



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGÍA ENTRE UN APROVECHAMIENTO HIDROENERGÉTICO Y TURBOMÁQUINAS

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

HÉCTOR REYNALDO ARÉVALO LLUMIPANTA
hector.arevalo@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. VÍCTOR HUGO HIDALGO DIAZ, DSc.
victor.hidalgo@epn.edu.ec

Quito, Marzo, 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Héctor Reynaldo Arévalo Llumipanta**, bajo mi supervisión.

Ing. Víctor Hidalgo, DSc

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Héctor Reynaldo Arévalo Llumipanta**, 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.

Héctor R. Arévalo LI.

DEDICATORIA

A mi madre por su incondicional apoyo en los momentos difíciles.

A mi esposa por su infinito amor.

AGRADECIMIENTO

A Dios por la Sabiduría para crear un mundo mejor
A mí estimada Escuela Politécnica Nacional por los conocimientos impartidos

ÍNDICE

Certificación	i
Declaración	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice	v
Resumen	vii
Abstract	viii
Introducción	1
Objetivo General	6
Objetivos Específicos	6
Alcance	6
Justificación e importancia	7
1. MARCO TEÓRICO	8
1.1. Generación de energía hidroeléctrica	8
1.1.1. Central Hidroeléctrica	9
1.1.2. Centrales hidroeléctricas en el Ecuador	11
1.1.3. Clasificación de las centrales hidroeléctricas	11
1.2. Principios de Hidráulica	12
1.2.1. Descripción de parámetros y variables	12
1.2.2. Análisis energético	13
1.2.3. Conservación de la energía	14
1.2.4. Conservación de la masa	15
1.2.5. Ecuación de la energía para turbinas	16
1.2.6. Teoría de semejanza	18
1.3. Turbinas hidráulicas	20
1.3.1. Triángulo de velocidades	21
1.3.2. Clasificación de las turbinas	23
1.3.3. Parámetros de la turbina	24
1.3.4. Turbinas Pelton	29
1.3.5. Turbinas de reacción: Francis	30
1.3.6. Turbinas Kaplan	31
2. METODOLOGÍA	31
2.1. Datos iniciales	31
2.2. Selección y dimensionamiento	33

2.2.1.	Determinación de las pérdidas de carga por fricción.....	35
2.2.2.	Dimensiones de la Turbinas Pelton.....	36
2.2.3.	Turbinas Francis.....	38
2.2.4.	Dimensiones de la Turbina Kaplan.....	39
2.2.5.	Cavitación en turbinas.....	41
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
3.1.	Casos de análisis y resultados.....	42
3.2.	Discusión.....	47
4.	CONCLUSIONES.....	48
	Referencias Bibliográficas.....	50
	ANEXO A: Modelado matemático para turbinas hidráulicas.....	51
A.1.	Modelos matemáticos para dimensiones de Turbinas Pelton.....	51
A.2.	Modelo matemático para dimensionar Turbinas Francis.....	54
A.3.	Modelos matemáticos para dimensionar Turbinas Kaplan.....	57
	ANEXO B: Desarrollo de lenguaje de programación para aprovechamiento hidropotencial.....	62
B.1.	Programación para la selección del tipo de turbina.....	62
B.2.	Programación para dimensionar turbinas tipo Pelton.....	68
B.3.	Programación para dimensionar turbinas Tipo Francis.....	71
B.4.	Programación para dimensionar turbinas tipo Kaplan.....	74
	ANEXO No 3: Manual de Usuario para el Programa Pot_Hidroenergía V. 1.0.....	77

RESUMEN

El presente estudio expone un procedimiento para determinar el potencial hidroenergético que lleva una corriente hídrica natural y para la cual se fija el tipo de turbomáquina más adecuado con su dimensionamiento respectivo. El proceso inicia con el estudio de bibliografía científica sobre investigaciones a nivel mundial en relación a la generación de energía para establecer la importancia del aprovechamiento del potencial hídrico en las centrales hidroeléctricas. Se identifican los componentes mecánicos, se determina parámetros y variables de funcionamiento: altura y caudal, y se analiza la transferencia de energía hidráulica en energía mecánica para determinar el tipo de turbina más adecuado junto con su dimensionamiento. Se incluye las pérdidas por fricción en la tubería de conducción y accesorios desde el tanque de presión hasta las turbinas y la presión de descarga en la salida. El estudio se basa en bibliografía especializada detallada en la parte correspondiente y estudios como: "Hydropower: Dimensions of social and environmental coexistence", Hydropower Engineering, entre otros; esto permite generar modelos para encontrar el tipo de turbina entre Pelton, Francis y Kaplan adecuadas para una aplicación particular. El resultado de este análisis determina el tipo de turbina que obtenga el mayor porcentaje de transferencia de energía, las dimensiones de la posible casa de máquinas, se da a notar que el estudio se relaciona con los posibles efectos de cavitación y de equilibrio para una etapa conceptual de diseño.

Palabras clave: Central hidroeléctrica, Máquina hidráulica, Potencial hidráulico, Turbina.

ABSTRACT

The present research presents a procedure to determine the hydropower potential that carries a natural water flow for the type that is fixed the type of turbo machine more suitable with its respective dimensioning. The process started with the study of scientific literature on worldwide research in relation to the generation of energy to establish the importance of the use of water potential in hydroelectric plants. It identifies the mechanical components, determines the parameters and the operating variables: height and flow, and fix the transfer of hydraulic energy into mechanical energy to determine the type of turbine more convenient together with its dimensioning. Friction losses are included in the piping and accessories from the pressure tank to the turbines and the discharge pressure at the outlet. The study is based on detailed technical literature shown in the relevant section and studies as, for "Hydroelectric: Dimensions of social and environmental coexistence", Hydroelectric Engineering, among others; This allows generating models to find the type of Pelton, Francis and Kaplan turbine suitable for a particular application. The result of this analysis determines the type of turbine that obtains the highest percentage of energy transfer, the dimensions of the possible house of the machines; a note is given that the study is related to the possible effects of cavitation and equilibrium for a design stage.

Keywords: Hydraulic machine, hydraulic potential, hydropower plant, turbine.

MODELACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE ENERGÍA ENTRE UN APROVECHAMIENTO HIDROENERGÉTICO Y TURBOMÁQUINAS

INTRODUCCIÓN

La presente investigación es un estudio de la capacidad hidropotencial de una corriente de fluido a la cual se la denomina río. Este documento inicia por la fundamentación teórica en la que se expone el potencial energético que tiene una corriente hidráulica; posteriormente se expone el contexto global del aprovechamiento energético; se determina el potencial hídrico particular con lo se puede estimar la energía aprovechable ligada a factores técnicos y económicos, no solo de insumos como fuentes de materia prima, materiales de construcción y elementos hidromecánicos sino también en comparación con otras fuentes de energía.

A nivel internacional, en los últimos años las aportaciones científicas en ingeniería sobre la generación energética en base a hidroeléctricas y consumo indican que se ha promovido el desarrollo de tecnologías en esta área para que las fuentes de energía sean correctamente aprovechables y su utilización no afecte al medio ambiente ya que permite considerar recursos naturales que sean más amigables con el mismo. Entre estos aportes se encuentra Seifried D. y Witzel W. (2010) quienes indican que:

Se prevé que la energía hidroeléctrica absorberá mayor parte de la electricidad generada a partir de energías renovables. Sin ir tan lejos en 2005, unos 2950 TWh de energía eléctrica se genera a partir de la energía hidroeléctrica energía renovable y el 16% de la energía eléctrica total en todo el mundo, un poco más que la energía nuclear, que proporcionó 2771TWh en 2005. (Darmawi, Riman, Siti, & Momon, 2012, pág. 213).

Así también, para investigadores como Darmawi et al (2012) la mayor fuente a nivel mundial de generación de electricidad es la energía hidroeléctrica, la utilización por

países es: Canadá con 60%, Brasil 84%, Suiza 55%, Islandia 80% y Noruega 98%. Se estima que el potencial técnico factible a nivel mundial es de 14.218.000 GWh/año, distribuyéndose por regiones de la siguiente manera Asia 6.800.000 GWh/año, América del Sur 2,700,000 GWh/año, África 1,750,000 GWh/año, Norte y Centroamérica 1,663,000 GWh/año, Europa 1,035,000 GWh/año.

En la investigación “A risk decision model of the contract generation for hydropower generation companies in electricity markets” (Ping'an, Weiguo, & Bin, 2012, págs. 90,91,96). Se expone que la mayoría de los mercados de electricidad ofrecen tres tipos de operaciones de energía: el comercio al contado, el comercio por contrato y el comercio a futuro. Los contratos a largo plazo proporcionan un almacenamiento virtual de electricidad que podría evitar la fluctuación de precios causada por el desajuste entre la oferta y la demanda a corto plazo y también puede utilizarse como una herramienta importante para reducir el riesgo en los mercados de la electricidad, el riesgo es debido a que en operación una central que se ve afectada por factores inciertos como la entrada de agua en su reservorio, eficiencia, el precio de la electricidad, la demanda de carga, etc., Se eligen dos factores principales inciertos: eficiencia e ingreso de fluido a la planta. La entrada se tiene de acuerdo a previsiones mensuales, con la ayuda del método de los mínimos cuadrados se diagrama una curva de expectativa matemática de la variable n bajo un H .

En lo referente a Suramérica se revisó el trabajo “An overview of small hydropower plants in Colombia: Status, potential, barriers and perspectives” (Morales, Alvarez, Acevedo, & Díaz, 2015, págs. 1650-1657). Los autores hacen una clasificación de las pequeñas centrales en Pico con 10 KW, Micro con 100 KW y Mini con 1 MW, se tiene una planeación para la expansión de la generación de energía del 2011 al 2025 para incrementar la capacidad instalada en 7914 MW de los cuales 6098 MW sean de plantas hidroeléctricas, todo esto gracias a su privilegiada posición geográfica, este potencial ha sido ampliamente explorado en grandes proyectos para beneficiar a grandes ciudades, en otras regiones fuera de la red energética se tienen varios pequeños proyectos mientras que hay zonas que se desconoce el potencial. El potencial hidroeléctrico en Colombia se estima en 93.085 MW independientemente de condiciones ambientales. La capacidad total instalada en el 2012 fue de 14.361 MW de los cuales 9.185 son de hidroenergía. Las barreras existentes para desarrollar todo el potencial se pueden clasificar en legales, institucionales; y, técnicas y tecnológicas. En lo legal, es la falta de políticas claras que ofrezcan incentivos firmes y consistentes para el desarrollo de energías no alternativas, en las barreras institucionales mediante la falta de interés por parte de los funcionarios encargados de distribución eléctrica en

la red nacional para atender los requerimientos zonales; y, técnicos y tecnológicos debido a la falta de conocimiento del potencial hídrico e ingeniería técnica especializada en aprovechar los diversos escenarios, En cuanto a las barreras económicas hay una alta inversión unitaria por KW instalado, estudios costosos en relación a la inversión total y la ineficiencia administrativa y debilidad financiera para desarrollar proyectos hidroenergéticos así también la pobreza de las comunidades en donde se encuentran los recursos hídricos no permiten cubrir los costos iniciales del proyecto.

Una vez que se tienen los estudios técnicos y económicos, evaluando tanto beneficios como barreras, se procede al diseño de la planta hidroeléctrica, de acuerdo con esto (Guedes, Vieira, Lisboa, & Saldanha, 2015, págs. 702-710) en su trabajo “A continuous compact model for cascaded hydro-power generation and preventive maintenance scheduling”. Presentan el estudio para aprovechar el potencial hidroeléctrico natural en la misma Cuenca mediante el arreglo de varias centrales hidroeléctricas que pueden ser en cascada, por esta razón se debe incluir en un modelo las principales características de cada planta, eficiencia de la generación de la energía, ecuación de conservación del flujo de agua, restricciones ambientales y programa de mantenimiento preventivo.

En referencia a nuestro contexto y de acuerdo al Consejo Nacional de Electrificación (CONELEC, 2013), para Ecuador el potencial hídrico estimado es del orden de 16.500 m³/s, distribuido en dos vertientes, la primera denominada Amazónica con el 71% y la segunda correspondiente al Pacífico con el 29% de la capacidad total; mientras que el potencial hidroeléctrico estimado es 90.976 MW. El potencial aprovechado en el Ecuador apenas es el 10,3% del potencial técnica y económicamente utilizable, esto es relativo en función de la variabilidad del entorno económico energético mundial.

De los datos obtenidos para el Balance Nacional de Energía, Septiembre 2016 (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2016) para la generación energética del Ecuador en el año 2016 donde se observa que la generación con energía no renovable (uso de hidrocarburos) suministran el 47.54% del total de la potencia nacional repartida en generación térmica de Motores de Combustión Interna, turbogas y turbovapor, la generación mediante Energía Renovable es del orden del 52.46%, en esto la generación hidráulica es del orden del 49.82%.

Las principales categorías de consumo en Ecuador son: sector residencial 36.74%; Comercial 20.08% e Industrial 26.99% donde el principal es el sector residencial con el 36,74% y el sector industrial con 20.08%.

De acuerdo con el Plan Maestro de Electrificación 2013-2022, Vol. III, Perspectiva y expansión del sistema eléctrico ecuatoriano, en el Ecuador existen 16 centrales de pequeña mediana y gran capacidad (1 – 100 MW), y 39 centrales pequeñas. Entre las principales está la central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair con 1500 MW; Marcel Laniado con 213 MW; Agoyán 160 MW; San Francisco 230 MW; Mazar 183 MW; Paute 1075 MW; Coca Codo Sinclair 1500 MW; Minas San Francisco 275 MW; Delsi Tanisagua 180 MW; Toachi Pilaton 254 MW; entre otras, esto de acuerdo al documento (CONELEC, 2013) y actualizado con (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2015)

A fin de realizar una pre selección de proyectos de aprovechamiento hídrico y de acuerdo con el Plan Maestro de Electrificación (CONELEC, 2013, pág. 177), se toma en consideración los siguientes aspectos:

- Vías de acceso: tiene que ver con las condiciones de las vías de acceso, longitud de las vías requeridas ya sea por mejorar o por construir. Se asigna un peso de 10% en la evaluación del proyecto.
- Aspectos socio ambientales: se estima longitud aproximada de túneles, altura de presa, longitud de líneas de transmisión y poblaciones cercanas; y se toma en cuenta el posible impacto ambiental y social de las obras, se asigna un peso de 25% en la evaluación total de aprovechamientos.
- Aspectos técnicos: geología, hidrología, emplazamiento y complejidad de la ejecución del proyecto, se asigna un 25% en la evaluación.
- Aspectos económicos: en función de aspectos aproximados de obra. Se asigna un 25%.
- Evacuación de energía eléctrica: a partir de un trazado básico de la línea de transmisión se establece la longitud, voltaje de transmisión, y la posibilidad de ampliar ciertas subestaciones hacia el Sistema Nacional Interconectado – SIN, se establece un 10%.
- Complementariedad Hidrológica: se requiere dar prioridad a los proyectos de la vertiente del Pacífico sobre los proyectos de la vertiente Amazónica, se asigna un peso del 5%.

Como información adicional y de acuerdo a lo revisado en (Warnick, 1984, p. 217), el análisis económico implica la medida de los beneficios y los gastos en el desarrollo de la planta hidroeléctrica, los beneficios son los bienes y servicios producidos por el desarrollo y los costos son los bienes y servicios usados en la construcción y mantenimiento de la Planta hidroeléctrica.

Para establecer el flujo económico se utiliza un diagrama que muestre los costos y los beneficios que se incurren en la mayoría de Plantas Hidroeléctricas, e involucran conceptos como Valor presente, valor futuro, Valor actual neto, rentabilidad, etc. Y cuyas expresiones matemáticas son conocidos de estudios de ingeniería económica.

La estimación de costos de acuerdo a la bibliografía revisada en (Warnick, 1984, p. 237), establece que los estudios económicos y estimación de costos son función del tipo de estudios: estudio de reconocimiento, estudios de factibilidad o estudios de diseño, con esto se tiene la precisión con que el estudio es realizado:

Los principales costos a determinar son:

- Suelo y derechos del suelo
- Estructuras y facilidades
- Reservorios, presa y conductos del agua
- Turbinas y generadores
- Equipos y accesorios eléctricos
- Equipos de energía misceláneos
- Calles, pasajes y puentes

De acuerdo con un estudio publicado en (Warnick, 1984, p. 245), y en función del factor de capacidad de la planta el costo para la energía hidráulica está entre 3 y 12 USD cent / KWh; energía mediante turbinas de gas está entre 5 y 10 USD cent / KWh; el costo de energía mediante ciclo combinado está entre 4 y 8 USD cent / KWh; el costo mediante energía nuclear está entre 2 y 5 USD cent / KWh.

Objetivo General

Modelar la transferencia de energía entre un aprovechamiento hidroenergético y turbomáquinas, tomando en cuenta el potencial hidráulico.

Objetivos Específicos

- Determinar e identificar las variables independientes y dependientes que intervienen en el modelado de las turbomáquinas.
- Modelar un sistema hidroenergético utilizando herramientas computacionales.
- Determinar el potencial energético de aprovechamientos hidráulicos.
- Determinar los mecanismos de transferencia de energía en un sistema hidráulico.
- Plantear diferentes escenarios a fin de determinar el desempeño óptimo de la turbina.

Alcance

En el alcance de estudio de la presente tesis se desarrolla el fundamento teórico como base para modelar el comportamiento del sistema fluido y las turbinas en un sistema hidroenergético, identificando las variables independientes y dependientes que intervienen en el modelado matemático de las turbinas.

Se parte de un caudal y altura aprovechables como dato de estudios anteriores sin profundizar en detalles de cómo se obtienen tales datos, se establece un trazado preliminar para determinar longitud de la tubería de presión.

Se elabora el concepto que determine el criterio para el modelado de la transferencia de energía, desarrollando la sistematización de los modelos en un programa de cálculo para ser ejecutado por un ordenador.

Se establecen criterios de evaluación económica preliminar que debe ser corroborado con proveedores especializados.

Se realizará la evaluación del proyecto a fin de generar las conclusiones y recomendaciones a aplicarse.

Justificación e importancia

De acuerdo con los enunciados y estudios citados para Ecuador se tiene la ventaja de la geografía y los recursos hídricos, razón por la que se requiere métodos de análisis y diseño de sistemas energéticos enfocados al aprovechamiento de energía renovable.

Se desea implementar mediante técnicas automatizadas de cálculo, las herramientas informáticas que permitan analizar mediante funciones hidráulicas que cuantifiquen la transferencia de energía y predecir el comportamiento de los sistemas hidroenergéticos; además se requiere fomentar el uso de fuentes de energías que sean de bajo impacto medioambiental y reducir el uso de aquellas que utilicen recursos fósiles.

Este trabajo y los resultados obtenidos en este sentido, permitirán determinar de manera eficiente las posibilidades de aprovechamiento de este potencial hidroenergético, a fin de utilizar de manera eficiente la energía disponible con el uso eficiente de los recursos hídricos reduciendo costos de producción de energía y minimizando el impacto al medioambiente.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Generación de energía hidroeléctrica

En este capítulo, una vez conocido el estado actual de la generación eléctrica y enfocando en la energía hidroeléctrica, a través de investigaciones a nivel mundial y en Ecuador, se enfoca el estudio a la definición de energía hidroeléctrica y conocer una Planta hidroeléctrica, sus componentes, clasificación por ubicación, por potencia generada

De acuerdo con el Atlas Hidropotencial de Colombia (Unidad de Planeación Minero Energético, 2015, págs. 24, 25) se define:

Hydroenergía es la energía que tiene el agua cuando se mueve a través de un cauce o cuando se encuentra embalsada (energía potencial) a cierta altura y se dejar caer para producir energía eléctrica. Esta fuente de energía renovable se encuentra disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua; la utilización más significativa la constituyen las centrales hidroeléctricas, y para su desarrollo requiere construcciones que varían de acuerdo con las condiciones del entorno.

De acuerdo con esto, la energía que está presente en una corriente de agua permite aprovechar la misma en energía mecánica mediante la inclusión de paletas alrededor de un eje que es la forma de trabajo de los molinos conocidos desde la antigüedad, la diferencia de nivel de suelo hace que fluyan las corrientes de agua desde un nivel superior a uno inferior, para aprovechar el potencial de la corriente en energía eléctrica se usan las centrales hidroeléctricas. Una central hidroeléctrica aprovecha el cambio de energía potencial en energía cinética, lo que se logra mediante el paso de agua movido por la diferencia de nivel, el agua que cae mueve las paletas de la turbina cuyo eje está acoplado al generador, el que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. El generador consta de dos partes: una parte móvil o rotor y otra estática llamada estator, cuando está en funcionamiento, el rotor genera un campo magnético que actúa como inductor para que el estator transforme la energía mecánica en energía eléctrica; se requiere redes de transmisión eléctrica para transferir la energía producida. Se tienen otros sistemas auxiliares para la turbina como son lubricación, enfriamiento, protección por alta vibración o temperatura, etc.

1.1.1. Central Hidroeléctrica

De acuerdo al Atlas Hidroeléctrico (Unidad de Planeación Minero Energético, 2015, pág. 26), una Central Hidroeléctrica es una instalación industrial para aprovechar el movimiento de fluido de un nivel superior a un nivel inferior para transformarlo en energía eléctrica utilizando turbinas acopladas al eje del generador, una vez que el fluido pasa por la turbina el agua regresa al cauce de modo que si se dan las condiciones se dan se puede volver a utilizar aguas abajo para generación o para consumo.

Los componentes de una Central Hidroeléctrica para fines del presente estudio se toman de acuerdo a lo mostrado en el Atlas Hidroeléctrico (Unidad de Planeación Minero Energético, 2015, pág. 26). Se establece los siguientes conceptos:

Presa o Captación, corresponde al sitio donde se contiene el agua de un río y se elige ubicar la toma de fluido de la fuente de fluido. Se debe determinar en función de la facilidad para ubicar los sistemas de captación como compuertas de captación, compuertas de entrada, compuerta de desfogue y rejilla de captación.

Conducción: corresponde a los canales, tubería de presión, distribuidores, que sirven para llevar el fluido desde la captación hacia la turbina y devolverla al río.

Tubería de presión: Conduce el fluido desde el tanque de presión hacia casa de máquinas, debe ser de acero para soportar alta presión de la columna estática de fluido, los fenómenos de presión de la succión de la turbina y durabilidad del sistema.

Distribuidor: válvulas de bloqueo: en el caso de presentarse varias unidades de generación o turbinas se debe tener accesorios que permitan distribuir y controlar el fluido hacia cada turbina.

Sala de máquinas: es el edificio donde se ubican los equipos como tableros de control, regulación, controladores de válvulas, equipos auxiliares, etc.

Turbina hidráulica: es el elemento que permite transmitir la energía cinética del fluido mediante rotación del eje mecánico que comunica con el generador eléctrico y obtener energía eléctrica, puede estar localizada de forma horizontal, vertical y su forma depende de las características de la central: Pelton, Francis, Kaplan, etc., corresponde al equipo que recibe la energía cinética de la corriente de agua.

Generador, es un equipo eléctrico que convierte la energía cinética en energía eléctrica mediante el campo magnético, consta del rotor y el estator.

Las partes principales que son parte de una central Hidroeléctricas se indican en la

Figura 1.1, que corresponde a una ilustración genérica

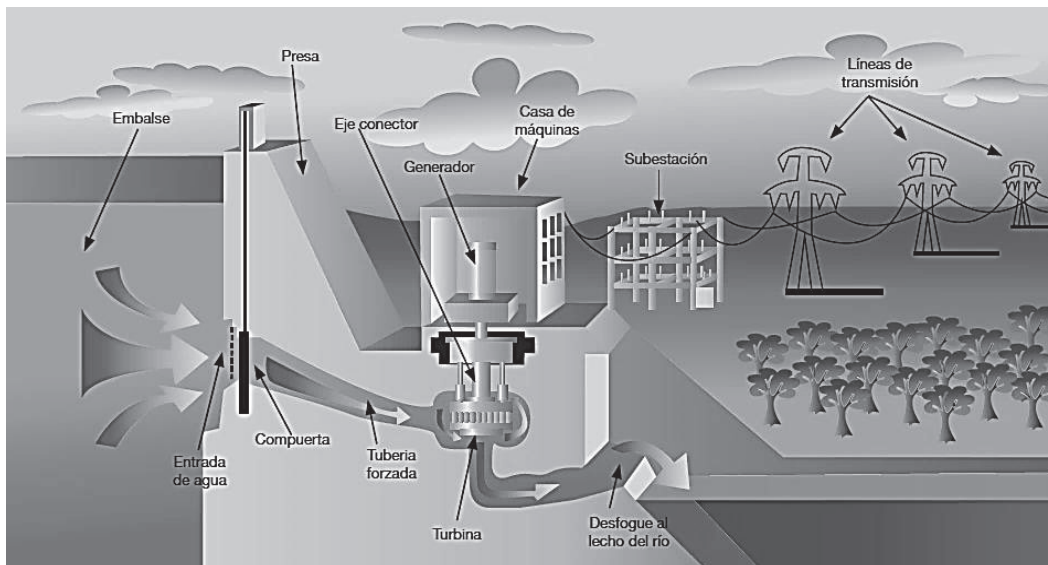


Figura 1.1. Componentes de una central hidroeléctrica.
(Fuente: Atlas de Potencial Hidroenergético (Unidad de Planeación Minero Energético, 2015)

Se procede a las definiciones respectivas para identificar el tipo de Centrales y de acuerdo al Atlas de Potencial Hidroenergético (Unidad de Planeación Minero Energético, 2015)

Central de agua fluvente: Son aquellas en las cuales se aprovecha el agua apenas se dispone, no cuentan con un embalse reservorio por lo tanto su generación depende de la fluidez del agua en la época del año, época de lluvias y sequias tiene un caudal variable.

Central de embalse o de regulación: En este tipo de centrales cuentan con un embalse de un volumen considerable de agua, formando lagos artificiales, por lo tanto, el agua almacenada llega a la altura máxima y desciende hasta la turbina

Central de acumulación por bombeo: Ocupa un embalse superior y uno inferior además de un sistema de bombeo para recircular el agua usada para generación en horas en los cuales la demanda es menor.

1.1.2. Centrales hidroeléctricas en el Ecuador

De acuerdo con la información mostrada en (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2015), en el Ecuador se tienen los siguientes tipos de turbinas.

Coca Codo Sinclair: La configuración es: desde el embalse compensador el agua es conducida mediante dos tuberías de presión hasta la casa de máquinas donde se dividen en cuatro ramas que se conectan a ocho (8) turbinas Pelton haciendo girar el generador de 187.5 MW cada uno para producir una potencia de 1500 MW, en la casa de máquinas a una profundidad de 500 m, y tiene dos cavernas: una de generadores de 26 m de ancho, 46.8 m de altura y 212 m de longitud.

Central hidroeléctrica Manduriacu: Está conformado por una presa a gravedad de hormigón, altura aproximada de 61.4 m, 2 vertederos de excesos, 2 tuberías de presión de 4.5 metros de diámetro y longitud 49.5 m, la altura máxima de 61.4 m sobre la cimentación. La casa de máquinas aloja dos grupos turbina – generador de tipo Kaplan de 32.5 MW cada una para un caudal total de 210 m³/s y una altura neta de 33.70 m.

Central Hidroeléctrica San Francisco: Tiene una potencia instalada de 230 MW, tiene dos turbinas tipo Francis eje vertical de 115 MW cada una, operan con un caudal de 58 m³/s y salto neto de 213.4 m.

Central Hidroeléctrica Isimanchi: Está localizada en la provincia de Loja, es una central que aprovecha el fluido del río Isimanchi con un flujo útil de 5 m³/h y potencia de 2,25 KW. Tiene 2 turbinas tipo Francis de 1,9 m³/h y altura de 59,78 m.

1.1.3. Clasificación de las centrales hidroeléctricas

De acuerdo con el Atlas de Potencial Hidroenergético (Unidad de Planeación Minero Energético, 2015, pág. 28), En función de la capacidad de generación la clasificación es la siguiente:

- Pico céntrales: cuya capacidad instalada está entre 0.5 y 5 kW. Aplica en zonas no interconectadas a una red.
- Micro centrales: capacidad instalada entre 5 y 50 kW
- Mini centrales: capacidad instalada entre 50 y 500 kW
- Hidroeléctricas: capacidad instalada entre 500 y 20.000 kW
- Centrales Hidroeléctricas: capacidad instalada mayor a 20 MW

1.2. Principios de Hidráulica

El estudio para determinar el potencial hidroenergético parte de la determinación del flujo y altura útil en una corriente hídrica, para hacerlo técnicamente se requiere hacer un estudio de la constancia de corriente, de acuerdo (Zopetti, 1974), la forma de presentar un estudio de flujo de caudal en una fuente hídrica se basa en un histograma, en el cual se muestra la variación de flujo en cada uno por unidad de medida del tiempo, pueden ser semanas, meses y por lo general es presentado para un año. Del diagrama anual de caudal que circula por el río se determina el rango de flujo aprovechable.

1.2.1. Descripción de parámetros y variables

Para el análisis de las variables y parámetros en un sistema de aprovechamiento de generación hidroeléctrica se presenta en el esquema de la Figura 1.2 sobre los principales parámetros de una central hidroeléctrica.

Las variables principales de una central hidroeléctrica son: H_0 : Altura total para aprovechamiento hidroenergético; Q_1 : Caudal hacia la turbina; estas variables a su vez tienen unas variables como son: *Diámetro*, es el diámetro de la tubería que conduce el fluido desde el tanque de presión hacia la turbina; *Longitud*: corresponde a la distancia de la tubería de presión; *Velocidad*: medida de movimiento del flujo; *Gravedad*: aceleración debido a la gravedad terrestre; *Densidad del agua*: propiedad inherente del fluido. Aparte de las variables nombradas se tienen otros componentes que es necesarios indicarlas: *Canal de conducción*: corresponde al canal que permite dirigir el fluido hacia el tanque de presión conservando la altura de captación del fluido. Se requiere cuando no se presentan altura considerable entre captación y descarga; *Tanque de presión*: corresponde a un depósito de fluido al inicio de la tubería de presión y se utiliza para disponer de fluido almacenado, previo al ingreso de la tubería de presión.

En el presente estudio las variables a ser consideradas son las siguientes:

- h: presión debido a la columna de líquido en la turbina, tanque de presión, tubería de presión y reservorio [mca].
- Q: Caudal de líquido [m^3/h]
- v: Velocidad del fluido [m/s]
- P: Potencia mecánica de la turbina

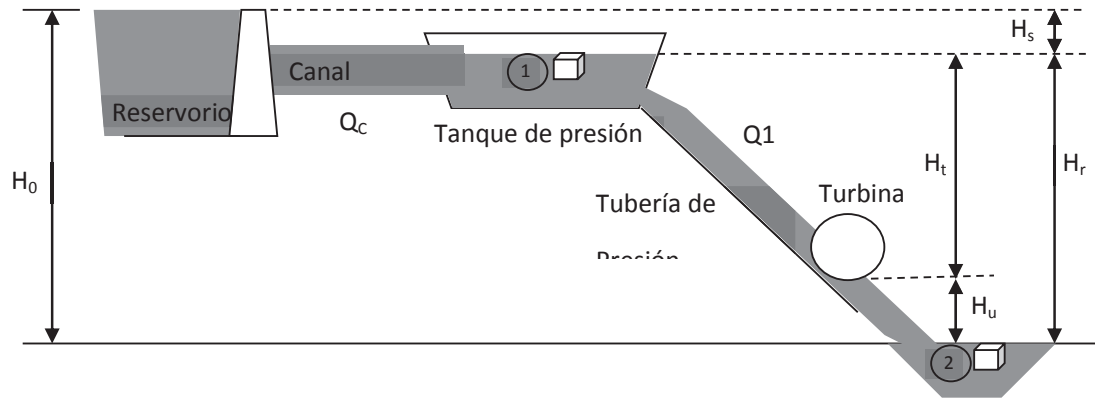


Figura 1.2. Parámetros de una central hidroeléctrica.
(Arévalo. 2017)

1.2.2. Análisis energético

Para el análisis energético se parte de las ecuaciones básicas al considerar las interacciones energéticas en una corriente de materia entre los puntos 1 y 2, y de acuerdo a lo expuesto en el capítulo de Turbomaquinaria en (Shames, 1995, pág. 701), se tiene que:

Premisas de diseño

Considerando un elemento en el espacio que se mueve del punto 1 al punto 2, en un diferencial de tiempo tal como se muestra en la Figura 1.3

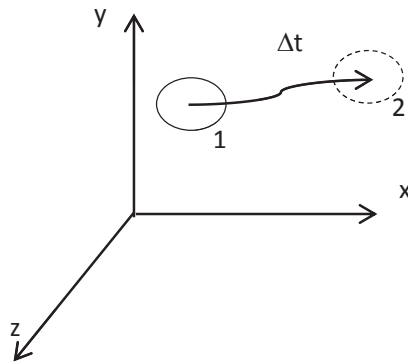


Figura 1.3. Desplazamiento de un elemento diferencial en el espacio.
(Arévalo, 2017)

Para los siguientes desarrollos matemáticos se tienen en cuenta las siguientes premisas:

- Todo elemento diferencial de área será cuadrado
- Todo elemento diferencial de volumen será un cubo
- El diferencial de área es un vector
- El diferencial de volumen es un escalar
- Lo que entra al sistema es negativo
- Lo que sale del sistema es positivo

1.2.3. Conservación de la energía

Al aplicar la ecuación de la energía al flujo fluido el principio de conservación de la energía se obtiene la ecuación:

$$E_{P1} + E_{add} - E_p - E_{ex} = E_{P2} \quad (1.1)$$

Donde:

E_{P1} : Energía en el punto 1

E_{add} : Energía añadida

E_p : Energía perdida

E_{ex} : Energía extraída

E_{P2} : Energía en el punto 2

Aplicando el principio de conservación de energía al tipo de fluido considerado para un aprovechamiento hidroenergético, flujo incompresible y variación de energía despreciable se muestra en la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 \right) + h_A - h_f - h_E = \left(\frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \right) \quad (1.2)$$

Para las consideraciones de diseño se analiza fluido perfecto por lo que la fricción se establece casi cero, además que no se toma en cuenta energía extraída ni energía añadida se tiene:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 = \text{constante} \quad (1.3)$$

La que corresponde al Teorema de Bernoulli que se enuncia así “A lo largo de cualquier línea de corriente la suma de las alturas cinéticas ($V^2/2g$), piezométrica (P/g) y potencial (Z) es constante”.

Con análisis dimensional cada término puede ser expresado en metros (Sistema Internacional) así:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{m^2/s^2}{m/s^2} \quad [\text{m}] \text{ Carga de velocidad o dinámica}$$

$$\frac{P}{\gamma} = \frac{kg/m^2}{kg/m^3} \quad [\text{m}] \text{ Carga de presión}$$

$$Z = m \quad [\text{m}] \text{ Carga geométrica o de posición}$$

1.2.4. Conservación de la masa

Para un flujo continuo y permanente, la masa de fluido que atraviesa cualquier sección de corriente de fluido, por unidad de tiempo es constante. Esto se define de la siguiente manera.

$$\rho_1 * A_1 * V_1 = \rho_2 * A_2 * V_2 = \text{constante} \quad (1.4)$$

$$\gamma_1 * A_1 * V_1 = \gamma_2 * A_2 * V_2 \quad [\text{kg} / \text{seg}] \quad (1.5)$$

Considerando un fluido incompresible y para el caso en que $\gamma_1 = \gamma_2$, la ecuación se transforma en:

$$\gamma_1 * A_1 * V_1 = \gamma_2 * A_2 * V_2 \quad [\text{kg} / \text{seg}] \quad (1.6)$$

$$Q = A_1 * V_1 = A_2 * V_2 = \text{constante} \quad [m^3 / s] \quad (1.7)$$

Donde A_1 y A_2 corresponden, respectivamente al área de la sección recta en $[m^2]$, y la velocidad media en $[m/s]$, en la sección 1 y en la sección 2. El caudal se mide en el SI en $[m^3/s]$ o en $[l/s]$.

1.2.5. Ecuación de la energía para turbinas

Considerando un estado cuasi estático de la materia, es decir, un proceso que puede ser representado por una sucesión de estados estacionarios en el cual las variables termodinámicas no cambian en el tiempo, se puede decir que:

$$Q - W = \Delta U \quad (1.8)$$

Donde:

Q : Energía total

W : Trabajo

ΔU : Variación de la energía interna

Para un estado dinámico de la materia

$$Q - W = \Delta E \quad (1.9)$$

ΔE : Variación de la energía; propiedad extensiva

$$E = E_{cinética} + E_{potencial} + E_{interna} \quad (1.10)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{DE}{DT} \quad (1.11)$$

$$n = \frac{E}{m} = e = \frac{V^2}{2} + gz + u \quad (1.12)$$

Y considerando:

$$\bar{F} = \frac{\delta}{\delta t} \oint_V \bar{V} \rho dV + \oint_A \bar{V} \rho \bar{V} \bar{dA} \quad (1.13)$$

El primer término se considera cero en estado estable, no hay variación de volumen

Por lo tanto:

$$\bar{F} = \oint_A \bar{V} \rho \bar{V} \bar{dA} \quad (1.14)$$

De la Figura 1.3, considerando una partícula elemental de volumen de agua, designada por δV , localizada en la posición 1 y que se mueva hacia la posición 2, y considerando el concepto:

Trabajo = Fuerza * Distancia

En términos diferenciales:

$$dW = \rho g dV h \quad (1.15)$$

Donde:

dW : Trabajo realizado por una masa elemental de agua [lb-ft]

ρ : Densidad del agua [lb-s²/ft⁴]

g : aceleración de la gravedad [ft/s²]

h : distancia vertical desplazada por el volumen de agua [ft]

Considerando que la descarga es un volumen por unidad de tiempo:

$$dq = \frac{dV}{dt} \quad (1.16)$$

Donde:

dq : Descarga elemental por unidad de tiempo [ft³/s]

La potencia extraída por una unidad de hidropotencia es el rango de trabajo hecho y se representa matemáticamente como sigue:

$$Potencia = \frac{Trabajo}{tiempo} \quad (1.17)$$

En términos matemáticos:

$$dP = \frac{dW}{dt} \quad (1.18)$$

Donde:

dP : Cantidad elemental de potencia [lb ft / s] y reemplazando

$$dP = \frac{\rho g dV h}{dt} \quad (1.19)$$

Reemplazando

$$dP = \frac{\rho g dq dt h}{dt} \quad (1.20)$$

Simplificando:

$$dP = \rho g dq h \quad (1.21)$$

Realizando la simplificación de unidades la potencia teórica de una descarga de agua pasando a través de la turbina, dada en unidades de caballos de potencia, está determinada por:

$$P_{HP} = \frac{\rho g q h}{550} \quad (1.22)$$

1.2.6. Teoría de semejanza

Para determinar las relaciones que existen entre las características de dos turbinas del mismo tipo, geometría y dinámicamente semejantes, se hacen las siguientes consideraciones, tal como se ilustra en la Figura 1.4:

Se debe tener una coherencia en el análisis dimensional y en la semejanza física, temporal y semejanza de masa.

Modelo: \vec{r}' , n' , Q' , C' , H_n'

Prototipo: \vec{r} , n , Q , C , N_n

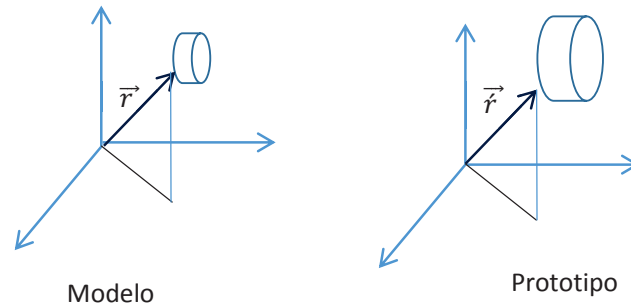


Figura 1.4. Modelo y prototipo.
(Arévalo, 2017)

La ventaja de utilizar las leyes de semejanza es la facilidad de utilizar una misma ecuación para el modelo y para el prototipo.

Parámetros adimensionales

$$e = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1.23)$$

Implica que $\phi(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = 0$

$$\frac{e}{V_0 t} = 1 + \frac{1}{2} \frac{a t^2}{V_0 t} \quad (1.24)$$

Entonces: $\phi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-k})$

$$\pi = 1 + \frac{1}{2} k \quad (1.25)$$

Donde:

π : Parámetro adimensional

k : Parámetro sin unidades (masa, longitud, tiempo, temperatura, etc.)

La teoría de semejanza se divide en los siguientes criterios:

- Análisis dimensional
- Semejanza física
- Semejanza temporal
- Distribución de masa

1.3. Turbinas hidráulicas

Al ingresar el fluido de trabajo a la turbomáquina la naturaleza del intercambio de energía es muy compleja debido a la naturaleza complicada y muchas veces caótica del movimiento del fluido en el interior del rotor. Para obtener una primera consideración de este intercambio energético se deben hacer consideraciones teóricas sobre la naturaleza del fluido y su comportamiento a través del rotor, esto con la finalidad de simplificar el modelado matemático del fluido en su paso por el rotor.

El fluido que pasa por el rotor es un fluido potencial debido a que tiene una energía tal como se muestra en la Figura 1.5.

Todas las líneas de corriente tienen la misma forma que cada uno de los álabes o paletas del rotor, esto sería equivalente a decir que el rotor tiene un infinito número de álabes.

Las características del régimen de flujo no varían en el tiempo, es decir, el flujo se encuentra completamente desarrollado, o en régimen permanente.

En el presente estudio se considera el caso en el que el fluido cede energía al rotor, lo que se denomina *turbina*.

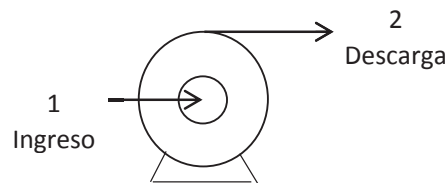


Figura 1.5. Volumen de control en una turbomáquina.
(Arévalo, 2017)

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + gZ_1 + gH_{B/T} = \frac{V_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + gZ_2 + gh_{pérdidas} \quad (1.26)$$

Con las consideraciones que Z_1 y Z_2 se acercan a cero y haciendo los arreglos necesarios

$$gH_{B/T} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \bar{H} \quad (1.27)$$

Donde:

\bar{H} es el producto del balance energético del intercambio de energía entre el rodete y el fluido.

Las unidades son [$L^2 \cdot T^{-2}$]

El fluido le transmite un torque al rodete que es función de:

N : Número de revoluciones en una unidad de tiempo [rpm]

ω : Velocidad angular

La potencia transmitida por un elemento motor es:

$$Potencia = T \cdot \omega \quad (1.28)$$

T : Torque

Para un volumen de control, como el que se muestra en la Ilustración 1.6:

$$T = \oint_{A_1} \vec{r} \cdot |\vec{V}| \cdot \text{sen}\theta \rho |V| \cdot dA + \oint_{A_2} \vec{r} \cdot |\vec{V}| \cdot \text{sen}\theta \rho |V| \cdot dA \quad (1.29)$$

1.3.1. Triángulo de velocidades

Para comprender las magnitudes que intervienen en las turbomáquinas se debe determinar el triángulo de velocidades, formado por los vectores que intervienen como se muestra en la Figura 1.6 para un instante y un punto analizado, cuando entra la partícula a la turbomáquina.

Donde:

- \vec{V}_2 : Velocidad absoluta del fluido
- \vec{u}_2 : velocidad lineal del rotor
- \vec{V}_{r2} : Velocidad relativa del fluido respecto al rotor

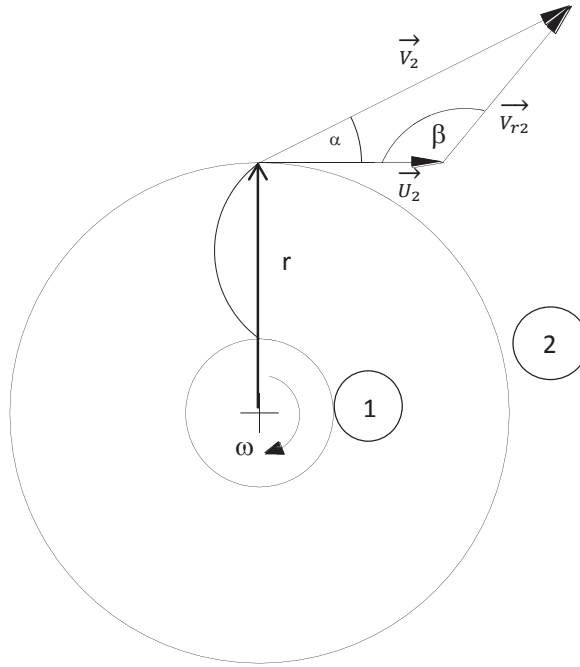


Figura 1.6. Triángulo de velocidades y radio de giro.
(Arévalo, 2017)

$$T = \oint_{A_1} r \cdot V_{U1} \rho \vec{V} \cdot dA + \oint_{A_2} r \cdot V_{U2} \cdot \rho \vec{V} \cdot dA \quad (1.30)$$

$$T = r_2 V_{U2} \cdot \dot{m} - r_1 V_{U1} \cdot \dot{m} \quad (1.31)$$

$$T = \dot{m}(r_2 V_{U2} - r_1 V_{U1}) \quad (1.32)$$

Por tanto en el intercambio

$$T\omega = \dot{E} = Potencia = \dot{m}(r_2\omega V_{U2} - r_1\omega V_{U1}) \quad (1.33)$$

$$Potencia = \dot{m}(U_2 V_{U2} - U_1 V_{U1}) \quad (1.34)$$

$$\frac{Potencia}{\dot{m}} = U_2 V_{U2} - U_1 V_{U1} \quad (1.35)$$

$$H = \frac{1}{g}(U_2 V_{U2} - U_1 V_{U1}) \quad (1.36)$$

g : aceleración de la gravedad

$$U_2V_{U2} - U_1V_{U1} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \quad (1.37)$$

1.3.2. Clasificación de las turbinas

Las turbomáquinas se pueden clasificar de acuerdo a varios criterios, en el alcance de la presente tesis se van a considerar el flujo de energía del fluido hacia la turbina y esta entrega trabajo mecánico en el eje de la turbina. Como fluido de trabajo se va considerar solo agua líquida a condiciones normales de presión y temperatura

De acuerdo a la forma que se presenta el fluido proyectado a través del rotor

- *Radial*. Si la trayectoria que sigue el fluido es normal al eje de rotación: centrífuga o centrípeta
- *Axial*: cuando la trayectoria del fluido es paralelo al eje de rotación
- *Diagonal*: flujo diagonal al eje de rotación

De acuerdo al cambio de presión en el rotor

- *Acción*: no existe un cambio de presión en el paso de fluido por el rotor
- *Reacción*: Existe cambio de presión en el paso del fluido

Velocidad de diseño: La velocidad del fluido es un parámetro muy importante en el diseño de una central hidroeléctrica, para el efecto tubería de succión la velocidad del fluido no debe exceder de 2 m/s, dependiendo el material y al existir mayores alturas se utiliza las siguientes mayores velocidades máximas:

A efectos de reducir el efecto por golpe ariete, y en general se recomienda que las velocidades máximas no superen el rango de 1.2 a 1.5 m/s. La velocidad mínima podrá ser determinada en función a las condiciones geográficas del recorrido del canal, las condiciones de auto limpieza, calidad del agua, etc.

1.3.3. Parámetros de la turbina

Presión máxima

Se recomienda que la presión estática máxima no sea mayor al 80% de la presión nominal de trabajo de las tuberías a emplearse, debiendo ser compatibles con las presiones de servicio de accesorios y válvulas a emplearse.

Tamaño de la turbina (D)

El tamaño de la turbina está definido por el diámetro del rodete móvil considerando las fórmulas que se desarrollan posteriormente.

Velocidad de rotación (o giro) de una turbina (N)

Es el número de revoluciones por minuto que la turbina gira cuando está en operación.

Velocidad específica de una turbina (NS)

Es el número de revoluciones por unidad de tiempo que da una turbina que desarrolla la unidad de potencia trabajando bajo la unidad de carga

$$N_s = \frac{N P^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (1.38)$$

Gasto específico de la turbina (Qs)

Es el gasto que la turbina específica necesita para trabajar

$$Q_s = \frac{Q H}{P} \quad (1.39)$$

Diámetro específico de una turbina (DS)

Es el diámetro que debe tener la turbina específica para desarrollar un caballo de potencia trabajando con una carga unitaria

$$D_s = \frac{D H^{3/4}}{P^{1/2}} \quad (1.40)$$

Altura de aspiración de la Turbina (Hesp)

Es la diferencia de nivel entre la superficie de agua de la entrada de líquido al tubo de presión y el nivel de superficie libre de las aguas en el canal de desfogue, esta altura es muy importante para que evitar la *cavitación*.

Grado de Reacción

Es la relación entre la carga estática a la carga total transferida, de la siguiente manera:

$$G_R = \frac{\text{Energía entregada en forma de presión}}{\text{Energía total entregada}} \quad (1.41)$$

Una turbomáquina de reacción se caracteriza por producir un gradiente de presión entre la entrada y salida de impulso en la que $\Delta p=0$.

Rendimiento

Es de fundamental importancia en las turbomáquinas, se puede notar como la razón existente entre los beneficios que pueden obtenerse idealmente y aquellos que son obtenidos en la realidad.

$$\eta_{total} = \frac{\text{Potencia restituida}}{\text{Potencia absorbida}} \quad (1.42)$$

Para el caso de las turbinas la potencia absorbida es toda aquella entregada por el fluido y la potencia restituida es la que se encuentra en el eje del rotor.

Aplicando la primera ley de la termodinámica se tiene que la potencia restituida jamás puede ser mayor que la potencia absorbida. La segunda Ley de la termodinámica indica que la potencia absorbida siempre será mayor que la potencia restituida, ya que la energía se suministra al fluido en un finito número de etapas, por lo que se puede afirmar que:

$$\eta_{total} < 1 \quad (1.43)$$

La diferencia entre la energía absorbida y la restituida se conoce como *pérdidas*

$$E_{\text{absorbida}} - E_{\text{entregada}} = E_{\text{perdida}} \quad (1.44)$$

Los elementos principales que definen la turbina son los siguientes:

1. Rango de flujo: es la cantidad de agua que fluye por un punto en un tiempo dado. Las unidades usadas son metros cúbicos por segundo [m^3/s], litros por segundo [lt/s], galones por minuto [gpm], y pies cúbicos por minuto [cfm].
2. La altura de carga o cabeza es la distancia vertical en metros [m] o pies [ft], medido desde el nivel de ingreso del agua a la tubería de presión hasta el nivel donde el agua deja la turbina en casa de máquinas.

Potencia útil

La cantidad de energía disponible está directamente relacionada con el rango de flujo, la cabeza y la fuerza de gravedad. Se debe determinar la cantidad de flujo de agua que se pueda disponer para generación, la cabeza disponible en el lugar más adecuado; entonces se puede calcular la cantidad de energía que se esperaría generar mediante el modelo matemático de Bernoulli que se muestra a continuación, se detallan cada uno de los parámetros en la Figura 1.7:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 = \text{constante} \quad (1.45)$$

Donde:

V_1 : Velocidad del agua en el punto 1, ft/s

P_1 : Presión en el punto 1, lb/ft²

$\gamma = \rho g$ = peso específico del agua, lb/ft³

Z_1 =altura de carga en el punto 1, ft

V_2 : Velocidad del agua en el punto 2, ft/s

P_2 : Presión en el punto 2, lb/ft²

Z_2 =altura de carga en el punto 2, ft

h_f =pérdida de altura de carga entre los puntos 1 y 2

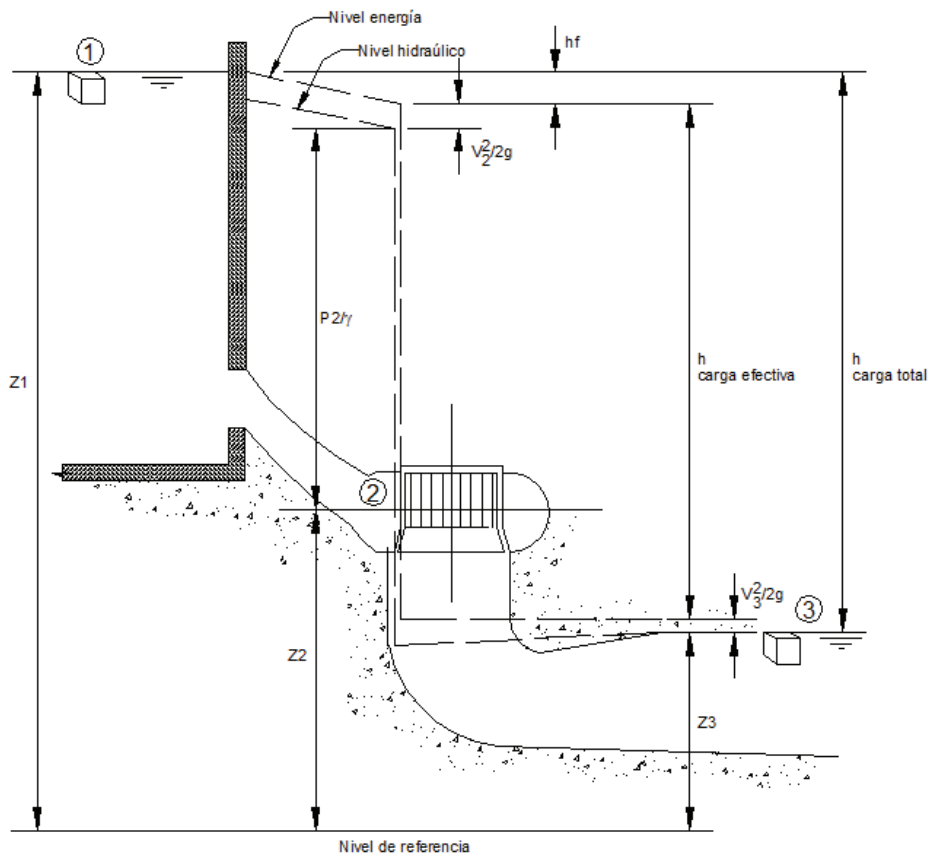


Figura 1.7. Análisis del paso de fluido por una turbina.
(Fuente: Warnick, 1984, p. 29)

Matemáticamente la ecuación de Bernoulli específica que la suma de los componentes de energías: posición, presión, y movimiento, es constante en un fluido con movimiento continuo a través de una trayectoria. Con referencia a la Figura 1.7 se tiene la siguiente relación matemática.

Aplicando el modelo matemático entre los puntos 1 y 2 de la figura 1.7 se tiene:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + h_f \quad (1.46)$$

Al aplicar el modelo de Bernoulli entre los puntos 2 y 3 se tiene:

$$\frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 = \frac{V_3^2}{2g} + \frac{P_3}{\gamma} + Z_3 + h \quad (1.47)$$

Para propósitos prácticos se considera que V_1 , P_1 , y P_3 son iguales a cero entonces la ecuación queda:

$$\frac{P_2}{\gamma} = Z_1 - \frac{V_2^2}{2g} - Z_2 - h_f \quad (1.48)$$

Ahora resolviendo para h

$$h = Z_1 - Z_3 - h_f - \frac{V_3^2}{2g} \quad (1.49)$$

Lo que es la cabeza de carga efectiva h , y se muestra en la figura 1.9.

Debido a que la ecuación de Bernoulli se define en términos de unidades de libra-pies por libra de agua fluyendo a través del sistema, se identifica que las libras de agua fluyendo por la turbina por unidad de tiempo por definición es pgq . Luego se identifica que la energía sobre unidad de tiempo es potencia, entonces ρgq o γq para obtener la potencia teórica entregada por el agua a la turbina.

$$P_{lb/ft} = \gamma q h \quad (1.50)$$

Donde:

$\gamma = \rho g =$ peso específico del agua, lb/ft³

$q =$ descarga de flujo hacia la turbina, ft³/s

$h =$ cabeza efectiva, ft

Realizando la conversión de potencia a caballos de potencia se tiene:

$$P_{hp} = \frac{\rho gh}{550} = \frac{\gamma qh}{550} \quad (1.51)$$

Utilizando la conversión a unidades del Sistema Internacional

$$P_{kW} = 0.746 P_{hp} \quad (1.52)$$

P_{th} : Energía teórica en [CV]

Q: Rango de flujo determinado [lt/s]

H: Cabeza total

e: Eficiencia (0.5 – 0.7)

Después de la definición del tramo de la fuente que dispone de potencial hidroeléctrico o río entre cuyos extremos debe establecerse la caída que se va a utilizar, es necesario determinar el caudal que habrá de aprovecharse para calcular el rendimiento económico del suministro de energía.

El empuje y la acción del agua para las turbinas de acción son coincidentes mientras que en las turbinas de reacción son opuestos

Las turbinas de reacción más conocidas son las denominadas Francis, la cual de acuerdo a la dirección del fluido corresponde a un tipo radial centrípeta

1.3.4. Turbinas Pelton

Las turbinas Pelton de acuerdo a lo revisado en (Fernández Díez, 2003, pág. 50), corresponden a las turbinas de acción o de chorro libre son utilizadas en grandes saltos de agua y caudales relativamente pequeño; la dirección del chorro es tangencial, el chorro choca en la parte central de la cuchara o cazoleta, circula por la cavidad y sale forma casi un ángulo de 180°, luego cae libremente a un cauce inferior. El regulador del chorro es el inyector que tiene una válvula tipo aguja cuyo desplazamiento determina el grado de apertura del inyector, para asegurar el cierre. Para asegurar la buena regulación se debe diseñar el inyector de forma que haya proporcionalidad entre la potencia de la turbina y la carrera de la aguja; con esto la potencia es proporcional al caudal y este a la sección de paso normal al flujo. La regulación puede ser manual o automática. Se observa el detalle de instalación de una turbina tipo Pelton en la Figura 1.8.

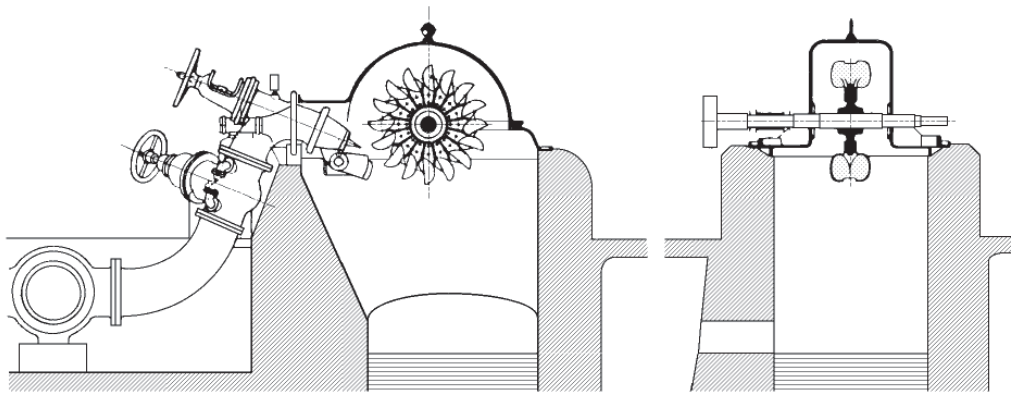


Figura 1.8. Turbina Pelton.

(Fuente: Fernández Díez, 2003, pág. 54)

1.3.5. Turbinas de reacción: Francis

De acuerdo al estudio realizado por (Fernández Díez, 2003, pág. 71), las turbinas Francis, son del tipo radial, admisión centrípeta y tubo de aspiración. De acuerdo a su construcción se pueden clasificar en lentas, normales y rápidas, Ver Figura 1.9

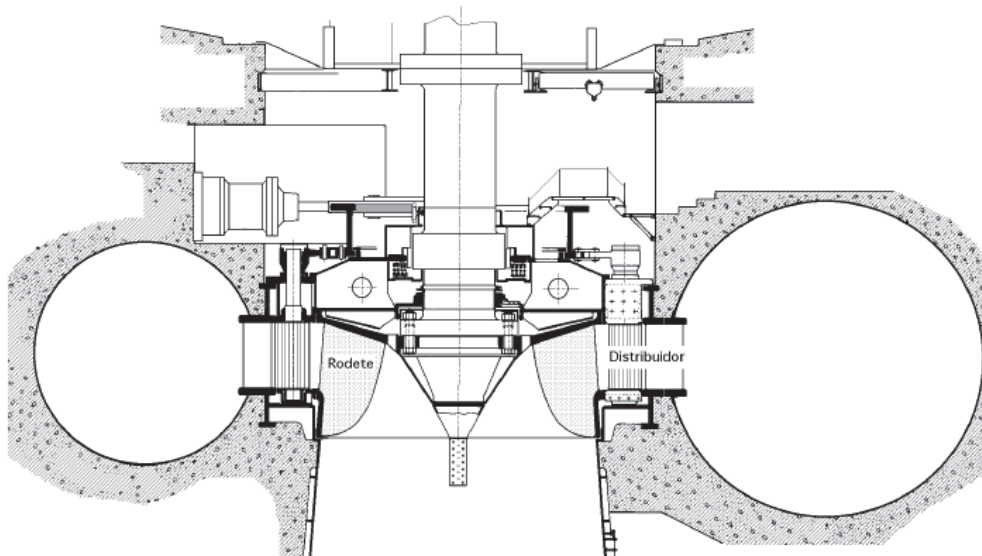


Figura 1.9. Turbina Francis.

(Fuente: Fernández Díez, 2003, pág. 68)

1.3.6. Turbinas Kaplan

Las Turbinas Kaplan pertenecen a las turbinas de reacción y de acuerdo a lo revisado en (Fernández Díez, 2003, pág. 6), fue desarrollada en 1912; y la descripción es que las palas del rodete tienen una forma de hélice: es aplicada en alturas de pequeña altura y se obtiene altos rendimientos. Si las palas son orientables entonces se obtiene un paso variable, si son fijas se llaman turbinas tipo hélice, Ver Figura 1.10.

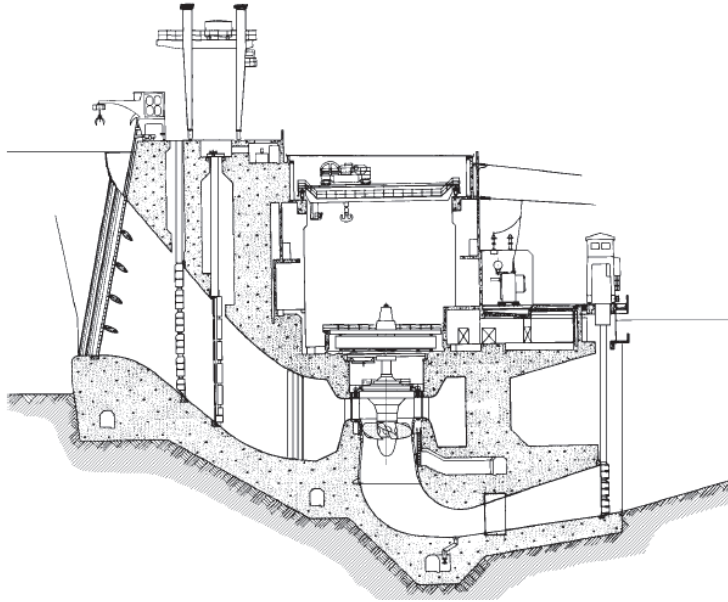


Figura 1.10. Turbina Kaplan.
(Fuente: Fernández Díez, 2003, pág. 110)

2. METODOLOGÍA

2.1. Datos iniciales

Al conocer la forma de aprovechar la energía eléctrica de un potencial hídrico, queda seleccionar la turbina que mejor se adapte a las condiciones existentes de altura y caudal así como determinar las posibles ventajas y desventajas técnicas y económicas

En el Anexo A se muestran todos los modelos matemáticos utilizados en los pasos para determinar el potencial hidro energético aprovechable. En el Anexo B se muestran los pasos en la elaboración del programa para computadora y en el Anexo C está el Manual del Usuario del Pot_Hidroenergético V 1.0

A partir de los datos recolectados de otras especialidades se procede a definir los parámetros que son requeridos para el estudio en la definición del tipo de turbina de acuerdo al procedimiento mostrado a continuación en la Figura 2.1:

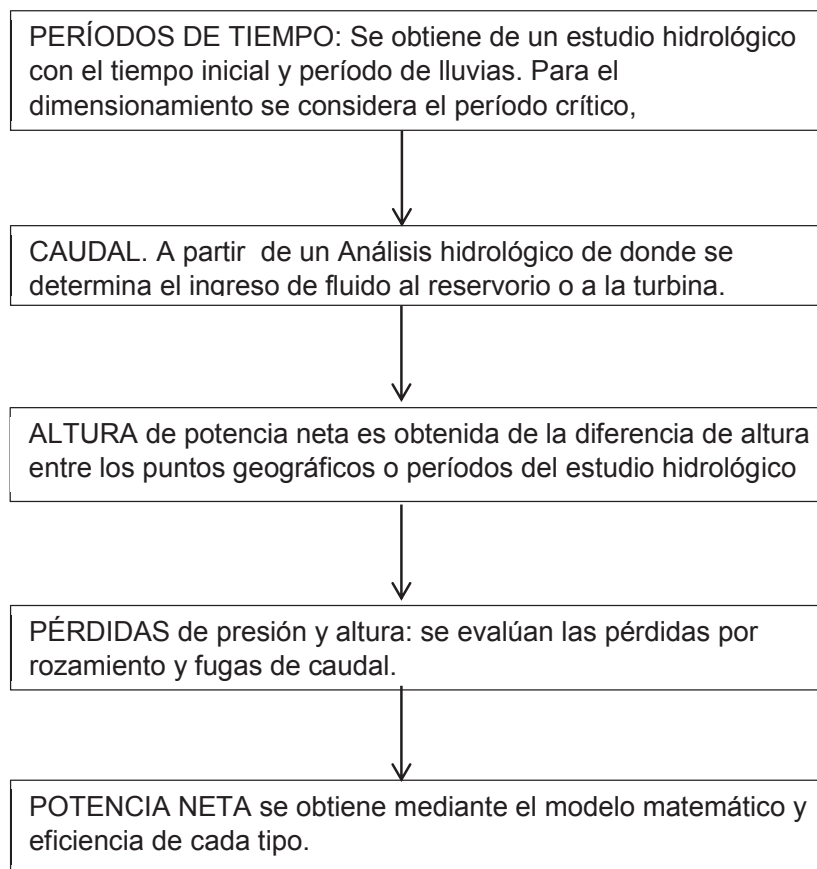


Figura 2.1. Diagrama de bloques para determinar la potencia neta
(Fuente: Arévalo, 2017)

La Figura 2.1 corresponde al diagrama de bloques para determinar la potencia neta de un aprovechamiento hidráulico.

2.2. Selección y dimensionamiento

Determinada la Potencia neta de un salto hidráulico se procede a seleccionar el tipo de turbina más adecuado de acuerdo con los modelos matemáticos y con el siguiente diagrama de bloques.

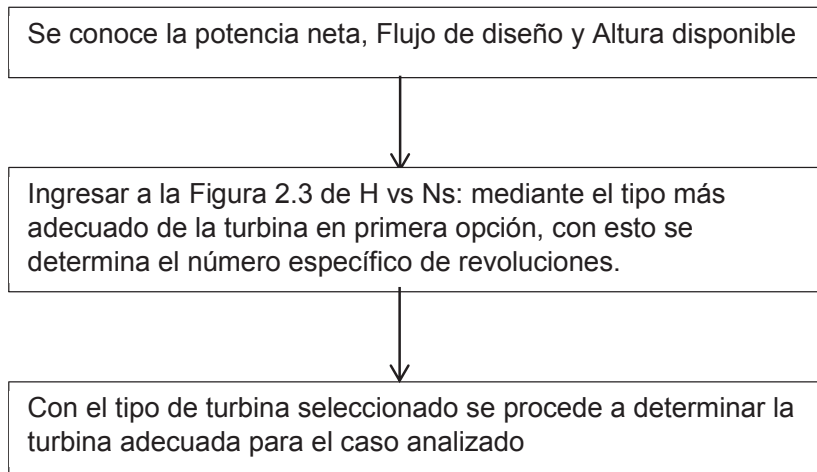


Figura 2.2. Determinación del tipo de turbina hidráulica.
(Fuente: Arévalo. 2017)

Mediante el diagrama mostrado en la Figura 2.2 se determina la potencia transferida con las ecuaciones respectivas

De acuerdo con lo mostrado en selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014), se tiene los siguientes valores prácticos:

- Turbina PELTON: Valores de carga H grandes y gastos Q pequeños
- Turbinas FRANCIS: Valores de carga H medianos y gastos Q medios
- Turbinas KAPLAN: Valores de carga H pequeños y gastos Q grandes

De manera cuantitativa

Turbinas Pelton $N_s \leq 100$

Turbina Francis $50 \leq N_s \leq 350$

Turbina Kaplan $350 \leq N_s$

En las turbinas Francis se pueden tener las siguiente sub clasificación:

- Francis Lenta: $50 \leq N_s \leq 150$

- Francis Normal $150 \leq N_s \leq 250$
- Francis Rápida $250 \leq N_s \leq 350$

Una vez que se tiene seleccionado el tipo de turbina se procede al dimensionamiento de las dimensiones significativas de la turbina, de acuerdo con lo mostrado en (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, págs. 12-15)

Turbinas Francis fabricadas entre 1970 – 1975

$$N_s = 3470 \cdot H_d^{-0,625} \quad (2.1)$$

La potencia en KW; altura en metros y velocidad específica en unidades SI

Turbinas Kaplan fabricadas entre 1970 – 1976

$$N_s = 2419 \cdot H_d^{-0,489} \quad (2.2)$$

La Figura 2.3 corresponde a datos recolectados de turbinas elaboradas, la potencia está en KW; altura en metros y velocidad específica en unidades SI

Turbinas Pelton fabricadas entre 1965 – 1977

$$N_{sj} = 85,49 \cdot H_d^{-0,243} \quad (2.3)$$

Donde

$$N_{sj} = \frac{N \left(\frac{P_i}{i} \right)^{0,5}}{H_d^{1,25}} \quad (2.4)$$

Donde i: número de inyectores 1 – 6 (máximo)

La potencia en KW; altura en metros y velocidad específica en unidades SI

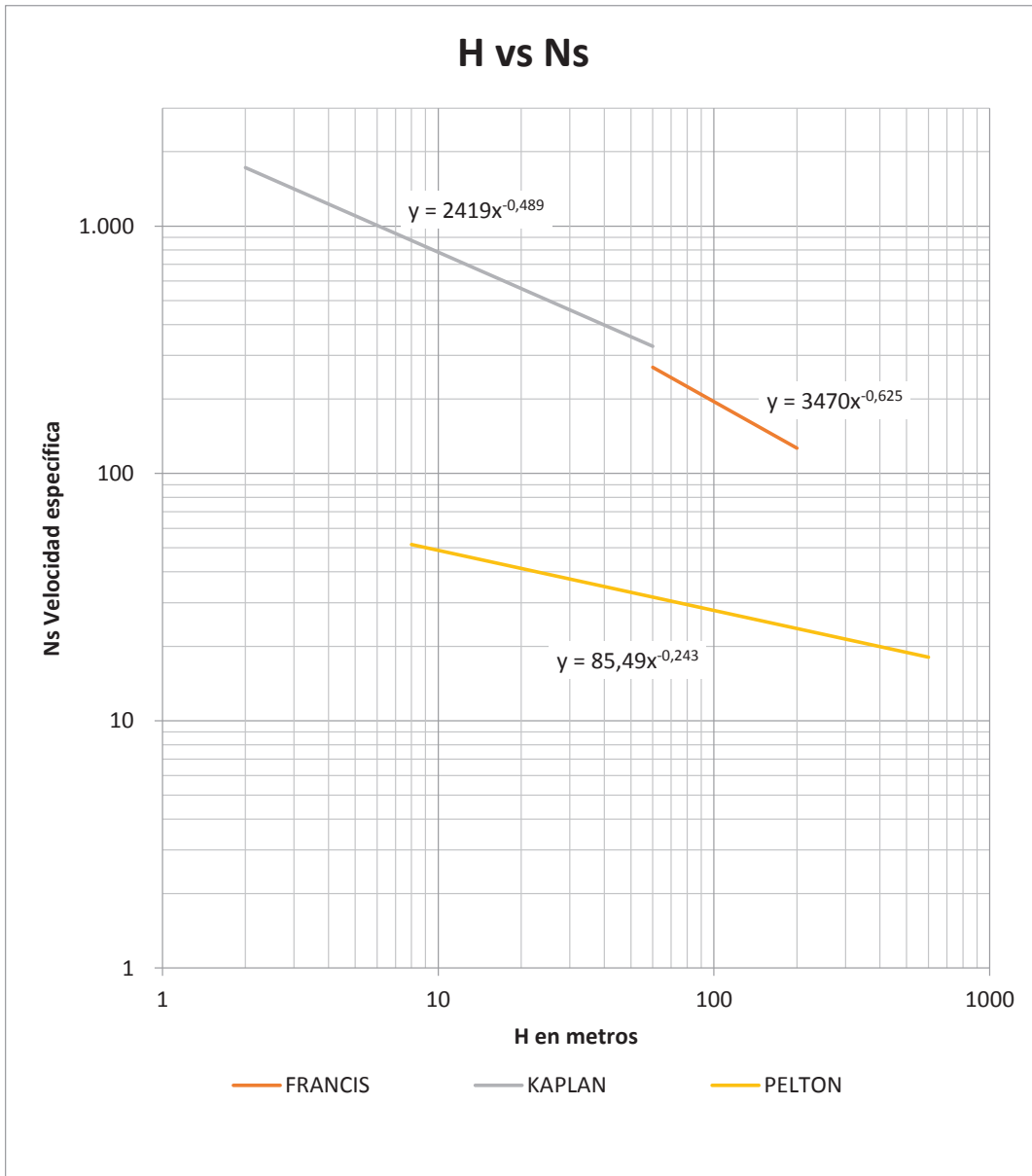


Figura 2.3. Velocidad específica vs Altura y tipos de turbina.
Fuente: (Warnick, 1984)

2.2.1. Determinación de las pérdidas de carga por fricción

En la determinación del potencial hidroenergético se tienen pérdidas en todas las etapas que atraviesa el fluido. Se utiliza el modelo de Darcy Weisbach, en base experimental que la resultante de fricción en tuberías y conductos de la siguiente manera.

$$h_f = f \frac{LV^2}{d2g} \quad (2.5)$$

Donde:

h_f : Pérdida de carga por fricción [m]

f : Factor de fricción

L : Longitud de la tubería [m]

d : Diámetro de la tubería [m]

$\frac{V^2}{2g}$: Altura de velocidad [m]

Como una aproximación general y como para efectos de una primera aproximación se estiman entre el 10% y 15%, dependiendo de la complejidad del trazado de la tubería de presión.

Una vez seleccionado el tipo de turbina adecuado para el aprovechamiento hídrico se procede al dimensionamiento del mismo de acuerdo con las ecuaciones que se han tomado de (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014), en cada caso respectivamente.

2.2.2. Dimensiones de la Turbinas Pelton

Son turbinas que reciben el fluido de manera tangencial al rodete, el agua sale del distribuidor a presión atmosférica y llega al rodete con la misma presión, toda la energía potencial de la altura se convierte en energía cinética. De acuerdo a lo revisado en (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, pág. 56), se tienen las siguientes definiciones:

Las dimensiones para el rodete están en función del coeficiente de velocidad periférica y la función de correlación para datos disponibles para varias turbinas

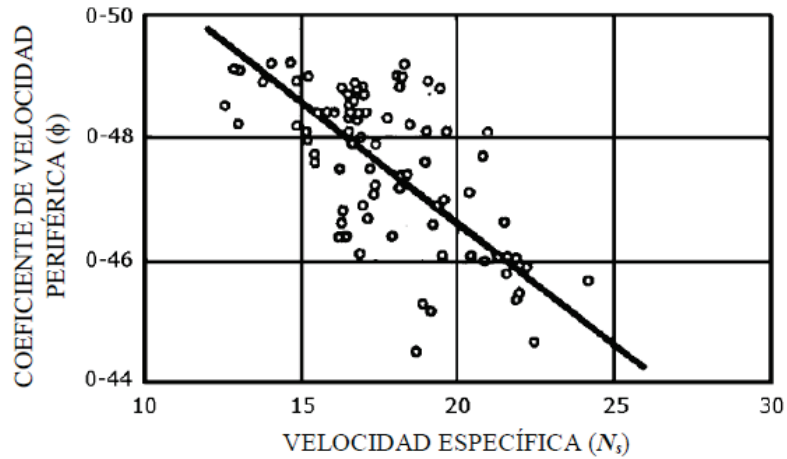


Figura 2.4. Turbinas Pelton Velocidad Periférica vs Velocidad específica.
Fuente: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, pág. 56)

En la Figura 2.4 se encuentra una regresión numérica con los datos de turbinas fabricadas de acuerdo a requerimientos particulares.

La función que determina ϕ es la siguiente:

$$\phi = 0.5445 - 0.0039N_{sj} \quad (2.5)$$

En la Figura 2.5 se establece el proceso para encontrar las dimensiones de la Turbina Pelton

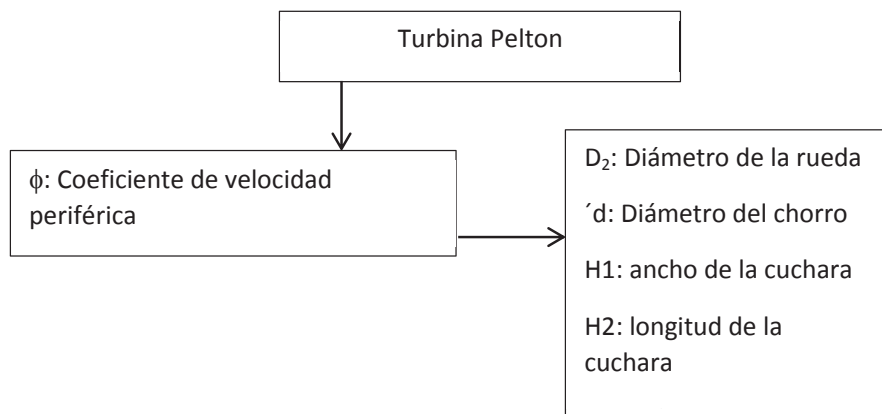


Figura 2.5. Diagrama para dimensiones de Turbina Pelton.
(Fuente: Arévalo, 2017)

En el Anexo A.1. se muestra la gráfica, ecuaciones y la programación para determinar las dimensiones de la Turbina Pelton.

2.2.3. Turbinas Francis

De acuerdo a lo revisado en la bibliografía (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, pág. 35), para dimensionar de forma general las turbinas tipo Francis se utilizan las funciones de correlación obtenidas por el procedimiento de regresión, publicadas en la Revista Water Power and Dam Construction, de Agosto de 1976.

Los modelos matemáticos están dados como función del Diámetro de descarga D_3 y la velocidad específica en unidades del Sistema Internacional. Un modelo matemático se muestra en la Figura 2.8.

Para determinar el tamaño del rodete se aplica las leyes de similitud y está definida por:

$$\phi = U / (2gH_d)^{0,5} \quad (2.8)$$

Donde U es la velocidad tangencial y ϕ se puede calcular como:

$$\phi = D_3 N' \pi / 60 \sqrt{2gH_d} \quad (2.9)$$

Donde:

D_3 : es el diámetro de descarga del rodete en metros [m]

N' : velocidad de rotación sincrónica en revoluciones por minuto

H_d : es la carga neta de diseño en metros [m]

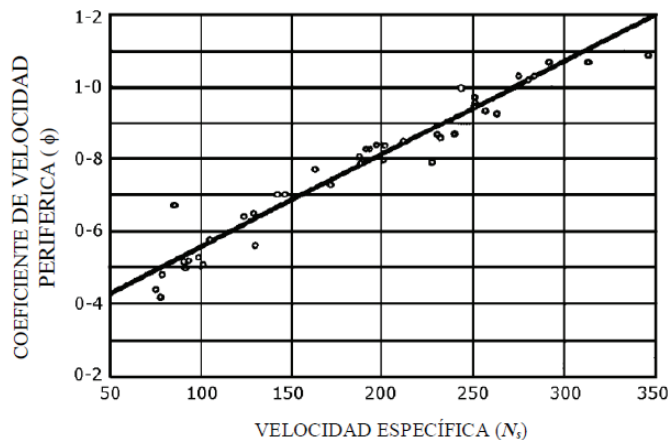


Figura 2.6. Turbina Francis, Dimensiones del Rodete.
(García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, pág. 36)

La razón de variación del coeficiente de velocidad periférica ϕ con respecto a la velocidad específica N_s , y la función de interpolación es:

$$\phi = 0.31 + 2.5 \times 10^{-3} N_s \quad (2.10)$$

A partir de la determinación del coeficiente de velocidad periférica se determina el resto de dimensiones del rodete y de la carcasa o caracol.

En el caso de las turbinas Francis es necesario definir también las dimensiones del tubo de aspiración; el cual está directamente relacionado con el tamaño del rodete, los dos tienen en común el diámetro D_3 , y la velocidad absoluta en la sección de entrada.

En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques para determinar las dimensiones de una Turbina tipo Francis.

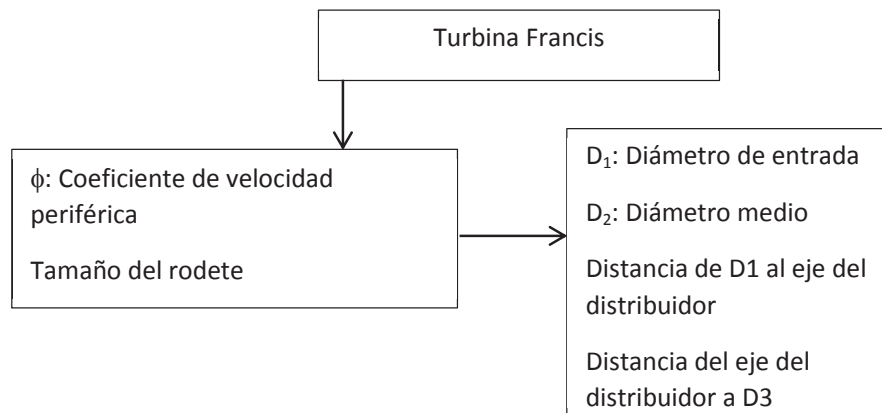


Figura 2.7. Diagramas para las Turbinas Francis.
(Fuente: Arévalo. 2017)

En el Anexo A.2. se muestra la gráfica, ecuaciones y la programación para determinar las dimensiones de la Turbina Francis.

2.2.4. Dimensiones de la Turbina Kaplan

Su importancia de acuerdo a la bibliografía en (Fernández Díez, 2003, pág. 103), radica en ser utilizada junto con las turbinas tipo hélice en pequeños saltos con grandes caudales tanto en posición vertical y horizontal. Cuando las hélices son fijas

se llaman turbinas hélice y si son orientables se denominan turbinas Kaplan, tienen un solo sentido de rotación.

La turbina Kaplan tiene una curva plana de rendimiento superior a las turbinas tipo hélice y tipo Francis.

Los parámetros de diseño se enuncian a continuación de acuerdo a (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, pág. 50), el coeficiente de velocidad periférica ϕ :

El tamaño del rodete se define de acuerdo a la siguiente

$$\phi = D_m \pi N' / 60 \sqrt{2gH_d} \quad (2.6)$$

La función $\phi = f(N')$ es calculada por correlación de los datos disponibles, como se muestra en la Figura 2.6 a partir de datos fabricados:

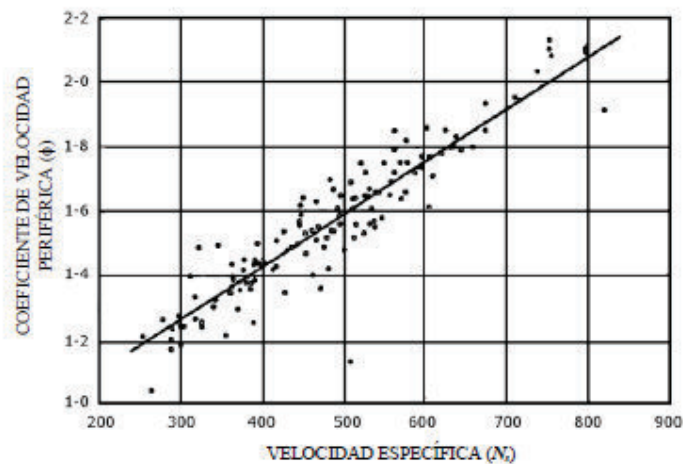


Figura 2.8. Velocidad específica - N_s para turbinas tipo Kaplan. (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014, pág. 42)

La función de ϕ , se determina de acuerdo a la siguiente relación:

$$\phi = 0,79 + 1.61 \times 10^{-3} N_s \quad (2.7)$$

Si la selección se ha definido como opción la turbina tipo Kaplan entonces el programa determina las dimensiones con el siguiente flujo:

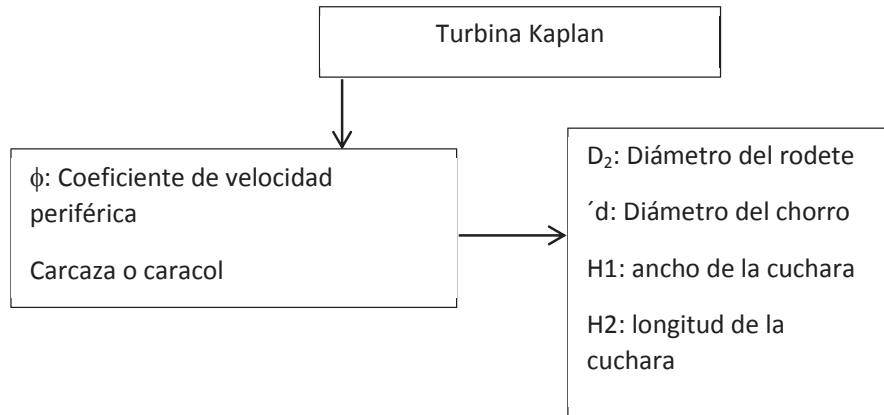


Figura 2.9. Diagrama de bloques para turbina Kaplan.
(Fuente: Arévalo. 2017)

En el Anexo A.3. se muestra la gráfica, ecuaciones y la programación para determinar las dimensiones de la Turbina Kaplan

2.2.5. Cavitación en turbinas

La cavitación de acuerdo a lo revisado en (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014), es un fenómeno físico que forma burbujas de aire e implosionan en un medio líquido cuando la presión absoluta llega a disminuir hasta alcanzar un valor igual o menor a la presión de saturación a la temperatura del agua, este fenómeno es perjudicial para las turbomáquinas ya que equivale al golpeteo continuo que reducen la vida útil agregando erosión y vibración a los elementos, esto traducido a las turbomáquinas corresponde a la variación de la presión por alteración de la velocidad del agua por acción de una superficie guía por donde pasa el fluido. Se debe evitar la cavitación mediante un diseño hidrodinámico adecuado. Acorde con la teoría este fenómeno se presenta para las turbinas tipo Francis y tipo Kaplan, lo que debe ser analizado en una etapa de diseño de detalle de la Planta hidroeléctrica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a los objetivos planteados y en función de obtener resultados con instalaciones existentes se procede a ensayar el programa con datos de centrales existentes.

3.1. Casos de análisis y resultados

Caso 1: Central Hidroeléctrica de Mazar

De acuerdo con (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2015) la Central hidroeléctrica Mazar, tiene 2 turbinas tipo Francis de eje vertical con un caudal máximo de $70.55 \text{ m}^3/\text{s}$, capacidad por unidad de 91.83 MW, cuenta con una altura nominal de 166 m, la casa de máquinas es subterránea.

Con los datos obtenidos se procede a realizar una simulación con el programa Pot_Hidroenergía V 1.0

Datos

Altura: 166 m = 545 ft

Caudal por unidad = $70.55 \text{ m}^3/\text{s} = 2491.45 \text{ ft}^3/\text{s}$

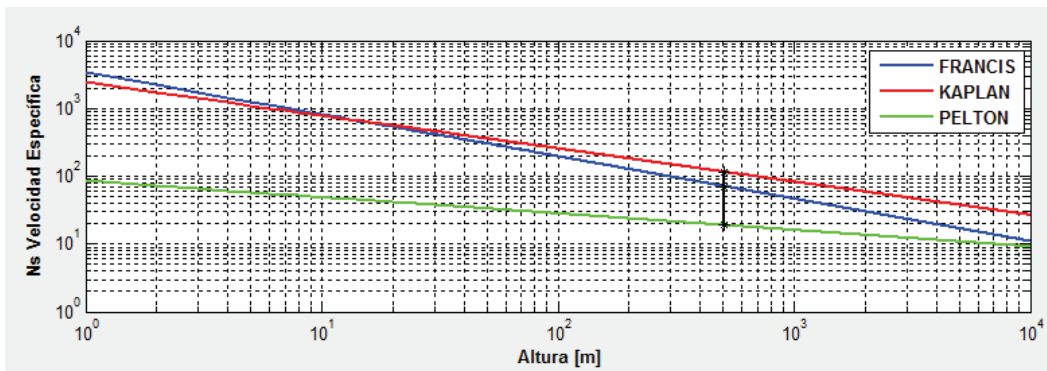
1. Determinación de parámetros iniciales

The screenshot shows a software window titled 'Hidroenergía' with a sub-header 'PARÁMETROS ESPECÍFICOS'. The interface is divided into several sections for data entry:

- INGRESO DE DATOS:** Includes fields for 'Altura' (545 pies), 'Caudal' (2491.45 pies cúbicos por segundo), 'Densidad' (1), and 'Eficiencia' (0.8). Buttons for 'Ejemplo', 'Borrar datos', and 'Borrar todo' are present.
- POTENCIA DE LA TURBINA (PASO 1):** Fields for 'P =' with values 122881 hp and 91.6696 MW, and an 'OK' button.
- VELOCIDAD DE LA TURBINA (PASO 2):** Field for 'n =' with value 2411.2 rpm and an 'OK' button.
- NUMERO DE POLOS (PASO 3):** Field for 'Np =' with value 23.5535 polos and a 'Selección' dropdown set to 22, with an 'OK' button.
- RE CALCULO DE LAS VELOCIDADES (PASO 4):** Fields for 'n =' (327.273 rpm) and 'ns =' (43.6411 rpm), with 'OK' buttons.
- DIAMETRO DEL RODETE (PASO 5):** Fields for 'diametro 1' (10.1058), 'diametro 2' (10.0315), and 'diametro mayor =' (10.1058), with an 'OK' button.

(Fuente: Arévalo. 2017)

2. Selección de turbina



(Fuente: Arévalo. 2017)

Turbinas			
TURBINA DE FRANCIS	$50 \leq N_s \leq 350$	70.7954	Posible
TURBINA DE KAPLAN	$N_s \geq 300$	115.113	No es posible
TURBINA DE PELTON	$N_s \leq 100$	18.8242	Posible

(Fuente: Arévalo. 2017)

3. Dimensionamiento de la turbina

TURBINAS TIPO FRANCIS

INGRESO DE DATOS:

Altura (m): 95.3853, 312.985 ft Densidad: $\rho = 62.48$ Eficiencia: $\eta = 0.65$

Caudal (m³/s): 141, 5007.61 cfs Ingrese un valor entre 0 - 1

POTENCIA DE LA TURBINA (PASO 1):

P = 115730 hp, 86.3345 MW

VELOCIDAD DE LA TURBINA (PASO 2):

n = 207.799 rpm

NUMERO DE POLOS (PASO 3):

np = 34.6489 polos, Selección: 36

RE CALCULO DE LAS VELOCIDADES (PASO 4):

n = 211.765 rpm, ns = 54.7233 rpm

DIAMETRO DEL RODETE (PASO 5):

dímetro 1: 127.126, dímetro 2: 126.017, dímetro mayor = 127.126

Velocidad Especifica: 28.2418

Velocidad de Rotación: 3.89019

Phi: 0.434657

Dímetro de la rueda: 0.996918

Dímetro del chorro: 0.140642

Dímetro D3: 1.41055

H1: 0.486789, **H2:** 0.436798

DIMENSIONES DE LA CAJA:

G: 0.724957 m, L: 3.62574 m, F: 3.70687 m, H: 2.51078 m, I: 2.64372 m

DIMENSIONES DEL ESPRAL:

B: 3.1529 m, C: 2.8863 m, D: 2.36102 m, E: 3.91002 m

(Fuente: Arévalo. 2017)

4. Cuadro de resultados

Tabla 3-1 Central Hidroeléctrica Mazar

Parámetro	Pot_Hidroenergía	Datos construido
Potencia	91.66 MW	91.83 MW
Tipo	Francis	Francis vertical
Número de polos	22	28
Velocidad turbina	327 rpm	257,14 rpm

(Fuente: Arévalo, 2017)

Caso 2: Central de Manduriacu

De acuerdo a lo revisado en (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2015), La Central Hidroeléctrica Manduriacu está localizada a 130 km al Noroccidente de Quito, tiene una capacidad de generación de 65MW de potencia, aprovecha las aguas del Río Guayllabamba, con un caudal medio diario de 168,9 m³/s con un caudal de diseño de aprovechamiento de 210 m³/s. Tiene dos tuberías de presión de 4,50 metros de diámetro y 49,50 m de longitud. La casa de máquinas semienterrada donde están dos grupos turbina-generador de tipo Kaplan de 32,5 MW c/u.

Datos

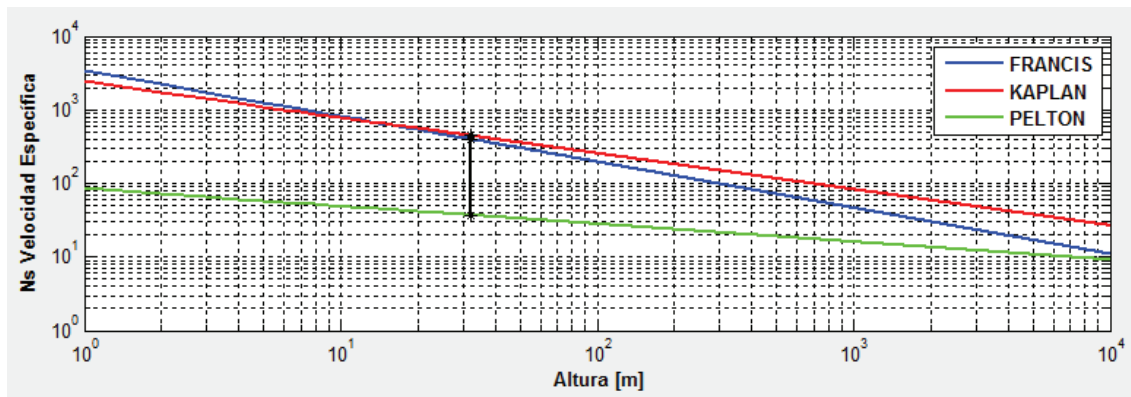
Altura: 33.70 m = 110.56 ft

Caudal: 168,9 m³/s = 5964.65 ft³/s

1. Determinación de parámetros iniciales

(Fuente: Arévalo. 2017)

2. Selección de turbina



(Fuente: Arévalo. 2017)

(Fuente: Arévalo. 2017)

3. Dimensionamiento de la turbina

(Fuente: Arévalo. 2017)

Tabla 3-2: Central Hidroeléctrica Manduriacu

Parámetro	Pot_Hidroenergía	Datos construido
Potencia	38.95 MW	32.5 MW
Tipo	Kaplan	Kaplan

(Fuente: Arévalo, 2017)

Caso 3: Central hidroeléctrica particular

De acuerdo a una construcción en particular se considera una Central Hidroeléctrica, está localizada en la parte sur del Ecuador, se tiene un rio que permanece durante todo el año, de los estudios se tiene que el caudal promedio es $25 \text{ m}^3/\text{s}$ pero se estable utilizar solo $5 \text{ m}^3/\text{s}$ para una central pico, la altura útil se determina en 65 m. Se requiere determinar la capacidad de generación así como la turbina más adecuada.

Datos

Altura: 65 m

Caudal: $5 \text{ m}^3/\text{s}$

Resultados

1. Cuadro de resultados

Tabla 3-3 Central Hidroeléctrica Particular

Parámetro	Pot_Hidroenergía	Datos construido
Potencia	2,8 MW	2,2 MW
Tipo	Francis	Francis

(Fuente: Arévalo, 2017)

3.2. Discusión

El modelado de las condiciones de diseño y lo que se considera para una etapa de construcción varía en forma mínima razón por la que en los casos que se ha analizado los parámetros de operación de las centrales hidroeléctricas ya construidas son mínimas para el Caso 1, permitiendo incluso determinar la eficiencia en términos generales de la turbina.

El cálculo de la Potencia calculada es cercano al valor real de la potencia que reporta la turbina (menor al 1%), por lo que se considera un valor correcto del programa; la diferencia presentada en el cálculo del número de polos se explica debido a factores constructivos, esto acarrea la diferencia del número de revoluciones de la turbina, sin embargo, se puede pulir la programación incluyendo factores constructivos y económicos. La selección de la turbina es correcta.

La comparación entre el dimensionamiento dado por el programa y lo construido en realidad no fue posible debido a que al momento de realizar este estudio no se logró encontrar datos dimensionales de la misma, se recomienda para encontrar estos datos y comparar con lo determinado en el programa.

Para el Caso 2, la potencia determinada con el programa es del 15% a lo real de funcionamiento, lo que se explica por la eficiencia y el valor de factor de planta de aprovechamiento, La selección de la turbina es totalmente correcta en un tipo Kaplan.

Para el Caso 3, hay una diferencia entre el caudal promedio y el caudal utilizado debido a factores constructivos, se establece la 5ta parte del caudal, la potencia

aprovechable sería mucho mayor sin embargo no se aprovecha a la capacidad completa por razones técnicas

4. CONCLUSIONES

En términos generales y de acuerdo a los objetivos planteados se procede a enunciar las conclusiones que se ha logrado del presente trabajo:

- Se ha modelado la transferencia de energía que existe en un aprovechamiento hidroenergético y turbomáquinas, tomando en cuenta el potencial hidráulico, estableciendo la mejor opción de las turbinas que se son comunes y representativas en cada caso en especial de los tipos que se dispone en el Ecuador
- Mediante las herramientas que permite la mecánica de fluidos como son el análisis dimensional, parámetros adimensionales y el modelado matemático se ha logrado simular las transferencia de energía y los límites que son propios en cada tipo de turbina
- Se han determinado e identificado las variables independientes y dependientes que intervienen en el modelado de las turbomáquinas, las variables independientes son la altura y el caudal de agua que se dispone en el punto a ser estudiado ya que se pueden operar de modo técnico; mientras que las variables dependientes son la disponibilidad de agua durante el período analizado, el consumo eléctrico estimado, ubicación geográfica, disposición de facilidades, etc.
- Con el uso de modelos matemáticos y herramientas de turbinas ya fabricadas se ha logrado modelar un sistema hidroenergético utilizando herramientas computacionales lo que ayuda a variar un salto hidráulico o flujo en diversos arreglos y obtener resultados para análisis posterior.
- Con ayuda del método analítico, método experimental y análisis dimensional se ha establecido un procedimiento para determinar el potencial energético de aprovechamientos hidráulicos, utilizando un tipo adecuado de turbina.
- En el caso de una instalación particular este estudio permite apreciar la variación que existe entre una consideración energética y una consideración

técnico – constructiva, entonces al plantearse diferentes escenarios a fin de determinar el desempeño óptimo de la turbina, se concluye que el uso de herramientas computacionales facilitan el trabajo tanto en tiempo como en recursos.

- Como trabajo futuro se recomienda el análisis para determinar el costo económico de la generación hídrica durante el tiempo de vida útil de las turbinas, tomando en cuenta las condiciones de la calidad de agua, influencia de la temperatura, etc.

Referencias Bibliográficas

- [1] Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (Septiembre de 2016). Recuperado el 08 de Enero de 2017, de <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/balance-nacional/>
- [2] CONELEC. (2013). *Plan Maestro de Electrificación, Vol. 4*. Quito: CONELEC.
- [3] Darmawi, B., Riman, S., Siti, M. B., & Momon, S. I. (2012). Renewable energy and hydropower utilization tendency worldwide. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 213.
- [4] Fernández Díez, P. (24 de Junio de 2003). Turbinas Hidráulicas. Barcelona, España.
- [5] García Gutiérrez, H., & Nava Mastache, A. (2014). *Selección y Dimensionamiento de Turbinas Hidráulicas para Centrales Hidroeléctricas* (1ra ed.). México: Facultad de Ingeniería.
- [6] Guedes, L., Vieira, D., Lisboa, A., & Saldanha, R. (2015). A continuous compact model for cascaded hydro-power generation and preventive maintenance scheduling. *Electrical Power and Energy Systems*.
- [7] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2015). Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/generacion/energias-renovables.html>
- [8] Morales, S., Alvarez, C., Acevedo, C., & Díaz, C. (2015). An overview of small hydropower plants in Colombia: Status, potential, barriers and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1650-1657.
- [9] Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). (1986). *Manual técnico para diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas. Turbinas de flujo axial (tubulares)*. Quito: OLADE.
- [10] Ping'an, Z., Weiguo, Z., & Bin, X. (2012). A risk decision model of the contrat generation for hidropower generation companies in electricity market. *Electric Power System Research*, 90, 91.
- [11] Shames, I. H. (1995). *Mecánica de Fluidos*. Colombia: McGraw-Hill.
- [12] Unidad de Planeación Minero Energético. (7 de Octubre de 2015). Obtenido de <http://www1.upme.gov.co/sala-de-prensa/noticias/primer-atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-colombia>
- [13] Warnick, C. (1984). *Hydropower Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- [14] Zopetti, G. (1974). *Centrales Hidroeléctricas* (3ra ed.). Barcelona: Imprenta Juvenil.

ANEXO A: Modelado matemático para turbinas hidráulicas

En la presente sección se incluyen las expresiones matemáticas utilizadas para determinar las dimensiones principales de las diversas turbinas, es un resumen tomado de la Selección y Dimensionamiento de Turbinas Hidráulicas para Centrales Hidroeléctricas, (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014)

A.1. Modelos matemáticos para dimensiones de Turbinas Pelton

Para el caso de las turbinas Pelton de acuerdo a lo revisado en la teoría se tiene la figura A.1:

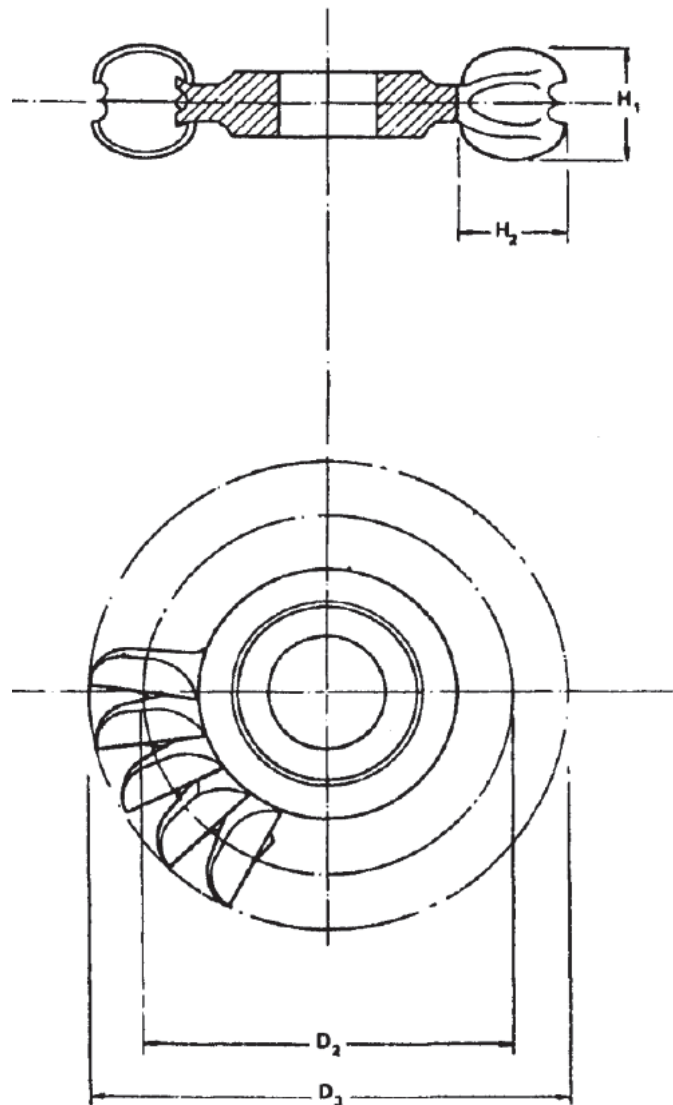


Figura A.1: Turbina Pelton: Dimensiones del Rodete
(Fuente: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014)

Para determinar las dimensiones de una turbina tipo Pelton, a partir del valor de la velocidad específica se procede con las siguientes expresiones matemáticas:

Diámetro de la rueda:

$$D_2 = 84,5 \phi \frac{\sqrt{H_d}}{N'} \quad (\text{A.1})$$

Diámetro del chorro

$$\frac{d}{D_2} = N_{sj} / (250,74 - 1,79 N_{sj}) \quad (\text{A.2})$$

Para el número de cucharas se procede de acuerdo a lo mostrado en (Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 1986) se da la siguiente recomendación:

Tabla A. 1: Número de cucharas en función de la relación diámetro del rodete / diámetro del chorro

Dp/d	Número de cucharas	
	Z min	Z máx
15	21	27
14	21	26
13	20	25
12	20	24
11	19	24
10	18	23
9	18	22
8	17	22
7,5	17	21

Fuente: (Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 1986)

Diámetro externo del rodete

$$\frac{D3}{D2} = 1,028 + 0,0137 N_{sj} \quad (\text{A.3})$$

Las alturas de los cucharones se dan como una función del diámetro del chorro de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$H_1 = 3,20 d^{0.96} \quad (\text{A.4})$$

$$H_2 = 3,23d^{1.02} \quad (\text{A.5})$$

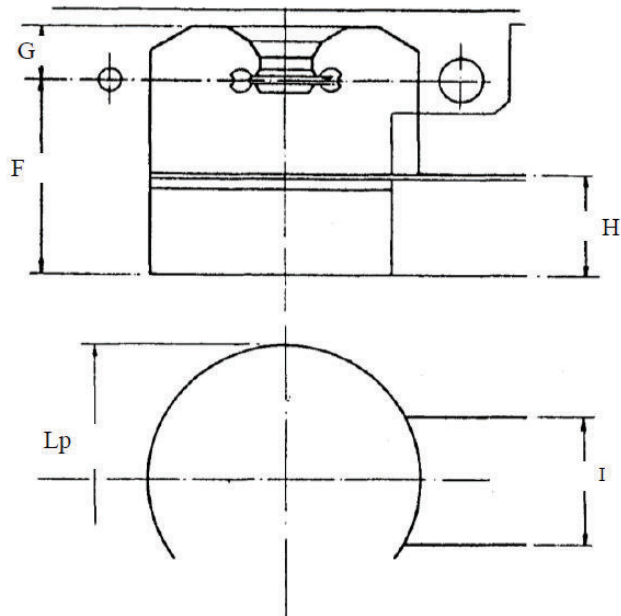


Figura A.2: Turbina Pelton: Dimensiones de la caja
(Fuente: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014))

Las expresiones para determinar las dimensiones de la caja, de acuerdo a la Figura A.2 son:

$$G = 0,196 + 0,0376 D_3 \quad (\text{A.6})$$

Donde G es la distancia entre el eje de la rueda y la parte superior de la caja

$$Lp = 0,78 + 2,06 D_3 \quad (\text{A.7})$$

Donde Lp representa el diámetro en planta de la caja.

$$F = 1,09 + 0,71 Lp \quad (\text{A.8})$$

$$H = 0,62 + 0,513 Lp \quad (\text{A.9})$$

$$I = 1,28 + 0,37 Lp \quad (\text{A.10})$$

Para la caja o espiral de distribución las dimensiones a considerar son las siguientes:

$$B = 0,595 + 0,694 Lp \quad (\text{A.11})$$

$$C = 0,362 + 0,68 Lp \quad (\text{A.12})$$

$$D = -0,219 + 0,7 Lp \quad (A.13)$$

$$E = 0,43 + 0,7 Lp \quad (A.14)$$

En la Figura A.3 se incluye una turbina Pelton con cuatro inyectores. La dimensión A corresponde al diámetro final del tubo de presión de ingreso a la turbina.

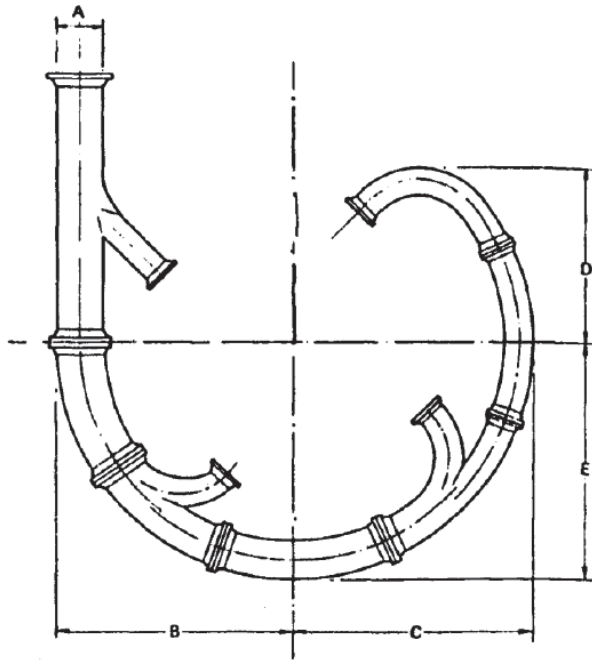


Figura A.3: Turbina Pelton: Carcaza espiral
(Fuente: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014))

A.2. Modelo matemático para dimensionar Turbinas Francis

Para el caso de las turbinas Francis de acuerdo a lo revisado en la teoría de (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014), las expresiones están dadas como función del Diámetro de descarga D_3 , expresado en metros y de la velocidad específica N_s , para el sistema métrico.

Diámetro de descarga

$$D_3 = 84,5 \phi \frac{\sqrt{H_d}}{N'} \quad (A.15)$$

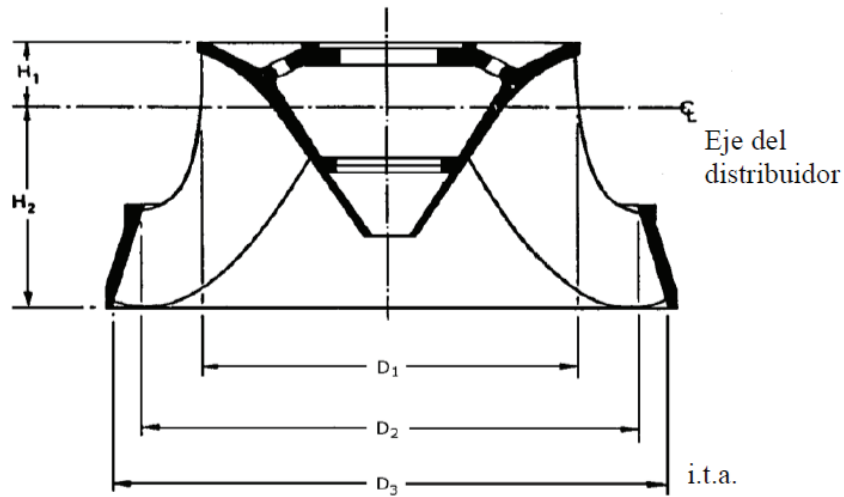


Figura A.4: Turbina Francis: Dimensiones del rodete
(Fuente: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014))

Las expresiones para determinar las dimensiones en función de N_s y D_3 son las siguientes:

Diámetro de entrada D_1

$$\frac{D_1}{D_3} = 0,4 + 94,5 N_s \quad (\text{A.16})$$

Diámetro medio D_2

$$\frac{D_2}{D_3} = 1 / (0,96 + 0,00038 N_s) \quad (\text{A.17})$$

Distancia de D_1 al eje del distribuidor

$$\frac{H_1}{D_3} = 0,094 + 0,00025 N_s \quad (\text{A.18})$$

Distancia del eje del distribuidor a D_3

$$\frac{H_2}{D_3} = -0,05 + \frac{42}{N_s}; \text{ si } 50 \leq N_s \leq 110 \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{H_2}{D_3} = 1 / (3,16 - 0,0013 N_s); \text{ si } 110 \leq N_s \leq 350 \quad (\text{A.20})$$

Para el tamaño de la carcaza o caracol se presentan las siguientes expresiones

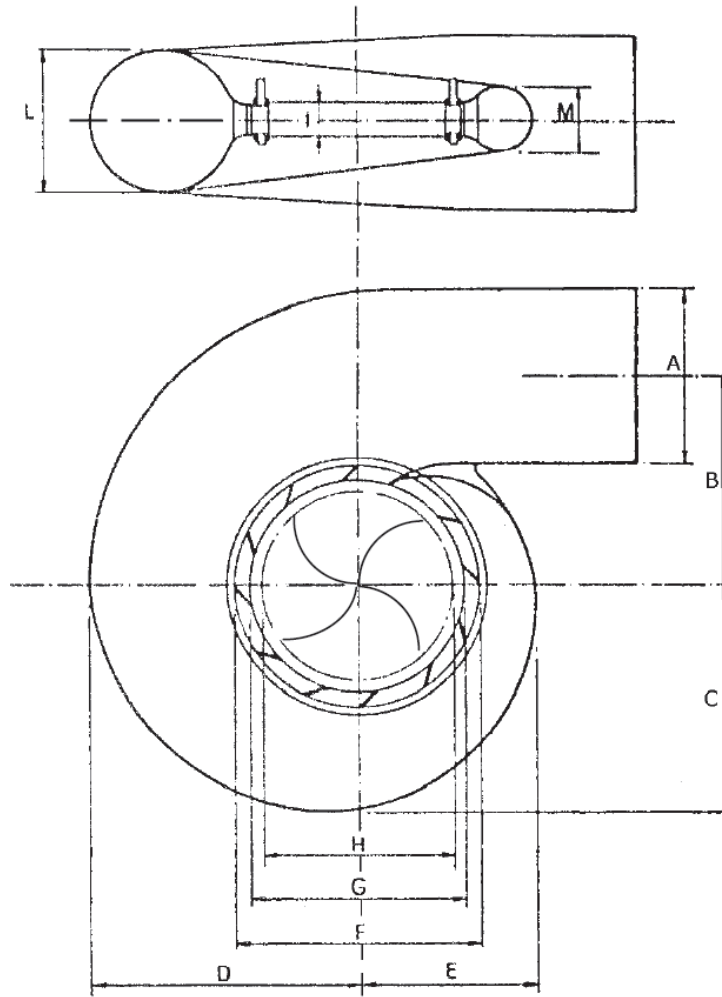


Figura A.5: Turbina Francis: Dimensiones de la carcaza
(Fuente: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014))

$$\frac{A}{D_3} = 1,2 - 19,56 / N_s \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{B}{D_3} = 1,1 + 54,8 / N_s \quad (\text{A.22})$$

$$\frac{C}{D_3} = 1,32 + 49,25 / N_s \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{D}{D_3} = 1,5 + 48,8 / N_s \quad (\text{A.24})$$

$$\frac{E}{D_3} = 0,98 + 63,60N_s \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{F}{D_3} = 1 + 131,4 / N_s \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{G}{D_3} = 0,89 + 96,5 / N_s \quad (\text{A.27})$$

$$\frac{H}{D_3} = 0,79 + 81,75 / N_s \quad (\text{A.28})$$

$$\frac{I}{D_3} = 0,1 + 0,00065 / N_s \quad (\text{A.29})$$

$$\frac{L}{D_3} = 0,88 + 0,00049 / N_s \quad (\text{A.30})$$

$$\frac{M}{D_3} = 0,60 + 0,000015 / N_s \quad (\text{A.31})$$

El tubo de aspiración es una obra complementaria en las turbinas tipo Francis y está determinado por el tamaño del rodete, ambos tienen en común el diámetro D_3 , y la velocidad absoluta en su sección de entrada, la cual corresponde aproximadamente con la velocidad de descarga del rodete.

A.3 Modelos matemáticos para dimensionar Turbinas Kaplan

En las turbinas tipo Kaplan de acuerdo a lo revisado en la teoría de (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014), las expresiones de correlación están en función del diámetro máximo del rodete D_M , expresado en metros, que es equivalente a D_3 en las turbinas tipo Francis, y de la velocidad específica N_s , para el sistema métrico.

Si se tiene el valor de la velocidad específica N_s , se procede a calcular el resto de dimensiones con las expresiones a continuación:

Diámetro de salida del rodete:

$$D_M = 84,5 \phi \frac{\sqrt{H_d}}{N_s} \quad (\text{A.32})$$

En la Figura se muestran las dimensiones principales

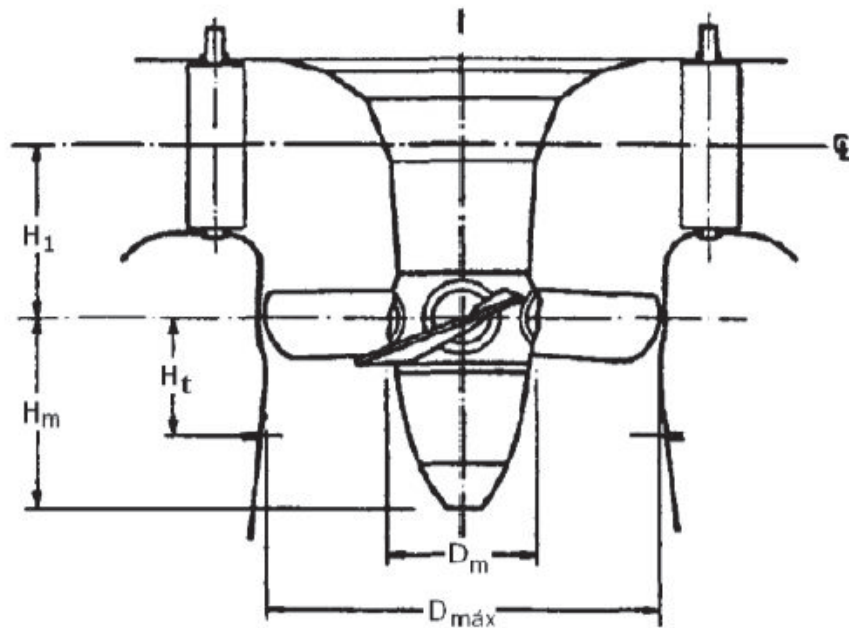


Figura A.6: Turbina Kaplan: Dimensiones del rodete
(Fuente: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014))

Las expresiones para encontrar las dimensiones son las siguientes:

$$\frac{D_m}{D_M} = 0,25 + 94,64 / N_s \quad (\text{A.33})$$

$$\frac{H_m}{D_M} = 6,94 (N_s)^{-0.403} \quad (\text{A.34})$$

$$\frac{H_1}{D_M} = 0,38 + 5,17 \times 10^{-5} N_s \quad (\text{A.35})$$

$$\frac{H_t}{D_M} = 0,24 + 7,82 \times 10^{-5} N_s \quad (\text{A.36})$$

Para la carcasa o caracol, de acuerdo con lo mostrado en Selección y Dimensionamiento de Turbinas Hidráulicas para Centrales Hidroeléctricas (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014), se recomienda que en el rango de velocidad específica de $400 \leq N_s \leq 600$, aproximadamente, se puede adoptar la carcasa de acero o de concreto, este rango de N_s , corresponde rigurosamente a cargas de diseño

entre 15 y 35 m. La carcasa de acero se recomienda para cargas $H_d \leq 15$ m. Y potencias de diseño $P_t \geq 70$ MW; la carcasa de concreto se utiliza para cargas de diseño $H_d \geq 40$; y potencias de diseño $50 \leq P_t \leq 100$ MW; el gráfico para hormigón está a la izquierda y para acero está a la derecha; y las expresiones utilizadas así como el gráfico ilustrativo se indican a continuación:

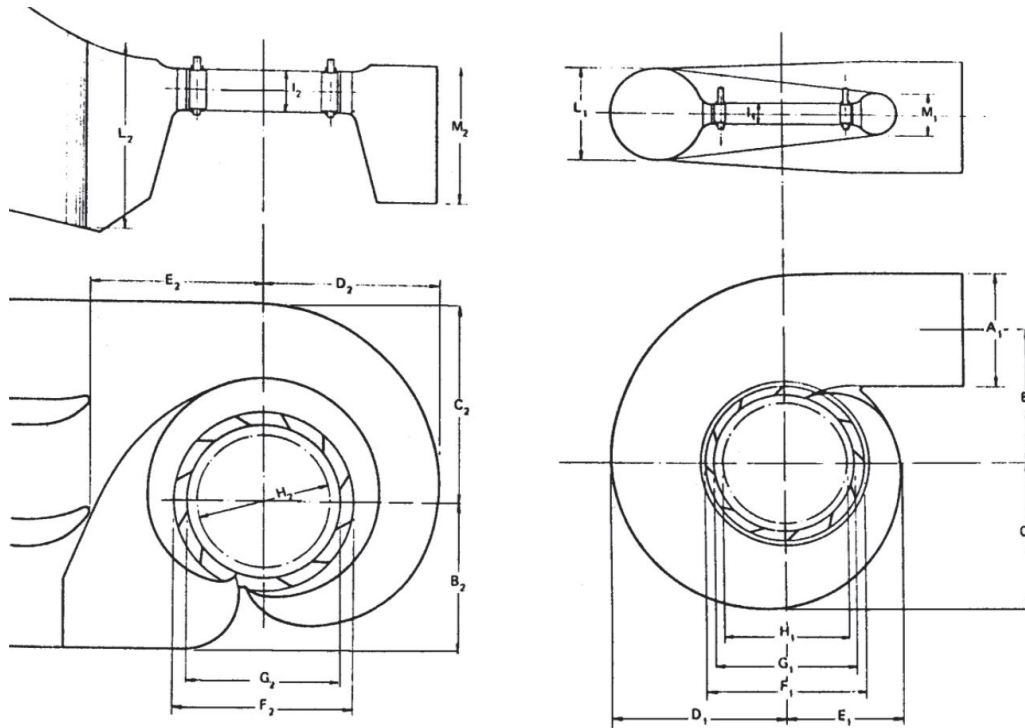


Figura 0.C.1: Turbina Kaplan: Dimensiones del rodete
(Fuente: (García Gutiérrez & Nava Mastache, 2014))

Carcasa de acero

$$\frac{A_1}{D_M} = 0,40 (N_S)^{0,20} \quad (\text{A.37})$$

$$\frac{B_1}{D_M} = 1,26 + 3,79 \times 10^{-4} N_S \quad (\text{A.38})$$

$$\frac{C_1}{D_M} = 1,46 + 3,24 \times 10^{-4} N_S \quad (\text{A.39})$$

$$\frac{D_1}{D_M} = 1,59 + 5,74 \times 10^{-4} N_S \quad (\text{A.40})$$

$$\frac{E_1}{D_M} = 1,21 + 2,71 \times 10^{-4} N_S \quad (\text{A.41})$$

$$\frac{F_1}{D_M} = 1,45 + 72,17 / N_S \quad (\text{A.42})$$

$$\frac{G_1}{D_M} = 1,29 + 41,63 / N_S \quad (\text{A.43})$$

$$\frac{H_1}{D_M} = 1,13 + 31,86 / N_S \quad (\text{A.44})$$

$$\frac{I_1}{D_M} = 0,4 - 31,80 / N_S \quad (\text{A.45})$$

$$\frac{L_1}{D_M} = 0,74 + 8,7 \times 10^{-4} N_S \quad (\text{A.46})$$

$$\frac{M_1}{D_M} = 1 / (2,06 - 1,20 \times 10^{-3} N_S) \quad (\text{A.47})$$

Carcaza de hormigón

$$\frac{B_2}{D_M} = 1 / (0,76 + 8,92 \times 10^{-5} N_S) \quad (\text{A.48})$$

$$\frac{C_2}{D_M} = 1 / (0,55 + 1,48 \times 10^{-5} N_S) \quad (\text{A.49})$$

$$\frac{D_2}{D_M} = 1,58 - 9,05 \times 10^{-5} N_S \quad (\text{A.50})$$

$$\frac{E_2}{D_M} = 1,48 - 2,11 \times 10^{-5} N_S \quad (\text{A.51})$$

$$\frac{F_2}{D_M} = 1,62 - 3,18 \times 10^{-5} N_S \quad (\text{A.52})$$

$$\frac{G_2}{D_M} = 1,36 + 7,79 / N_S \quad (\text{A.53})$$

$$\frac{H_2}{D_M} = 1,19 + 4,69 / N_S \quad (\text{A.54})$$

$$\frac{I_2}{D_M} = 0,44 - 32,47 / N_S \quad (\text{A.55})$$

$$\frac{L_2}{D_M} = 1,44 + 105,29 / N_S \quad (\text{A.56})$$

$$\frac{M_2}{D_M} = 1,03 + 136,28 / N_S \quad (\text{A.57})$$

Al igual que las turbinas tipo Francis, las turbinas tipo Kaplan, requieren el diseño del tubo de aspiración como una obra complementaria para lo cual se deben revisar las expresiones para dimensionar el mismo en la bibliografía respectiva.

ANEXO B: Desarrollo de lenguaje de programación para aprovechamiento hidropotencial

B.1. Programación para la selección del tipo de turbina

```
function varargout = Tipo_Turbina(varargin)
% TIPO_TURBINA M-file for Tipo_Turbina.fig
%   TIPO_TURBINA, by itself, creates a new TIPO_TURBINA or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = TIPO_TURBINA returns the handle to a new TIPO_TURBINA or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   TIPO_TURBINA('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in TIPO_TURBINA.M with the given input arguments.
%
%   TIPO_TURBINA('Property','Value',...) creates a new TIPO_TURBINA or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Tipo_Turbina_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Tipo_Turbina_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Tipo_Turbina

% Last Modified by GUIDE v2.5 07-Dec-2015 19:40:35

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
                  'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Tipo_Turbina_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn', @Tipo_Turbina_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn', [], ...
                  'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Tipo_Turbina is made visible.
function Tipo_Turbina_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Tipo_Turbina (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Tipo_Turbina
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
clc
```

```

axes(handles.axes1);
cla
box on; grid on
xlabel(' \bfAltura [m]')
ylabel(' \bfNs Velocidad Especifica')

global Caudal Aef
set(handles.csi, 'String', Caudal);
set(handles.asi, 'String', Aef);

set(handles.csin, 'String', Caudal*35.515);
set(handles.asin, 'String', Aef*3.281);
% UIWAIT makes Tipo_Turbina wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

axes(handles.axes2);
imshow(imread('epn.JPG'))

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Tipo_Turbina_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function csin_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to csin (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of csin as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of csin as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function csin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to csin (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function asin_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to asin (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of asin as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of asin as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function asin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to asin (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```



```

function Isin_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to Isin (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Isin as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Isin as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Isin_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to Isin (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function csi_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to csi (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of csi as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of csi as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function csi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to csi (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function asi_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to asi (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of asi as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of asi as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function asi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to asi (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles   empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Isi_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject   handle to Isi (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Isi as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Isi as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Isi_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Isi (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
C = str2num(get(handles.csin, 'String'));
A = str2num(get(handles.asin, 'String'));

% Ns Francis
Nsf = 3470*(A/3.28)^(-0.625);
% Ns Kaplan
Nsk = 2419*(A/3.28)^(-0.489);
% Ns Pelton
Nsp = 85.49*(A/3.28)^(-0.243);

set(handles.F, 'String', Nsf);
set(handles.K, 'String', Nsk);
set(handles.P, 'String', Nsp);

if Nsf>=50 && Nsf<=350
    set(handles.t1, 'String', 'Posible');
    set(handles.TF, 'ForegroundColor', [0 0 0]);
    set(handles.bf, 'Enable', 'On');
else
    set(handles.t1, 'String', 'No es posible');
    set(handles.TF, 'ForegroundColor', [1 0 0]);
    set(handles.bf, 'Enable', 'Off');
end

if Nsk>=300
    set(handles.t2, 'String', 'Posible');
    set(handles.TK, 'ForegroundColor', [0 0 0]);
    set(handles.bk, 'Enable', 'On');
else
    set(handles.t2, 'String', 'No es posible');
    set(handles.TK, 'ForegroundColor', [1 0 0]);
    set(handles.bk, 'Enable', 'Off');
end

if Nsp<=100
    set(handles.t3, 'String', 'Posible');
    set(handles.TP, 'ForegroundColor', [0 0 0]);
    set(handles.bp, 'Enable', 'On');
else
    set(handles.t3, 'String', 'No es posible');
    set(handles.TP, 'ForegroundColor', [1 0 0]);
    set(handles.bp, 'Enable', 'Off');
end

```

```

% Grafica

axes(handles.axes1);
xlabel(' \bfAltura [m]')
ylabel(' \bfNs Velocidad Especifica')

A = linspace(0, 10e3, 10000);
% Ns Francis
Nsf = 3470*(A).^(-0.625);
% Ns Kaplan
Nsk = 2419*(A).^(-0.489);
% Ns Pelton
Nsp = 85.49*(A).^(-0.243);

loglog(A, Nsf, 'Linewidth', 2); grid on
hold on

loglog(A, Nsk, 'r', 'Linewidth', 2);

loglog(A, Nsp, 'g', 'Linewidth', 2);
legend('\bfFRANCIS', '\bfKAPLAN', '\bfPELTON')

A = str2num(get(handles.asin, 'String'));
A = A/3.28;
% Ns Francis
Nsf = 3470*(A).^(-0.625);
% Ns Kaplan
Nsk = 2419*(A).^(-0.489);
% Ns Pelton
Nsp = 85.49*(A).^(-0.243);

plot(A, Nsf, '*k')
plot(A, Nsk, '*k')
plot(A, Nsp, '*k')

plot([A A], [Nsf Nsk], '--k', 'Linewidth', 2)
plot([A A], [Nsf Nsp], '--k', 'Linewidth', 2)
plot([A A], [Nsp Nsk], '--k', 'Linewidth', 2)

box on; grid on
xlabel(' \bfAltura [m]')
ylabel(' \bfNs Velocidad Especifica')

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

function F_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to F (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of F as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of F as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function F_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to F (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function K_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to K (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of K as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of K as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function K_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to K (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function P_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to P (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of P as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of P as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function P_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to P (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in bp.
function bp_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to bp (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
Turbina_Pelton

% --- Executes on button press in bk.
function bk_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to bk (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
Turbina_Kaplan

% --- Executes on button press in bf.
function bf_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject handle to bf (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
Turbina_Francis

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton8.
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
global Aef Caudal
% hObject handle to pushbutton8 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
Multiples_Turbinas

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
Multiples_Turbinas_NoHomogeneas

```

B.2. Programación para dimensionar turbinas tipo Pelton

```

% --- Executes on button press in pushbutton7.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton7 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Datos
p = str2num(get(handles.d_, 'String'));
h = str2num(get(handles.H_, 'String'));
nG = str2num(get(handles.n_, 'String'));
Q = str2num(get(handles.q_, 'String'));

% Potencia
P_hp = p*h*nG*Q/550;
P_MW = P_hp*0.746/(1000);

% Velocidad
ns = 950/(h^0.5);
n = ns*h^(1.25)/(P_hp^0.5);
Np1 = (7200/n);
Npr = floor(Np1);
Np2 = Npr - rem(Npr, 2);

n = 7200/Np2;
ns = n*sqrt(P_hp)/(h^1.25);
set(handles.rn, 'String', n);
set(handles.rns, 'String', ns);

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Datos
p = str2num(get(handles.d_, 'String'));
h = str2num(get(handles.H_, 'String'));
nG = str2num(get(handles.n_, 'String'));
Q = str2num(get(handles.q_, 'String'));

% Potencia
P_hp = p*h*nG*Q/550;
P_MW = P_hp*0.746/(1000);

% Velocidad
ns = 950/(h^0.5);
n = ns*h^(1.25)/(P_hp^0.5);
Np1 = (7200/n);
Npr = floor(Np1);
Np2 = Npr- rem(Npr, 2);
Np2 = ceil(Np2/4)*4;
set(handles.Np_1, 'String', Np1);
set(handles.Np_2, 'String', Np2);

function Np_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Np_2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Np_2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Np_2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Np_2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Np_2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Datos
p = str2num(get(handles.d_, 'String'));
h = str2num(get(handles.H_, 'String'));
nG = str2num(get(handles.n_, 'String'));
Q = str2num(get(handles.q_, 'String'));

% Potencia
P_hp = p*h*nG*Q/550;
P_MW = P_hp*0.746/(1000);

% Velocidad
ns = 950/(h^0.5);
n = ns*h^(1.25)/(P_hp^0.5);
set(handles.n_rpm, 'String', n);

function Pmw_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Pmw (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Pmw as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Pmw as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Pmw_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Pmw (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Datos
p = str2num(get(handles.d_, 'String'));
h = str2num(get(handles.H_, 'String'));
nG = str2num(get(handles.n_, 'String'));
Q = str2num(get(handles.q_, 'String'));

% Potencia
P_hp = p*h*nG*Q/550;
P_MW = P_hp*0.746/(1000);
set(handles.Php, 'String', P_hp);
set(handles.Pmw, 'String', P_MW);

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.H_, 'String', '');
set(handles.q_, 'String', '');
set(handles.d_, 'String', '');
set(handles.n_, 'String', '');

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

set(handles.H_, 'String', '');
set(handles.q_, 'String', '');
set(handles.d_, 'String', '');
set(handles.n_, 'String', '');

set(handles.Php, 'String', '');
set(handles.Pmw, 'String', '');
set(handles.n_rpm, 'String', '');

set(handles.Np_1, 'String', '');
set(handles.Np_2, 'String', '');

set(handles.rn, 'String', '');
set(handles.rns, 'String', '');

set(handles.d1_, 'String', '');
set(handles.d2_, 'String', '');
set(handles.dm_, 'String', '');

```

B.3. Programación para dimensionar turbinas Tipo Francis

```

% --- Executes on button press in pushbutton7.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Datos
p = str2num(get(handles.d_, 'String'));
h = str2num(get(handles.H_, 'String'));
nG = str2num(get(handles.n_, 'String'));
Q = str2num(get(handles.q_, 'String'));

% Potencia
P_hp = p*h*nG*Q/550;
P_MW = P_hp*0.746/(1000);

% Velocidad
ns = 950/(h^0.5);
n = ns*h^(1.25)/(P_hp^0.5);
Np1 = (7200/n);
Npr = floor(Np1);
Np2 = Npr- rem(Npr, 2);

n = 7200/Np2;
ns = n*sqrt(P_hp)/(h^1.25);
set(handles.rn, 'String', n);
set(handles.rns, 'String', ns);

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```



```

function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Datos
p = str2num(get(handles.d_, 'String'));
h = str2num(get(handles.H_, 'String'));
nG = str2num(get(handles.n_, 'String'));
Q = str2num(get(handles.q_, 'String'));

% Potencia
P_hp = p*h*nG*Q/550;
P_MW = P_hp*0.746/(1000);

% Velocidad
ns = 950/(h^0.5);
n = ns*h^(1.25)/(P_hp^0.5);
Np1 = (7200/n);
Npr = floor(Np1);
Np2 = Npr- rem(Npr, 2);
Np2 = ceil(Np2/4)*4;
set(handles.Np_1, 'String', Np1);
set(handles.Np_2, 'String', Np2);

function Np_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Np_2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Np_2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Np_2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Np_2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Np_2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Datos
p = str2num(get(handles.d_, 'String'));
h = str2num(get(handles.H_, 'String'));
nG = str2num(get(handles.n_, 'String'));
Q = str2num(get(handles.q_, 'String'));

% Potencia
P_hp = p*h*nG*Q/550;
P_MW = P_hp*0.746/(1000);

% Velocidad
ns = 950/(h^0.5);
n = ns*h^(1.25)/(P_hp^0.5);
set(handles.n_rpm, 'String', n);

function Pmw_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Pmw (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Pmw as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Pmw as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Pmw_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Pmw (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Datos
p = str2num(get(handles.d_, 'String'));
h = str2num(get(handles.H_, 'String'));
nG = str2num(get(handles.n_, 'String'));
Q = str2num(get(handles.q_, 'String'));

% Potencia
P_hp = p*h*nG*Q/550;
P_MW = P_hp*0.746/(1000);
set(handles.Php, 'String', P_hp);
set(handles.Pmw, 'String', P_MW);

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
set(handles.H_, 'String', '');
set(handles.q_, 'String', '');
set(handles.d_, 'String', '');
set(handles.n_, 'String', '');

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

set(handles.H_, 'String', '');
set(handles.Q_, 'String', '');
set(handles.d_, 'String', '');
set(handles.n_, 'String', '');

set(handles.Php, 'String', '');
set(handles.Pmw, 'String', '');
set(handles.n_rpm, 'String', '');

set(handles.Np_1, 'String', '');
set(handles.Np_2, 'String', '');

set(handles.rn, 'String', '');
set(handles.rns, 'String', '');

set(handles.d1_, 'String', '');
set(handles.d2_, 'String', '');
set(handles.dm_, 'String', '');

function d1__Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to d1_ (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of d1_ as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of d1_ as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function d1__CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to d1_ (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function d2__Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to d2_ (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of d2_ as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of d2_ as a double

```

B.4. Programación para dimensionar turbinas tipo Kaplan

```

% --- Executes on button press in ok.
function ok_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to ok (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
global Aef Caudal

Ns = 3470*(Aef)^(-0.625);
set(handles.ves, 'String', Ns);

```

```

N = Ns*Aef^(3/4)/(sqrt(Caudal));
set(handles.vrot, 'String', N);

Np1 = (7200/N);
Npr = floor(Np1);
Np2 = Npr- rem(Npr, 2);
Np2 = ceil(Np2/4)*4;

set(handles.npolos, 'String', Np2);

Nsco = 120*60/16;
Nsin = Nsco*(Aef^(3/4)/sqrt(Caudal));

set(handles.nsc, 'String', Nsco);
set(handles.nsin, 'String', Nsin);

set(handles.nst, 'String', Ns);
phi = 0.79+0.00161*Nsco;
set(handles.phit, 'String', phi);
D3 = 84.5*phi*sqrt(Aef)/Nsin;
set(handles.d3t, 'String', D3);

R1 = 0.25+94.64/Nsin;
R2 = 6.94*(Nsin)^(-0.403);
R3 = 0.38+0.00517*Nsin;
R4 = 0.24+0.0000782*Nsin;

set(handles.r1, 'String', R1);
set(handles.r2, 'String', R2);
set(handles.r3, 'String', R3);
set(handles.r4, 'String', R4);

R5 = R1*D3;
R6 = R2*D3;
R7 = R3*D3;
R8 = R4*D3;

set(handles.r5, 'String', R5);
set(handles.r6, 'String', R6);
set(handles.r7, 'String', R7);
set(handles.r8, 'String', R8);

% Carcaza de acero
A1D = 0.4*Nsin^0.2;
set(handles.a1d, 'String', A1D);

B1D = 1.26+0.000379*Nsin;
set(handles.b1d, 'String', B1D);

C1D = 1.46+0.000324*Nsin;
set(handles.c1d, 'String', C1D);

D1D = 1.59+0.000574*Nsin;
set(handles.d1d, 'String', D1D);

E1D = 1.21+0.000271*Nsin;
set(handles.e1d, 'String', E1D);

F1D = 1.45+72.17/Nsin;
set(handles.f1d, 'String', F1D);

G1D = 1.29+41.63/Nsin;
set(handles.g1d, 'String', G1D);

```

```

H1D = 1.13+31.86/Nsin;
set(handles.h1d, 'String', H1D);

I1D = 0.45-31.8/Nsin;
set(handles.i1d, 'String', I1D);

L1D = 0.74+0.00087*Nsin;
set(handles.l1d, 'String', L1D);

M1D = 1/(2.06-0.0012*Nsin);
set(handles.m1d, 'String', M1D);

A1 = A1D*D3;
set(handles.a1, 'String', A1);

B1 = B1D*D3;
set(handles.b1, 'String', B1);

C1 = C1D*D3;
set(handles.c1, 'String', C1);

D1 = D1D*D3;
set(handles.d1, 'String', D1);

E1 = E1D*D3;
set(handles.e1, 'String', E1);

F1 = F1D*D3;
set(handles.f1, 'String', F1);

G1 = G1D*D3;
set(handles.g1, 'String', G1);

H1 = H1D*D3;
set(handles.h1, 'String', H1);

I1 = I1D*D3;
set(handles.i1, 'String', I1);

L1 = L1D*D3;
set(handles.l1, 'String', L1);

M1 = M1D*D3;
set(handles.m1, 'String', M1);

function ves_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to ves (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ves as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ves as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ves_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to ves (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

ANEXO No 3: Manual de Usuario para el Programa Pot_Hidroenergía V. 1.0

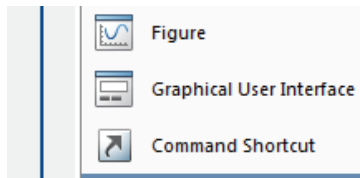
En el programa Pot_Hidroenergía V. 1.0 se han condensado todos los cálculos y procedimientos para encontrar la transferencia de energía potencial y cinética de una corriente hídrica para lo cual se requiere conocer con certeza los datos que se ingresa.

ADVERTENCIA:

- El desarrollo del presente programa es con fines académicos.
- Los datos obtenidos se deben analizar con criterio ingenieril con el fin de obtener resultados que se apeguen a datos constructivos y verificables.
- El autor no se responsabiliza por datos ingresados que dan resultados incoherentes.

El programa está desarrollado en lenguaje de programación para Matlab R2013a

Abrir desde el Graphical User Interface.



1. Se debe seleccionar y abrir el archivo "Hidroenergía", que se muestra a continuación:



PARÁMETROS ESPECÍFICOS

INGRESO DE DATOS

Altura: H = 65 m, 213.363 pies
Caudal: Q = 5 m³/s, 176.575 ft³/s
Densidad: p = 62.48
Eficiencia: n = 0.9

Sist. Inglés Borrar datos

POTENCIAL DISPONIBLE (PASO 1)

P = 3835.65 hp, 2.86139 MW OK

VELOCIDAD DE LA TURBINA (PASO 2)

n = 854.532 rpm OK

NUMERO DE POLOS (PASO 3)

Np = 8.40793 polos OK
Selección: 8

RE CALCULO DE LAS VELOCIDADES (PASO 4)

n = 900 rpm, ns = 68.4701 rpm OK

DIAMETRO DEL RODETE (PASO 5)

diametro 1: 28.5869, diametro mayor = 28.5869 OK
diametro 2: 28.4342

Siguiente Borrar todo

- Ingresar los datos correspondientes a la altura y caudal y propiedades físicas de densidad y eficiencia de la turbina

INGRESO DE DATOS

H =	<input type="text"/>	Altura pies	p =	<input type="text"/>	Densidad
Q =	<input type="text"/>	Caudal pies cúbicos por segundo	n =	<input type="text"/>	Eficiencia

- Como primera aproximación se determina la Potencia teórica de la turbina.

POTENCIA DE LA TURBINA (PASO 1)

P =	<input type="text"/>	hp	<input type="button" value="OK"/>
	<input type="text"/>	MW	

- Se determina una velocidad teórica de la turbina

VELOCIDAD DE LA TURBINA (PASO 2)

n =	<input type="text"/>	rpm	<input type="button" value="OK"/>
-----	----------------------	-----	-----------------------------------

- Con estos datos se determina un número de polos

NUMERO DE POLOS (PASO 3)

Np =	<input type="text"/>	polos	<input type="button" value="OK"/>
Selección	<input type="text"/>		

- Con un número normalizado de polos se procede a recalculer la velocidad sincrónica

RE CALCULO DE LAS VELOCIDADES (PASO 4)

n = rpm

ns = rpm

OK

- Con la velocidad sincrónica se calcula el diámetro del rodete y se compara con el diámetro mayor.

DIAMETRO DEL RODETE (PASO 5)

diametro 1

diametro 2

diametro mayor =

OK

Una vez que se determinó un diámetro de primera mano se procede a determinar el resto de variables por lo que se debe abrir el archivo Pérdidas.m, presionar el botón "SIGUIENTE"

Perdidas

Datos

Sistema Internacional Sistema Ingles

Caudal (m3/s) = cfs

Altura (m) = ft

Longitud de la tubería (m) = ft


Calcular Resetear

Sistema Internacional Sistema Ingles

Potencia (KW) hp

Velocidad (Handbook) fps

Diametro (Handbook) ft



Perdida	Valores	
1. Rejilla		m
2. Entrada		m
3. Friccion		m
4. Codos		m
5. Valvula		m
6. Distribuidor		m
TOTAL		m

Altura Efectiva m

TIPOS DE TURBINAS

- Por defecto se incluyen los datos que fueron ingresados en la primera pantalla. Incluir el dato de una probable longitud de la tubería

Datos		Sistema Internacional	Sistema Ingles
Caudal (m3/s) =	<input type="text" value="22.4"/>	<input type="text"/>	cfs
Altura (m) =	<input type="text" value="517.5"/>	<input type="text"/>	ft
Longitud de la tubería (m) =	<input type="text" value="930"/>	<input type="text"/>	ft

2. Click en el botón "Calcular"

<input type="button" value="Calcular"/>	<input type="button" value="Resetear"/>
---	---

3. Una vez cuantificadas las pérdidas se determina la potencia, velocidad y diámetro en unidades del sistema internacional y su correspondencia en el sistema inglés.

	Sistema Internacional	Sistema Ingles
Potencia (KW)	<input type="text"/>	<input type="text"/> hp
Velocidad (Handbook)	<input type="text"/>	<input type="text"/> fps
Diametro (Handbook)	<input type="text"/>	<input type="text"/> ft

4. Se determinan las probables pérdidas por accesorios en metros de longitud equivalente

Perdida	Valores	π
1. Rejilla		π
2. Entrada		π
3. Friccion		π
4. Codos		π
5. Valvula		π
6. Distribuidor		π
TOTAL		π

Altura Efectiva		π
------------------------	--	-------

TIPOS DE TURBINAS

Una vez que se tienen definidos los parámetros principales de un potencial hídrico se procede a seleccionar la turbina adecuada para determinar la energía aprovechable.

SELECCIÓN DE TURBINAS

Datos

Caudal (m³/s) = Sistema Internacional Sistema Ingles cfs

Altura (m) = ft

Turbinas

TURBINA DE FRANCIS 50 <= Ns <= 350

TURBINA DE KAPLAN Ns >= 300

TURBINA DE PELTON Ns <= 100

1. Por defecto se incluyen los datos iniciales de parámetros iniciales de Caudal y Altura en unidades del SI y sistema inglés.

Datos

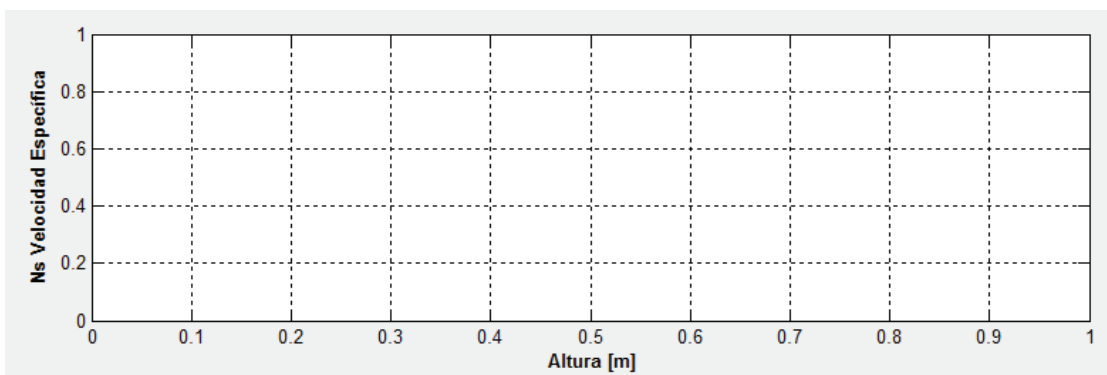
	Sistema Internacional	Sistema Ingles	
Caudal (m ³ /s) =	<input type="text"/>	<input type="text"/>	cfs
Altura (m) =	<input type="text"/>	<input type="text"/>	ft

2. Se realiza el cálculo de la velocidad específica y se presentan los valores de acuerdo a los rangos de las ecuaciones lo que permite seleccionar la turbina adecuada.

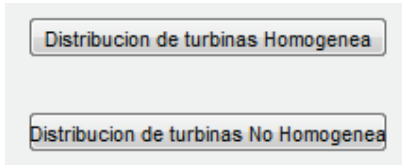
Turbinas

TURBINA DE FRANCIS	$50 \leq N_s \leq 350$	<input type="text"/>
TURBINA DE KAPLAN	$N_s \geq 300$	<input type="text"/>
TURBINA DE PELTON	$N_s \leq 100$	<input type="text"/>

3. Se grafican las curvas sobre las cuales se encuentra el valor del aprovechamiento hidro energético.

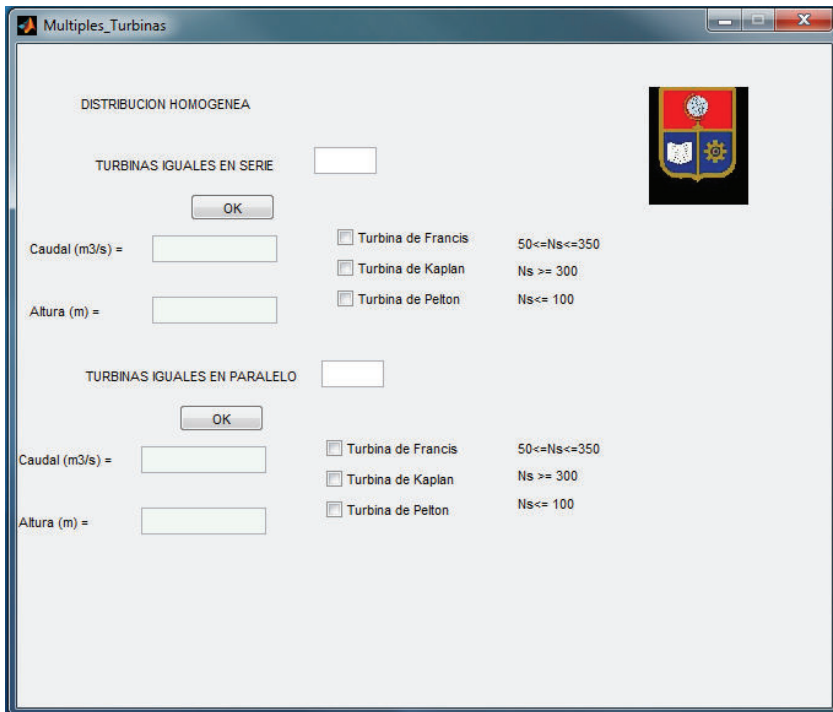


4. Se presenta un menú para seleccionar una probable distribución de turbinas, permitiendo seleccionar turbinas en paralelo con distribución homogénea y no homogénea.

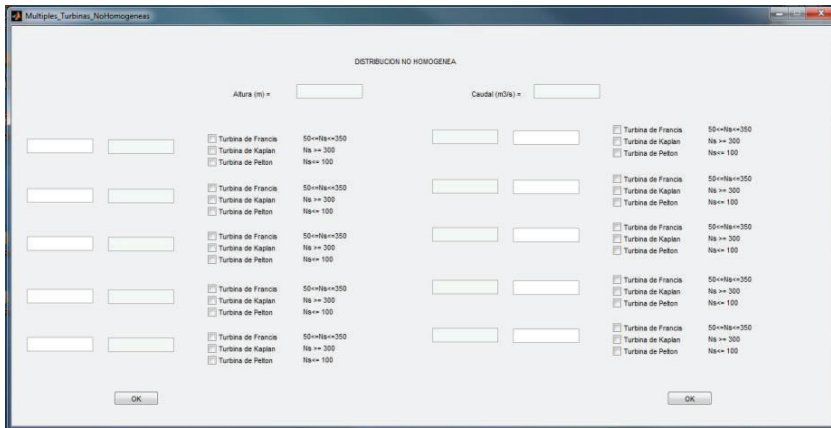


Con el archivo Multiples_Turbinas.m se pueden seleccionar turbinas en serie y en paralelo con distribución homogénea y no homogénea. Esto de acuerdo a parámetros técnico que deben ser analizados.

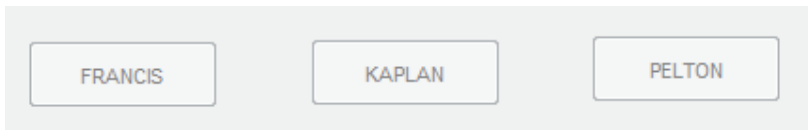
- A. Ingresar los datos del análisis en serie o paralelo con los posibles valores de Caudal y Altura.



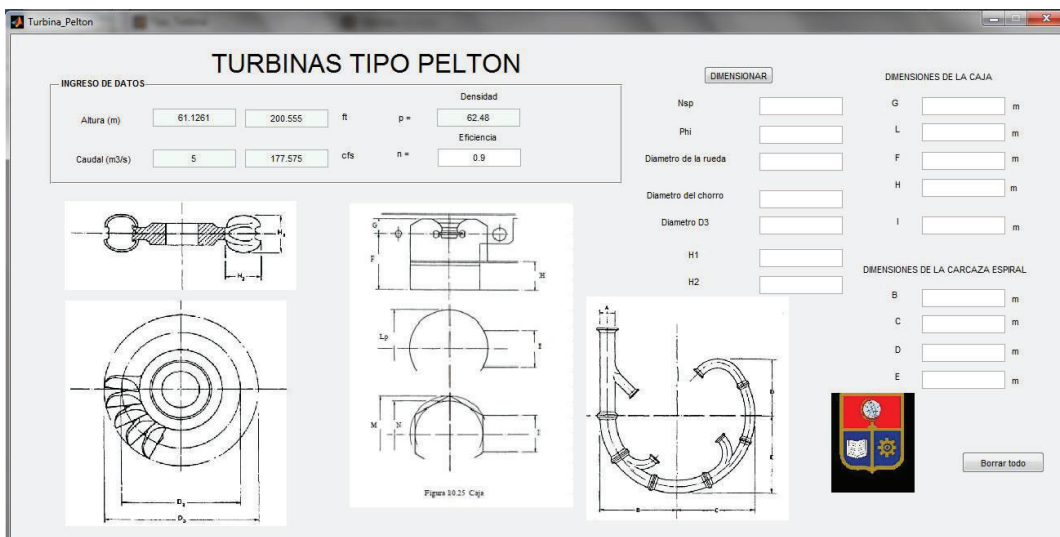
B. Al igual que el ítem A se tiene la distribución en paralelo y no homogénea



5. El programa permite seleccionar un probable tipo de turbina resaltando sobre las demás e inhabilitando los tipos que no son adecuados.



1. Para las turbinas tipo Pelton el ambiente de diseño es el mostrado a continuación



2. Se calculan los parámetros adicionales,

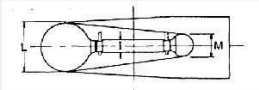
Velocidad Especifica	<input type="text"/>	DIMENSIONES DE LA CAJA	
Velocidad de Rotacion	<input type="text"/>	G	<input type="text"/> m
Phi	<input type="text"/>	L	<input type="text"/> m
Diametro de la rueda	<input type="text"/>	F	<input type="text"/> m
Diametro del chorro	<input type="text"/>	H	<input type="text"/> m
Diametro D3	<input type="text"/>	I	<input type="text"/> m
H1	<input type="text"/>	DIMENSIONES DEL ESPIRAL	
H2	<input type="text"/>	B	<input type="text"/> m
		C	<input type="text"/> m
		D	<input type="text"/> m
		E	<input type="text"/> m

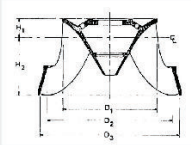


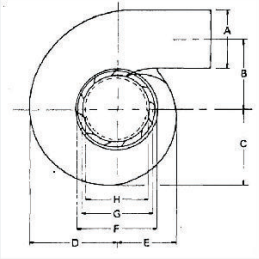
6. El programa llama mediante el click en el botón correspondiente al archivo seleccionado. Se analizan Turbinas Tipo Francis.

TURBINAS TIPO FRANCIS


INGRESO DE DATOS				DIAMETRO DEL RODETE (PASO 5)			
Altura (m)	<input type="text" value="61.1261"/>	<input type="text" value="200.555"/>	ft	Densidad	<input type="text" value="62.48"/>	lb/ft ³	
Caudal (m ³ /s)	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="177.575"/>	cfs	Eficiencia	<input type="text" value="0.9"/>	Ingresar un valor entre 0 - 1	







DIMENSIONES DEL RODETE				DIMENSIONES DE LA CAJA				
A	<input type="text"/>	m	G	<input type="text"/>	m	L	<input type="text"/>	m
B	<input type="text"/>	m	F	<input type="text"/>	m	H	<input type="text"/>	m
C	<input type="text"/>	m	I	<input type="text"/>	m			
D	<input type="text"/>	m						
E	<input type="text"/>	m						



7. Por defecto se incluyen los valores iniciales de Altura y Caudal, se incluye un valor de eficiencia de 0.9.

INGRESO DE DATOS

Altura (m)	<input type="text" value="61.1261"/>	<input type="text" value="200.555"/>	ft	Densidad	<input type="text" value="62.48"/>	lb/ft ³
Caudal (m ³ /s)	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="177.575"/>	cfs	Eficiencia	<input type="text" value="0.9"/>	

8. Al determinar los parámetros de funcionamiento de la turbina Francis, el programa procede a dimensionar las dimensiones de la turbina. Se debe analizar los parámetros adecuados.


Velocidad Especifica	<input type="text"/>	DIMENSIONES DE LA CAJA	
Velocidad de Rotacion	<input type="text"/>	G	<input type="text"/> m
Phi	<input type="text"/>	L	<input type="text"/> m
Diametro de la rueda	<input type="text"/>	F	<input type="text"/> m
Diametro del chorro	<input type="text"/>	H	<input type="text"/> m
Diametro D3	<input type="text"/>	I	<input type="text"/> m
H1	<input type="text"/>	DIMENSIONES DEL ESPIRAL	
H2	<input type="text"/>	B	<input type="text"/> m
		C	<input type="text"/> m
		D	<input type="text"/> m
		E	<input type="text"/> m
<input type="button" value="DIMENSIONAR"/>			
<input type="button" value="Borrar todo"/>			

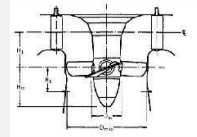
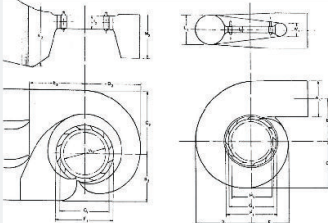
9. En el caso de ser adecuado una Turbina tipo Kaplan se presenta la pantalla a continuación

DATOS INICIALES

	Sistema Internacional	Sistema Ingles
Altura (m)	<input type="text" value="61.1261"/>	<input type="text" value="177.575"/> ft
Caudal (m ³ /s)	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="200.555"/> cfs

TURBINAS TIPO KAPLAN



Dimensionamiento inicial

Ns

Phi

Dimensionamiento del Rodete

Dm m

Hm m

H1 m

Ht m

Carcasa de acero

A1	<input type="text"/>	Static Text
B1	<input type="text"/>	m
C1	<input type="text"/>	m
D1	<input type="text"/>	m
E1	<input type="text"/>	m
F1	<input type="text"/>	m
G1	<input type="text"/>	m
H1	<input type="text"/>	m
I1	<input type="text"/>	m
L1	<input type="text"/>	m
M1	<input type="text"/>	m

Carcasa de concreto

B2	<input type="text"/>	m
C2	<input type="text"/>	m
D2	<input type="text"/>	m
E2	<input type="text"/>	m
F2	<input type="text"/>	m
G2	<input type="text"/>	m
H2	<input type="text"/>	m
I2	<input type="text"/>	m
L2	<input type="text"/>	m
M2	<input type="text"/>	m

La carcasa de acero se recomienda para cargas Hd menores a 15 m y potencia de diseño P1 mayor a 70 MW.
La carcasa de concreto se utiliza para cargas de diseño Hd mayores a 40 metros y potencia de diseño entre 50 y 100 MW.