 1,3d será considerado en el presente estudio.

Si se requiere un valor inicial como referencia, se podrá utilizar la ecuación (2.119)

2.6.1.14. Profundidad de la Muesca

Los rangos para el cálculo de la Profundidad de la Muesca se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.20 Ecuaciones de la Profundidad de la Muesca

Autor	Ecuación	Referencia
OLADE	$0.3 * d - 0.6 * d$	(2.123)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$0.44 * d - 0.625 * d$	(2.124)

(Fuente: [6], [18])

Análisis:

Como lo señalan la OLADE (2.123) y los autores Zaw Oo, Nyi & Khaing (2.124), el rango comprendido entre 0,3d a 0,625d será considerado en el presente estudio.

2.6.1.15. Ancho de la Muesca

Los rangos para el cálculo del Ancho de la Muesca se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.21 Ecuaciones del Ancho de la Muesca

Autor	Ecuación	Referencia
OLADE	$1 * d - 1.2 * d$	(2.125)
Zaw Oo, Nyi & Khaing	$1.12 * d - 1.6 * d$	(2.126)

(Fuente: [6][18])

Análisis:

Como lo señalan la OLADE (2.125) y los autores Zaw Oo, Nyi & Khaing (2.126), el rango comprendido entre 1d a 1,6d será considerado en el presente estudio.

2.7. Modelo paramétrico

Como detallan los autores citados en el presente estudio: las experiencias prácticas en la fabricación de Turbinas Pelton han tenido un rol de mayor relevancia además de las reglas generales de diseño. El número de cucharones y el tamaño del rodete, por ejemplo, se determinaron finalmente por modelos y experiencia; y es así que, varias fuentes bibliográficas citadas reportan la mayor confiabilidad en datos de Turbinas Pelton fabricadas o en modelos físicos realizados luego del diseño geométrico y los datos utilizados como retroalimentación, se han considerado en el literal 2.1.

Con este antecedente, se considerarán a las ecuaciones y rangos determinados anteriormente para elaborar la metodología a seguir para cumplir las condiciones de máxima eficiencia hidráulica a partir de la geometría de los cucharones y rodete que forman a las Turbinas Tipo Pelton.

2.7.1. Puntos principales del Análisis comparativo de los parámetros empleados en los pasos de Diseño de Turbinas Pelton

Al inicio de cada proyecto de diseño se definen las condiciones de operación que regirán el funcionamiento de la turbina, estas son:

- Altura neta
- Caudal
- Potencia

Estos parámetros serán denominados: Parámetros de Operación y serán el primer objetivo a determinar para el diseño de Turbinas Tipo Pelton y corresponden a la Energía Potencial disponible.

En la transformación de la energía potencial a energía cinética se calculan los parámetros involucrados, por lo que se agruparán bajo la denominación de Parámetros Cinéticos. Una vez que se obtengan estos parámetros, se procederá a determinar la geometría del Rodete,

Jet y número de cucharones. Estos parámetros definen la fase de conversión de energía cinética en potencial y se los ha agrupado como Parámetros geométricos.

Para garantizar la eficiencia hidráulica más alta, la energía mecánica comienza su etapa en los cucharones de la Turbina tipo Pelton, por lo que los parámetros involucrados se han denominado como Parámetros del Cucharón.

En la Figura 2.8 se presenta el flujo de cálculo para Parámetros agrupados e individuales que formarán parte de la metodología:

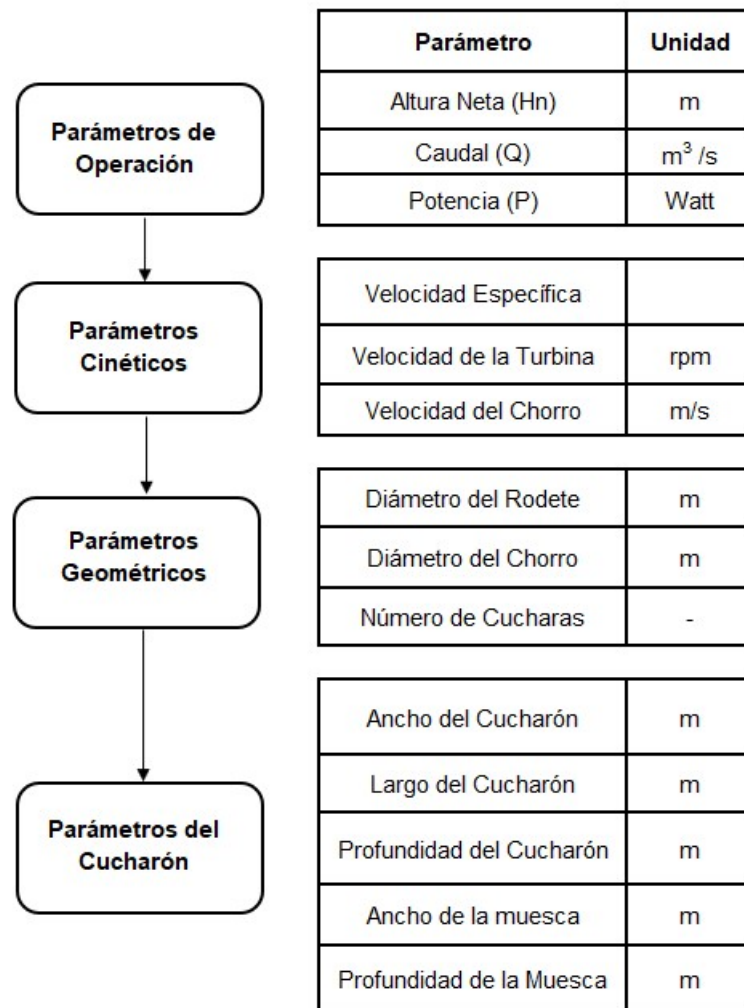


Figura 2.8 Flujo de cálculo para los parámetros agrupados e individuales.
(Fuente: Elaboración Propia)

En la siguiente tabla se indican las ecuaciones a emplearse para el cálculo de los parámetros de la metodología desarrollada:

Tabla 2.22 Fórmulas para el cálculo de los parámetros dentro de la Metodología para el Diseño de Turbinas tipo Pelton

Parámetro	Unidad	Ecuación
Parámetros de Operación		
Altura Neta (Hn)	m	$H_n = H_g - H_l$
Caudal (Q)	m ³ /s	$Q = \frac{P}{n\rho gH}$
Potencia (P)	Watt	$P = n\rho gQH$
Parámetros Cinéticos		
Velocidad Específica	adim	$N_s = 85.49 * \sqrt{n_j} / H_n^{0.243}$
Velocidad de la Turbina	rpm	$n = \frac{n_q * H^{3/4}}{\sqrt{Q/z_{jet}}}$
Velocidad del Chorro	m/s	$V_j = Cn * \sqrt{2 * g * H_n}$
Parámetros Geométricos		
Diámetro del Rodete	m	$D_r = 38,6 * \sqrt{H_n/N}$
Diámetro del Chorro	m	$d_o = 0,545 \sqrt{\frac{Q}{Z_o\sqrt{H}}}$
Número de Cucharas	-	$n_b = 15 + \frac{D_r}{2 * D_j}$
Parámetros del Cucharón		
Ancho del Cucharón	m	$2,8d - 3,3d$
Largo del Cucharón	m	$2,28d - 4d$
Profundidad del Cucharón	m	$0,8d - 1,2d$
Ancho de la muesca	m	$1,12d - 1,6d$
Profundidad de la Muesca	m	$0,44d - 0,625d$

(Fuente: Elaboración Propia.)

Para el cálculo se requiere un proceso iterativo en donde se asumirá el número de inyectores en base a la Tabla 2.23.

Tabla 2.23 Proceso Iterativo con número de Inyectores

Z	W/dj
1	3,1
2-3	3,2
4-5	3,3
6	3,4

Fuente: [6]

Una vez que se tengan los diferentes valores, se pueden tomar diferentes referencias desde información y datos de operación de Turbinas Tipo Pelton, por lo que la Tabla 2.2 puede ser modificada para asumir el número de cucharones por lo que puede presentar a continuación:

Tabla 2.24 Número de cucharones en función de la relación de diámetro del rodete y diámetro del chorro jet

Dp/d	NÚMERO DE CUCHARAS	
	Z min	Z máx
15	21	27
14	21	26
13	20	25
14	20	24
11	19	24
10	18	23
9	18	22
8	17	22
7,5	17	21

Fuente: [6]

Una vez definidos los valores, se podrá referir a lo presentado por la OLADE para la elaboración de planos acorde a la Figura 2.4.

Debido a que la ubicación de las cucharas contribuye al menor desgaste, se deberán calcular los ángulos de talonamiento acorde a lo indicado en la Tabla 2.3.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con las diferentes ecuaciones seleccionadas durante la elaboración de la metodología, así como los resultados y la validación de la metodología mediante la comparación con los datos obtenidos de la Turbina tipo Pelton de la Central Hidroeléctrica Illuchi II.

3.1. Resultados

3.1.1. Estudio de la sensibilidad de Parámetros en el Diseño de Turbinas Tipo Pelton

A continuación, se podrán observar los rangos de variación de cada parámetro acorde a los datos de entrada principales y a la transformación de energía en el proceso de funcionamiento, según lo presentado durante el desarrollo del presente tema de investigación:

3.1.1.1. Variación de la Altura neta en relación a las pérdidas de la Altura en Bruto

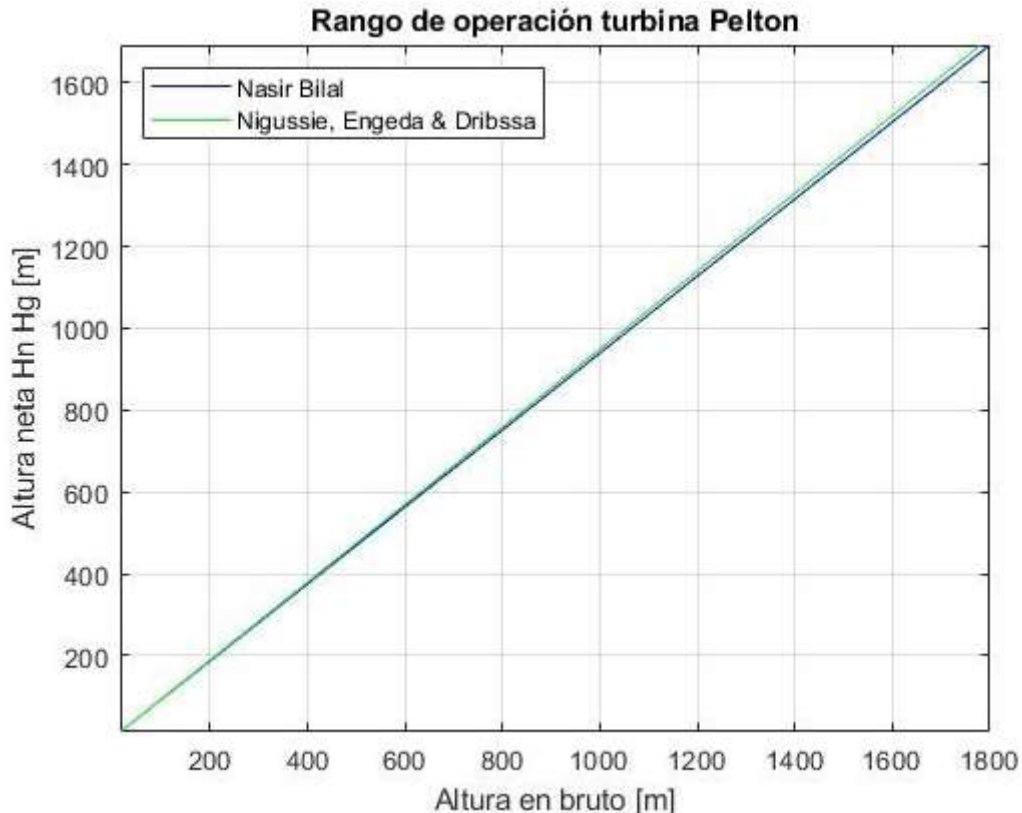


Figura 3.1 Variación de la Altura neta en relación a las pérdidas desde Altura en Bruto.
(Fuente: Elaboración Propia)

En la figura se observa la variación de la altura neta, considerando las pérdidas totales entre 5% y 6 %, esta disminución deberá ser considerada siempre debido a las condiciones de diseño y fabricación.

3.1.1.2. Variación de la Potencia de entrada en relación a la Altura Neta

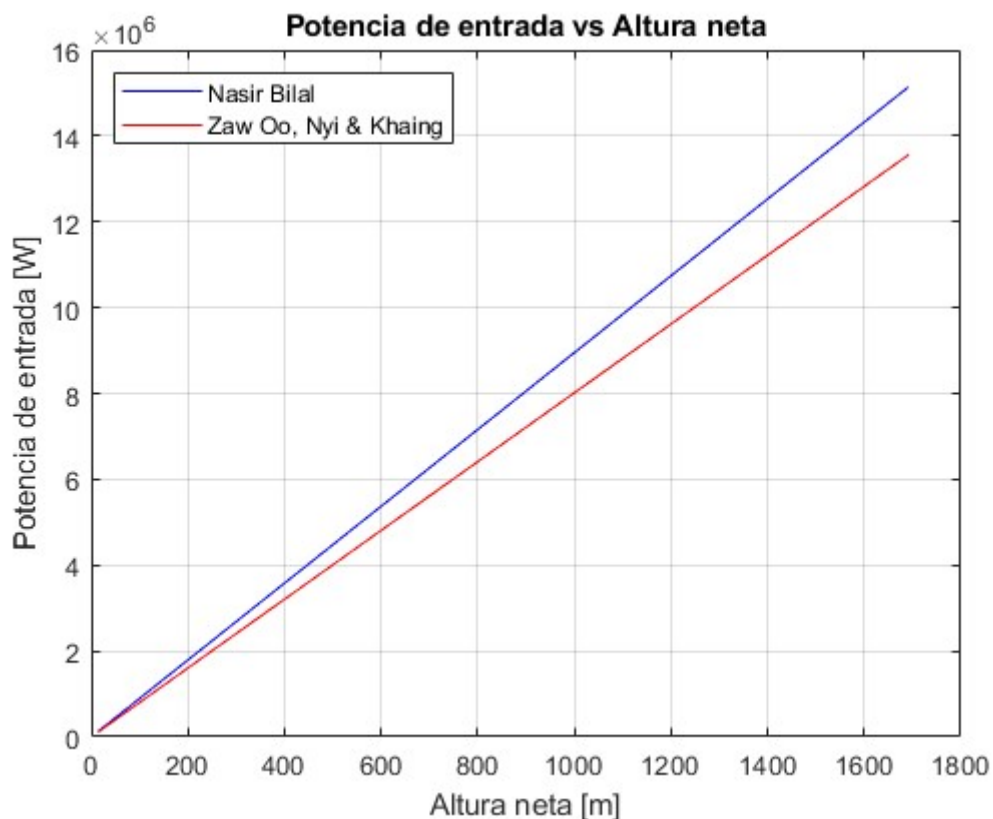


Figura 3.2 Variación de la Potencia de entrada en relación a la Altura neta.
(Fuente: Elaboración Propia)

Los resultados obtenidos acorde a las ecuaciones presentadas por Bilal Nasir y Zaw Oo, Nyi & Khaing se encuentran en una misma tendencia, la diferencia se encuentra en la consideración de los parámetros: coeficiente de descarga a $C_n \cong 0,98$ para lo señalado por Bilal Nasir y la eficiencia total del proyecto, como valor máximo promedio de 0,90 para Zaw Oo, Nyi & Khaing.

3.1.1.3. Variación de la Velocidad específica en función del Caudal

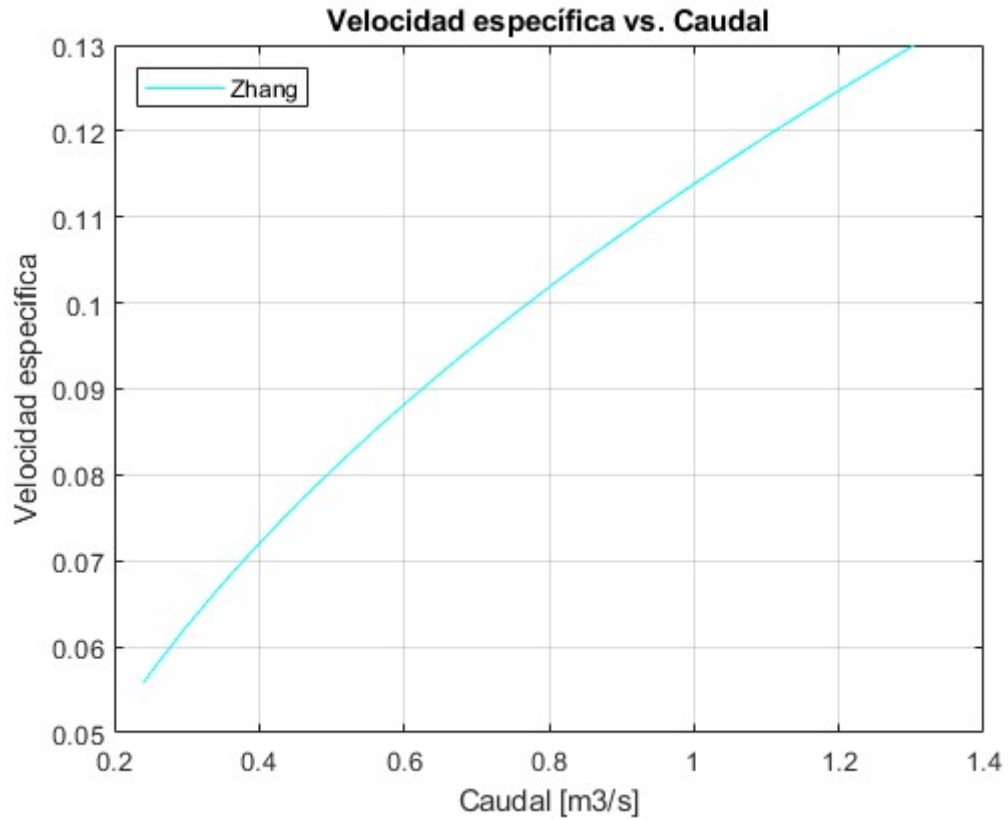


Figura 3.3 Velocidad específica Potencia de entrada en relación a la Altura neta
(Fuente: Elaboración Propia)

Acorde a lo indicado por Zhang, manteniendo constante el número de cucharones, se observa que el parámetro de Velocidad Específica por debajo del valor 0.13 permite obtener la referencia para el diseño de las turbinas teniendo en cuenta el caudal para las condiciones de mayor eficiencia hidráulica.

3.1.1.4. Variación de la Velocidad de la turbina en función de la Altura Neta

Debido a la variación en los diseños, para cada proyecto se deberá calcular la velocidad de diseño característica utilizando lo propuesto en (2.83). Siguiendo el lineamiento de parámetros empleados acorde a lo expuesto en la sección 2.6.1.6.

3.1.1.5. Variación de la Velocidad del Chorro Jet en función de la Altura Neta

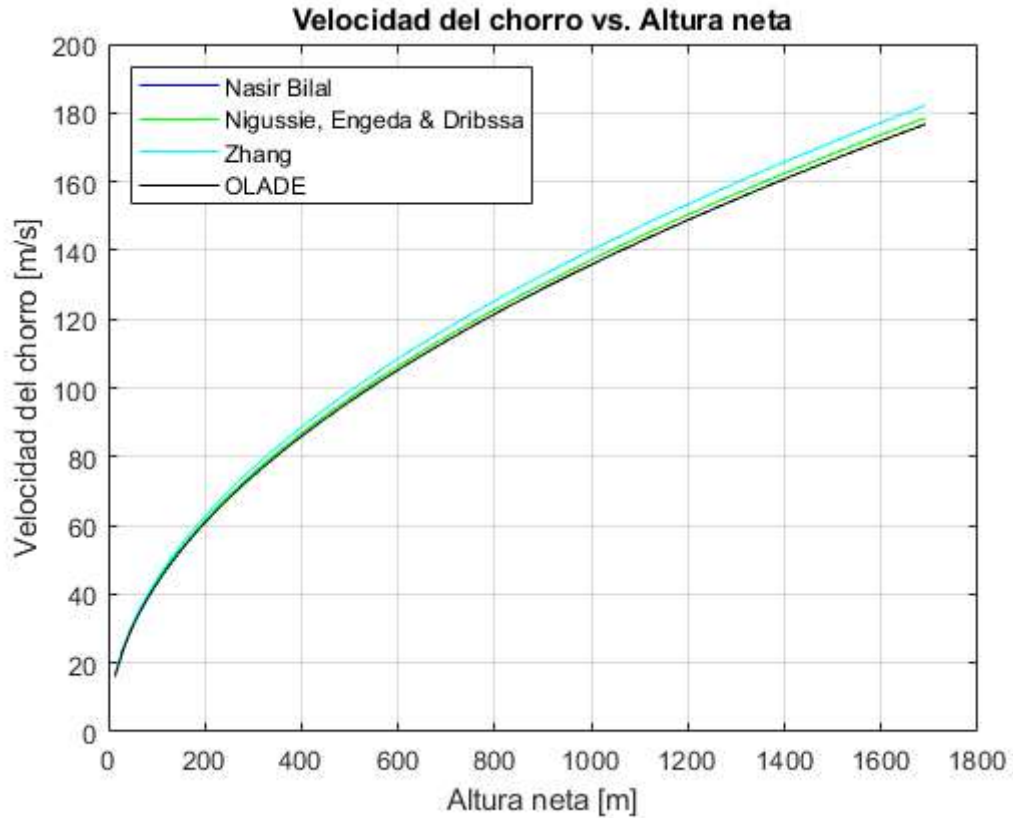


Figura 3.4 : Velocidad de la Turbina en relación a la Altura neta.
(Fuente: Elaboración Propia)

Se observa que los resultados graficados corresponden a una familia de curvas, la forma de la ecuación se mantiene constante entre todos los autores y la variable principal es la Altura neta. El coeficiente planteado está, según los diferentes autores, entre 0,95 y 0,99. Se podrá considerar para el estudio el rango intermedio entre 0,97 y 0,98.

3.1.1.6. Variación del Diámetro del rodete en función de la Altura Neta

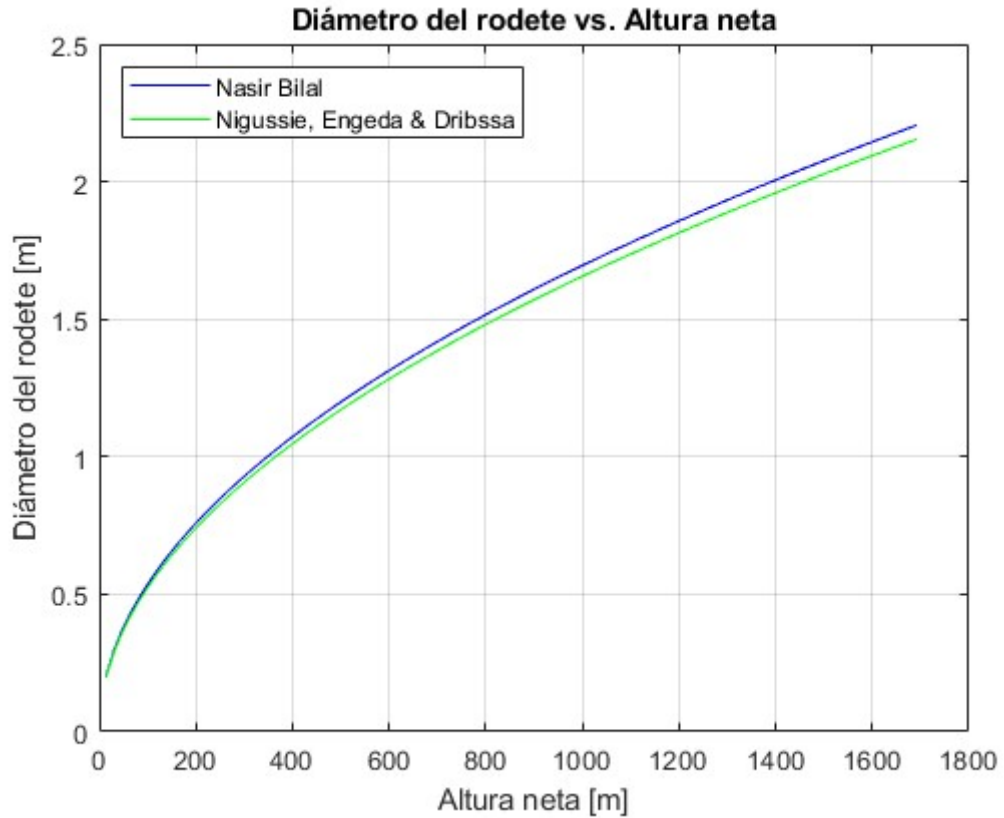


Figura 3.5 Diámetro del rodete en relación a la Altura neta.
(Fuente: Elaboración Propia)

Se observa en los datos graficados que se obtiene una familia de curvas para las ecuaciones presentadas por Bilal Nasir y Nigussie, Engeda & Dribssa, al mantener constante el número de revoluciones en el diseño, varía la relación entre el rodete y la velocidad del chorro entre 0,46 y 0,47 respectivamente, para estos valores en el diseño se obtiene la mayor eficiencia hidráulica.

3.1.1.7. Variación del Diámetro del chorro jet en función de la Altura Neta

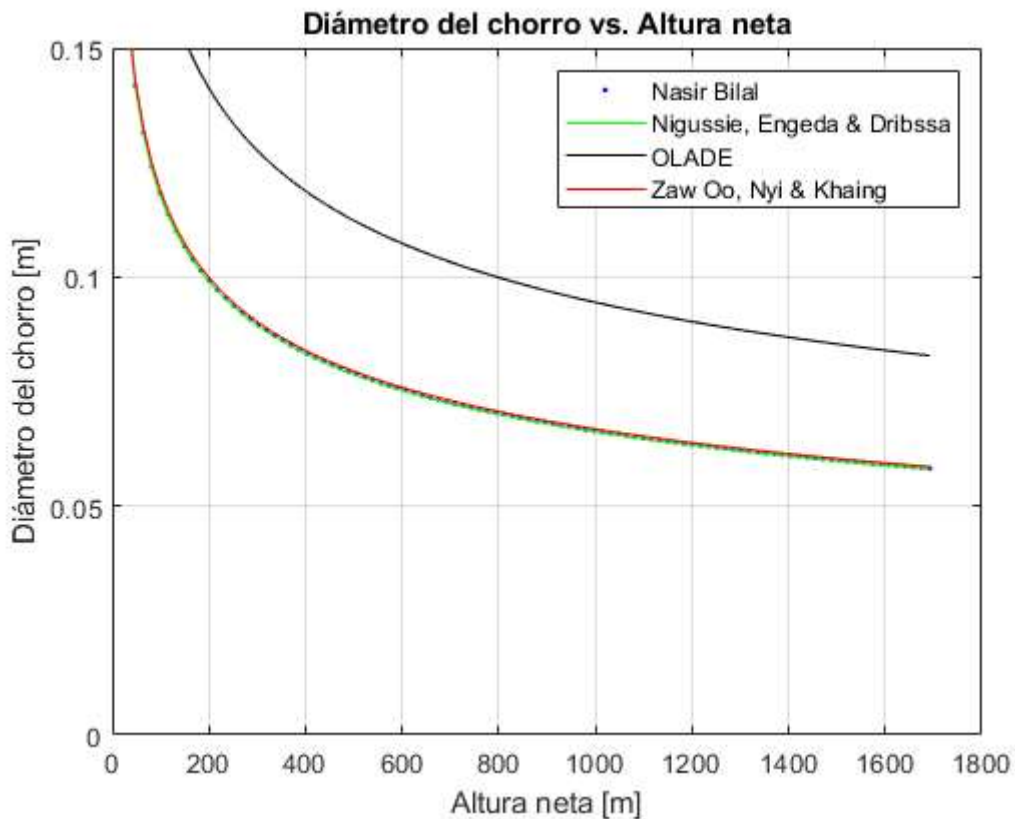


Figura 3.6 Diámetro del chorro en relación a la Altura neta.
(Fuente: Elaboración Propia)

Se observa en los datos graficados a partir de las ecuaciones presentadas por Bilal Nasir, Nigussie, Engeda & Dribssa, OLADE y Zaw Oo, Nyi & Khaing que se genera una familia de curvas en donde debido a las diferentes constantes de la ecuación se genera la separación entre curvas únicamente de la ecuación propuesta por la OLADE. Se analiza en función de la Altura Neta ya que es el parámetro de mayor influencia en la ecuación fundamental.

3.1.1.8. Variación del Número de cucharas en función del radio del Chorro

En el literal e del análisis para la metodología se presentan diferentes ecuaciones para la aproximación al número de cucharones en base a la experiencia, esta guía tomada a partir de la operación se considera como la base para la toma de datos e iteración en el desarrollo del presente estudio.

Tabla 3.1 Número de cucharones aproximado en relación del diámetro del chorro jet.

Radio del Chorro	6	8	10	15	20	25
Número de cucharones	17-21	18-22	19-24	22-27	24-30	26-33

Fuente: [18]

3.1.1.9. Variación del Ancho del cucharón en función del diámetro jet

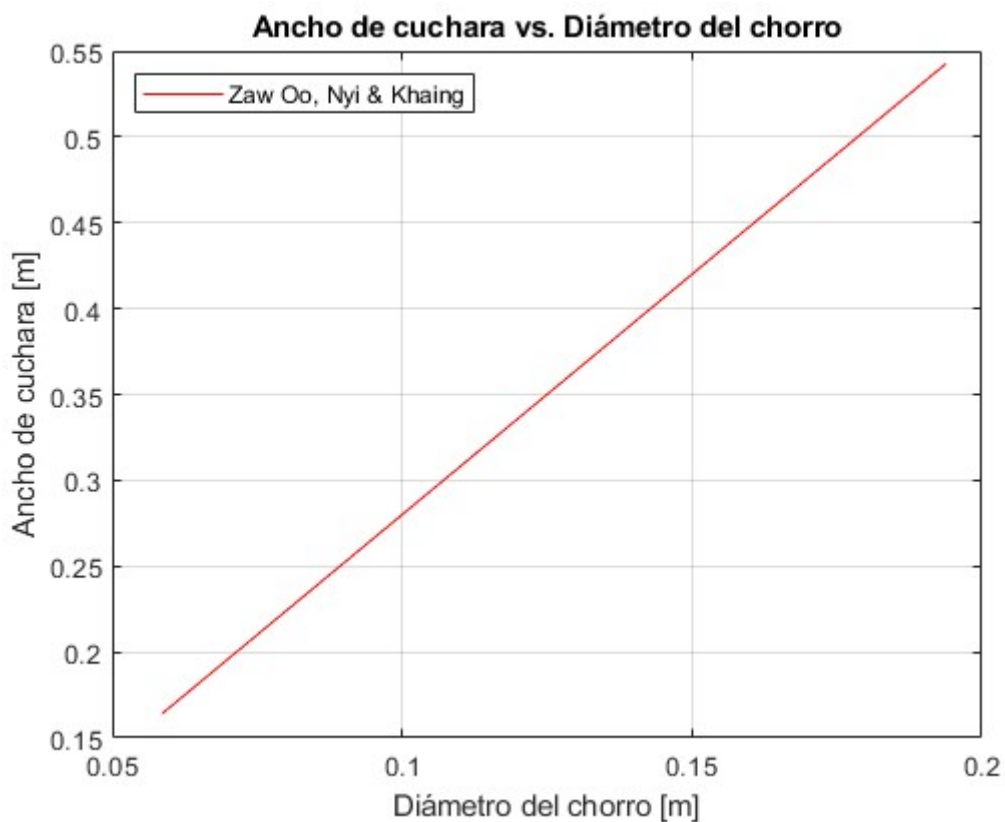


Figura 3.7 Ancho del cucharón en relación al diámetro del chorro (Fuente: Elaboración Propia)

El rango total considerado permite obtener valores desde $2,5d$ hasta $4d$, se observa que en los valores iniciales graficados se obtiene una relación lineal en donde se podrá iterar valores para el diseño, en función del diámetro del chorro.

3.1.1.10. Variación del Largo del cucharón en función del diámetro jet

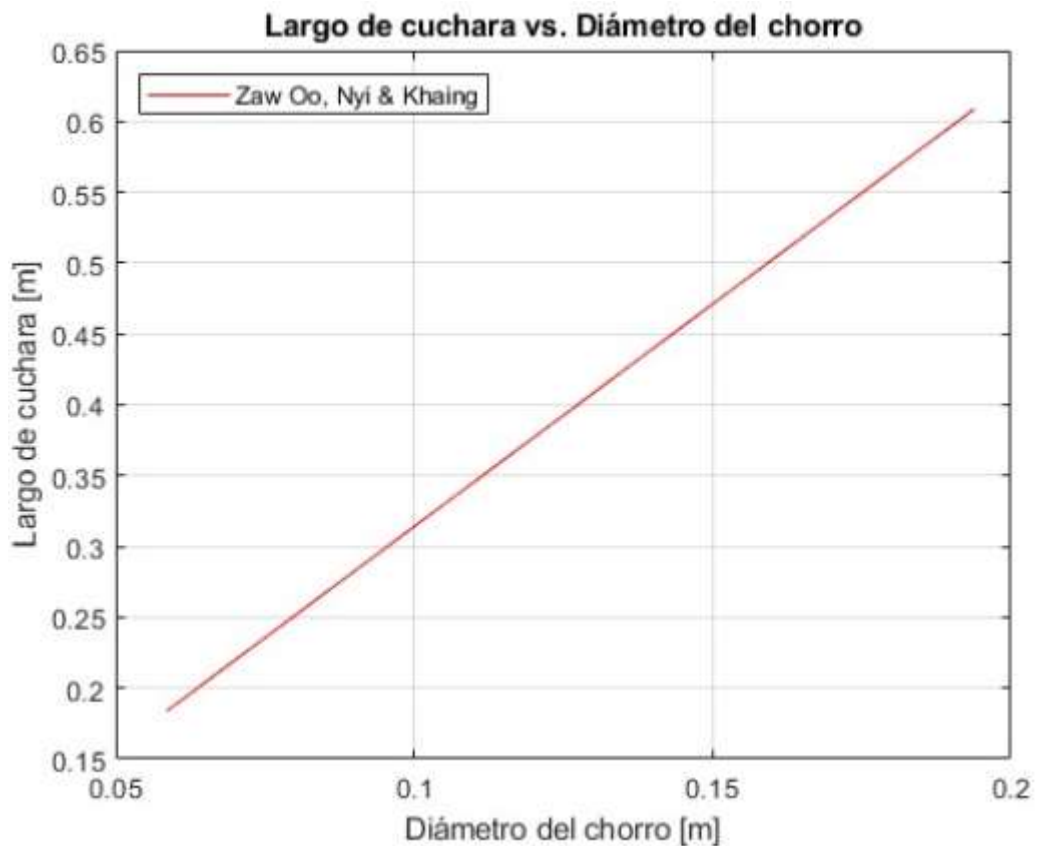


Figura 3.8 Largo del cucharón en relación al diámetro del chorro
(Fuente: Elaboración Propia)

El rango total considerado permite obtener valores desde $2,5d$ hasta $3,3d$, se observa de igual forma una relación lineal en función del diámetro del chorro.

3.1.1.11. Variación de la Profundidad del cucharón en función del diámetro jet

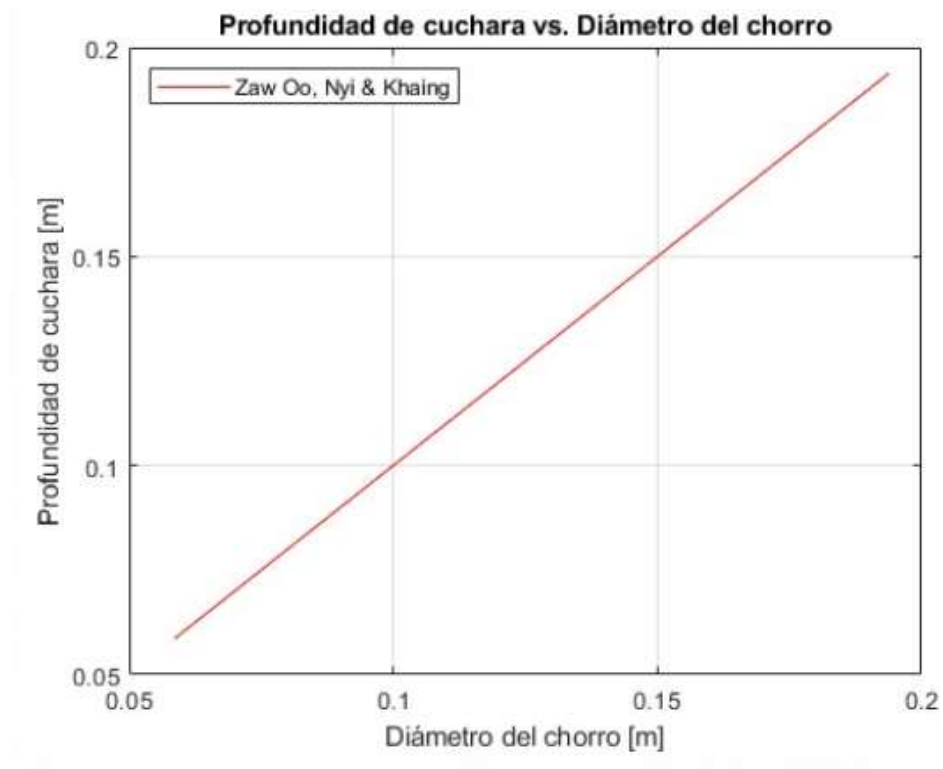


Figura 3.9 Profundidad del cucharón en relación al diámetro del chorro
(Fuente: Elaboración Propia)

El rango total considerado permite obtener valores desde $0,8d$ hasta $1,3d$, se observa de igual forma una relación lineal en función del diámetro del chorro.

3.1.1.12. Variación del Ancho de la muesca en función del diámetro jet

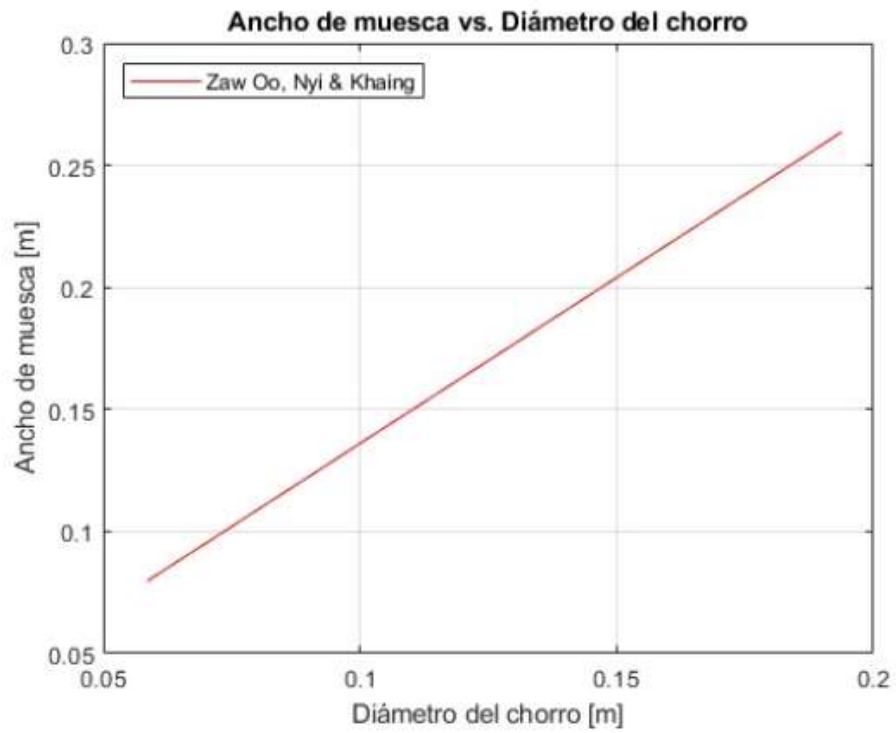


Figura 3.10 Ancho de la muesca en relación al diámetro del chorro
(Fuente: Elaboración Propia)

El rango total considerado permite obtener valores desde $1,0d$ hasta $1,6d$, se observa de igual forma una relación lineal en función del diámetro del chorro.

3.1.1.13. Variación de la Profundidad de la muesca en función del diámetro jet

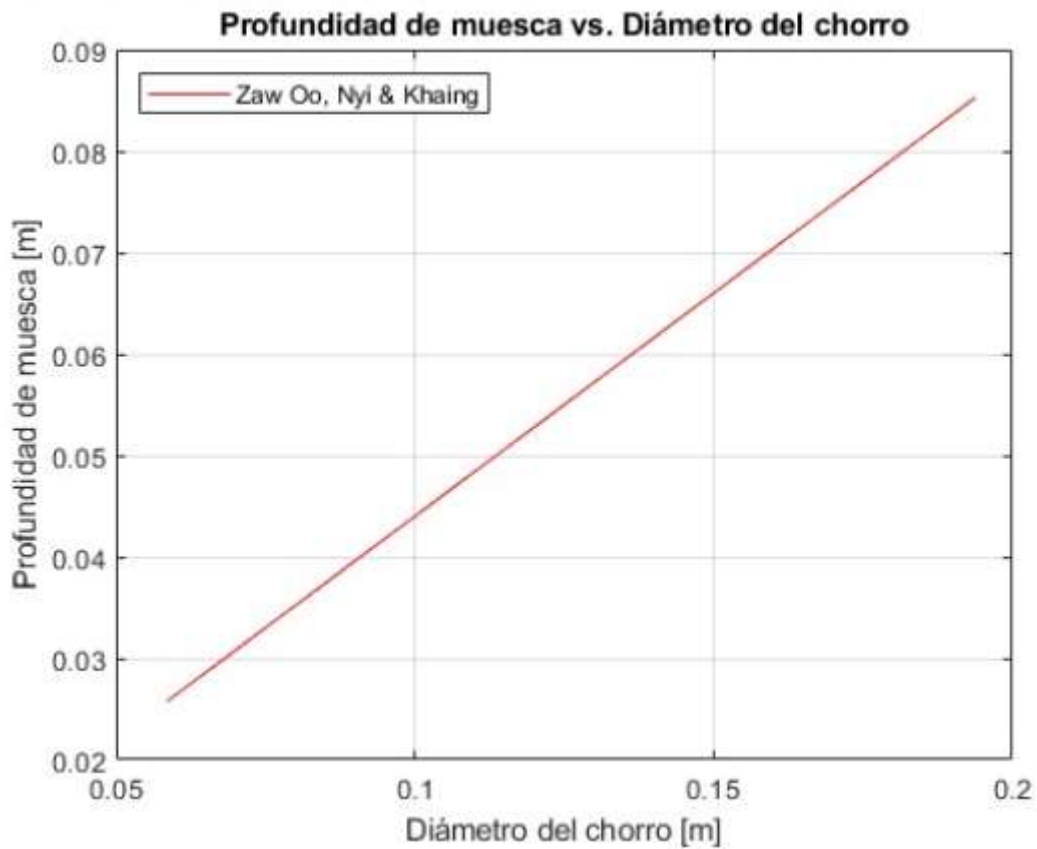


Figura 3.11 Profundidad de la muesca en relación al diámetro del chorro
(Fuente: Elaboración Propia)

El rango total considerado permite obtener valores desde $0,3d$ hasta $0,625d$, se observa de igual forma una relación lineal en función del diámetro del chorro.

3.2. Validación del Modelo Paramétrico

A continuación, se presentan los datos obtenidos de la Central Hidroeléctrica Illuchi II y el cálculo de los parámetros planteados en la metodología para la etapa de validación del modelo desarrollado:

3.2.1. Datos Obtenidos de la Central Hidroeléctrica

Se presentan los datos calculados acorde a la metodología y ecuaciones expuestos en los literales anteriores:

Tabla 3.2 Datos Obtenidos

Parámetros Generales	Dato	Unidad
Hn	348	m
Q	0,95	m/s ³
Nq	-	-
V-jet	-	-
djet (dj)	-	-
Z	20	
N	720	rpm
Dt	1,3	m
N	0,86	
P-turbina	2848	KW

(Fuente: Elaboración Propia)

Tabla 3.3 Datos Geométricos Obtenidos

Parámetros del Cucharón	Dato	Unidad
L	0,23	m
W (B)	0,26	m
Espesor	0,012	m
Δh	0,09	m
M	0,11	m
D		
ψ (ángulo)	20	°
B4 (ángulo)	12	°

(Fuente: Elaboración Propia)

Los valores presentados en las Tablas 3.2 y 3.3 corresponden a los valores nominales en la placa de operación de la Turbina tipo Pelton y a las dimensiones de los cucharones luego de la operación, junto con una estimación del diámetro del chorro utilizado en la operación diaria de la turbina.

3.2.2. Datos Calculados a partir de los datos Obtenidos de la Central Hidroeléctrica Illuchi II, utilizando la Metodología Propuesta:

Acorde a lo detallado en la metodología en la sección 2.7.1, y al análisis de sensibilidad, se presentan los resultados calculados para los parámetros del diseño de la Turbina Tipo Pelton:

Tabla 3.4 Datos Obtenidos

Parámetro	Unidad	Ecuación	Dato Obtenido	Dato Calculado	Desviación
Parámetros de Operación					
Altura Neta (Hn)	m	$H_n = H_g - H_l$	348	330,6	5%
Caudal (Q)	m ³ /s	$Q = \frac{P}{n\rho gH}$	0,95	0,94	1%
Potencia (P)	Watt	$P = n\rho gQH$	2848000	2,789.14	2%
Parámetros Cinéticos					
Velocidad Específica	adim	$N_s = 85.49 * \sqrt{n_j} / H_n^{0.243}$		29.6	No aplica
Velocidad de la Turbina	rpm	$n = \frac{n_q * H^{3/4}}{\sqrt{Q/z_{jet}}}$	700	729,45	1%
Velocidad del Chorro	m/s	$V_j = Cn * \sqrt{2 * g * H_n}$		78,51	No aplica
Parámetros Geométricos					
Diámetro del Rodete	m	$D_r = 38,6 * \sqrt{H_n} / N$	1,3	1,30	0%
Diámetro del Chorro	m	$d_o = 0,545 \sqrt{\frac{Q}{z_o \sqrt{H}}}$	0,09	0,088	2%
Número de Cucharas	-	$n_b = 15 + \frac{D_r}{2 * D_j}$	20	21	3%
Parámetros del Cucharón					
Ancho del Cucharón	m	$2,8d - 3,3d$	0,26	0,246	5%
Largo del Cucharón	m	$2,28d - 4d$	0,23	0,245	7%
Profundidad del Cucharón	m	$0,8d - 1,2d$	0,09	0,088	2%
Ancho de la muesca	m	$1,12d - 1,6d$	0,11	0,12	9%
Profundidad de la Muesca	m	$0,44d - 0,625d$	0,036	0,039	7%

(Fuente: Elaboración Propia)

3.2. Discusión

Una vez que se han determinado los resultados presentados en la Tabla 3.3 se procede a determinar la relación de los diámetros del jet y del chorro:

$$\frac{D}{d_o} = \frac{1,3}{0,088} = 14,77$$

De acuerdo a lo expuesto, la máxima eficiencia hidráulica se cumple cuando este valor es inferior a 15, por lo que cumplirá la condición de máxima eficiencia hidráulica.

Una vez que se ha determinado la validez de la relación de diámetros, acorde a la Tabla 2.12 se calcula el número mínimo de cucharas:

$$n_b = 15 + \frac{D_r}{2 * D_j} = 21$$

Se puede notar que para cumplir el criterio de máxima eficiencia acorde a lo detallado por Zhang en:

$$N = 15 + \frac{0,62}{0,13} = 20$$

Por lo que, en lugar de una construcción de una turbina con 22 cucharones, el diseño con 20 cucharones cumple con este criterio de diseño.

El siguiente criterio de diseño a verificar será el de carga volumétrica de los cucharones, aquí la relación máxima a cumplir será: $B = 3do$ o $\varphi \approx 0.11$, por lo que acorde a lo presentado en la Tabla 3.3 se tendrá que:

$$B = 3do = 0,264 m$$

El valor obtenido por lo tanto es aceptable y a continuación se procede a determinar las longitudes en base a los diámetros del chorro jet, para la comparación de máximos y mínimos, además de lo expuesto en el análisis de la sección 3.1, se consideran las propuestas por Hermod y Kjølle como reglas generales en donde se observan variaciones dentro del rango aceptable y con una desviación de 7% a 9% del valor real de la turbina.

Como paso final para la Eficiencia Hidráulica se selecciona el ángulo para la mayor eficiencia hidráulica el cual irá desde 170° hasta 180°.

Para cumplir el criterio de coincidencia de los cucharones, se indica el ángulo de talonamiento acorde a lo detallado en la Tabla 2.3, y la orientación del borde de la cuchara con respecto al giro del rodete acorde a lo detallado en la Tabla 2.4.

Por lo detallado a continuación, se observa que los valores de los ángulos recomendados son de 0°.

Sin embargo, se tomó en cuenta que el número de cucharas podría ser superior, por lo que el siguiente ángulo de talonamiento acorde a lo detallado en la Tabla 2.3, y la orientación del borde de la cuchara acorde a la Tabla 2.4 será de 20°.

Con lo calculado y los resultados presentados se podrá continuar con el diseño, en base a la Figura 2.5 de la OLADE, se deberá calcular el diámetro para la ubicación correcta de los cucharones además de los ángulos, el cual se ha determinado:

$$D_{o'} = 0,2318 \text{ m}$$

Y, en base a las Figuras 2.5 y 2.6, acorde a lo presentado por la OLADE, se procede con el esquema de los planos para la elaboración de cucharones de la turbina tipo Pelton, permitiendo tener el diseño final mostrado a continuación:

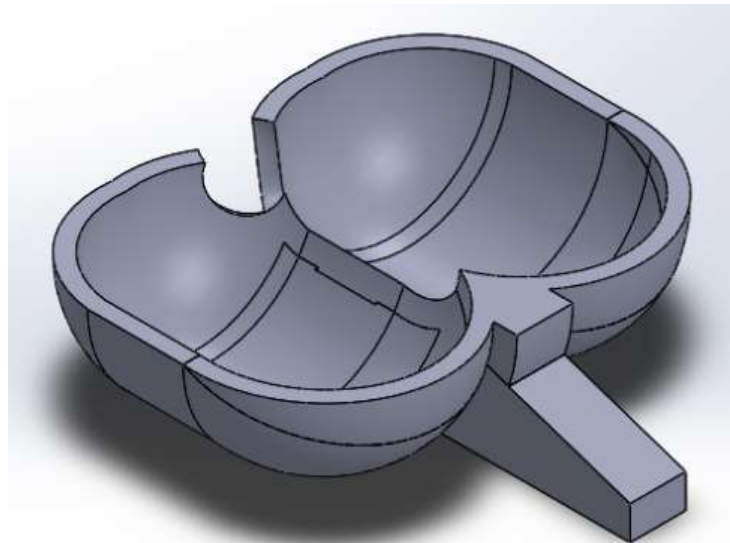


Figura 3.2 Diseño de los cucharones para la Turbina Tipo Pelton

(Fuente: Elaboración Propia)

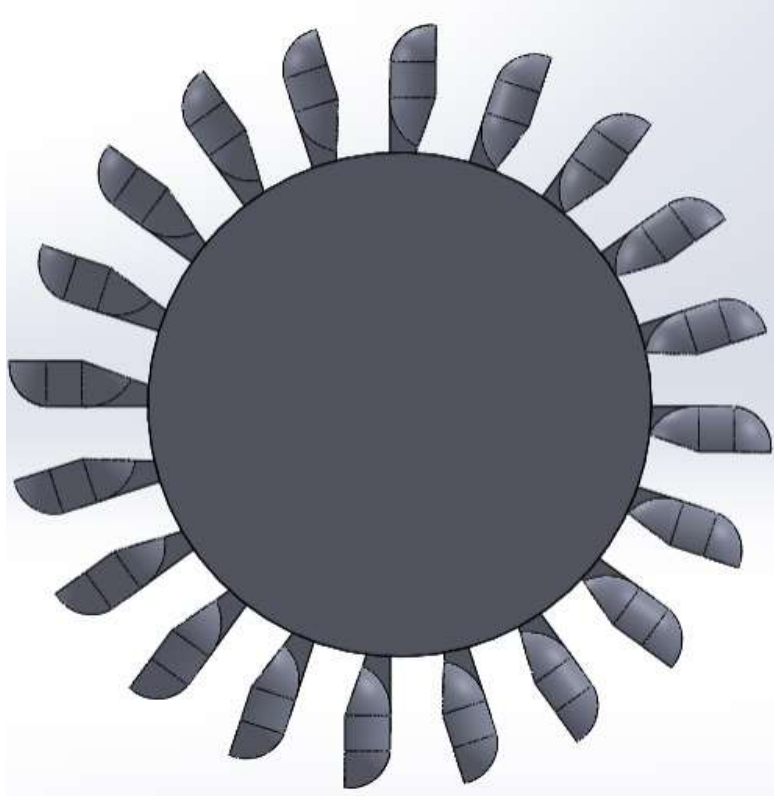


Figura 3.3 Diseño la Turbina Tipo Pelton

(Fuente: Elaboración Propia)

Finalmente, se podrá recomendar la distancia entre la boquilla y la cuchara teniendo en cuenta el espacio libre mínimo entre la boquilla y los cucharones:

$$X_{nb} = 0,625 * D_r = 0,055 \text{ [m]}$$

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se ha evaluado al modelo desarrollado a través del estudio de los pasos presentados por los diferentes autores, en base a lo expuesto en el marco teórico para los parámetros involucrados en el diseño de las Turbinas Tipo Pelton, delimitados en las condiciones para la máxima eficiencia hidráulica, condiciones en base a las cuales se determinó una interrelación de parámetros para el proceso de transformación de energía en parámetros de operación, cinéticos, geométricos y propios del cucharón, a través del uso de ecuaciones y reglas de operación y desgaste para obtener un análisis tipo causa-efecto en la metodología final que permita comparar uno de los posibles resultados en el diseño, con los datos obtenidos de la Central Hidroeléctrica Illuchi II. Del trabajo realizado se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Los datos obtenidos en la Tabla 3.3 cumplen todas las condiciones de máxima eficiencia hidráulica por lo que el modelo paramétrico presentado en el presente estudio es válido.
- Las dimensiones obtenidas difieren en un máximo 9% de los valores de la Central Hidroeléctrica Illuchi II, y debido a que las dimensiones obtenidas fueron realizadas in situ, las condiciones originales de la turbina pudieron sufrir una variación, por lo que los porcentajes de desviación, al estar dentro de los máximos presentados tanto en el marco teórico y metodología, cumplen con las condiciones y reglas generales de diseño de Turbinas Tipo Pelton.
- Para evitar el desgaste prematuro, se podrán considerar los ángulos de talonamiento y ubicación de los cucharones acorde a lo presentado por la OLADE.
- Si bien el número de cucharones de la Turbina estudiada es inferior al número de cucharones calculado utilizando la metodología detallada en el presente estudio, cumple la condición de carga de los cucharones.
- Se concluye que, para la operación y desgaste, los ángulos de talonamiento y de ubicación de los cucharones en el rodete, coinciden con los de la turbina de la Central Hidroeléctrica Illuchi II, por lo que el modelo paramétrico queda validado en su desarrollo a partir de las consideraciones de máxima eficiencia.

4.2. Recomendaciones

- Los pasos presentados durante el presente estudio corresponden a generación eléctrica para Turbinas y microturbinas, por lo que se podrá utilizar la metodología de diseño presentada para turbinas tipo Pelton, en áreas en donde no existan grandes caídas de agua, para generación de proyectos de generación local de energía eléctrica (como ejemplo 50kW acorde a lo presentado por Thake, 2000)
- Se recomienda considerar el valor del diámetro del chorro utilizado para garantizar las condiciones de máxima eficiencia en la geometría de la turbina.
- Para futuros estudios se recomienda el análisis de la geometría y optimización mediante CFD, partiendo de la geometría de diseño desarrollada para el estudio de eficiencia total de los proyectos de diseño de turbinas tipo Pelton.
- Se recomienda la consideración de una distancia de 0,055m desde la salida del chorro jet hasta el contacto con los cucharones para prevenir el desgaste prematuro en la Turbina tipo Pelton.
- Se recomienda el estudio posterior de los materiales de diseño, recubrimientos y partículas que intervienen en el desgaste por erosión en las turbinas tipo Pelton para un mejor entendimiento del desgaste de tipo erosión- abrasión.
- En las condiciones actuales, se recomienda incluir una etapa previa de filtrado para evitar la acumulación de sedimentos en la mezcla con el agua para evitar el contacto con los cucharones de la Turbina Tipo Peltonsert
- En caso de paras por mantenimiento, se recomienda una operación con paras planificadas para retirar los sedimentos del reservorio de agua de la Central Hidroeléctrica Illuchi II.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Solemslie, "General Pelton Theory," pp. 15–18, 2016.
- [2] B. Dudley, "Statistical Review of World Energy," 2016.
- [3] J. Thake, *Micro-hydro Pelton Turbine Manual: Design, manufacture and installation for small-scale hydropower (Paperback)*. Practical Action Publishing, 2000.
- [4] "Hydraulic machines - Guide for dealing with hydro-abrasive erosion in Kaplan, Francis and Pelton turbines," Geneva, Switzerland, 2013.
- [5] Z. Zhang, "Pelton Turbines," 1st ed., Zurich: Swiss Federal Institute of Technology in Zurich, 2016, pp. 234–246.
- [6] C. Hernández and E. Indacochea, *Apuntes para un manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas*, 1st ed. Quito, 1988.
- [7] J. Sobieszczanski-Sobieski and R. T. Haftka, "Multidisciplinary aerospace design optimization: Survey of recent developments," *Struct. Optim.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–23, 1997, doi: 10.1007/BF01197554.
- [8] D. E. P. J. S. Anagnostopoulos, "A numerical methodology for design optimization of Pelton turbine runners.," *ResearchGate*, no. August, pp. 1–9, 2006.
- [9] K. Michalkova and B. Bastl, "Imposing angle boundary conditions on B-spline/NURBS surfaces," *Comput. Des.*, 2015, doi: 10.1016/j.cad.2014.10.002.
- [10] C. Vessaz *et al.*, "Toward design optimization of a Pelton turbine runner," *HAL Arch.*, p. 18, 2017.
- [11] H. Brekke, Y. Wu, and B. Cai, "Design of hydraulic machinery working in sand laden water," *C.G. Duan, V.Y. Karelin (Eds.), Arasive Eros. Corros. Hydraul. Mach. 2 Imp. Coll. Press*, 2002.
- [12] A. Kjølle, "Vannkraftmaskiner. Universitetsforlaget," 1980.
- [13] K. Winkler, "Hydro-abrasive erosion: Problems and solutions[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science," 2014.
- [14] J. Yáñez, "Diseño Paramétrico De Álabes Para Turbinas Francis," Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [15] E. Bone, "Metodología de Diseño para una Turbina Francis mediante Diseño Paramétrico, Optimización Multiobjetivo y Simulación en CFD," Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [16] B. A. Nasir, "Design of High Efficiency Pelton Turbine for Micro-Hydropower Plant," *Int. J. Electr. Eng. Technol.*, no. 1, pp. 171–183, 2013.
- [17] T. Nigussie, A. Engeda, and E. Dribssa, "Design, Modeling, and CFD Analysis of a

- Micro Hydro Pelton Turbine Runner: For the Case of Selected Site in Ethiopia," *Int. J. Rotating Mach.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/3030217.
- [18] T. Zaw Oo, N. Nyi, and C. C. Khaing, "Design Calculation of Pelton Turbine for 220 kW," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 9, no. 7, 2019, doi: 10.29322/ijsrp.9.07.2019.p9131.

ANEXOS

ANEXO I: Programación en Matlab para el Estudio de sensibilidad de Parámetros en el Diseño de turbinas Tipo Pelton

A) Altura neta

```

% A) Alturas
clc
clear
close all

Hg = 15:1:1800; %metros
% Método 1 (Nasir Bilal)
Hn1= Hg-0.06 * Hg;
% Método 2 (Nigussie, Engeda & Dribssa)
Hn2= Hg-0.05 * Hg;

plot(Hg, Hn1, "b", Hg, Hn2, "g")
grid on
set(gcf, 'Color', 'w')
% Escalamiento rango operación T. Pelton acorde a límites de pérdidas
% mayor (6%)
axis([15 1800 14.1 1692 ])

title('Rango de operación turbina Pelton')
xlabel('Altura en bruto [m]')
ylabel('Altura neta Hn Hg [m]')
legend({'Nasir Bilal', 'Nigussie, Engeda & Dribssa'}, 'Location', 'northwest')

```

B) Potencia de entrada

```

% C) Potencia entrada
clc
clear
close all

% Método 1 (Nasir Bilal)
Hg = 15:1:1800; %metros
Hn= Hg-0.06 * Hg;
Q=0.95;
p=1000;
g=9.81;
Cn=0.98;
P1= p*g*(Cn^2)*Hn.*Q;

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
% Propuesta eficiencia = 0.86
n = 0.86;
P5=p*g*n.*Hn.*Q;

plot (Hn, P1, "b", Hn, P5, "r")
grid on
set (gcf, 'Color', 'w')

```

```

title('Potencia de entrada vs Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Potencia de entrada [W]')
legend({'Nasir Bilal', 'Zaw Oo, Nyi & Khaing'}, 'Location', 'northwest')

```

C) Velocidad específica

```

% D) Velocidad específica
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;          %Este rango de Hn se utiliza para Método 1,4 y
5
Q=0.95;

% Método 1 (Nasir Bilal)
nj=2;
Ns1=(85.49 * nj^0.5 ) ./ (Hn.^0.243);

% Método 4 (OLADE)
N=720;
Nq4= N*(Q^0.5) ./ (Hn.^0.75);

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
Ns5=85.49 ./ (Hn.^0.245);

plot(Hn,Ns1,"b",Hn,Nq4, "k", Hn, Ns5, "r")
grid on
set(gcf, 'Color', 'w')
title('Velocidad específica vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Velocidad específica')
legend('Nasir Bilal', 'OLADE', 'Zaw Oo, Nyi & Khaing')

% Método 3 (Zhang)

% Q[m3/s]= 0.95 variar en un rango de +- 75% Q
% Propuesta número de pasos N = 100
% Datos dados acorde al método enumerados a continuación:
zjet=2;
x=10000;
Q3 = linspace(0.24,1.67,100);
nq = (N * (Q3.^0.5))/((zjet^0.5)*x^0.75);
figure
plot(Q3,nq, 'c');
% axis([0.2 1.4 0.05 0.13])
grid on
set(gcf, 'Color', 'w')
title('Velocidad específica vs. Caudal')
xlabel('Caudal [m3/s]')
ylabel('Velocidad específica')
legend({'Zhang'}, 'Location', 'northwest')

```


D) Número de Boquillas

```
% E) Número de boquillas
clc
clear
close all

% Método 1 (Nasir Bilal)
% Qt[m3/s]= 0.95 variar en un rango de +- 75% Q
Qt = linspace(0.24,1.67,100);
nj=40; %número de boquillas, dato dado
%Se evalúa el caudal de la boquilla Qn
Qn= Qt/nj;

plot(Qn,Qt);
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Caudal de la turbina vs. Caudal de la boquilla')
xlabel('Caudal de la boquilla [m3/s]')
ylabel('Caudal de la turbina [m3/s]')
legend({'Nasir Bilal'},'Location','northwest')
```

E) Velocidad de la turbina

```
% F) Velocidad de la turbina
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;

% Método 1 (Nasir Bilal)
% Qt[m3/s]= 0.95 se propone mantener este dato cte
% para evaluar Velocidad de turbina respecto a altura neta
Qt = 0.95;
nj=2;
p=1000;
g=9.81;
Cn=0.98;

% Se evalúa la velocidad de la turbina N con respecto a la variación de
Hn
N1= ((85.49 * nj^0.5) .* Hn.^0.507) / (Cn*(p*g*Qt)^0.5);

% Método 2 (Nigussie, Engeda & Dribssa)
x=0.46; % Ratio de la rueda /velocidad del chorro (x=0.46 para máxima
potencia)
kn=0.98; % Coeficiente de velocidad de la tobera
D=1.3; % Diámetro de la rueda

% Se evalúa la velocidad de la turbina N con respecto a la variación de
Hn
N2= (60*x*kn*((2*g.*Hn).^0.5)) / (D*pi);

% Método 3 (Zhang)
nq=0.12;
```

```

Zjet=2;
% Se evalúa la velocidad de la turbina n3 con respecto a la variación de
Hn
n3=(nq.*Hn.^0.75)/((Qt/Zjet)^0.5);

% Método 4 (OLADE)
% Se evalúa la velocidad de la turbina N4 con respecto a la variación de
Hn
Dp=1.3;
Ku=0.445657;
N4=(84.54*Ku.*Hn.^0.5)/Dp;

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
% Eficiencia e = 0.86
e=0.86;
N5=(85.49.*Hn.^0.495)/((e*p*g*Qt)^0.5);
plot(Hn,N1,"b",Hn,N2,"g",Hn,n3,"c",Hn,N4,"k");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Velocidad de la turbina vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Velocidad de la turbina [rpm]')
legend({'Nasir Bilal','Nigussie, Engeda &
Dribssa','Zhang','OLADE'},'Location','northwest')

figure
plot(Hn,N1,"b",Hn,n3,"c");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Velocidad de la turbina vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Velocidad de la turbina [rpm]')
legend({'Nasir Bilal','Zhang'},'Location','northwest')

```

F) Velocidad del chorro

```

% G) Velocidad del chorro
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
% Cada método a continuación será evaluado respecto a la altura neta

% Método 1 (Nasir Bilal)
Cn=0.98;
Vj= Cn*((2*g.*Hn).^0.5);

% Método 2 (Nigussie, Engeda & Dribssa)
Kn=0.98;
Vjet= Kn*((2*g.*Hn).^0.5);

```

```

% Método 3 (Zhang)
Co=(2*g.*Hn).^0.5;

% Método 4 (OLADE)
Kc=0.97;
Ci=Kc*((2*g.*Hn).^0.5);

plot(Hn,Vj,"b",Hn,Vjet,"g",Hn,Co,"c",Hn,Ci,"k");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Velocidad del chorro vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Velocidad del chorro [m/s]')
legend({'Nasir Bilal','Nigussie, Engeda & Dribssa','Zhang','OLADE'},'Location','northwest')

```

G) Diámetro de la rueda

```

% H) Diámetro de la rueda
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
% Cada método a continuación será evaluado respecto a la altura neta

% Método 1 (Nasir Bilal)
X= 0.093324;
Cn=0.98;
Vj= Cn*((2*g.*Hn).^0.5);
Dr1=(38.6.*(Hn.^0.5))/N;

% Método 2 (Nigussie, Engeda & Dribssa)
D2=(37.7.*(Hn.^0.5))/N;

% Método 3 (Zhang)
Km=0.45;
Dm3=(Km*(2*g.*Hn).^0.5)/(pi*N);

% Método 4 (OLADE)
Q=0.95;
i=1;
Dp4=(((76*(i^0.5).*Hn.^0.75)/(N*(Q^0.5)))-
1.12).*(0.545.*(Q./(Hn.^0.5)).^0.5);

plot(Hn,Dr1,"b",Hn,D2,"g",Hn,Dm3,"c",Hn,Dp4,"k");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Diámetro del rodete vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Diámetro del rodete [m]')

```

```

        legend({'Nasir          Bilal', 'Nigussie,          Engeda          &
Dribssa', 'Zhang', 'OLADE'}, 'Location', 'northwest')

figure
plot(Hn, Dr1, "b", Hn, D2, "g");
grid on
set(gcf, 'Color', 'w')
title('Diámetro del rodete vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Diámetro del rodete [m]')
legend({'Nasir          Bilal', 'Nigussie,          Engeda          &
Dribssa', }, 'Location', 'northwest')

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
% Relacionando la velocidad tangencial de la rueda (u), la velocidad de
la turbina.
% Se propone generar un gráfico que relacione u con cada valor de
% Diámetro rueda obtenido en los 4 primeros métodos
u1=(pi.*Dr1*N)/60;
u2=(pi.*D2*N)/60;
u3=(pi.*Dm3*N)/60;
u4=(pi.*Dp4*N)/60;

figure
plot(u1, Dr1, "b", u2, D2, "g", u3, Dm3, "r", u4, Dp4, "k");
grid on
set(gcf, 'Color', 'w')
title('Diámetro del rodete vs. V tangencial [Zaw Oo, Nyi & Khaing]')
xlabel('Velocidad tangencial del rodete')
ylabel('Diámetro del rodete [m]')
legend({'Nasir          Bilal', 'Nigussie,          Engeda          &
Dribssa', 'Zhang', 'OLADE'}, 'Location', 'northwest')

```

H) Diámetro del chorro

```

% I) Diámetro del chorro
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
Q=0.95;
% Cada método a continuación será evaluado respecto a la altura neta
% Q' [m3/s]= 0.95 variar en un rango de +- 75% Q
Q1= linspace(0.24,1.67,100);
% Método 1 (Nasir Bilal)
Cn=0.98;
nj=2;
Vj= Cn*((2*g.*Hn).^0.5);
Dj1=((4*Q)./(pi*nj.*Vj)).^0.5;

% Método 2 (Nigussie, Engeda & Dribssa)

```

```

njet=2;
djet2=(0.54./(Hn.^0.25))*((Q/njet)^0.5);

% Método 6 (Solemslie)
% Z=2;
% dj6=Q./(Z*((2*g*Hn).^0.5));

% Método 4 (OLADE)
i= 1;
Dp=1.3;

d4=(0.545.*(Q./(Hn.^0.5)).^0.5);
% d41 =(Dp.*N.*Q.^0.5)./(75*Hn.^(3/4));

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
Zo=2;
d5=(0.545.*(Q./(Zo*(Hn.^0.5))).^0.5);

plot(Hn,Dj1,"b.",Hn,djet2,"g",Hn,d4,"k",Hn,d5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
axis([0 1800 0.00 0.15])
title('Diámetro del chorro vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Diámetro del chorro [m]')
legend('Nasir Bilal','Nigussie, Engeda & Dribssa','OLADE','Zaw Oo, Nyi
& Khaing')

```

I) Número de cucharas

```

% J) Número de cucharas
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
Q=0.95;
% Cada método a continuación será evaluado respecto a la altura neta

% Método 1 (Nasir Bilal)
X= 0.02086783

Cn=0.98;
nj=2;
Vj= Cn*((2*g.*Hn).^0.5);
Dr1=((60*X)/(pi*N))*Vj;
Dj1=((4*Q)/(pi*nj.*Vj)).^0.5;
nb1=15+(Dr1./(2*Dj1));

% Método 2 (Nigussie, Engeda & Dribssa)
njet=2;
djet2=(0.54./(Hn.^0.25))*((Q/njet)^0.5);

```

```

D2=(37.7.*(Hn.^0.5))/N;
Z2=(D2./(2*djet2))+15;

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
Zo=2;
d5=(0.545.*(Q./(Zo*(Hn.^0.5))).^0.5);
D=1.3;
Z5=(0.5*(D./d5))+15;
plot(Hn,nb1,"b",Hn,Z2,"g",Hn,Z5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Número de cucharas vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Número de cucharas')
legend({'Nasir Bilal','Nigussie, Engeda & Dribssa','Zaw Oo, Nyi &
Khaing'}, 'Location','northwest')

% Método 3 (Zhang)
% Q[m3/s]= 0.95 variar en un rango de +- 75% Q
% Propuesta número de pasos N = 100
% Datos dados acorde al método enumerados a continuación:

% Q3 = linspace(0.24,1.67,100);
% zjet=40;
% x=10000;
% nq = (N * Q3.^0.5)/((zjet^0.5)*x^0.75);
% N3=15.+(0.62./nq);
%
% figure
% plot(Q3,N3,'c');
% grid on
% set(gcf,'Color','w')
% title('Número de cucharas vs. Caudal')
% xlabel('Caudal [m3/s]')
% ylabel('Número de cucharas')
% legend('Zhang');

% Método 4 (OLADE)
% Da=1.3;
% Dp=2;
% Ku=1;
% Kp=0.65;
% Teta = linspace(2*pi,4*pi,100);
% Z4=(2*pi)./(Kp.*(Teta-2*(Da/Dp)*Ku*sin(Teta/2)));
%
% figure
% plot(Teta,Z4,'k');
% grid on
% set(gcf,'Color','w')
% title('Número de cucharas vs. phi')
% xlabel('phi')
% ylabel('Número de cucharas')
% legend('OLADE');

```

J) Ancho de la cuchara

% K) Ancho de la cuchara

```

clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
Q=0.95;

% Método 1 (Nasir Bilal)
Cn=0.98;
nj=2;
Vj= Cn*((2*g.*Hn).^0.5);
Dj=((4*Q)./(pi*nj.*Vj)).^0.5;
Bw1= 3.4*Dj;

% Método 3 (Zhang)
Km=0.47;
Dm=(Km*((2*g.*Hn).^0.5))/(pi*N);
zjet=2;
x=10000;
nq = (N * (Q^0.5))/((zjet^0.5)*x^0.75);
phi=0.11;
B3=(nq*Dm)/(2.63*Km*(phi^0.5));

% Método 4 (OLADE)
d4=(0.545.*(Q./(Hn.^0.5)).^0.5);
b4=(4*d4)-(2.5*d4);

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
Zo=2;
d5=(0.545.*(Q./(Zo*(Hn.^0.5))).^0.5);
b5=(4*d5)-(2.8*d5);

plot(Hn,Bw1,"b",Hn,B3,"c",Hn,b4,"k",Hn,b5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Ancho de cuchara vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Ancho de cuchara [m]')
legend('Nasir Bilal','Zhang','OLADE','Zaw Oo, Nyi & Khaing')

figure
plot(d5,b5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Ancho de cuchara vs. Diámetro del chorro')
xlabel('Diámetro del chorro [m]')
ylabel('Ancho de cuchara [m]')
legend({'Zaw Oo, Nyi & Khaing'},'Location','northwest')

```

K) Largo de la cuchara

```

% L) Largo de la cuchara
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
Q=0.95;

% Método 1 (Nasir Bilal)
Cn=0.98;
nj=2;
Vj= Cn*((2*g.*Hn).^0.5);
Dj=((4*Q)./(pi*nj.*Vj)).^0.5;
BL1= 3*Dj;

% Método 2 (Nigussie, Engeda & Dribssa)
D=(37.7.*(Hn.^0.5))/N;
h2=0.34*D;

% Método 4 (OLADE)
d4=(0.545.*(Q./(Hn.^0.5)).^0.5);
L4=(3.5*d4)-(2.5*d4);

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
Zo=2;
d5=(0.545.*(Q./(Zo*(Hn.^0.5))).^0.5);
L5=(3.3*d5)-(2.28*d5);

% Método 6 (Solemslie)
% Se obtiene un valor puntual
Dc=1.3;
Dr=0.95;
L6=(Dc-Dr)/2;

plot(Hn,BL1,"b",Hn,h2,"g",Hn,L4,"k",Hn,L5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Largo de cuchara vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Largo de cuchara [m]')
legend({'Nasir Bilal','Nigussie, Engeda & Dribssa','OLADE','Zaw Oo, Nyi & Khaing'},'Location','northwest')

figure
plot(d5,L5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Largo de cuchara vs. Diámetro del chorro')
xlabel('Diámetro del chorro [m]')
ylabel('Largo de cuchara [m]')
legend({'Zaw Oo, Nyi & Khaing'},'Location','northwest')

```

L) Profundidad de la muesca


```

% M) Profundidad de la muesca
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
Q=0.95;

% Método 4 (OLADE)
d4=(0.545.*(Q./(Hn.^0.5)).^0.5);
L4=(0.6*d4)-(0.3*d4);

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
Zo=2;
d5=(0.545.*(Q./(Zo*(Hn.^0.5))).^0.5);
L5=(0.625*d5)-(0.44*d5);

plot(Hn,L4,"k",Hn,L5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Profundidad de muesca vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Profundidad de muesca [m]')
legend('OLADE','Zaw Oo, Nyi & Khaing')

figure
plot(d5,L5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Profundidad de muesca vs. Diámetro del chorro')
xlabel('Diámetro del chorro [m]')
ylabel('Profundidad de muesca [m]')
legend({'Zaw Oo, Nyi & Khaing'},'Location','northwest')

```

M) Ancho de la muesca

```

% N) Ancho de la muesca
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
Q=0.95;

% Método 4 (OLADE)

```

```

d4=(0.545.*(Q./(Hn.^0.5)).^0.5);
L4=(1.2*d4)-(1.1*d4);

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
% Este método evalúa 2 fórmulas
Zo=2;
d5=(0.545.*(Q./(Zo*(Hn.^0.5))).^0.5);
L5=(1.6*d5)-(1.12*d5);
M=(1.1*d5)+5;

plot(Hn,L4,"k",Hn,L5,"r",Hn,M,"c");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Ancho de la muesca vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Ancho de muesca [m]')
legend({'OLADE','Zaw Oo, Nyi & Khaing 1','Zaw Oo, Nyi & Khaing
2'},'Location','southwest')

figure
plot(Hn,L4,"k",Hn,L5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Ancho de muesca vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Ancho de cuchara [m]')
legend('OLADE','Zaw Oo, Nyi & Khaing')

figure
plot(d5,M,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Ancho de muesca vs. Diámetro del chorro')
xlabel('Diámetro del chorro [m]')
ylabel('Ancho de muesca [m]')
legend({'Zaw Oo, Nyi & Khaing'},'Location','northwest')

```

N) Profundidad de la cuchara

```

% O) Profundidad de la cuchara
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
Q=0.95;

% Método 1 (Nasir Bilal)
Cn=0.98;
nj=2;
Vj= Cn*((2*g.*Hn).^0.5);
Dj=((4*Q)./(pi*nj.*Vj)).^0.5;

```

```

Bd1= 1.2*Dj;

% Método 4 (OLADE)
d4=(0.545.*(Q./(Hn.^0.5)).^0.5);
E4=(1.3*d4)-(0.85*d4);

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
Zo=2;
d5=(0.545.*(Q./(Zo*(Hn.^0.5))).^0.5);
E5=(1.2*d5)-(0.8*d5);

plot(Hn,Bd1,"b",Hn,E4,"k",Hn,E5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Profundidad de la cuchara vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Profundidad de cuchara [m]')
legend({'Nasir Bilal','OLADE','Zaw Oo, Nyi & Khaing'},'Location','northwest')

figure
plot(d5,E5,"r");
grid on
set(gcf,'Color','w')
title('Profundidad de cuchara vs. Diámetro del chorro')
xlabel('Diámetro del chorro [m]')
ylabel('Profundidad de cuchara [m]')
legend({'Zaw Oo, Nyi & Khaing'},'Location','northwest')

```

O) Altura de la Cuchara

```

% P) Altura de la cuchara
clc
clear
close all

Hg = linspace(15,1800,100); %Rango de altura de operación T. Pelton
[m]
Hn= Hg-0.06 * Hg;
g=9.81;
N=720;
Q=0.95;

% Método 2 (Nigussie, Engeda & Dribssa)
D=(37.7.*(Hn.^0.5))/N;
A2=0.34*D;

% Método 4 (OLADE)
d4=(0.545.*(Q./(Hn.^0.5)).^0.5);
A4=(1.6*d4)-(1.7*d4);

% Método 5 (Zaw Oo, Nyi & Khaing)
Zo=2;
d5=(0.545.*(Q./(Zo*(Hn.^0.5))).^0.5);
A5=(1.75*d5)-(2.5*d5);

plot(Hn,A2,"g",Hn,A4,"k",Hn,A5,"r");
grid on

```

```
set(gcf, 'Color', 'w')
title('Altura de la cuchara vs. Altura neta')
xlabel('Altura neta [m]')
ylabel('Altura de la Cuchara [m]')
legend({'Nigussie, Engeda & Dribssa', 'OLADE', 'Zaw Oo, Nyi & Khaing'}, 'Location', 'northwest')
```