

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO
HIDRÁULICO DE PICO, MICRO Y MINI CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN
ZONAS NO INTERCONECTADAS A LA RED ELECTRICA NACIONAL**

BRAYANN SNEYDER PRADA ROMERO

MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ RAMÍREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2018

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO
HIDRÁULICO DE PICO, MICRO Y MINI CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN
ZONAS NO INTERCONECTADAS A LA RED ELÉCTRICA NACIONAL**

BRAYANN SNEYDER PRADA ROMERO

MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ RAMÍREZ

**Proyecto de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Manuel del Jesús Martínez

Ph.D. en Ingeniería Mecánica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado, un esfuerzo total es una victoria completa”. Mahatma Gandhi

A Dios, que siempre ha sido el motor y guía de mi vida, y quien, por medio de su voluntad, me encamino en este viaje.

Dedico este logro a todos los integrantes de mi familia, en especial a mis padres Nelson y Liliana, mi nona Inés y mi abuela Cecilia, por su constante apoyo e instrucción en mi vida, haciéndome la persona que hoy soy.

A mi novia Daniela por apoyarme, darme fuerzas y hacer de esta persona un profesional humano, lleno de amor y con menos defectos.

A mis amigos en general, porque a través de los amigos se vive alegre, motivado y son un regalo de Dios y en especial a nuestro buen amigo Marco (Q.E.P.D), cuya vida nos enseñó el don de la amistad, el esfuerzo y la dedicación; y obviamente a mi hermano Miguel que con su laborioso esfuerzo, y excelente amistad hizo más amena mi estancia en la UIS.

Brayann Sneyder Prada Romero

DEDICATORIA

Dedico este logro principalmente a Dios que me ha acompañado durante toda mi existencia, me ha aconsejado y ayudado a sortear todos los altibajos que se presentan en el camino de la vida.

A mis padres y hermanos que son el principal motor para levantarme cada día, es por ellos que me esfuerzo al máximo en todo lo que me propongo porque quiero compartir con ellos mis triunfos y derrotas.

A mi pequeña Natalia Stefanny por ser la mujer que me acompañó durante más de la mitad de mi carrera universitaria y ha compartido conmigo: su vida, sus alegrías, tristezas y por estar siempre ahí para mí cuando más la necesito.

A mi compañero Ingeniero Mecánico Marco Antonio Beltrán que hoy ya no se encuentra con nosotros, es triste que haya partido de este mundo tan joven, pero siempre estará en nuestra memoria, la de sus compañeros, amigos y familiares.

Viva el viejo Marco.

A todos mis amigos y demás compañeros de la universidad y del colegio que siempre creyeron en mí y esperan grandes cosas, espero nunca defraudarlos, siempre daré lo mejor y no me rendiré. Lo prometo.

Doctorisímo, Brayann Sneyder, gran persona y amigo. Este proyecto se debe en gran parte a Ud. Gracias por ponerse la 10 y ayudarme mientras yo daba mis primeros pasos en el mundo laboral.

Miguel Ángel Sánchez Ramírez

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, agradecemos a Dios por darnos la oportunidad de estar vivos, por haber tomado las decisiones necesarias que nos permitieron estudiar esta apasionante carrera, y por encaminar nuestro pensamiento hacia la emocionante área de la mecánica de fluidos.

A la universidad pública UIS, por permitirnos ser parte de su distinguida comunidad, por educarnos integralmente, y hacernos partícipes de todas las herramientas intelectuales y materiales, que de una u otra manera nos formaron con ciudadanos profesionales con altos estándares, permitiéndonos aportar al desarrollo de nuestro país. A los profesores que hicieron parte de nuestra formación profesional, que a través de sus enseñanzas, consejos y recomendaciones, nos hicieron crecer intelectual y personalmente, fomentando en nosotros una actitud crítica, curiosa, investigativa, humana y correcta. A los profesores Javier Rugeles Pérez, Néstor Raúl D'croz y Manuel del Jesús Martínez, por su constante apoyo durante la realización de este proyecto y por sus críticas y recomendaciones que permitieron la culminación exitosa de la tesis.

Al Laboratorio de STAF, que nos acogió, nos educó, y nos permitió consolidar nuestros conocimientos, y compartirlos con nuestros compañeros, desarrollando en nosotros amor por la docencia.

A nuestras familias, por su apoyo continuo e incondicional, que a través de su comprensión, permitieron que dedicáramos gran parte de nuestro tiempo a la academia y a nuestra formación.

A nuestros amigos y compañeros que se convirtieron en nuestra familia universitaria, con los que compartimos largas jornadas académicas, deportivas y diversas historias que quedaran en nuestra memoria.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	24
1. JUSTIFICACIÓN	26
2. OBJETIVOS.....	30
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	30
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
3. MARCO TEÓRICO	31
3.1 ENERGÍA	31
3.2 TIPOS DE ENERGÍA.....	32
3.3 ENERGÍA MECÁNICA.....	32
3.4 ENERGÍA TÉRMICA.....	33
3.5 ENERGÍA HIDRÁULICA	34
3.6 ENERGÍA ELÉCTRICA.....	35
3.7 FUENTES NO RENOVABLES.....	36
3.8 FUENTES RENOVABLES.....	36
3.9 TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA	37
3.10 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA	38
3.11 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN	

EL MUNDO.....	39
3.12 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN COLOMBIA.....	40
3.13 NORMATIVIDAD EN COLOMBIA.....	41
3.13.1 Ley 1715 de 2014	42
3.13.2 Ley 143 de 1994	42
3.13.3 Ley 142 de 1994	42
3.14 SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL.....	43
3.15 UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA ADSCRITA A MINMINAS.....	44
3.16 ZONAS NO INTERCONECTADAS.....	44
3.17 ÓRGANOS ESTATALES INVOLUCRADOS EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA	45
3.18 MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA	46
3.19 UPME	48
3.20 FAZNI	49
3.21 CLASIFICACIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	50
3.22 SEGÚN LA POTENCIA INSTALADA.....	50
3.23 PICOCENTRAL (PICOICHE).....	51
3.24 MICROCENTRAL (MICROICHE).....	51
3.25 MINICENTRAL (MINICHE)	52
3.26 PEQUEÑA CENTRAL (PCH).....	54
3.27 CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	54
3.28 SEGÚN EL TIPO DE CAPTACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	55
3.29 CENTRALES A PIE DE PRESA	56

3.30 CENTRALES DE AGUA FLUYENTE.....	57
3.31 ATLAS HIDROENERGÉTICO DE COLOMBIA	58
3.32 POTENCIAL HIDROELÉCTRICO DE COLOMBIA	60
3.33 EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	60
3.34 REGISTROS DE DATOS HIDROLÓGICOS	63
3.35 MEDICIÓN DE CAUDAL	64
3.36 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE CAUDAL.....	65
3.37 MEDICIÓN DIRECTA DEL CAUDAL.....	66
3.38 MÉTODO DEL RECIPIENTE	66
3.39 MÉTODO DEL ÁREA Y LA VELOCIDAD	67
3.40 MÉTODO DEL VERTEDERO	67
3.41 MÉTODO DE AFORO	68
3.42 HISTOGRAMA.....	68
3.43 CURVA DE CAUDALES CLASIFICADOS (CCC)	70
3.44 MEDICIÓN DE SALTO O ALTURA BRUTA.....	70
3.45 MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL SALTO BRUTO.	71
3.46 CAUDAL ECOLÓGICO.....	71
3.47 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA.....	72
3.48 CALCULO DE LA POTENCIA Y ENERGÍA REQUERIDA	75
3.49 COMUNIDADES NO ENERGIZADAS	76
3.50 COMUNIDADES CON PLANTAS DIÉSEL	77
3.51 OBRAS REQUERIDAS PARA CONSTRUCCIÓN DE CENTRALES DE AGUA FLUYENTE.....	77
3.52 OBRAS CIVILES	79

3.53 BOCATOMAS.....	81
3.54 BARRAJES.....	81
3.55 PRESAS DERIVADORAS O AZUDES	83
3.56 TOMAS DE BARRAJE SUMERGIDO	83
3.57 ALIVIADEROS.....	84
3.58 DESARENADOR	84
3.59 CÁMARA DE CARGA.....	85
3.60 CANALES DE CONDUCCIÓN.....	86
3.61 TUBERÍAS DE PRESIÓN.....	87
3.62 CHIMENEA DE EQUILIBRIO.....	88
3.63 MATERIALES EMPLEADOS EN LA TUBERÍA FORZADA.....	90
3.64 PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍAS.....	91
3.65 GOLPE DE ARIETE.....	92
3.66 CASA DE MAQUINAS	93
3.67 EQUIPOS MECÁNICOS.....	94
3.68 VÁLVULAS	94
3.69 VÁLVULAS DE COMPUERTA.....	95
3.70 VÁLVULAS DE BOLA.....	95
3.71 PÉRDIDAS EN VÁLVULAS	95
3.72 TURBINAS	96
3.73 CLASIFICACIÓN DE TURBINAS SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO	97
3.74 CLASIFICACIÓN SEGÚN GRADO DE REACCIÓN	98
3.75 TURBINAS DE ACCIÓN.....	99
3.76 TURBINA PELTON.....	99

3.77 PARTES DE LA TURBINA PELTON	101
3.78 FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA PELTON	101
3.79 TURBINAS DE REACCIÓN	102
3.80 TURBINA FRANCIS	103
3.81 PARTES DE LA TURBINA FRANCIS	104
3.82 FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA FRANCIS	105
3.83 TURBINA KAPLAN	105
3.84 PARTES DE LA TURBINA KAPLAN.....	107
3.85 FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA KAPLAN.....	108
3.86 RENDIMIENTO DE LAS TURBINAS	109
3.87 CURVAS CARACTERÍSTICAS	110
3.88 VELOCIDAD ESPECÍFICA	111
3.89 TEORÍA DE MODELOS O LEYES DE SEMEJANZA.....	112
3.90 CRITERIOS PARA DISEÑO DE TURBINAS	113
3.91 REGULACIÓN DE VELOCIDAD.....	114
3.92 REGULACIÓN DE VELOCIDAD POR REGULACIÓN DE CARGA	115
3.93 CAVITACIÓN EN TURBINAS	115
3.94 BOMBAS USADAS COMO TURBINAS	116
3.95 TRANSMISIONES MECÁNICAS	117
3.96 EQUIPOS ELÉCTRICOS.....	117
3.97 GENERADORES.....	118
3.98 SÍNCRONOS	120
3.99 ASÍNCRONOS.....	122
3.100 MOTORES USADOS COMO GENERADORES	122

3.101 TRANSFORMADORES	123
4. DISEÑO HIDRAULICO.....	125
4.1 MECÁNICA DE FLUIDOS	125
4.2 GOLPE DE ARIETE.....	126
4.3 PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍAS.....	128
4.4 DISEÑO HIDRÁULICO DE TURBINAS	132
4.4.1 Diseño hidráulico de la turbina Pelton	132
4.4.2 Diseño hidráulico de la turbina Francis	136
4.4.2.1 Calculo Triángulos de velocidad.	136
4.4.2.2 Cámara espiral	140
4.4.3 Diseño hidráulico de TK.....	143
5. MANTENIMIENTO.....	148
5.1 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN BOCATOMAS.....	150
5.2 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN CANALES	150
5.3 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN DESARENADORES.....	150
5.4 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN CÁMARAS DE CARGA.....	151
5.5 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN TUBERÍAS.....	151
5.6 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN VÁLVULAS	152
5.7 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN TURBINAS HIDRÁULICAS	152
5.8 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN ACOPLAMIENTOS, RODAMIENTOS Y TRANSMISIÓN.....	153
5.9 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN REGULADORES	153
5.10 HOJA DE VIDA DE EQUIPOS.....	154
5.11 REPUESTOS Y HERRAMIENTAS PARA MANTENIMIENTO	155

5.12 DIAGNÓSTICO DE FALLAS.....	155
6. ANÁLISIS ECONOMICO	157
6.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS	157
6.2 TASA SOCIAL DE DESCUENTO	158
6.3 CRITERIOS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE UN PROYECTO	158
6.3.1 VALOR PRESENTE NETO (VPN)	159
6.3.2 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR).....	160
6.3.3 PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (N)	161
6.3.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA COSTO/BENEFICIO.....	162
7. SISTEMAS BÁSICOS DE CONTROL EN LA GENERACIÓN.....	163
7.1 EQUIPOS DE CONTROL DEL SISTEMA DE GENERACIÓN	163
7.1.1 Voltímetro, amperímetro y medidor de frecuencia.....	163
7.1.2 Watímetro y medidor de energía (kW-h)	163
7.1.3 Medidor del factor de potencia y medidor reactivo (kVA)	164
7.2 EQUIPOS QUE CONTROLAN LA VELOCIDAD DE LA TURBINA	164
7.2.1 Regulador de caudal:.....	165
7.2.2 Regulador de carga:	167
7.2.3 Sistema de control digital y excitación de maquina sincrónicas	167
8. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA	169
8.1 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA HERRAMIENTA	169
8.1.1 Características principales de la Interfaz.....	170
8.2 PROGRAMACIÓN.....	172
8.2.1 Demanda	175
8.2.1.1 Demanda haciendo uso de hoja de cálculo.....	177

8.2.2 Potencial Hidroenergético	181
8.2.3 Selección de la Turbina	183
8.2.4 Costos	186
9. PRUEBAS Y RESULTADOS	193
9.1 ANÁLISIS ENTRE EL MÉTODO TRADICIONAL Y EL PLANTEADO EN EL PROYECTO.	194
9.1.1 Método tradicional.....	194
9.1.2 Método desarrollado a través de la herramienta computacional	194
9.1.3 Ventajas del software sobre el método tradicional.	198
9.2 PRUEBA COMPARATIVA	199
10. CONCLUSIONES	203
11. RECOMENDACIONES.....	206
BIBLIOGRAFIA.....	209

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localidades y zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional. .	28
Figura 2. Uso de la energía hidráulica en el trabajo humano.	34
Figura 3. Energía hidroeléctrica para transformación energética.	38
Figura 4. Estimación económica del costo del servicio eléctrico.	43
Figura 5. Redes del sistema interconectado nacional (SIN).	47
Figura 6. Mapa del monitoreo energético de las zonas no interconectadas.	48
Figura 7. Equipo electromecánico en picocentral hidroeléctrica de 5 KW	52
Figura 8. Turbina Pelton de dos inyectores con potencia instalada de 200 kW.	53
Figura 9. Turbina Francis acoplada a un generador de 250KW	55
Figura 10. Central Hidroeléctrica a pie de presa	56
Figura 11. Captación de agua fluyente	58
Figura 12. Portada Atlas hidroenergético de Colombia	59
Figura 13. Curva de duración de caudales.	62
Figura 14. Red de estaciones hidrológicas y Alertas.	64
Figura 15. Tipos de vertedero utilizados en la medición de caudal.	69
Figura 16. Potencia instalada, curva de demanda de la comunidad durante un día típico, proyección por potencia y por energía de la comunidad durante T años. ...	76
Figura 17. Motor Diesel 3612 marca CAT, Potencia 2980-3700 kW.	78
Figura 18. Obras y equipos de una central hidroeléctrica a filo de agua.	79
Figura 19. Obras civiles mini central hidráulica.	80
Figura 20. Esquema de bocatoma	82
Figura 21. Azud	85

Figura 22. Aliviadero.....	86
Figura 23. Tipos de secciones de canal.....	88
Figura 24. Tubería corta y tubería larga.....	89
Figura 25. Golpe de ariete.....	93
Figura 26. Perdidas de presión en algunas válvulas.....	96
Figura 27. Ejemplos de turbinas.....	98
Figura 28. Sección transversal de una turbina Pelton de una sola pieza (Dibujo de la firma Wyss).....	100
Figura 29. Turbina Francis.....	106
Figura 30. Rodete y mecanismo del distribuidor.....	107
Figura 31. Porcentaje de potencia de diseño – Porcentaje de carga de diseño. .	111
Figura 32. Alabes Fink en distribuidor para regulación de velocidad de la turbina.	114
Figura 33. Alternador Volvo trifásico síncrono 88 kVA.....	119
Figura 34. Estator de generador síncrono trifásico.....	121
Figura 35. Transformador WEG.....	124
Figura 36. Tubería forzada, Carga neta.....	129
Figura 37. Triangulo de velocidades en turbina pelton.....	134
Figura 38. Dimensiones principales de la cazoleta.....	136
Figura 39. Triángulos de velocidades de entrada y salida.....	137
Figura 40. Tablas de selección constantes ϕ	139
Figura 41. Tablas de selección constantes b y ξ	140
Figura 42. Rodete de la turbina Francis y curva de Alpha.....	141
Figura 43. Dimensiones de la turbina Kaplan, relacionadas con N_s	143
Figura 44. Dimensiones de la carcasa.....	145
Figura 45. Dimensiones del tubo de aspiración.....	147
Figura 46. Mantenimiento del rodete y eje de una turbina Francis.....	154
Figura 47. Curva P-F.....	156
Figura 48. Estimacion del VPN.....	160
Figura 49. Tablero de control en generación hidroeléctrica.....	165

Figura 50. Control de velocidad en un proceso de generación.	166
Figura 51. Regulación de caudal para Pelton.	167
Figura 52. Regulación de Carga.	168
Figura 53. Pantalla principal HidroEnergía PRO	169
Figura 54. Navegación entre pestañas.	170
Figura 55. Paso a paso de HidroEnergía PRO	171
Figura 56. Gráfico de dispersión para turbinas Francis.	184
Figura 57. Precio específico en centrales de diferente capacidad.	188
Figura 58. Datos linealizados de la figura 73.	190
Figura 59. Costo por kW.	191

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Potencial hidroeléctrico acumulado por tipo de central, y por sitio identificado para aprovechamiento, en kW.	61
Tabla 2. Medición de salto o altura bruta.	74
Tabla 3. Comparación de los diferentes materiales para tuberías de presión.	91
Tabla 4. Comparación entre los órganos constructivos en turbinas de acción y reacción.	103
Tabla 5. Tipos de transmisiones mecánicas.	119
Tabla 6. Numero de cucharas en función de la N_s	135
Tabla 7. Tabla de relación N_s y coeficiente de Thoma.	142
Tabla 8. Explicación de los componentes del Software desarrollado.	173
Tabla 9. Vida útil de pico y minicentrales hidroeléctricas.	176
Tabla 10. Cuadro de demanda.	178
Tabla 11. Sumatoria de potencias de demanda en diferentes rangos horarios. ...	179
Tabla 12. Ponderación de potencias.	180
Tabla 13. Proyección de demanda de energía y potencia UPME.	181
Tabla 14. Hoja de Excel para introducir datos históricos de caudales.	183
Tabla 15. Costos unitarios de PCH's.	187
Tabla 16. Proyección de costos en pico y microCHE en función de la potencia..	189
Tabla 17. Analisis de fuentes para el % de costos.	192
Tabla 18. Análisis de métodos para el estudio de turbomáquinas.	193
Tabla 19. Comparacion 1 entre el diseño comun y el asistido por el software. ...	197
Tabla 20. Comparacion 2 entre el diseño comun y el asistido por el software. ...	198
Tabla 21. Comparación y análisis entre HidroEnergia PRO y el proyecto de pico central.	200

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Herramienta computacional diseñada, HidroEnergía PRO.

ANEXO B. Manual de usuario de la herramienta HidroEnergía PRO.

ANEXO C. Diagrama de flujo de diseño, Turbina PELTON.

ANEXO D. Diagrama de flujo de diseño, Turbina FRANCIS.

ANEXO E. Diagrama de flujo de diseño, Turbina KAPLAN.

ANEXO F. Recomendaciones de mantenimiento, Turbina PELTON.

ANEXO G. Recomendaciones de mantenimiento, Turbina FRANCIS.

ANEXO H. Recomendaciones de mantenimiento, Turbina KAPLAN.

ANEXO I. Recomendaciones del Control en turbinas hidráulicas.

ANEXO J. Recomendaciones del tipo de Bocatoma.

ANEXO K. Video tutorial, para el trazado de la tubería de presión.

ANEXO L. Reportes de Pruebas realizadas con el software.

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE PICO, MICRO Y MINI CENTRALES HIDROELÉCTRICAS EN ZONAS NO INTERCONECTADAS A LA RED ELECTRICA NACIONAL*

AUTORES: MIGUEL ANGEL SANCHEZ RAMIREZ, BRAYANN SNEYDER PRADA ROMERO.**

PALABRAS CLAVES: CENTRALES HIDROELECTRICAS, TURBINAS HIDRAULICAS, ENERGÍA, ZONAS NO INTERCONECTADAS

DESCRIPCIÓN: Colombia posee un gran potencial hidroenergetico, que de ser aprovechado supliríamos la necesidad energética de las zonas más apartadas del país y se produciría un gran cambio a nivel económico y ambiental, debido a que la energía es sinónimo de progreso y al ser obtenida de un recurso renovable como el agua, se disminuiría la producción de gases de efecto invernadero.

Es así como el objetivo del proyecto es desarrollar una herramienta computacional que permita a las zonas no interconectadas hacer más asequible y viable la opción de energización mediante pequeñas centrales hidroeléctricas a filo de agua, debido a la disminución de costos asociados a estudios de prefactibilidad. Esta herramienta permite al usuario obtener una estimación de la demanda energética mediante información socioeconómica introducida, además a través datos históricos provistos; calcular el potencial existente de la fuente hídrica. Se realiza un análisis de viabilidad energética, posteriormente selecciona la turbina hidráulica, se realiza un análisis básico de viabilidad económica y provee un reporte con toda la información pertinente calculada durante la ejecución de la herramienta.

Esta herramienta proporciona información cuantitativa y cualitativa como: Demanda de potencia, turbina seleccionada, velocidad específica, revoluciones de la turbina y del generador, tipo de generador y número de polos, salto bruto, salto neto, caudal de diseño, caudal ecológico, material de la tubería de presión, velocidad promedio del agua, diámetro nominal, presión máxima de trabajo, histograma de demanda energética, pronóstico de demanda energética a n años de vida útil, histograma de caudales, curva de duración de caudales, diseño preliminar de la geométrica de la turbina, distribuidor, carcasa y tubería de aspiración en caso de que se requiera, cálculo de los triángulos de velocidad, costo específico por kW instalado, costos de obras civiles, hidrograma, accesorios, imprevistos entre otros, recomendaciones de control, mantenimiento y tipo de bocatoma.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Programa Ingeniería Mecánica. Director: Manuel del Jesús Martínez

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL FOR THE HYDRAULIC DESIGN OF PEAK, MICRO AND MINI HYDROELECTRIC POWER PLACES IN NON-INTERCONNECTED ZONES TO THE NATIONAL ELECTRICAL NETWORK *

AUTHORS: MIGUEL ANGEL SANCHEZ RAMIREZ, BRAYANN SNEYDER PRADA ROMERO.**

KEYWORDS: HYDROELECTRIC POWER PLANTS, HYDRAULIC TURBINES, ENERGY, NON-INTERCONNECTED ZONES

DESCRIPTION: Colombia has great potential in hydropower which can supplement the energy needs of the most remote areas of the country and contribute to economic development and environmental sustainability. Energy is required for progress and through the use of a renewable source such as water; we can meet growing demand for energy while reducing the level of emitted greenhouse gases.

The objective of this project is to develop a computational tool that allows remote areas to have an option of generating affordable and feasible hydropower through the use of small hydroelectric power plants by the edge of flowing bodies of water. Affordability would come a result of decreased costs associated with pre-feasibility studies. This tool allows the user to estimate the energy demand of an area using available socioeconomic data and provided historical data to calculate the existing potential of the water source. If the site is suitable, an energy feasibility analysis and a basic economic feasibility analysis will be carried out and the water turbine will be selected. A report is generated that includes all the relevant information calculated during the execution of the tool.

This tool provides quantitative and qualitative information such as: power demand, selection for the turbine, specific speed, turbine and generator revolutions, generator type and number of poles, gross jump, net jump, design flow rate, ecological flow, the pipe material pressure, average water velocity, nominal diameter, maximum working pressure, energy demand histogram, energy demand forecast, estimate useful lifespan, flow histogram, flow duration curve, preliminary design of the geometry of the turbine, distributor, casing and suction pipe if required, calculation of speed triangles, specific cost per kW installed, costs of civil works, hydrogroup, accessories, contingencies among others, recommendations for control, maintenance and type of catchment.

* Degree Project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering program. Director: Manuel del Jesus Martinez

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de una región, siempre ira de la mano, con la satisfacción de los requerimientos energéticos de la misma; y uno de los problemas presentados en Colombia basados en hechos como la guerra, la centralización y el desvió de recursos, además de factores geográficos como los terrenos difíciles, distancias largas etc. Han impedido que zonas con gran potencial agroindustrial, se desarrollen eficientemente, aportando mejoras al desarrollo mismo del país. La búsqueda de mejoras energéticas y el aprovechamiento de los recursos de cada región fueron pilares fundamentales que motivaron la decisión de aportar a través del presente proyecto, en la mejora de estas condiciones y en la búsqueda de facilitar el acceso a la energía, utilizando el recurso hídrico de cada región.

Para la construcción de una central hidroeléctrica, es necesario documentarse y tomar datos, tanto del recurso hídrico, como de las alturas geodésicas, que representan el potencial hidroenergetico, que debería suplir la demanda energética de la población. Debido a la dificultad y los altos precios de inversión inicial, el estado ha preferido suplir esta demanda con plantas diésel, muchas de las cuales presentan actualmente inconvenientes de generación, por mantenimiento inadecuado. La utilización de la energía hidráulica tiene muchos beneficios en estas regiones, pues son mucho menos contaminantes, el recurso hídrico abunda, el mantenimiento es menos complejo y la vida útil puede garantizar una generación con mayor disponibilidad.

La herramienta computacional desarrollada permite, predecir la viabilidad de un posible proyecto de generación de baja potencia, contribuyendo con el proceso de diseño hidráulico, dando una idea cualitativa de la inversión y el retorno de la misma. Además, facilita los cálculos hidrológicos, que permiten conocer la factibilidad del recurso hídrico aplicado a la central. El siguiente documento presenta una explicación detallada de cómo se creó e implementó la herramienta, y expone sus características y campo de acción en zonas no interconectadas, brindando un estímulo al desarrollo de estos proyectos.

1. JUSTIFICACIÓN

El territorio colombiano posee actualmente una cobertura al servicio eléctrico a través del SIN (sistema interconectado nacional) del 48%, según datos del ministerio de minas y energía; esta cobertura está basada en el desarrollo económico del país, que debido a su organización centralista, se extiende a lo largo de la zona central andina, desde la costa atlántica hasta la costa pacífica sur en el municipio de Tumaco, dejando fuera del SIN a gran parte de la región de la Orinoquia, la amazonia, la zona insular y el Choco; esta falta de interconexión obedece a la baja demografía en estos sitios, y a la dificultad de llevar el servicio eléctrico a través de zonas selváticas y parques nacionales naturales, en donde las pérdidas por transmisión serían en muchos de los casos mayores al consumo propio en estos sectores.

Las zonas no interconectadas conocidas como ZNI, poseen sistemas de generación energética basados en la utilización de combustibles como el carbón, gas y diésel, también pequeñas centrales hidroeléctricas, sistemas de energía alternativa (eólica y solar) entre otras. El problema radica en que, por su bajo costo, la utilización de derivados del petróleo, gas y carbón, están en la cabeza de la producción eléctrica en las ZNI, generando altos grados de contaminación que contribuyen a la no preservación de estas regiones naturales. De esta manera se limita el grado de aprovechamiento del recurso hídrico que en ellas abunda.

Las plantas diésel constituyen la solución más rápida, pero menos eficiente y confiable, lo que las hace contaminantes, aun siendo las más utilizadas en las ZNI, pero muchas de estas plantas están en alto grado de deterioro, y para garantizar el abastecimiento eléctrico se requiere una solución más estructurada, amigable con el medio ambiente y que utilice los recursos naturales directos que la región ofrece. De esta manera se busca por medio del presente proyecto, plasmar una metodología de diseño optima de pequeñas centrales hidroeléctricas, a través de una herramienta computacional que relacione datos reales del lugar donde se llevará a cabo un posible proyecto, y se facilite al usuario el laborioso trabajo que esto conlleva, obteniéndose resultados como: cálculos hidráulicos, tipo de turbina recomendada, modo de captación del recurso hídrico, capacidad, transmisión, control, mantenimiento y un análisis económico que brinde la posibilidad de utilizar recursos de la FAZNI (Fondo de apoyo a la energización de zonas no interconectadas) para solucionar necesidades energéticas en las ZNI; además poseen un alto potencial agrícola, que fácilmente comenzará a aumentar por el estado de postconflicto que vive el país actualmente.

Figura 1. Localidades y zonas no interconectadas al sistema eléctrico nacional.



Fuente: MINMINAS. Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas – FAZNI [Imagen]. Ministerio de minas y energía [Consultado: 2 de enero de 2018] .Disponble en internet: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>

Es evidente el crecimiento económico que tendrá Colombia en un futuro cercano debido al proceso actual de paz, debido a que muchas zonas agrícolas que han estado neutras tras el conflicto volverán a ser productivas, aportaran al desarrollo

total del país y al crecimiento del PIB que según el PND (Plan Nacional de Desarrollo) crecerá de 2% a 3,8% debido al mejoramiento del sector agrícola. También el Departamento Nacional de Planeación (DNP) estima la contribución de la paz a la expansión de la actividad económica entre 1,1% y 1,9% anual. Este bono elevaría la capacidad de crecimiento potencial de la economía colombiana de 4% a entre 5,1% y 5,9% anual, por lo que un proyecto de esta índole permitirá a estas zonas aisladas realizar el crecimiento económico pronosticado, haciéndolas competitivas con el resto del país.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta computacional que agilice las labores de diseño hidráulico para ejecución de proyectos hidroeléctricos en zonas no interconectadas a la red eléctrica nacional, siguiendo los objetivos misionales de la Universidad Industrial de Santander de innovación, desarrollo tecnológico y aprovechamiento de recursos naturales, en busca de dar solución a necesidades socioeconómicas en zonas aisladas y con alto potencial agrícola.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Desarrollar una herramienta computacional, que relacione datos reales de un lugar donde se quiera llevar a cabo un posible proyecto pico, micro o mini hidroeléctrico, y facilitar al usuario la laboriosa tarea que esto conlleva, obteniéndose resultados como: cálculos hidráulicos, tipo de turbina recomendada, modo de captación del recurso hídrico, capacidad, análisis económico y recomendaciones de control y mantenimiento.
- ✓ Implementar una metodología de diseño hidráulico pre establecida y adaptarla mediante diferentes criterios encontrados en la literatura, de manera que se mejore el flujo de información y de esta manera hacer la herramienta computacional más atractiva al usuario final.
- ✓ Presentar a través de un diagrama de flujo, el proceso completo de diseño hidráulico utilizado en la herramienta computacional propuesta y compararlo con el proceso de diseño tradicional.
- ✓ Realizar un manual de usuario ilustrativo que permita la correcta utilización de la herramienta desarrollada.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ENERGÍA

“Hoy en día, desde el punto de vista de la Física, no sabemos qué es realmente la Energía. No tenemos ninguna evidencia de que la Energía venga en pequeñas cantidades, a modo de gotas. Lo que sí sabemos es que toda materia es Energía en reposo, y que la Energía se manifiesta en multitud de formas que se relacionan entre sí mediante numerosos mecanismos de conversión”¹

Como lo plantea Cengel², aunque todo el mundo tiene idea de lo que es la energía, es difícil definirla de forma precisa. La energía se puede considerar como la capacidad para causar cambios. En la actualidad, el concepto se interpreta de manera amplia para incluir los aspectos de energía y sus transformaciones, incluida la generación de potencia, la refrigeración y las relaciones entre las propiedades de la materia. Una de las más importantes y fundamentales leyes de la naturaleza es el principio de conservación de la energía, ecuación (1). Éste expresa que, durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma u otra, pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye. El cambio en el contenido energético de un cuerpo o de cualquier otro sistema es igual a la diferencia entre la entrada y la salida de energía, y el balance de ésta se expresa como:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (1)$$

¹ FEYNMANN, Richard. Energía. En: The Feynman Lectures on Physics. 1964. Volume I. 4-1.

² CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. TERMODINAMICA 1a. ed. MEXICO: MCGRAW-HILL, 1999. p.51

3.2 TIPOS DE ENERGÍA

La energía puede presentarse en la naturaleza de diferentes maneras, a través de las cuales el ser humano ha desarrollado tecnología por medio de la cual esta puede ser aprovechada para las actividades comúnmente desarrolladas por el mismo, como lo son la industria, la alimentación, el confort, la investigación y todas las actividades que requieran algún tipo de trabajo.

“La energía puede existir en varias formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear, cuya suma conforma la energía total E de un sistema, la cual se denota por unidad de masa.”³

3.3 ENERGÍA MECÁNICA

Es aquella que posee un determinado objeto o cuerpo debido a su movimiento, caso de la energía cinética, ubicación con respecto a otro objeto, caso que se presenta con la energía potencial o dependiendo de sus propiedades elastoplásticas, en cuerpos elásticos.

La energía cinética, ecuación (2), es aquella relacionada al movimiento de un objeto, se presenta a continuación:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2)$$

La energía potencial, ecuación (3), aparece por los efectos gravitacionales de un objeto muy pequeño como una roca, respecto a uno muy grande como el planeta

³ CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. TERMODINAMICA 1a. ed. MEXICO: MCGRAW-HILL, 1999. p.53

tierra, esta energía está relacionada con la altura vertical del cuerpo sobre la superficie del planeta tierra, “que relaciona de esta forma:

$$Ug = mgy \quad (3)$$

La energía potencial elástica, ecuación (4), es aquella que tiene que ver con la interacción de un material con propiedades elásticas y se puede percibir como la energía almacenada, su expresión es la siguiente:

$$Us = \frac{1}{2}kx^2 \quad (4)$$

La energía mecánica, ecuación (5), corresponde finalmente a la sumatoria de las interacciones por energía cinética, potencia gravitatoria y potencial elásticas como se plantea a continuación:

$$Emecanica = Ug + Us + Ec \quad (5)$$

3.4 ENERGÍA TÉRMICA

La energía térmica tiene que ver con la energía interna de un sistema u objeto, aumenta a mayor temperatura absoluta, y esta varía dependiendo de la transferencia de calor que exista por la existencia de diferencias de temperaturas.

3.5 ENERGÍA HIDRÁULICA

La energía hidráulica es aquella que se aprovecha por medio de la energía cinética y potencial que posee el agua, ya sea por flujos o caudal de agua, saltos o alturas hidráulicas o simplemente movimiento de agua por mareas.

Figura 2. Uso de la energía hidráulica en el trabajo humano.



Fuente: Enciclopedia de Ejemplos. Molinos de agua [Imagen]. Energía Hidráulica. 2017. [Consultado: 14 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://www.ejemplos.co/ejemplos-de-energia-hidraulica/>

Este tipo de energía se ha aprovechado desde la antigüedad, en donde el flujo de agua se utilizaba para mover un molino que la transformaba en energía mecánica y trabajo para moler granos de trigo y maíz; “Es generalmente considerada un tipo de energía renovable puesto que no emite productos contaminantes. Sin embargo, produce un gran impacto ambiental debido a la construcción de las presas, que

inundan grandes superficies de terreno y modifican el caudal del río y la calidad del agua.”⁴

La energía hidráulica es actualmente conocida como una fuente renovable, alternativa y una de las más utilizadas en la obtención de energía eléctrica a través de centrales hidroeléctricas, en donde esta energía, con la ayuda de una turbina, se convierte en energía mecánica y a través de un generador, se convierte en energía eléctrica.

3.6 ENERGÍA ELÉCTRICA

La energía eléctrica, es aquella que tiene que ver con el movimiento de cargas eléctricas como los electrones, por medio de un material conductor como lo es el cobre, debido a la existencia de un potencial que genera este movimiento, conocido como corriente eléctrica. La energía eléctrica es renovable y su rendimiento energético es muy alto, lo que la hace aprovechable en la mayoría de las aplicaciones humanas, y no produce emisiones tóxicas como lo hace el uso de carbón o el petróleo; además es fácilmente transformable a otras formas de energía necesarias en la humanidad.

⁴ ESPAÑA, MINISTERIO DE EDUCACION, CULTURA Y DEPORTE. Energía hidráulica. 2016

3.7 FUENTES NO RENOVABLES

Se denominan así a aquellas fuentes de energía que se han formado a lo largo de épocas geológicas pasadas y como consecuencia de condiciones geológicas determinadas.

Reciben el nombre de combustibles porque generalmente se les ha utilizado y se les utiliza como tales, de forma que con su combustión liberan la energía solar que acumularon hace miles de años.

El carácter de fuente de energía no renovable les viene dado por el hecho de que una vez liberada la energía que contienen deberían transcurrir muchísimos años (miles de generaciones humanas) para que volvieran a generarse.

Existen diferentes tipos de fuentes no renovables de energía que se presentan a continuación: carbón, petróleo, etc.⁵

La energía nuclear se da en forma de fisión o fracción de un núcleo, utilizada en muchas centrales que llevan este mismo nombre, y por fusión, proceso que se realiza naturalmente en estrellas como el sol; los daños ocasionados, se basan en los residuos sobrantes radioactivos, que son peligrosos para los seres vivos y sus procesos naturales.

3.8 FUENTES RENOVABLES

En términos energéticos se puede hablar de fuentes renovables y no renovables,

Las energías renovables son la alternativa más limpia para el medio ambiente. Se encuentran en la naturaleza en una cantidad ilimitada y, una vez consumidas, se pueden regenerar de manera natural o artificial. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) de España, frente a las fuentes convencionales, las energías renovables son recursos limpios cuyo impacto es prácticamente nulo y siempre reversible.

⁵ PUIG, Josep; COROMINAS Joaquim. La ruta de la energía. Anthropos editorial, 1990.p.214

Entre los diferentes tipos de energías renovables encontramos los siguientes: Energía hidráulica, Energía eólica, Energía solar, Energía geotérmica, Energía mareomotriz y Energía de la biomasa. Las energías renovables son recursos abundantes y limpios que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones dañinas para el medio ambiente como las emisiones de CO₂, algo que sí ocurre con las energías no renovables como son los combustibles fósiles.⁶

3.9 TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA

“Durante casi toda la historia de la humanidad, el hombre ha utilizado las energías renovables como fuente de energía; no es hasta después de la revolución industrial cuando se inicia la utilización generalizada de los combustibles fósiles. Este último periodo, de unos 200 años, se ha caracterizado por un consumo creciente e intensivo de energía que prácticamente ha acabado con los combustibles fósiles.”⁷

Para el verdadero aprovechamiento energético, la energía pasa de unas formas energéticas a otras generalmente más útiles y en la mayoría de los casos, la energía tiende a degradarse a unas formas energéticas de menor calidad, como lo es el calor.

Son miles de plantas de generación energética en el mundo, donde el objetivo primario resulta ser la conversión de un tipo de energía como la hidráulica, térmica, nuclear, solar, a energías de mayor calidad y mejor potencial de uso como lo es la energía eléctrica; para esta transformación generalmente se utiliza máquinas eléctricas generadoras.

⁶ ENDESA. Energía: ¿Qué son las energías renovables? [En línea]. Madrid, España. TWenergy. 2012. (Recuperado en 05 febrero 2018.) Disponible en : <https://twenergy.com/a/que-son-las-energias-renovables-516>

⁷ INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS. Energías renovables y eficiencia energética. ITC S.A. Santa Cruz, 2008. p.14.

3.10 ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

Figura 3. Energía hidroeléctrica para transformación energética.



Fuente: Panorama. Ingeniero: Gurí podría recuperarse entre 6 meses y 2 años [Imagen]. Globovisión. Venezuela. 2016. [Consultado: 14 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://globovision.com/article/guri>

La energía hidroeléctrica, es aquella que se obtiene y es aprovechada en saltos geodésicos favorables, por los que además transita un fluido a través de ríos o quebradas.

La energía hidráulica corresponde a proceso de conversión de energía gravitacional, originada a partir del flujo másico del agua a través de la tubería de presión. Es decir, la energía hidráulica suministrada a la turbina equivale al peso del agua m que se desplaza en el tramo, comprendido entre la sección de entrada y la salida de la tubería de presión y corresponde a:

$$E_H = E_{est} \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot t \quad (6)$$

Y la potencia hidráulica total obtenida en este tramo equivale a:

$$P_H = E_{est} \cdot \rho \cdot g \cdot Q \quad (7)$$

Sin embargo es importante señalar que en la ecuación anterior, la altura estática no incluye las pérdidas por longitud y accesorios en la tubería de presión, además no considera el efecto del gradiente cinético en la tubería de presión y la recuperación de parte de la energía cinética del agua a la salida del tubo de succión.⁸

3.11 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN EL MUNDO

Como lo plantea en su libro el ingeniero D'croz⁹ Nadie sabe hace cuánto tiempo, quien fue el creador inicial, ni donde se colocaron en funcionamiento para la humanidad, las primeras corrientes de agua; sin embargo parece ser, que su uso fue el agrícola con métodos de irrigación. El método más usual para subir el agua de sus márgenes, fue mediante la utilización de ruedas persas, que poseían cangilones en su periferia y que estaban montadas sobre ejes horizontales; ruedas que aún pueden apreciarse en lugares como Egipto. Estas ruedas aparecieron durante los comienzos de la era cristiana, pero fueron los romanos a través de Vitrubio, quienes describieron su funcionamiento y las aplicaron como fuente de energía mecánica.

Durante el periodo de la revolución industrial comprendido aproximadamente entre 1750-1850 se produjo la transición del molino de viento y de la rueda hidráulica, a la turbina hidráulica y a la máquina de vapor, a continuación, se presenta una lista

⁸ ORTIZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. Bogotá, ediciones de la U. 2011. p.26

⁹ D'CROZ, Néstor Raúl. Curso de actualización de pequeñas centrales hidroeléctricas. Bucaramanga, Edición UIS. 1987. p.4

cronológica que muestra el avance y la evolución en el mundo de las turbinas hidráulicas:

- 1751 Leonard Euler desarrolla ecuación de las turbo máquinas y la turbina que lleva su mismo nombre.
- 1824 Baker presento una turbina con su nombre, basada en la turbina de Heron y muy parecida al molinete hidráulico de hoy.
- 1841 Henschel-Jonval. Presentación de la primera turbina de axial de reacción con tubo de aspiración, con el inconveniente de que el rodete no resulta accesible y se generan vórtices cuando el agua entra al tubo de aspiración.
- 1842 Zuppinger (Alemania) presento la turbina tangencial de inyección parcial, para grandes saltos y caudales reducidos.
- 1849 Francis James. Propuso una turbina radial, con tubo de aspiración y admisión centrípeta. Considerada la precursora de las turbinas modernas.
- 1872 Fink, construye el distribuidor con paletas directrices giratorias en sus versiones cilíndrica, axial y cónica.
- 1880 Lester A. Pelton (USA) patento la turbina de acción de flujo tangencial, que hoy es ampliamente usada y lleva su mismo nombre.
- 1912 Victor Kaplan (Austria), patento su turbina axial de reacción, dotada de un rotor de alabes orientables.
- 1956 P. Deriaz (Suiza), invento la turbina que lleva su nombre, utilizada en saltos de mediana y gran altura. ¹⁰

3.12 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN COLOMBIA

En Colombia la prestación del servicio de energía eléctrica se inició a finales del siglo XIX, cuando miles de habitantes de la capital del país vieron cómo se esparcía la luz de un centenar de lámparas que iluminaban las calles de Bogotá. Del uso inicial de la energía eléctrica para el alumbrado público y comercio se pasó al uso residencial en los estratos más adinerados de la sociedad y posteriormente llegó a talleres, fábricas y al tranvía. Con el fin de impulsar la electrificación en el país, en 1946 se creó el Instituto de Aprovechamiento de Aguas y Fomento Eléctrico (Electraguas) que en 1968 se convirtió en el Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL). En la década del 50 se empezó a hablar de la interconexión de los

¹⁰ D'CROZ, Néstor Raúl. Curso de actualización de pequeñas centrales hidroeléctricas. Bucaramanga, Edición UIS. 1987. p.6

sistemas regionales, idea que solo se materializó con la creación de Interconexión Eléctrica S.A. (ISA) en 1967. En diciembre de 1992 el Gobierno Nacional reestructuró el Ministerio de Minas y Energía, disolvió la Comisión Nacional de Energía y creó tres unidades administrativas especiales: la Comisión de Regulación de Energía (CRE) convertida en 1994 en la actual Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la Unidad de Información Minero Energética (UIME) y la Comisión de Planeación Minero Energética (UPME). Con base en la política de la nueva Constitución, según la cual el Estado debe cumplir una función más reguladora, controladora y vigilante que de administrador, se ha vendido buena parte de los activos que se tenían en el sector.¹¹

3.13 NORMATIVIDAD EN COLOMBIA

La generación eléctrica en Colombia, está regulada por diferentes entidades adscritas al ministerio de minas y energía, quien por medio de una normatividad regula la generación de zonas del sistema interconectado nacional (SIN) como de las zonas no interconectadas (ZNI), en la constitución política de Colombia se plantean los derechos fundamentales, razón por la cual la corte constitucional colombiana aclaró que la energía es un derecho fundamental, y por este motivo debe ser garantizado en el país.

Existen diferentes entidades que regulan, garantizan, promueven y vigilan todo lo referente con la generación transporte y venta de energía, acompañado por las normas actuales que regulan estos procesos. A continuación, se explican brevemente algunas normas y leyes relacionadas con la energía en Colombia:

¹¹ CREG. Historia de la energía eléctrica en Colombia: Comisión de regulación de energía y gas [En línea]. Bogotá, Colombia. (Recuperado en 05 febrero 2018.) Disponible en: <http://www.creg.gov.co/index.php/sectores/energia/historia-energia>

3.13.1 Ley 1715 de 2014

Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.

3.13.2 Ley 143 de 1994

La presente ley establece el régimen de las actividades de generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad, que en lo sucesivo se denominarán actividades del sector, en concordancia con las funciones constitucionales y legales que le corresponden al Ministerio de Minas y Energía.

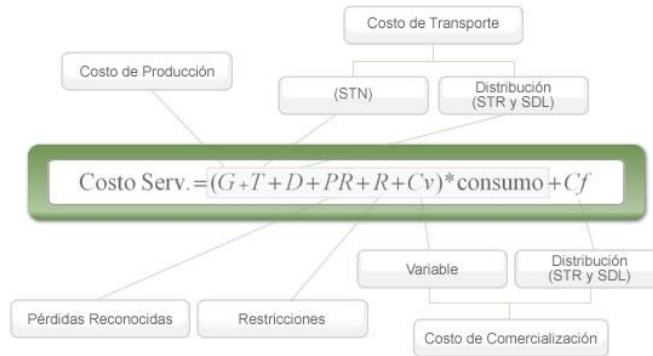
3.13.3 Ley 142 de 1994

Esta ley se aplica a los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo, energía eléctrica, distribución de gas combustible, telefonía fija pública básica conmutada y la telefonía local móvil en el sector rural; a las actividades que realicen las personas prestadoras de servicios públicos de que trata el artículo 15 de la presente ley, y a las actividades complementarias definidas en el Capítulo II del presente título y a los otros servicios previstos en normas especiales de esta ley.¹²

La C.R.E.G que es la comisión reguladora de energía y gas tiene como función la identificación del costo del servicio y el precio que se cobra a los distintos usuarios (tarifas), que además se denomina estructura tarifaria. El costo del servicio es el resultado de agregar los costos de cada una de las etapas (producción, transmisión, distribución, comercialización y administración).

¹² SIEL. Electricidad: Sistema de información eléctrico colombiano [En línea]. Bogotá, Colombia. (Recuperado en 05 febrero 2018.) Disponible en: <http://www.siel.gov.co/Inicio/Normatividad/tabid/65/Default.aspx>

Figura 4. Estimación económica del costo del servicio eléctrico.



Fuente: CREG. Historia de la energía eléctrica en Colombia: Comisión de regulación de energía y gas [Imagen]. Bogotá, Colombia. [Consultado: 05 de febrero de 2018]. Disponible en internet: <http://www.creg.gov.co/index.php/sectores/energia/historia-energia>

3.14 SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL

Se habla de sistema interconectado nacional al conjunto de todas las redes eléctricas tanto de generación y transporte de energía, que en forma de malla garantizan el servicio eléctrico en la mayoría de las zonas del país, esto a través de la unión y aporte energético de diversas plantas de generación y el transporte a sitios como ciudades, pueblos o industrias donde es consumida.

3.15 UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA ADSCRITA A MINMINAS

El sistema colombiano es principalmente hidráulico (alrededor de un 65%). Lo cual quiere decir que fenómenos climáticos como el Niño y/o la Niña, o las sequías, pueden afectar en la disponibilidad de recursos, y por tanto en el precio de la electricidad, así como en la compra venta de energía de largo plazo. También se produce energía térmica con carbón (22%) y gas (7%), y con esa combinación de hidráulicas y térmicas se abastece el país.

La capacidad instalada del sistema colombiano es de casi 15.000 megavatios. Consume alrededor de 10.000 megavatios. La gran ventaja del sistema interconectado es que hace posible integrar los recursos energéticos de todas las regiones del país. De esta manera, la energía producida en Boyacá puede llegar hasta el Valle del Cauca o Nariño, o la deficiencia que podría registrarse en las plantas de la Costa Atlántica puede ser atendida por un transportador, que la haga llegar desde cualquier otra región.¹³

3.16 ZONAS NO INTERCONECTADAS

Las zonas no interconectadas (ZNI) son los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional (artículo 1 de la Ley 855 de 2003). Por ejemplo, el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Leticia en el Amazonas, Capurganá en el Chocó, Puerto Carreño en el Vichada y Mitú en el Vaupés. Las empresas prestadoras del servicio público de energía eléctrica localizadas en las ZNI pueden desarrollar, en forma integrada, las actividades de generación, distribución y comercialización (artículo 74 de la Ley 143 de 1994).

La metodología tarifaria aplicable a estas zonas está en la Resolución CREG-091 de 2007, excepto para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. En dicha resolución se establecen las fórmulas para determinar los costos de las actividades de generación, distribución y comercialización de energía. En las ZNI la

¹³ ENDESA. Energía: Guía para entender el sistema interconectado nacional colombiano [En línea]. Madrid, España. TWenergy. 2012. (Recuperado en 05 febrero 2018.) Disponible en : <https://twenergy.com/co/a/guia-para-entender-el-sistema-interconectado-nacional-colombiano-2233>

prestación del servicio se hace principalmente mediante plantas de generación diésel, paneles solares y pequeñas centrales hidroeléctricas.¹⁴

3.17 ÓRGANOS ESTATALES INVOLUCRADOS EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

Uno de los requerimientos que se deben cubrir en un país, es el consumo energético, y es por este motivo el estado regula tanto la generación como la distribución de la energía eléctrica; existen diversas empresas tanto públicas como privadas que plantean proyectos de generación y transmisión, los cuales deben cumplir la normatividad y reglamentación exigida en el país.

En Colombia el ministerio de minas y energía es el estamento publico encargado de la regulación, planes, proyectos, auditorias, revisiones, mejoras y demás labores que se deben llevar desde el estado hasta los consumidores, de este órgano estatal se desprenden diversos estamentos como la FAZNI o fondo de apoyo financiero a las zonas no interconectadas, la UPME o unidad de planeación minero energética, el PRONE o programa de normalización de redes eléctricas y la FAER o fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas rurales interconectadas.

La generación de la energía en Colombia está a cargo de empresas públicas y privadas, reunidas en la asociación de empresas generadoras de energía eléctrica ACOLGEN, en las que estas involucradas empresas como ISAGEN, EPM etc.

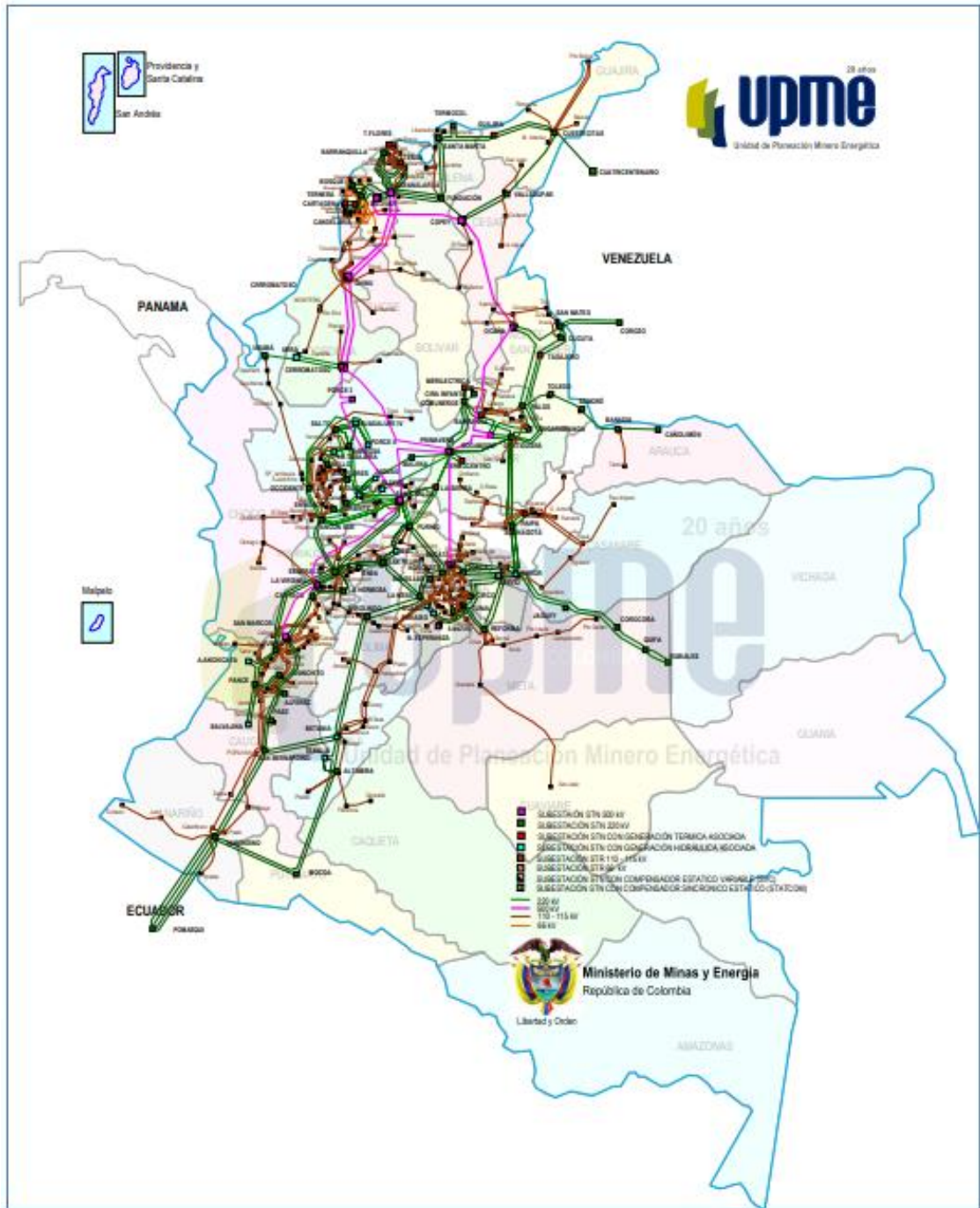
¹⁴ CREG. Zonas no interconectadas. Comisión de regulación de energía y gas [En línea], 2 de enero de 2018. Disponible en internet en: <http://www.creg.gov.co/index.php/sectores/energia/zni-energia>

3.18 MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

El Ministerio de Minas y Energía se crea a raíz de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), una época de conflicto internacional durante la cual surgieron problemas de orden económico que repercutieron directamente en el progreso de Colombia. Ante esta situación, el Gobierno Nacional diseñó un plan para la defensa y el fomento de las industrias existentes, buscando el aprovechamiento de los recursos naturales y el desarrollo de otras fuentes de producción.

El Decreto 968 del 18 de mayo de 1940 estableció por primera vez el Ministerio de Minas y Petróleos, y al mismo tiempo modificó la organización del Ministerio de la Economía Nacional. Durante los años siguientes el Ministerio fue reestructurado mediante el Decreto 0464 de 1951, el Decreto 0481 de 1952, el Decreto 636 del 10 de abril de 1974 con el cual se modifica el nombre del Ministerio de Minas y Petróleos por el de Ministerio de Minas y Energía.

Figura 5. Redes del sistema interconectado nacional (SIN).



Fuente: UPME. Quienes somos. Sistema interconectado nacional [Imagen]. Unidad de planeación minero energética. Colombia. 2014. [Consultado: 2 de enero de 2018]. Disponible en internet en: <http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/Mapas/Mapas>

Figura 6. Mapa del monitoreo energético de las zonas no interconectadas.



Fuente: IPSE. Instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas [imagen]. Centro nacional de monitoreo. Colombia. 2018. [Consultado: 26 de marzo de 2018]. Disponible en Internet: <http://www.ipse.gov.co/>

3.19 UPME

La Unidad de Planeación Minero Energética UPME es una Unidad Administrativa Especial del orden Nacional, de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, regida por la Ley 143 de 1994 y por el Decreto número 1258 de Junio 17 de 2013. Su objetivo es planear en forma integral, indicativa, permanente y coordinada con los agentes del sector minero energético, el desarrollo y aprovechamiento de los recursos mineros y energéticos; producir y divulgar la información requerida para la formulación de política y toma de decisiones; y apoyar al Ministerio de Minas y Energía en el logro de sus objetivos y metas; gestionar y administrar de forma integral la información de los sectores minero energético para apoyar la toma de decisiones de los agentes públicos y privados y apoyar al MME

y otras entidades en la realización de las convocatorias del STN, evaluación de proyectos de cobertura, emisión de conceptos para otorgar incentivos, cálculo de precios base para liquidación de regalías, entre otros.¹⁵

La UPME como entidad encargada de la planeación energética, es aquella que realiza procesos de estudios de factibilidad energética en país, especialmente en las zonas no interconectadas, además de avalar proyectos que tengan que ver con la generación eléctrica en las ZNI, ver figura 6.

3.20 FAZNI

El Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas no Interconectadas, definido por el artículo 82 de la Ley 633 de 2000, es un fondo especial del Ministerio de Minas y Energía sin personería jurídica, sujeto a las normas y procedimientos establecidos en la Constitución Política de Colombia, el Estatuto Orgánico del Presupuesto Nacional y demás normas vigentes aplicables. De conformidad con la ley, a este Fondo ingresarán las sumas recaudadas de conformidad con lo establecido en el artículo 1º de la Ley 1099 de 2006 y también podrán ingresar los recursos provenientes del Presupuesto General de la Nación y los recursos que canalice el Gobierno Nacional de diferentes fuentes públicas y privadas, nacionales e internacionales.¹⁶

La FAZNI en otras palabras es un fondo económico creado por el estado colombiano, en busca de tener un apoyo financiero que mejore las condiciones energéticas en las zonas no interconectadas a la red eléctrica nacional, especialmente aquellas que no poseen servicio eléctrico. Este fondo está destinado a la generación eléctrica de estas zonas por medio de energías renovables como la energía fotovoltaica, hidráulica y eólica, pero por su facilidad se ha destinado a la implementación de energías no renovables a través de plantas Diésel, que

¹⁵ UPME. Quienes somos. Unidad de planeación minero energética [En línea], 2 de enero de 2018. Disponible en internet en: <http://www1.upme.gov.co/Entornoinstitucional/NuestraEntidad/Paginas/Quienes-Somos.aspx>

¹⁶ MINMINAS. Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas – FAZNI. Ministerio de minas y energía [En línea], 2 de enero de 2018. Disponible en internet en: <https://www.minminas.gov.co/fazni>.

constantemente por falta de mantenimiento presentan fallas, y terminan sin funcionar.

3.21 CLASIFICACIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Se pueden clasificar las centrales en diferentes categorías, las dos más extendidas son: clasificación según la potencia instalada, y según el tipo de captación del recurso hídrico. Además, existe otra clasificación de acuerdo con la altura neta del salto, pero no se abordará en el presente documento.

3.22 SEGÚN LA POTENCIA INSTALADA

“No existe un criterio único de clasificación de las centrales hidroeléctricas, ya que los valores de clasificación pueden variar según el país.”¹⁷ La clasificación que se adoptará es la provista por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) para centrales hidroeléctricas.

¹⁷ UPME, COLCIENCIAS y UNIVERSIDAD JAVERIANA. ATLAS. Potencial hidroenergetico de Colombia. [En línea]. Bogotá, 2015. [Consultado: 06 de diciembre de 2017]. 28p. Disponible en internet: <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>.

3.23 PICOCENTRAL (PICOCHE)

Su capacidad instalada oscila entre 0.5 y 5 KW, no requiere de embalse, son frecuentemente usadas para autoconsumo en zonas rurales que carecen de interconexión eléctrica, son suficientes para abastecer de energía a una vivienda que no tenga demasiados electrodomésticos o aparatos de gran consumo.

3.24 MICROCENTRAL (MICROCHE)

Su capacidad instalada oscila entre 5 y 50 KW, operación a filo de agua, al igual que las picocentrales no requieren de embalse, son aplicables a fincas o caseríos carentes de energía eléctrica convencional y con bajo consumo de energía. Las pico y micro centrales son potencialmente factibles en la utilización de bombas como turbinas PAT (pump as turbine), según el artículo de investigación: Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants – a case study¹⁸ llevado a cabo por investigadores indios, en el que se demuestra que desde el punto de vista económico, la utilización de bombas centrífugas en lugar de turbinas representan un alto porcentaje de ahorro tanto en el costo inicial como en costos de mantenimiento.

¹⁸ MOTWANI, K H; JAIN, S V y PATEL R N. Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants – a case study. NUiCONE. 2012.

Figura 7. Equipo electromecánico en picocentral hidroeléctrica de 5 KW



Fuente: MIRANDA, Julio y VILLEGAS, Ezequiel. Diseño y construcción de una picocentral hidroeléctrica de 5 kW para la finca mirasol en la vereda sacramento, corregimiento de fundación magdalena [En línea] [Fotografía]. Ingeniero mecánico. Bucaramanga. UIS. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. 2013. [Consultado: 16 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2158/eds/results?vid=0&sid=a7827f52-3da2-422e-8b6f-09d2a77caae9%40sessionmgr4010&bquery=picocentral%2B5kW&bdata=JmNsaTA9RIQxJmNsdjA9WSZsYW5nPWVzJnR5cGU9MCZzaXRIPWVky1saXZI>

3.25 MINICENTRAL (MINICHE)

Al igual que las pico y micro centrales no requieren de embalse, estas centrales se caracterizan por poseer una potencia más representativa que las anteriores y oscila entre 50 y 500KW. Para entender un poco sobre su capacidad, suponga un periodo

de funcionamiento ideal de 24 horas diarias a máxima potencia, en este periodo se pueden tener conectados diversos equipos y electrodomésticos, vale la pena analizar la cantidad de electrodomésticos que se podrían encender simultáneamente aprovechando la energía generada por una mini central. Estas centrales son aplicables a pequeñas poblaciones. Vea las figuras 8 y 9 para entender la magnitud de los equipos requeridos.

Figura 8. Turbina Pelton de dos inyectores con potencia instalada de 200 kW.



Fuente: Empresa Saltos del pirineo. Turbina Pelton de 2 inyectores. [Imagen]. Catálogo de turbinas. España. p.12. [Consultado: 26 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: http://www.saltosdelpirineo.com/catalogos/cat_thee.pdf

3.26 PEQUEÑA CENTRAL (PCH)

Capacidad instalada entre 500 y 20.000 KW, operación a filo de agua o con embalse, (sin posibilidad de participar en el despacho eléctrico, menores a 500 kW, y con posibilidad de hacerlo las mayores a 10.000 kW). Estas centrales no hacen parte del alcance del proyecto. Según el programa THERMIE¹⁹, las PCH presentan un mayor ahorro en cuanto a costo por kW generado (\$/kW) frente a las anteriormente mencionadas centrales de menor potencia.

3.27 CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Una central hidroeléctrica posee una capacidad de generación mayor a 20 MW, normalmente funcionan con turbinas de reacción y hacen uso de represamiento de agua para ganancia de altura y disponibilidad de recurso hídrico. Para el represamiento es necesario la construcción de un embalse que lo conforma una zona inundada con su respectiva presa de contención, razón por la cual poseen un gran impacto ecológico debido al desplazamiento de especies por la inundación de sus hábitats.

¹⁹ ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. Programa THERMIE. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.384. ISBN 978-958-8675-99-2. [consultado: 11 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

Figura 9. Turbina Francis acoplada a un generador de 250KW



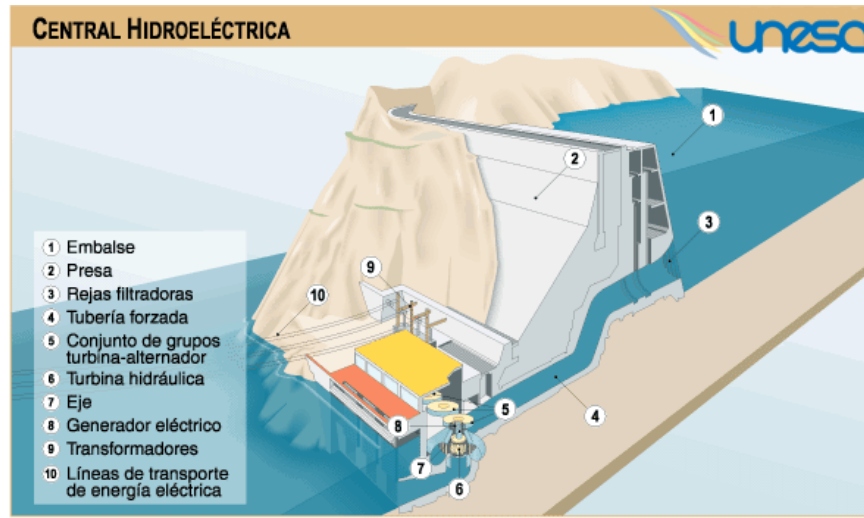
Fuente: Foshan Xin Yi Hydropower. Alternador síncrono del generador de accionamiento hidráulico hidroeléctrico del generador 200KW. [Imagen]. Pequeñas turbinas hidráulicas. China. 2015. [Consultado: 7 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://spanish.smallhydroturbines.com/sale-7512933-200kW-hydroelectric-generator-water-powered-generator-synchronous-alternator.html> .

3.28 SEGÚN EL TIPO DE CAPTACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

“El objetivo de un aprovechamiento hidroeléctrico es convertir la energía potencial de una masa de agua situada en un punto, el más alto del aprovechamiento, en energía eléctrica, disponible en el punto más bajo, donde está ubicada la casa de máquinas. La potencia eléctrica que se obtiene en este aprovechamiento, es proporcional al caudal utilizado y a la altura del salto.”²⁰ Podemos clasificar los aprovechamientos en función del tipo de central, como sigue:

²⁰ ESHA. Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica. Madrid, 2016. [consultado: 22 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: http://www.cnr.gob.cl/Home/Documentacin%20Complementaria/GUIA_Layman_ESHA_PCH.pdf

Figura 10. Central Hidroeléctrica a pie de presa



Fuente: UNESA. Asociación española de la energía eléctrica. [Imagen]. Central hidroeléctrica. España. 2017. [Consultado: 7 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1347-central-hidroelectrica>.

3.29 CENTRALES A PIE DE PRESA

Las centrales a pie de presa como su nombre lo indica, hacen uso de una presa para acumular agua en un embalse e incrementar su cota, esto para posteriormente ser turbinado en una cota inferior y aprovechar la mayor energía posible del fluido, en pequeñas centrales la construcción de dicha presa puede resultar costosa y no ser factible económicamente, por ello se recomienda en caso de requerirse, utilizar una obra civil ya existente con otros fines como el riego y adaptarla a los requerimientos.

Para el presente proyecto no se tiene pensado hacer uso de este tipo de captación por lo mencionado anteriormente en cuanto a factibilidad económica e imposibilidad

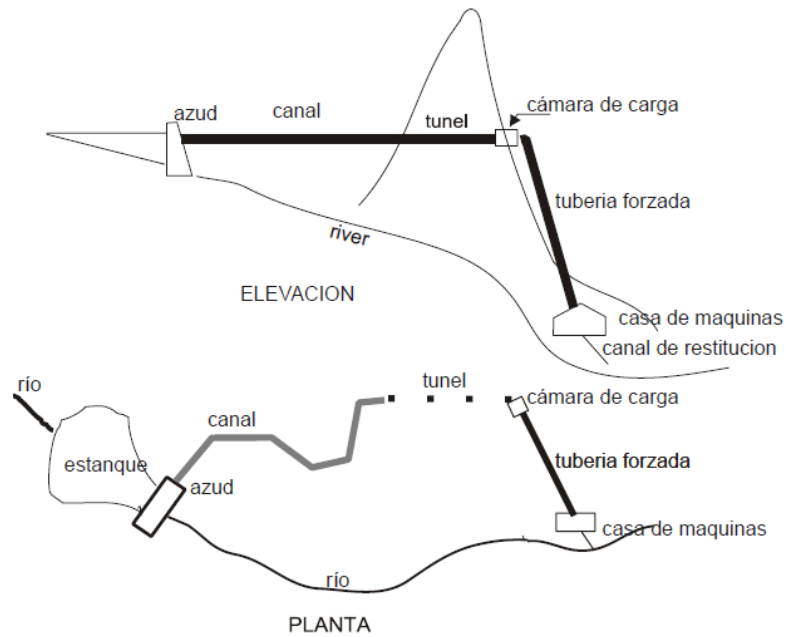
de predecir las características particulares de un lugar que cuente con obras civiles en funcionamiento, ya que se pretende que la herramienta computacional a desarrollar sea general y está no podrá tomar decisiones en cuanto a adaptaciones requeridas de las obras civiles.

3.30 CENTRALES DE AGUA FLUYENTE

Las centrales de agua fluyente, no requieren de un embalse, se dice que en este tipo de captación el caudal no puede ser regulado ya que depende de las características físicas de la fuente hídrica y del terreno. Este tipo de captación normalmente está conformado por las siguientes partes: Azud, toma, canal de derivación, cámara de carga, tubería forzada, casa de máquinas y equipamiento electromecánico, canal de descarga o restitución, subestación y línea eléctrica. Ver Figura 11.

Posteriormente el agua se deposita en la cámara de carga donde el propósito es mantener una presión o nivel constante del agua a turbinar, por último, el fluido entra a la tubería forzada y desciende hasta la casa de máquinas donde se aprovecha su energía. Existen otros tipos de captación de agua fluyente, pero no se hablará de ellos.

Figura 11. Captación de agua fluyente

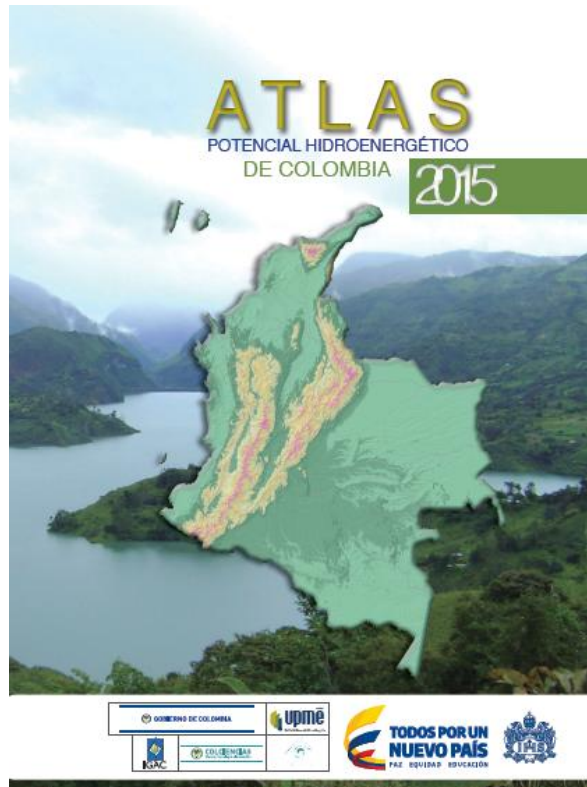


Fuente: ESHA. Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica. Madrid, 2016. [Consultado: 22 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: http://www.cnr.gob.cl/Home/Documentacin%20Complementaria/GUIA_Layman_ESHA_PCH.pdf

3.31 ATLAS HIDROENERGÉTICO DE COLOMBIA

El atlas fue desarrollado por la Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME en conjunto con Colciencias, y la Universidad Javeriana en el año 2015 como un esfuerzo del gobierno nacional por cuantificar el potencial hidroeléctrico a baja escala que posee el país.

Figura 12. Portada Atlas hidroenergético de Colombia



Fuente: UPME, COLCIENCIAS y UNIVERSIDAD JAVERIANA. ATLAS. Potencial hidroenergético de Colombia. [Imagen]. Bogotá, 2015. [Consultado: 06 de diciembre de 2017]. 1p. Disponible en internet: <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>.

El documento presenta un conjunto de mapas que permiten identificar puntos de la geografía nacional donde se pueden realizar proyectos hidroeléctricos, y permitiría a los inversionistas efectuar estudios con mayor profundidad y detalle en materia de ingeniería, medición hidrológica, entre otros, para identificar potenciales desarrollos.

“Actualmente se cuenta con una capacidad eléctrica instalada de 15 GW, de los cuales 10 GW corresponden a generación hidráulica. Con esta nueva herramienta, se logró estimar que dicha cifra tiene un potencial de aprovechamiento de hasta 6

veces la capacidad actual del país, para un total de 56 GW sólo en proyectos a filo de agua”, afirmó Jorge Alberto Valencia Marín, director general de la UPME al término del lanzamiento del nuevo atlas. Como una posible desventaja para el desarrollo de la herramienta computacional, la información presentada en los atlas no está tabulada o disponible al público, lo que es un inconveniente para el aprovechamiento de los mismos en un proyecto.

3.32 POTENCIAL HIDROELÉCTRICO DE COLOMBIA

Según el atlas de potencial hidroenergético de Colombia, el país posee más de 56.000 MW de potencia disponible en fuentes hídricas repartidas a lo largo y ancho del país. En la figura 13 se observan 5 zonas, las cuales son: (Amazonas, Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco y Pacífico) estas representan todo el territorio; Para cada Área hidrográfica se presenta el potencial hidroenergético a diferentes escalas de generación (Pico, Micro, Mini, Pequeñas y Grandes centrales).

3.33 EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

Cualquier fuente hídrica que posea un caudal suficiente o una caída geodésica apreciable es potencialmente factible para la implementación de un proyecto hidroenergético, cabe resaltar que existen algunas restricciones ambientales y sociales que deben ser tenidas en cuenta, tales como: (Existencias de parques o reservas naturales, áreas protegidas, zonas de paramo, manglares y humedales, comunidades indígenas, etc.

Tabla 1. Potencial hidroeléctrico acumulado por tipo de central, y por sitio identificado para aprovechamiento, en kW.

Área hidrográfica	Tipo de Central					
	Pico	Micro	Mini	Pequeñas	Grandes	
					20 - 40 MW	> 40 MW
Amazonas	285	2.799	26.948	903.311	1.518.300	9.522.541
Caribe	210	1.935	16.843	436.476	749.309	2.922.066
Magdalena Cauca	514	5.229	47.567	1.646.204	2.808.652	17.713.622
Orinoco	360	3.599	35.789	1.230.958	2.205.013	10.227.236
Pacífico	165	1.647	15.984	568.657	831.949	2.743.598
Total por tipo de central	1.533	15.209	143.132	4.785.606	8.113.222	43.129.063

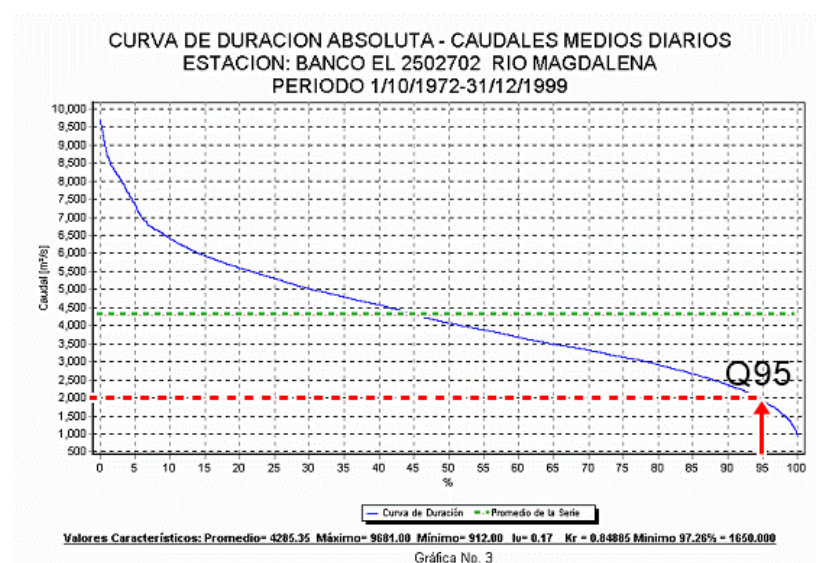
Fuente: UPME, COLCIENCIAS y UNIVERSIDAD JAVERIANA. ATLAS. Potencial hidroenergetico de Colombia. [Imagen]. Bogotá, 2015. [Consultado: 14 de diciembre de 2017]. 65p. Disponible en internet: <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>.

Una vez teniendo en cuenta estas restricciones se podrá saber si la fuente es apta para un proyecto hidroeléctrico o no; el paso a seguir es conocer el histórico de caudales para poder obtener el caudal de diseño que se recomienda sea un Q95; el 95 significa un caudal igual o superior a un 95% del tiempo (Ver Figura 14).

“Los caudales que se ubican entre Q70 Y Q100 se consideran bajos, en la medida que los caudales pasan de Q95 a Q100 se alcanzan condiciones de sequía. En el diseño de sistemas de aprovechamiento hidroenergético es importante considerar estos caudales puesto que, por ejemplo, en la legislación colombiana el Q95 se emplea para el cálculo de la energía firme. Así, la curva de duración de caudal se

constituye en una fuente de información de consulta obligatoria en la evaluación del potencial hidroenergético”.²¹

Figura 13. Curva de duración de caudales.



Fuente: COLOMBIA. MINAMBIENTE. Resolución 865 de 2004 (4, agosto, 2004). Por la que se adopta una metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales. [En línea]. Bogotá, D.C., 2004. [Consultado: 2 de febrero de 2018]. Disponible en internet: http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Resolucion865_20040722.htm

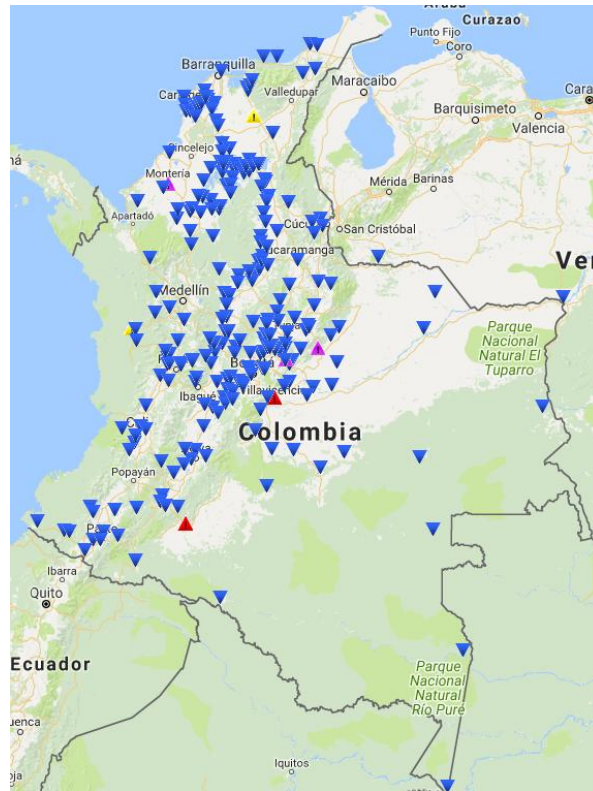
²¹ UPME, COLCIENCIAS y UNIVERSIDAD JAVERIANA. ATLAS. Potencial hidroenergético de Colombia. [Imagen]. Bogotá, 2015. [Consultado: 06 de diciembre de 2017]. 1p. Disponible en internet: <http://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergético-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>.

3.34 REGISTROS DE DATOS HIDROLÓGICOS

La curva de duración de caudal mencionada anteriormente se construye en base a datos históricos de caudales de la fuente hídrica específica. En el territorio nacional existen estaciones hidrológicas del IDEAM encargadas de registrar datos tales como: precipitación y nivel del agua, con una frecuencia que depende de la tecnológica utilizada para realizar las mediciones.

En la figura 15 se presentan algunas de las estaciones hidrológicas del país. Si en la fuente hídrica que desea llevar a cabo un proyecto hidroeléctrico no existen datos históricos, debe realizar las mediciones correspondientes durante un periodo de tiempo que dependerá de la importancia y envergadura del proyecto, que podría ser de 1 a 5 años.

Figura 14. Red de estaciones hidrológicas y Alertas.



Fuente: IDEAM. Solicitud de información: Plataforma FEWS-Colombia [Imagen]. Colombia. 2014. [Consultado: 16 de noviembre de 2017]. Disponible en internet: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>

3.35 MEDICIÓN DE CAUDAL

“Es importante destacar que el uso y la conservación de los recursos hídricos están ocupando un espacio relevante en el desarrollo sostenible regional y global; es por ello que el uso del agua para la generación de energía debe causar el menor

impacto ambiental y por tanto se debe considerar en su diseño no comprometer la sostenibilidad ambiental de la cuenca.”²²

Para el estudio, análisis y diseño de una pequeña central hidroeléctrica, es necesario realizar un exhaustivo proceso de toma de datos, que proporcionen información necesaria acerca de información de caudal y salto geodésico que posee el sitio con potencial energético aprovechable, es por ello que los siguientes términos proporcionan una breve, pero completa información acerca de los tipos y técnicas de medición de caudal existentes.

3.36 TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE CAUDAL

Las técnicas de medición de caudal, son métodos que el hombre en su proceso de industrialización ha desarrollado, para diferentes funciones como la energización, la navegación, la seguridad climática, la utilización agrónoma en el riego de cultivos, etc. Las técnicas de medición de caudal en su mayoría utilizan principios de la mecánica de fluidos, y por medio de estas técnicas, se puede conocer el caudal de un río o quebrada, para su utilización en un proceso de aprovechamiento hidroenergético del afluente, en donde son temas de interés, mantener un caudal ecológico, aprovechar un caudal necesario que garantice una energía generada capaz de satisfacer la demanda de la población beneficiada.

²²ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. Estudio hidrológico. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.91. ISBN 978-958-8675-99-2. [consultado: 11 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

3.37 MEDICIÓN DIRECTA DEL CAUDAL

Como se plantea en la investigación de EOI²³ existen diferentes dispositivos que permiten la medida directa del caudal de un río o canal, aforo directo, medida usada también para establecer y comprobar las curvas de gasto nivel-caudal. Existen 3 grupos: el grupo de medidores de la velocidad en un punto, el vertedero portátil pre calibrado y el dispositivo de volumen calibrado.

3.38 MÉTODO DEL RECIPIENTE

Planteado en el manual de mini centrales de Perú los profesores exponen²⁴ que el método del recipiente es una manera simple de medición de caudal, donde el caudal a medir se desvía hacia un balde donde es tomado el tiempo en que se tarda en llenar. Debido a que el volumen del envase es conocido, simplemente por definición se contabiliza el tiempo de llenado y posteriormente con la división entre el volumen y el tiempo se obtiene el caudal; este método resulta práctico en caudales pequeños.

²³ EOI, Escuela de negocios. Caudales de ríos. Instrumentos de medida y redes. España. 2012, p.12.

²⁴ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p36.

3.39 MÉTODO DEL ÁREA Y LA VELOCIDAD

“Este método se basa en el principio de continuidad. Para un fluido de densidad constante fluyendo a través de un área de sección conocida, el producto entre del área de la sección por la velocidad media serán constantes:

$$Area * V_{media} = Q = Constante \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad (9)$$

Donde Velocidad media = velocidad promedio del agua en la corriente.

Este producto es igual al valor del caudal volumétrico (Q) en m³/s.”²⁵

3.40 MÉTODO DEL VERTEDERO

Un vertedero es una estructura similar a un muro de baja altura ubicado a lo ancho de un río o canal. Un vertedero de medición de caudal tiene una muesca a través de la cual toda el agua en la corriente fluye. Los vertederos son generalmente estructuras temporales y son diseñados de modo que la descarga volumétrica pueda ser leída directamente o determinada por una simple lectura de la diferencia de altura entre el nivel del agua antes del vertedero y el vértice o cresta de este.

Para alcanzar mejores resultados hay que utilizar vertederos de pared delgada y además evitar que el sedimento se acumule tras ellos. Estos vertederos se hacen de plancha de acero. Hay 3 tipos de vertederos de uso más frecuente: a) el vertedero triangular, que mide descargas pequeñas con mayor precisión que otros tipos, b) el vertedero trapezoidal llamado Cipoletti, este puede compensar las contracciones en los bordes con caudales reducidos, lo cual introduce errores en los vertederos rectangulares, c) El vertedero rectangular, que permite medir descargas mayores y su ancho puede ser cambiado para diferentes caudales. La distancia entre el fondo del lecho del río y la cresta del vertedero aguas arriba de

²⁵ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p36.

este, deberá ser al menos dos veces la altura máxima a medirse (carga del vertedero).²⁶

3.41 MÉTODO DE AFORO

Como plantea la EIA universidad colombiana en una cartilla de fluidos²⁷ El elemento actuante en un aforador, o medidor de corriente, es una rueda o serie de aspas o cazoletas impelidas por la corriente. Su velocidad de rotación varía con la velocidad que lleva el fluido. Existen además diferentes dispositivos de medición de la velocidad de la rueda; generalmente se hace con un tacómetro o un medidor de revoluciones que abre o cierra un circuito, tras cada revolución dada. Se tiene además dos tipos generales de aforadores o medidores de corriente: el diferencial o tipo de cazoletas, que consiste en un eje vertical con una serie de cazoletas que giran por exceso de presión en la parte cóncava sobre la convexa, y el de tipo directo o de hélice con aspas dispuestas sobre un eje horizontal, que giran por la acción directa de la corriente.

3.42 HISTOGRAMA

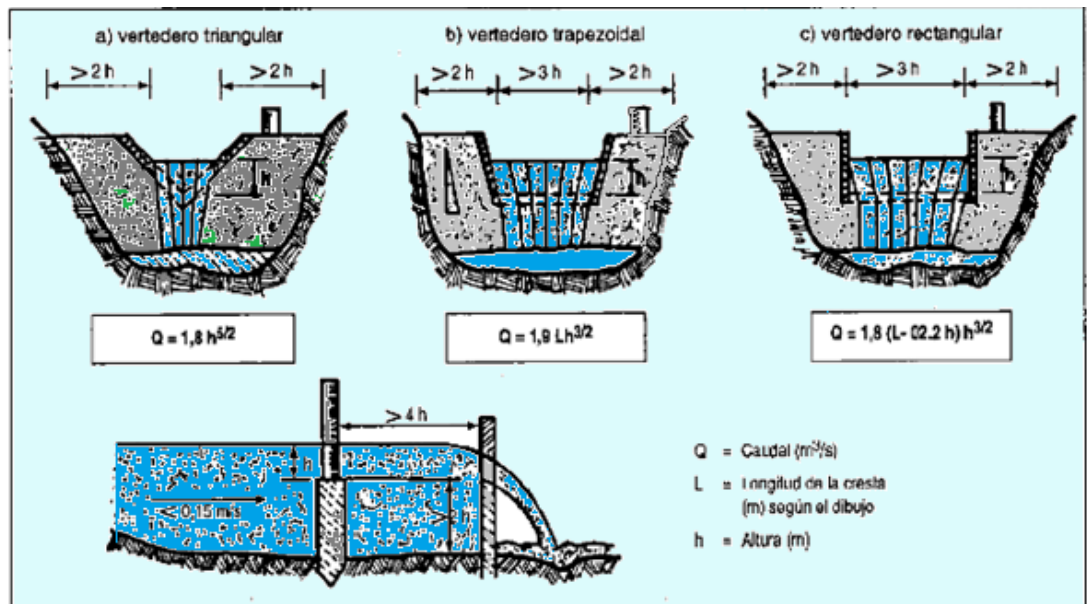
La cantidad de agua que fluye en un río varía a lo largo del año. Esta variación del caudal obedece a múltiples factores entre los que destacan: el área de la cuenca, las condiciones climáticas existentes, la topografía del terreno y las características geológicas de la cuenta.

²⁶ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p36.

²⁷ GUTIERREZ, Ernesto. Métodos de aforo en cauces naturales [en línea]. Artículos. Bogotá. 1. [Consultado: 4 de febrero de 2018]. Disponible en internet en: http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/medidores/aforo_cauces/aforo_cauces.htm

El registro de la variación del caudal a lo largo del año se toma de las estaciones de aforo, las cuales están ubicadas en el cauce de los principales ríos. En muchas de estas estaciones se toman los datos en forma inmediata. Un registro de aforos de varios años resulta de gran utilidad para poder predecir las variaciones estacionales del caudal. Este análisis consiste en elaborar primero tablas de frecuencia absolutas y relativas agrupando datos en clases o rangos. La tabla de frecuencias relativas acumulativas, representan en buena cuenta la curva de duración de caudales, que nos da la probabilidad como un porcentaje de tiempo de todo el periodo de aforos, en donde la frecuencia relativa acumulativa viene a ser la duración en términos de porcentajes.²⁸

Figura 15. Tipos de vertedero utilizados en la medición de caudal.



Fuente: COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos [Imagen]. Tipos de vertedero. Perú. 1 ed. 1996, p.39-40.

²⁸ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.39-40.

3.43 CURVA DE CAUDALES CLASIFICADOS (CCC)

Como se expone en el documento de Javier Sánchez²⁹ La curva de duración de caudales, representa los caudales diarios de un año hidrológico dado, o representar varios años, ordenados de mayor a menor; la utilidad es muy importante debido a que en el caso de una obra hídrica, la curva indicara cuantos días al año no se alcanzara el caudal mínimo necesario del proyecto. Para la construcción de la curva de duración de caudales, se necesitará una hoja de cálculo en donde se situarán de manera vertical todos los datos que se obtengan, ya sea de un año de análisis o de más años. Se añade además una columna donde se distinga el número de orden asignado a cada uno de los datos, y otra columna para ordenarlos de mayor a menor y se prosigue a calcular la probabilidad sobre el total de los días.

Para calcular la probabilidad en el día n se utiliza la ecuación (10) con la que se permite hallar matemáticamente, la probabilidad, que a su vez permite graficar la curva de caudales clasificados, que lleva en su eje ordenado al caudal, y en el eje de las abscisas la probabilidad hallada.

$$P = \frac{(n - 0,5)}{N} * 100\% \quad (10)$$

3.44 MEDICIÓN DE SALTO O ALTURA BRUTA

El salto bruto que se denominara H_b , corresponde a la diferencia entre la altura del nivel del agua en la toma, o altura superior y el nivel del agua en la salida del equipo turbogenerador, a través de estos datos, se puede seleccionar una turbo máquina

²⁹ SANCHEZ, Javier. Construcción de una curva de caudales clasificados [En línea]. Curvas de caudales clasificados. España. (septiembre de 2013), p.1. [Consultado: 13 de enero de 2018]. Disponible en Internet: <https://uao.libguides.com/c.php?g=529806&p=4412778>.

con mayor aprovechamiento del salto hidráulico y menor caudal, casos en los que influyen factores como las necesidades energéticas que vienen de un estudio previo socioeconómico; las diferentes distribuciones geográficas posibles en cada proyecto, y el recurso hídrico de cada población.

La medición del salto hidráulico permitirá realizar los cálculos de selección basados además en la verdadera altura aprovechable, o altura neta, que se calcula teniendo en cuenta la altura bruta geodésica, y las pérdidas energéticas en el tramo de tubería que conduce el fluido a la casa de máquinas para la generación.

3.45 MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL SALTO BRUTO.

Ver figura 17, en la que se plantean los distintos tipos de medición de caudal, ventajas, medición y recomendaciones.

3.46 CAUDAL ECOLÓGICO

Como plantea el ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible³⁰ se entiende por caudal ambiental, el volumen de agua en un tiempo determinado, en términos de calidad, cantidad, duración y capacidad, con el cual se puede garantizar la debida sostenibilidad de ecosistemas y el desarrollo normal de actividades socioeconómicas presentes en cada lugar, esto para personas o actividades

³⁰ COLOMBIA. ANLA. Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental. Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. [En línea]. Bogotá D.C. 2013. [Consultado: 12 de enero de 2018]. Disponible en internet: http://www.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf

desempeñadas, a lo largo de la rivera del río. Para hallar debidamente el caudal ecológico o ambiental, se deben estudiar a fondo los datos hidrológicos que son tomados por un tiempo específico en un afluente hídrico (por lo menos 1 año), además pueden ser diarios, mensuales o promedios semanales. También es necesario comprender que el caudal a lo largo del año varía con los fenómenos medioambientales como lo son: el niño, la niña etc. Por este motivo debe regularse la cantidad de caudal que se tome del afluente, en condiciones en que al ser retirado no se afecte el caudal ecológico del río. Cumpliendo con las normativas de la ANLA, para determinar el caudal ecológico, desde el punto de vista hidrológico, se realizan la respectiva toma de datos, que posteriormente son analizadas en una curva de duración de caudales, y por el concepto de Q95 y el 7Q10, se asume como caudal ecológico, al menor entre los 2 expuestos.

3.47 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

Estimar la demanda de energía en zonas no interconectadas al SIN es una laboriosa y necesaria tarea que involucra diversos factores socioculturales. Es muy importante llevar a cabo esta estimación ya que de ella depende el éxito o fracaso del proyecto hidroeléctrico. Es necesario estimar la demanda a futuro; se debe pensar en 10, 15 o 20 años. Algunos de los factores socioculturales más influyentes o determinantes a la hora de calcular la demanda: población, edades, natalidad, mortalidad, economía, agricultura, cercanía a la fuente hídrica, industria, fuentes alternativas de energía, comercio, negocios futuros, cercanía a poblaciones vecinas, futura interconexión, poder adquisitivo de la población, capacidad de pagar tarifas de energía, personal capacitado para la operación y mantenimiento de los equipos. Se podrían mencionar otros, pero se consideran estos por ahora como los más representativos. Sí la comunidad nunca ha tenido energía eléctrica en sus hogares

es más difícil establecer una demanda y deben realizarse suposiciones acertadas del futuro, basadas en encuestas a la comunidad, sobre los tipos de electrodomésticos que utilizaría en su hogar en caso de contar con el servicio eléctrico. Si en una comunidad ya existe energía eléctrica, por ejemplo, en poblaciones con plantas Diésel es más fácil realizar el estudio de la demanda, ya que se tienen datos históricos de consumo. Haciendo uso de herramientas estadísticas puede modelarse el crecimiento de la demanda para el tiempo de vida estimado del proyecto, y de esta manera obtenerse un estimado de la energía a generar.

Tabla 2. Medición de salto o altura bruta.

Metodo	Proceso	Ventajas y desventajas	Presicion	Nota importante
Manguera de nivelacion	Se suma la cantidad de veces necesaria la altura esperimentada con la manguera hasta llegar a la C.M.	Dificil en caidas geodesica altas y a su vez factible para caidas pequeñas	Aproximadamente . 5%	Recomendable hacerlo entre 2 personas
Manguera y manometro	Tome medidas de presion con un manometro y manguera y conviertalas finalmente a carga en metros.	Rapido, seguro y permite medir la longitud de la tuberia de presion; ligero y de bajo costo	<5%	Calibrar bien los instrumentos
Nivel de carpintero y tablas	Parecido al de manguera, pero en este caso se mide el niver con tablas de nivel de carpinteria.	Inapropiado en pendientes suaves y largas, ademas es lento	Pendientes altas 5% y pequeñas 10-20%	Solo en caidas pequeñas si no existe otro metodo
Altimetro	Comprar el instrumento, mide presion atmosferica , mediciones afectadas por el clima, mejoran con la forma de medicion.	Usado en caidas medias y altas por ej. Mayores a 40 metros ademas es rapido	Hasta 30%	Tomar 3 o mas medidas, se necesita instrumentos y destreza
Eclimetro	Se necesitan 2 personas, se mide la distancia entre ellas y el angulo alpha 1 , se repite hasta tener la medida total $H1=L1*\text{Sen}(a1)$	Es rapido liviano y de costo moderado	Buena 5%	Recomendable en terrenos despejados.
Nivel del ingeniero	Se requieren personas diestras en el manejo de equipos y se alquilan facilmente	Rapido pero de alto costo	Muy buena hasta 1mm	No es bueno en lugares con muchos arboles
Mapa	Metodos que hace tan solo unos años no eran tan factibles, pero con la tecnologia ha aumentado la presicion y exactitud.	Solo para caidas altas y no se tiene la necesidad de viajar de un lugar a otro, es liviano y economico	Aceptable en pre factibilidad	Se necesita destreza en la lectura de planos

Fuente: COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos [Cuadro].1 ed. Perú. 1996, p.27-33.

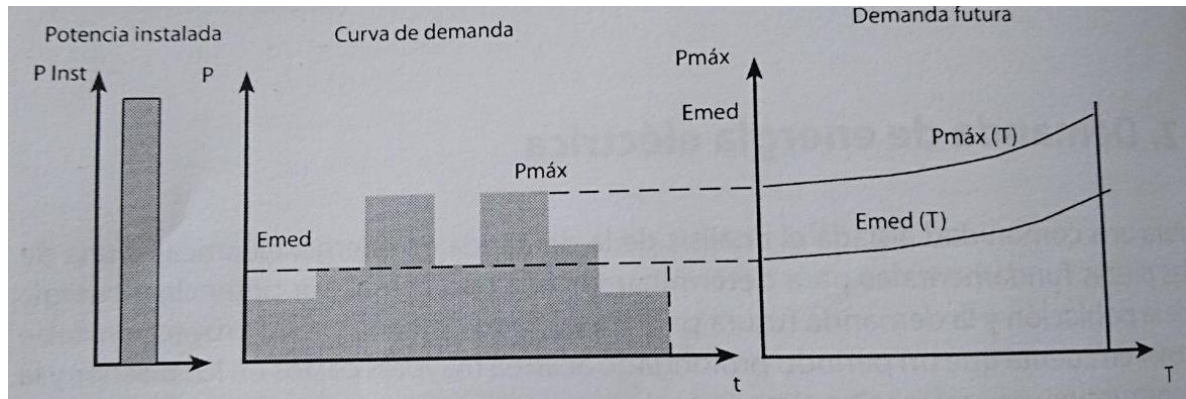
3.48 CALCULO DE LA POTENCIA Y ENERGÍA REQUERIDA

“Para una comunidad aislada, el análisis de la demanda de energía eléctrica es una de las piezas fundamentales para determinar el consumo actual por potencia y energía de la población, además de la demanda futura para un periodo de T años. Esta proyección debe tener en cuenta que un periodo prolongado acarrea mayores costos en los diseños y la construcción; por tal motivo el periodo de proyección es un criterio del diseñador para satisfacer las necesidades energéticas de la comunidad, el cual debe estar en armonía con la disponibilidad energética del recurso hídrico.”³¹

En todo caso el estudio debe orientarse a conocer la capacidad instalada, la curva de demanda y la proyección de la demanda máxima proyectada de la comunidad, aspectos que hacen referencia a la Capacidad instalada que representa la sumatoria de las potencias instaladas de la comunidad para atender demandas del tipo residencial, industrial, servicios públicos, entre otros; en ella se identifican los instrumentos eléctricos y su potencia; la curva de demanda refleja el uso de los equipos eléctricos durante un día representativo, indicándonos el uso de estos dentro de un horario, y reflejándose como el consumo de un día típico; de ella se extrae la demanda máxima (pico) por potencia y por energía. Finalmente la demanda futura corresponde a la proyección de la demanda máxima por potencia y por energía de un día representativo proyectada en un periodo de T años, que el diseñador ha establecido; para ello debe tener en cuenta información de natalidad, mortalidad, migración, emigración, perspectivas de desarrollo de la comunidad, entre otros.

³¹ ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.311-353. ISBN 978-958-8675-99-2. [consultado: 11 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

Figura 16. Potencia instalada, curva de demanda de la comunidad durante un día típico, proyección por potencia y por energía de la comunidad durante T años.



Fuente: ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas [Imagen]. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la 2011. P.47. ISBN 978-958-8675-99-2.

3.49 COMUNIDADES NO ENERGIZADAS

Como plantea el ingeniero Ramiro Ortiz³² existen muchas comunidades en el país que por diferentes motivos y dificultad de acceso, no han permitido el ingreso de la energía eléctrica, y que debido a esto ha llevado al uso excesivo de otras fuentes no renovables como el carbón, el petróleo, carbón entre otros. Para determinar la demanda energética de esas comunidades se requiere un estudio socioeconómico, que busca a través de encuestas y datos reales, que caractericen energéticamente a la comunidad; con estos datos se podrá conocer la potencia instalada, la curva de demanda y la demanda futura.

³² ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.31. ISBN 978-958-8675-99-2. [consultado: 07 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

3.50 COMUNIDADES CON PLANTAS DIÉSEL

Para suplir la necesidad de una fuente comercial de energía, se han empleado tres soluciones clásicas con resultados prácticos que son: la interconexión para zonas que son de fácil interconexión por encontrarse en los límites del sistema interconectado nacional (SIN), las plantas Diésel para zonas en donde no es factible técnica ni económicamente la interconexión, y las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) para las zonas que tienen potencial hidroeléctrico.

En las centrales Diésel el factor que mayor incidencia ha tenido en el costo de la generación es el combustible. Los altos costos del Diésel, la gasolina y gas licuado de petróleo, GLP, se deben al transporte y restricciones de seguridad que existen para su mercadeo. Las comunidades comúnmente beneficiadas por estas plantas Diésel son caseríos, etnias indígenas, entre otros. El mayor problema con las plantas es su deterioro debido a la falta de mantenimiento, producto del difícil acceso a estas zonas por parte del personal capacitado, y repuestos requeridos para el normal funcionamiento de las mismas.

3.51 OBRAS REQUERIDAS PARA CONSTRUCCIÓN DE CENTRALES DE AGUA FLUYENTE.

Las partes y el funcionamiento de todas las centrales hidroeléctricas poseen generalmente los mismos principios. En la Figura 20. Se muestra el funcionamiento de la central hidroeléctrica a filo de agua, que inicia con captar el agua a orilla del rio por medio de una bocatoma, para luego transportarla a través de un canal de concreto hacia un desarenador, y a la cámara de carga.

El agua que es almacenada en esta estructura es conducida por una tubería de alta presión hacia la casa de máquinas, en donde en su recorrido va transformando su

energía potencial en cinética (pierde su fuerza y adquiere velocidad). Al llegar el agua a casa de máquinas y mover la turbina hidráulica, la energía cinética se convierte en energía mecánica de rotación la cual mueve el eje de la turbina hidráulica produciendo energía eléctrica a través del generador controlado por un sistema de cómputo. Finalmente, en una subestación esta energía es transformada, transportada y distribuida hacia las áreas de consumo como viviendas, comercios e industrias.³³

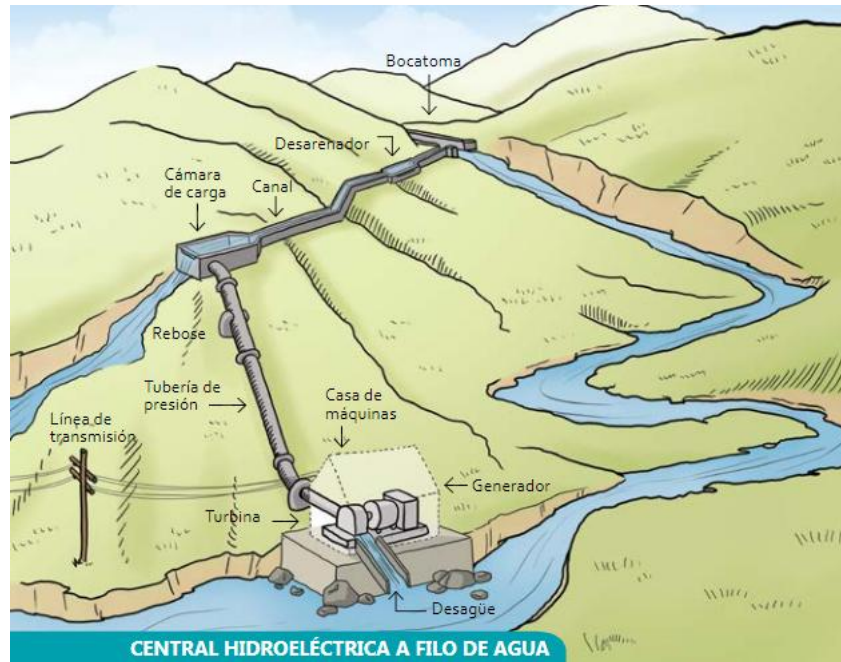
Figura 17. Motor Diesel 3612 marca CAT, Potencia 2980-3700 kW.



Fuente: Industrial 3612. Motor Diésel marca CAT [Imagen]. España. 2018. [Consultado: 14 de noviembre de 2017]. Disponible en internet: https://www.cat.com/es_ES/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines-lesser-regulated-non-regulated/18398361.html

³³ ALFARO, Omar. Centrales hidroeléctricas de pequeña escala, la experiencia de la fundación Solar en Guatemala. 2013

Figura 18. Obras y equipos de una central hidroeléctrica a filo de agua.



Fuente: Fundación solar. Centrales hidroeléctricas de pequeña escala, la experiencia de la fundación solar en Guatemala [Imagen]. Guatemala. 2014, p.14. [Consultado: 18 de mayo de 2017]. Disponible en: www.fundacionsolar.org.gt

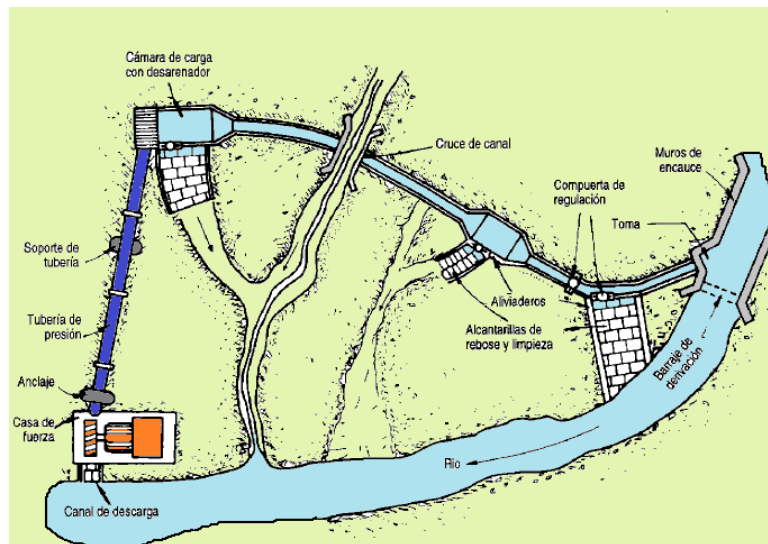
3.52 OBRAS CIVILES

“Los distintos componentes de la ruta de abastecimiento de agua para una mini central hidráulica son: (1) Barraje derivación, (2) Toma de ingreso, (3) Compuerta de regulación, (4) Aliviaderos, (5) Canales de rebose, (6) Desarenador, (7) Canal, (8) Cámara de carga, (9) Tubería de presión, (10) Cruces de canal, (11) Apoyos de tubería, (12) anclajes de tubería.”³⁴ Ver Figura 21.

³⁴ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.39-40.

Para el diseño de todos estos componentes es necesario tener en cuenta una serie de factores esenciales como el sedimento que son partículas de material duro y abrasivo que pueden ocasionar daños considerables a la turbina; el caudal adecuado es la cantidad de flujo de agua en el río puede variar durante el año, pero el proyecto ha sido diseñado para un caudal constante sin importar estos cambios, es deber de la toma y el canal asegurar el caudal correcto mediante la utilización de aliviaderos para eliminar excesos de este.

Figura 19. Obras civiles mini central hidráulica.



Fuente: COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos [Imagen].1 ed. Perú. 1996, p.37.

“La turbulencia es otro aspecto que requiere atención y es el efecto de la misma en el flujo de agua. En todas las secciones de la conducción de agua, incluyendo canal y bocatoma, los cambios bruscos en la dirección del agua, crearán turbulencias que

erosionarán las estructuras, ocasionando pérdidas de energía y acarreo de sedimentos.”³⁵

3.53 BOCATOMAS

Las bocatomas, ver figura 22, son obras hidráulicas cuya función es regular y captar un determinado caudal de agua, en este caso, para la producción de hidroenergía sea esta mecánica o eléctrica. Las bocatomas nos permiten tomar el agua de los ríos y conducirla aprovechando la fuerza de la gravedad.

Las bocatomas deben cumplir las siguientes funciones:

Garantizar la captación de una cantidad constante de agua, especialmente en épocas de estío. Impedir, hasta donde sea posible, el ingreso de materiales sólidos y flotantes, haciendo que estos sigan el curso del río o facilitando la limpieza. Proteger el resto del sistema de obras hidráulicas del ingreso de avenidas o embalses que pudieran producirse en épocas de lluvia. La ubicación más apropiada para una bocatoma es en los tramos rectos y estables del río, dependiendo de la topografía, la geología, el comportamiento de los suelos y principalmente de las variaciones hidrológicas del lugar que nos servirá de emplazamiento. Las partes de una bocatoma son: (1) Barraje, (2) Descarga de fondo, (3) Solera de captación, (4) Antecámara, (5) Reja de admisión, (6) Compuerta de control de admisión, (7) Canal de conducción, (8) Vertederos o aliviaderos, (9) Desarenador, (10) Colchón de agua, (11) Muros de encauzamiento.³⁶

3.54 BARRAJES

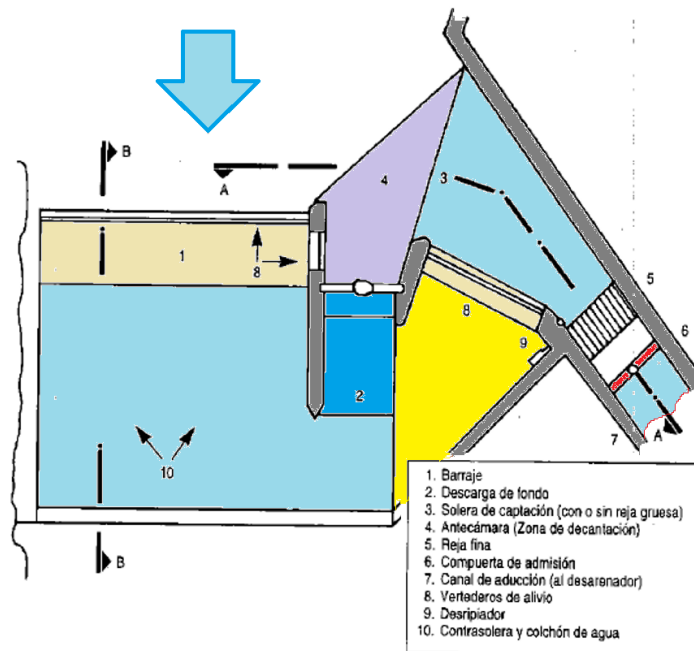
“Es una estructura de derivación que sirve para elevar el nivel de las aguas y se construye en sentido transversal al río con fines de captación, siempre y cuando sea

³⁵ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.55.

³⁶ *Ibíd.*, p.58.

necesario. Es decir, en aquellos casos en que el tirante del río (distancia vertical entre el punto más bajo del río y el nivel del agua) no sea lo suficientemente grande y no abastezca los requisitos de captación. Los barrajes pueden tomar diferentes nombres: barrajes de derivación, vertederos de derivación, cortinas, presas derivadoras, tanques o azudes.³⁷

Figura 20. Esquema de bocatoma



Fuente: COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos [Imagen].1 ed. Perú. 1996, p.58.

³⁷ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos.1 ed. Perú. 1996, p.59.

3.55 PRESAS DERIVADORAS O AZUDES

El azud es un tipo de barrage, una represa vertedora, cuya función es captar y dejar escapar el agua excedente o de avenidas, que no debe ingresar al sistema. Es represa porque levanta el nivel del agua, y vertedora porque deja pasar el agua no tomada. Las presas vertedoras o de barrage fijo se emplean en los casos de ríos con pequeños caudales, cuando el caudal de derivación es superior al 30% del caudal del río en verano, ver figura 23.

Es necesario que el azud sea hidráulico y esté estructuralmente bien diseñado. Asimismo, debe ser ubicado de manera tal que las descargas del vertedor no erosionen ni socaven el talón aguas abajo. Las superficies que forman la descarga del vertedor deben ser resistentes a las velocidades erosivas creadas por la caída de las aguas desde la cresta.³⁸

3.56 TOMAS DE BARRAJE SUMERGIDO

Como su nombre lo indica, la toma de barrage sumergido o de tipo Tirol, consiste en un canal con techo de rejillas construido en sentido transversal y debajo del lecho del río que funciona como un sumidero, con una pendiente tal que permita conducir las aguas hacia la ventana de captación. Como resulta obvio todas las partes que forman esta estructura de captación tienen un diseño específico.

³⁸ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.59.

3.57 ALIVIADEROS

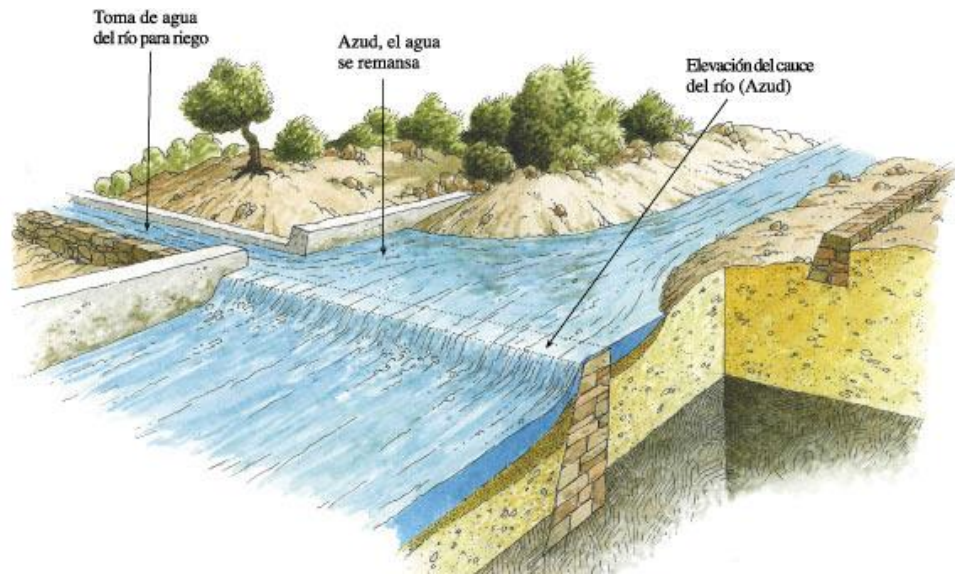
Un aliviadero es un tipo de vertedor. Se llama vertedor a un dispositivo hidráulico que consiste en una escotadura a través de la cual se hace circular el agua.

Los aliviaderos son estructuras de regulación y protección que sirven para evacuar caudales de exceso o superiores a los de diseño. Si estas aguas excedentes ingresaran a las diferentes obras que componen el sistema, podrían ocasionar daños de imprevisibles consecuencias.

3.58 DESARENADOR

En épocas lluviosas, los ríos acarrearán abundantes materiales sólidos, tanto de fondo como en suspensión, debido a la erosión que provocan en todo su recorrido. Por ello es importante contar con desarenadores o decantadores, particularmente en obras de MCH. Las partículas de diámetro superior a 0,2mm ocasionan daños en la turbina por lo que deberán ser retenidas y eliminadas al momento. Un buen diseño pondrá especial atención en la velocidad del agua dentro del desarenador y en su longitud.

Figura 21. Azud



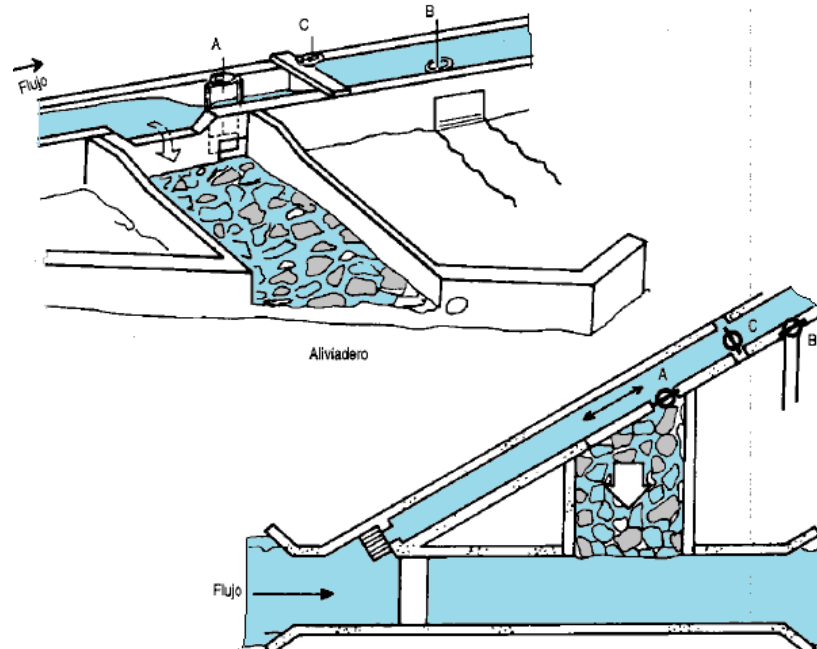
Fuente: GONZALES, Juan; CASCALES, Francisco. Los azudes, kilómetro cero de los regadíos [Imagen]. [Consultado: 11 de septiembre de 2017]. Disponible en internet: http://servicios.laverdad.es/murcia_agua/cap6.2.htm

3.59 CÁMARA DE CARGA

Por sus características, la cámara de presión y la almenara son estructuras que unen un sistema de baja presión con uno de alta presión, caracterizados por tener velocidades diferentes. Bajo estas condiciones, ellos deben ser dimensionados para condiciones críticas de operación, que son: el arranque rápido y la parada brusca; momentos en los cuales cambia la velocidad del caudal, originando ondas de oscilación que pueden ser positivas o negativas “Golpe de ariete”; y afecta directamente la tubería de presión. Por tal motivo deben ser amortiguadas en la cámara de presión o en la almenara. Para que ellas puedan cumplir con estas condiciones deben conocerse los fenómenos que ocurren durante su funcionamiento y en especial el golpe da ariete.³⁹

³⁹ ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.217. ISBN 978-958-8675-99-2. [consultado: 8 de agosto de 2017]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

Figura 22. Aliviadero



Fuente: COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos [Imagen].1 ed. Perú. 1996, p.45.

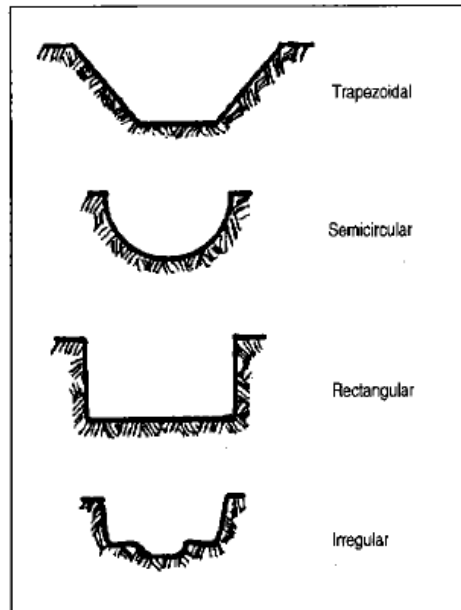
3.60 CANALES DE CONDUCCIÓN

El canal es una estructura hidráulica de forma regular artificialmente construida, que en razón de su pendiente puede conducir agua de un lugar a otro. En el caso de Microcentrales, casi siempre se trata de conductores abiertos de sección muy diversa (rectangulares, trapezoidales, semicirculares o muchas veces, de sección irregular, tal como se aprecia en la figura 25).

3.61 TUBERÍAS DE PRESIÓN

El uso de tubería en lugar de canal abierto resulta considerablemente más costoso, por ello es importante en el diseño lograr que la tubería sea lo más corta posible. En el caso de tubería corta el canal es largo y está expuesto a un mayor riesgo de obstrucción, colapso o deterioro producto de un escaso mantenimiento. En caso de ubicarse en una pendiente escarpada con erosión, el sistema de tubería corta dejaría de ser una opción deseable debido a que los altos costos de mantenimiento del canal podrían sobrepasar el costo inicial de una tubería. En caso de una tubería larga, esta se instala a lo largo del río. Aunque este sistema es necesario cuando resulta imposible construir un canal debido a las características del terreno, hay que tomar siempre algunas precauciones. La más importante es asegurar que la creciente del río no dañe o deteriore la tubería. También es vital calcular el diámetro de tubería más económico, pues si se trata de una tubería larga el costo será muy elevado.

Figura 23. Tipos de secciones de canal.



Fuente: COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos [Imagen].1 ed. Perú. 1996, p.58.

3.62 CHIMENEA DE EQUILIBRIO

Como define en su libro el profesor Ortiz⁴⁰ la chimenea de equilibrio y respectivamente el tanque de carga, responden a variaciones energéticas considerables, especialmente en momentos de arranque y parada, por este motivo es necesario contar con un volumen de fluido y un colchón de aire que este diseñado para amortiguar el golpe de ariete. En términos civiles, la chimenea de equilibrio se construye al final de la pico, mini o micro central hidroeléctrica, en derivación a

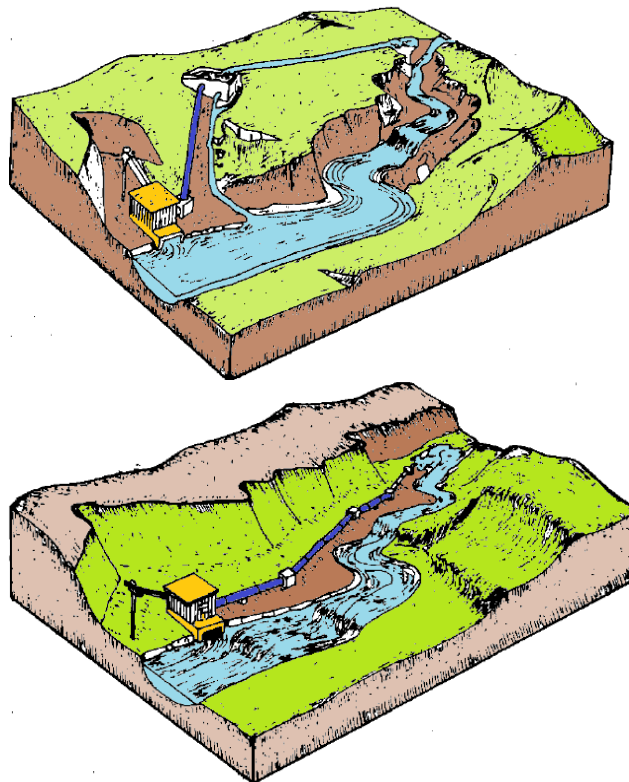
⁴⁰ ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.227. ISBN 978-958-8675-99-2. [consultado: 2 de agosto de 2017]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

conducciones del túnel. Para instalar una chimenea de equilibrio debemos contar con lo siguiente:

$$\frac{l}{H_B} \leq 5 \text{ ó } \frac{t_h}{v} < 0.51 \quad (11)$$

Donde l es la longitud de la tubería, H_b la caída bruta, t_h tiempo hidráulico, y v es la velocidad del caudal en la tubería de presión, y la condición más general es que si el tiempo de cierre es menor a 3 segundos, se requiere chimenea de equilibrio.

Figura 24. Tubería corta y tubería larga.



Fuente: COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos [Imagen]. 1 ed. Perú. 1996, p.52.

3.63 MATERIALES EMPLEADOS EN LA TUBERÍA FORZADA

La tubería forzada, es aquella que conduce el fluido desde la zona de captación, ya sea por presa o en agua fluyente, hasta la casa de máquinas, lugar donde se produce la conversión energética con la turbina hidráulica, además es el lugar donde con respecto al nivel del fluido, se produce la altura más grande y la mayor presión consecuentemente. Por este motivo la tubería de presión debe tener en cuenta factores como: presión de diseño, diámetros y pérdidas por fricción, accesibilidad al lugar y dificultad de instalación, mantenimiento, disponibilidad, desgaste y costo mismo de la tubería. Los aspectos anteriormente mencionados, afectan principalmente a la tubería de presión, y la forma en que esta contrarresta y se vincula con estos factores del material con la cual se haya construido.

Los materiales más utilizados en el diseño y fabricación de tuberías de presión son: el Acero comercial, El PVC o policloruro de vinilo, cemento reforzado, el asbesto, la resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, el hierro dúctil y el polietileno de alta densidad. La figura 27 presenta una comparación que pondera de 1 a 5 el funcionamiento de la tubería frente a aspectos importantes para su selección:

Tabla 3. Comparación de los diferentes materiales para tuberías de presión.

Material	Pérdida por fricción	Peso	Corrosión	Costo	Presión de trabajo
Hierro dúctil	4	3	2	1	5
Asbesto cemento	3	3	4	4	4
PVC	5	5	4	4	4
Acero comercial	3	3	3	2	5
Polietileno	5	5	5	3	4

Fuente: ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas [Imagen]. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.251. ISBN 978-958-8675-99-2. [Consultado: 2 de agosto de 2017]. Disponible en internet: <http://download.ebookshelf.de/download/0003/5742/55/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

3.64 PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍAS

Como se estudia en la mecánica de fluidos, y en el transporte y aprovechamiento de los mismos, la energía puede transformarse en diferentes tipos que a su vez pueden ser aprovechados dependiendo de unas necesidades específicas dadas; las energías en términos de presión, altura y velocidad, aparecen y se transforman entre ellas dependiendo de accesorios, cambios de altura y de diámetro de las tuberías, pero teniendo en cuenta que existen irreversibilidades en cualquier proceso, también cierta cantidad de energía se pierde de estas formas útiles, y termina convertida en calor por la fricción, vibraciones y energía sonora. Los accesorios que aparecen en un sistema de transporte de fluidos, pueden hacer disminuir la energía presente en el mismo, estos accesorios generan una caída en

la presión, al paso del fluido por los mismos, caída que en cada caso es diferente y depende del accesorio mismo

Desde un punto 1 a un punto 2 de un tramo de tubería, con ciertas características de continuidad, podremos representar la energía en cada punto con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 * g} + z_1 - h_f = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 * g} + z_2 \quad (12)$$

$$h_f = h_{f\text{accesorios}} + h_{f\text{tubería}} = K_{\text{accesorios}} * Q^2 + K_{\text{fricción}} * Q^2 \quad (13)$$

3.65 GOLPE DE ARIETE

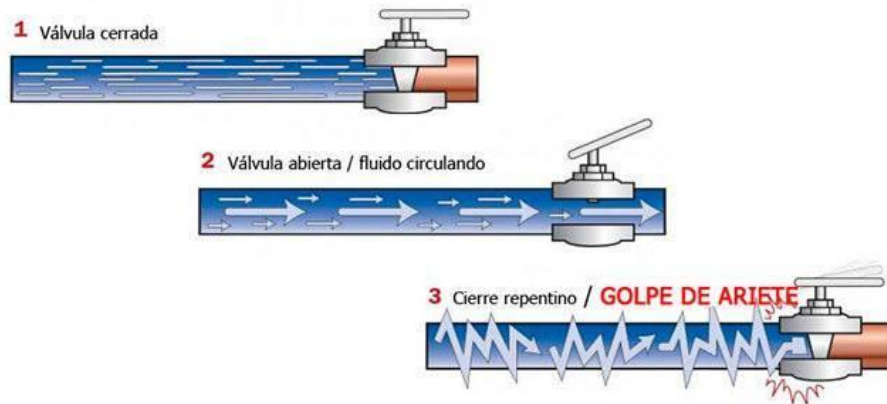
“Si el flujo de agua en la tubería de presión se detiene bruscamente (por ejemplo, a causa de un bloqueo repentino cerca de la turbina), se originan sobrepresiones muy altas llamadas golpes de ariete. La tubería debe ser lo suficientemente fuerte como para no romperse cuando esto suceda. Por otro lado, tales presiones harán que la tubería se mueva, lo que ocasionará daños si los anclajes no son resistentes.”⁴¹ Ver figura 25.

⁴¹ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.55.

3.66 CASA DE MAQUINAS

La casa de máquinas como su nombre lo indica, es el sitio destinado al montaje de toda la maquinaria hidroeléctrica entre la que se destaca: el grupo hidrogenerador, las válvulas de admisión, sistemas eléctricos y de control etc. La casa de máquinas además es el lugar de menos altura geodésica, con respecto al nivel de agua de la presa, debido a que de esta manera la turbina hidráulica puede aprovechar el mayor salto hidráulico posible para emplearlo en la generación. En el caso de muchas centrales que funcionan con presa, la casa de máquinas se encuentra o en cavernas ganadas a una montaña, o en salones creados dentro de la misma parte inferior de la presa.

Figura 25. Golpe de ariete.



Fuente: Aristegui, maquinaria. Que entendemos por golpe de ariete en una tubería [Imagen]. Barcelona: 2016. [Consultado: 5 de septiembre de 2017]. Disponible en internet: <https://www.aristegui.info/que-entendemos-por-golpe-de-ariete-en-una-tuberia/>

3.67 EQUIPOS MECÁNICOS

Una gran parte de los equipos de una central hidroeléctrica, corresponden a equipos mecánicos, como la turbina misma, el montaje y acople del eje, las tuberías, válvulas, grúa de carga, etc. De igual manera es importante aclarar que los equipos eléctricos y de control, también son muy importantes y utilizados; la importancia que tienen los equipos mecánicos está basada en la tarea básica de enviar el fluido desde el lugar de captación, controlarlo a través de válvulas y otros sistemas de amortiguación de cargas, entrada y direccionamiento de agua dentro de la turbina, que convierte la energía hidráulica en mecánica, y si es necesario finalmente un sistema de reducción que garantice una velocidad síncrona con el generador.

3.68 VÁLVULAS

“Las válvulas ubicadas antes de la turbina, se utilizan para el cierre del caudal a través de la turbina y para reparación, Para P.C.H. ís de gran caída ($H > 200$ metros) las válvulas antes de la turbina son operativas, que se cierran por parada de la turbina con el fin de evitar cavitación. Para P.C.H. ís de baja caída se utilizan válvulas de compuerta en la entrada de la turbina, y válvulas mariposa para caídas que oscilan entre 30 y 200 metros con un diámetro de la tubería de presión de 1200mm y esféricas cuando la caída bruta es superior a los 200 metros.”⁴²

⁴² ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.257. ISBN 978-958-8675-99-2. [Consultado: 2 de agosto de 2017]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55s/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

3.69 VÁLVULAS DE COMPUERTA

Las válvulas de compuerta, es una válvula reguladora de caudal, que consiste de un disco circular que sube y baja dependiendo del giro de la misma, este disco funciona a medida que se opone al caudal y finalmente se asienta sobre la parte inferior de la tubería, impidiendo el paso de fluido.

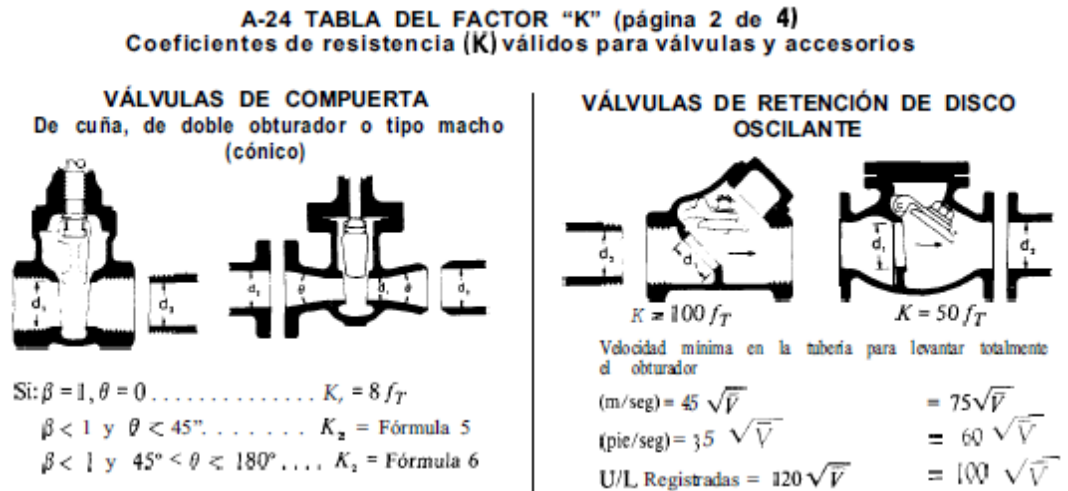
3.70 VÁLVULAS DE BOLA

La válvula de bola es otro dispositivo o accesorio de un sistema de flujo, que funciona para control de líneas, suministro y cierre al paso de fluido, este tipo de válvulas están compuestas de un obturador móvil que, a través de una perforación en su geometría, permite o impide el paso de fluido con tan solo un giro de la misma.

3.71 PÉRDIDAS EN VÁLVULAS

Como se mencionó anteriormente, existen pérdidas energéticas al paso del fluido por un accesorio, en este caso una válvula; estas pérdidas energéticas se pueden analizar en términos de caídas de presión que le restan energía al flujo, pero que son necesarias para controlarlo. Las pérdidas en válvulas pueden calcularse a través de constantes que son calculadas por medio de catálogos y que están relacionadas con la caída de presión en cada una de las válvulas. La figura 29, expone un manual de accesorios con información:

Figura 26. Pérdidas de presión en algunas válvulas.



Fuente: Crane. Flujo de Fluidos en Válvulas Accesorios y Tuberías, Constantes de pérdida en accesorios de tubería. McGRAW-HILL, Traducido por Valfisa [Consultado: 23 de mayo de 2017]. Disponible en internet en: <https://mecanicafluidos.wikispaces.com/file/view/CRANE+Flujo+de+Fluidos.pdf>

3.72 TURBINAS

Una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas), modificando la energía total de la vena fluida que las atraviesa. En el estudio de las turbo máquinas hidráulicas no se tienen en cuenta efectos de tipo térmico, aunque a veces habrá necesidad de recurrir a determinados conceptos termodinámicos; todos los fenómenos que se estudian serán en régimen permanente, caracterizados por una velocidad de rotación de la máquina y un caudal, constantes. En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; éste mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua. Los métodos utilizados para su estudio son, el analítico, el experimental y el análisis dimensional.

Para estudiar el movimiento del agua en las turbinas hidráulicas, se utiliza una nomenclatura universal que define los triángulos de velocidades, a la entrada y salida del rodete, de la forma siguiente:

u Es la velocidad tangencial o periférica de la rueda

c La velocidad absoluta del agua

w Es la velocidad relativa del agua

α Es el ángulo que forman las velocidades u y c

β Es el ángulo que forman las velocidades u y w

El subíndice 0 es el referente a la entrada del agua en la corona directriz o distribuidor

El subíndice 1 es el referente a la entrada del agua en el rodete.

El subíndice 2 es el referente a la salida del agua del rodete

El subíndice 3 es el referente a la salida del agua del tubo de aspiración⁴³

La ecuación fundamental de las turbo máquinas en general y en este caso de las turbinas hidráulicas viene dado por la siguiente expresión:

$$H_{euler} = \frac{C_{1n}U_1 - C_{2n}U_2}{g} = H_n * \eta \quad 44 \quad (14)$$

3.73 CLASIFICACIÓN DE TURBINAS SEGÚN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO

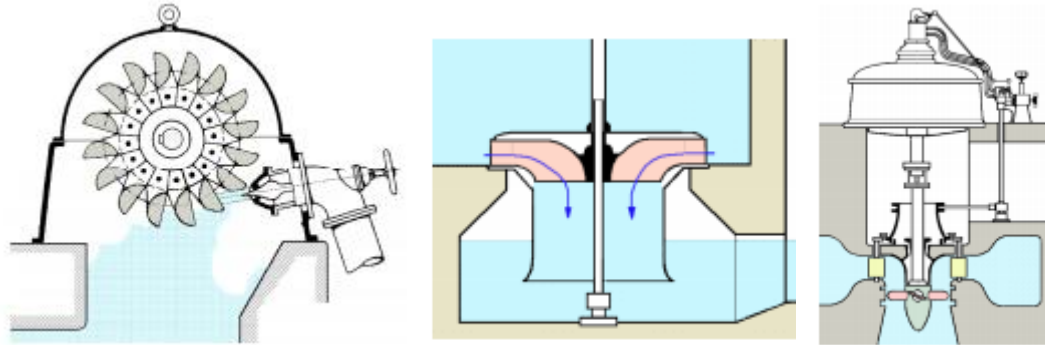
Atendiendo a la dirección de entrada del agua en las turbinas, éstas pueden clasificarse en: a) Axiales) Radiales (centrípetas y centrífugas); c) Mixtas; d) Tangenciales. En las axiales, (Kaplan, hélice, Bulbo), el agua entra paralelamente al eje, tal como se muestra en la figura 30. En las radiales, el agua entra perpendicularmente al eje, siendo centrífugas cuando el agua vaya de dentro hacia afuera, y centrípetas, cuando el agua vaya de afuera hacia adentro, (Francis). En las mixtas se tiene una combinación de las anteriores. En las tangenciales, el agua

⁴³ FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas. España, 2017. p.2. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pdf>

⁴⁴Ibíd., p. 12.

entra lateral o tangencialmente (Pelton) contra las palas, cangilones o cucharas de la rueda.⁴⁵

Figura 27. Ejemplos de turbinas



Fuente: FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [Imagen]. España, 2017. p.2. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pdf>

3.74 CLASIFICACIÓN SEGÚN GRADO DE REACCIÓN

Como se explica en el libro de Mataix⁴⁶ todas las turbomáquinas presentes actualmente, se pueden clasificar en 2 grandes grupos: las turbinas de acción y reacción. Si el grado de reacción es distinto de cero, la turbina será de reacción y en caso contrario, en que sea cero será una turbina de acción. Cada una de estas tiene límites definidos. Los grados de reacción son muy variados, igual que los de acción, sin embargo se puede cambiar de un tipo a otro con variaciones mínimas.

⁴⁵ FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas. España, 2017. p.3. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pdf>

⁴⁶ MATAIX, Claudio. Turbomáquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. p.326. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

3.75 TURBINAS DE ACCIÓN

“En el distribuidor (llamado inyector), se transforma la energía de presión de fluido en energía cinética del chorro. A la entrada y salida del rodete reina la presión atmosférica. Las secciones de la salida de la turbina y el nivel coinciden, debido a que carece de tubo de aspiración. Las turbinas de acción que se construyen actualmente son las turbinas Pelton llamadas turbinas de chorro libre”⁴⁷.

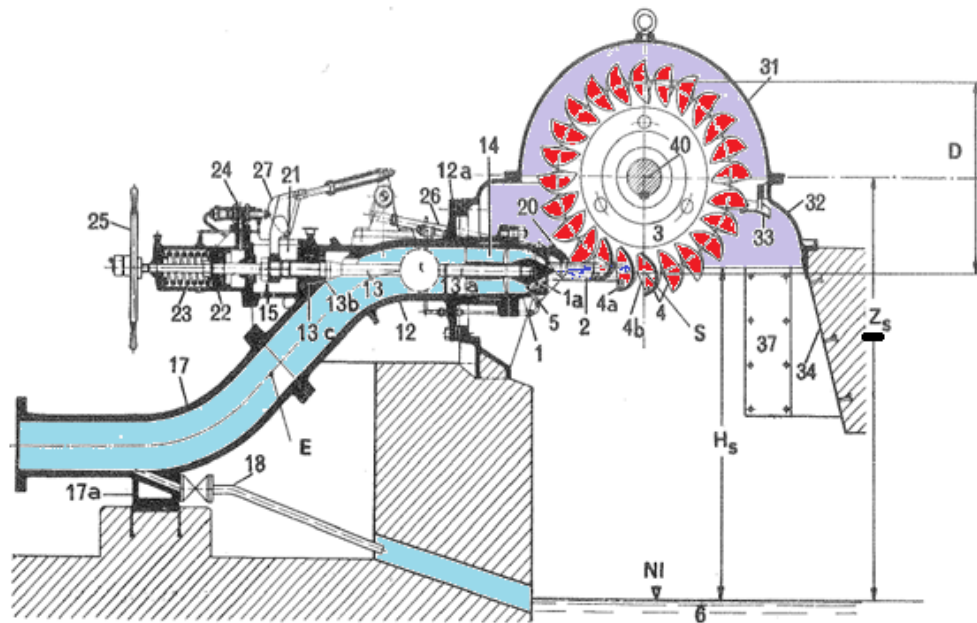
3.76 TURBINA PELTON

Las turbinas Pelton son turbinas de chorro libre, que se acomodan a la utilización de saltos de agua con mucho desnivel y caudales relativamente pequeños, con márgenes de empleo entre 60 y 1500 metros, consiguiéndose rendimientos máximos del orden del 90%. En una rueda Pelton la dirección del chorro no es ni axial ni radial, sino tangencial; el elemento constructivo más importante es la cazoleta en forma de doble cuchara, que recibe el chorro exactamente en su arista media donde se divide en dos, circulando por su cavidad y recorriendo hasta la salida casi un ángulo de 180°, contrarrestándose así los empujes axiales por cambio de dirección de los dos chorros. El agua una vez sale de la cazoleta, cae libremente una cierta altura, pasando al cauce inferior. El inyector es el órgano regulador del caudal del chorro; consta de una válvula de aguja cuya carrera determina el grado de apertura del mismo; para poder asegurar el cierre, el diámetro máximo de la aguja tiene que ser superior al de salida del chorro cuyo diámetro d se mide en la sección contraída, situada aguas abajo de la salida del inyector y en donde se puede considerar que la presión exterior es igual a la atmosférica.⁴⁸

⁴⁷ MATAIX, Claudio. Turbomáquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. p.327. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

⁴⁸ FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas. España, 2017. p.35. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

Figura 28. Sección transversal de una turbina Pelton de una sola pieza (Dibujo de la firma Wyss)



1 Tobera; 1a Pieza intermedia; 1b Pieza de sujeción; 1c Barrenados; 1d Tapas de protección, 2 Chorro de agua; 3 Rodete; 4 Alabes; 4a Escotadura de los alabes; 4b Arista divisoria; 5 Cabeza de la aguja; 5a Punta; 5b Tornillo calibrado; 5c Cuña; 5d Cuerpo de la aguja; 5e - 5f Agujeros cilíndricos para espigas; 6 Aguas abajo; D Diámetro del rodete; d_0 Diámetro del chorro; 7 Solapas; 8 Corona del rodete; 8a Cubo del rodete; 9 Bulones de fijación con tuerca; 9a y 9b Cabeza de los bulones tensores; 10 Bulones tensores; 11 Cuñas radiales; 12 Codo de entrada; 12a Brida de sujeción; 13 Vástago de la aguja; 13a Camisa de bronce; 13b Pistón de descarga; 13c Guarnición de cuero; 14 Cruceta de guía; 14a Nervios de guía; 15b Envoltorios para los anteriores; 15 Consola para el vástago de la aguja; 16 Orificio de limpieza; 17 Codo inferior; 17a Soporte del anterior; 18 Tubería de desagüe; 19 Válvula de la turbina; 20 Desviador; 20a Cuchilla del anterior; 20b Palanca de retorno; 22 Pistón del servo-motor para la regulación de la aguja; 23 Resorte de cierre para la aguja; 24 Válvula de distribución para la aguja; 25 Volante a mano para la regulación de la aguja; 26 Varilla del deflector; 27 Rueda de levas; 30 Caja; 30a Orificio para el codo de entrada; 30b Departamentos laterales; 30c Soportes de los cojinetes fundidos en una sola pieza con la caja; 31 Tapa de la caja; 32 Parte inferior de la caja; 32a Paredes de guía; 32b Canales de desagüe para salpicaduras con el eje de la turbina; 33 Colector de salpicaduras; 35 Blindaje; 36 Serpentin de refrigerante; 37 Recubrimiento para el anterior; 37a Orificios para el desagüe del agua refrigerante; 40 Eje de la turbina; 40a Anillo de reborde; 40b Anillo centrífugo; 41 Cojinete exterior de la turbina; 42 Cojinete interior de la turbina; 43 Acoplamiento del eje; 44 Regulador de velocidad; 45 Volante.

Fuente: MATAIX, Claudio. Turbomáquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

3.77 PARTES DE LA TURBINA PELTON

Las partes más importantes de una turbina Pelton son: el inyector, que es un dispositivo que transforma la presión ocasionada por la altura neta, en velocidad ayudando a mejorar la trasmisión energética con las cucharas o cazoletas. Las cazoletas son las cucharas a través de las cuales el fluido imparte la energía, que finalmente llega al eje debido a que están colocadas en sentido radial, y de tal forma que el chorro se aproveche al máximo en cada una; como cualquier otra turbina posee una carcasa que evita que el fluido salga en cualquier dirección; también se cuenta con el eje respectivo donde se acopla la turbina.

En la figura 31 se representan la mayoría de los componentes usados en el montaje de una turbina Pelton para generación eléctrica, y se relacionan directamente en la gráfica anterior.

3.78 FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA PELTON

“La turbina Pelton pertenece al grupo de las turbinas de impulsión o bien de acción. Con estas se produce la transformación completa de la energía de presión del agua en energía cinética en el distribuidor. Para ello, el chorro de agua se acelera en una tobera e incide en los álabes de la rueda Pelton tangencialmente. En los álabes se desvía el chorro de agua casi 180°. El impulso del chorro de agua se transmite a la rueda Pelton.”⁴⁹ Finalmente la energía mecánica obtenida del salto hidráulico, pasa

⁴⁹ Gunt, Hamburg. Equipos para la educación en ingeniería, Principio de funcionamiento de una turbina Pelton. [Consultado: 16 de enero de 2018]. Disponible en internet en: https://www.gunt.de/es/productos?option=com_gunt&view=panel&task=gunt.suche.suche.request&Itemid=150&back=1

al eje quien en forma de torque, revoluciones y con el debido acoplamiento a un generador, produciendo energía eléctrica.

3.79 TURBINAS DE REACCIÓN

En las turbinas de reacción el agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete, de forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa; en estas turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete y, por lo tanto, la energía potencial del salto se transforma, una parte, en energía cinética, y la otra, en energía de presión. El difusor o tubo de aspiración, es un conducto por el que desagua el agua, generalmente con ensanchamiento progresivo, recto o acodado, que sale del rodete y la conduce hasta el canal de fuga, permitiendo recuperar parte de la energía cinética a la salida del rodete para lo cual debe ensancharse; si por razones de explotación el rodete está instalado a una cierta altura por encima del canal de fuga, un simple difusor cilíndrico permite su recuperación, que de otra forma se perdería. Si la turbina no posee tubo de aspiración, se la llama de escape libre.⁵⁰

⁵⁰ FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.35. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

Tabla 4. Comparación entre los órganos constructivos en turbinas de acción y reacción.

Turbina	Accion	Reaccion
Distribuidor	Inyector o tobera con Valvula de aguja	Distribidor Fink o alabes fijos
Rodete	Cucharas	Alabes o paletas
Dispositivo de proteccion contra embalamiento y golpe de ariete	Pantalla deflectora	orificio compensador
salida del rodete	Sin tubo de aspiracion, a la presion atmosferica	Con tubo de aspiracion a presion mas baja que la atmosferica

Fuente: MATAIX, Claudio. Turbomáquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. p.327. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

3.80 TURBINA FRANCIS

“Las turbinas Francis, son de tipo radial, admisión centrípeta y tubo de aspiración; siempre se construyen en condiciones de rendimiento máximo, dando lugar a tres tipos fundamentales, lentas, normales y rápidas, diferenciándose unas de otras en la forma del rodete”.⁵¹ Las turbinas Francis son turbo máquinas de reacción, es decir que en el paso del fluido a través del rodete, existe una caída de presión, los alabes están diseñados para recibir flujo radial o mixto dependiendo el caso. Las turbinas Francis son las más utilizadas en la generación energética en Colombia, en donde las compañías energéticas, han creado sistemas hidroeléctricos con

⁵¹ FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.55. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

presas de contención, garantizando el aprovechamiento del caudal y la cota de caída del fluido; son importantes dentro de las partes de la turbina, el tubo de aspiración, el rodete, la carcasa y los alabes fink.

3.81 PARTES DE LA TURBINA FRANCIS

Como se expresa en el proyecto de Ecuador⁵² los principales órganos de una turbina Francis se presentarán según el sentido en que el fluido incide sobre ellos. El primero es la carcasa o caracol, que es un ducto que suministra el fluido a la turbina, es semicircular y con un decrecimiento de diámetros procurando que el fluido sea el necesario y con una velocidad constante dentro del rodete.

El distribuidor es un juego de alabes en forma de persiana incidente sobre el rodete, si son de tipo fink se puede modificar su ángulo utilizando una servo válvula, regulando el gasto requerido por la turbina y la incidencia del flujo sobre el rodete. El rodete se forma por la unión de los alabes dentro de un plato que va montado al eje de la turbina, el fluido toma el sentido de los alabes y finalmente sale de la turbina; cabe recalcar que se construyen para soportar corrosión y abrasión. Finalmente, el tubo difusor que es la tubería que conduce el fluido a la salida del rodete evitando la cavitación a través del aumento de la carga estática, hasta la presión atmosférica.

⁵² GALARZA, José. Metodología de diseño de turbinas en pequeñas centrales hidroeléctricas con capacidad menor a 10MV con ejemplo de aplicación [En línea]. Proyecto de titulación previo a la obtención del título de ingeniero en mecánico. Escuela politécnica nacional. Facultad de ingeniería mecánica. Quito. 2015. [Consultado: 11 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9138/1/CD-6092.pdf>

3.82 FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA FRANCIS

Se plantea en el proyecto de Galarza⁵³, que la forma del rodete de la turbina Francis varía según el valor de la velocidad específica, si la velocidad específica es menor, el rodete tendrá mayor acción radial, y de manera contraria se convierte en un rodete semiaxial o mixto, esto debido a que a mayor carga mayor acción radial, y a mayor caudal mayor acción semiaxial. En un proyecto hidroeléctrico la turbina es el órgano fundamental, pues es quien transforma la energía hidráulica en energía mecánica de rotación que a su vez pasa a ser eléctrica a través de un generador síncrono. El rotor es el elemento esencial, pues es en él, en donde existe la transferencia de energía, además el ducto de caracol recibe el agua de la tubería de presión y la reparte a través rotor y el distribuidor. Finalmente, en la tubería de succión a la salida de la turbina, el fluido que sale con presiones de vacío, recupera presión estática y evita fenómenos de cavitación.

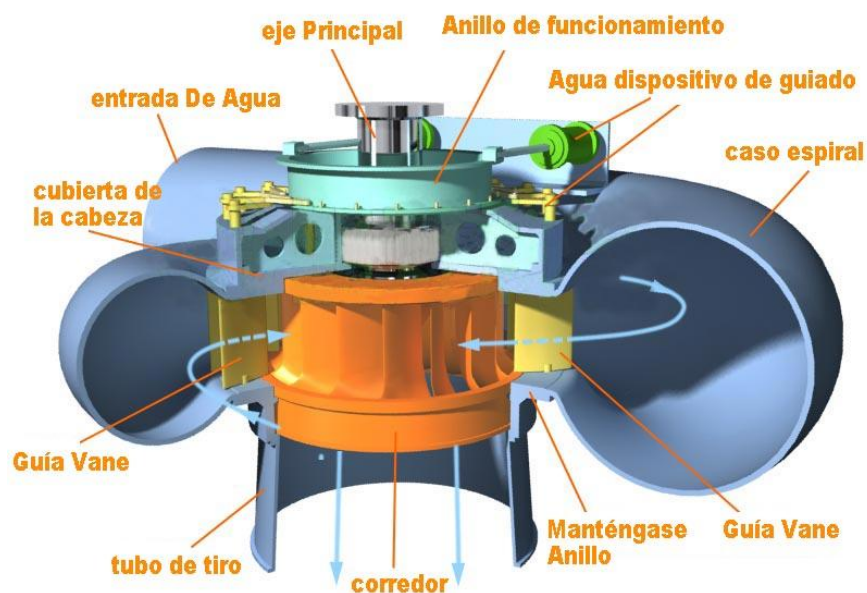
3.83 TURBINA KAPLAN

La importancia de las turbinas Hélice y Kaplan en pequeños saltos con grandes caudales, las hacen idóneas tanto en posición horizontal como vertical; por su similitud con las turbinas Bulbo, empleadas tanto en centrales mareomotrices como en algunas mini centrales hidráulicas, presentamos este somero estudio que permite comprender su funcionamiento y campos de aplicación. La tendencia a la construcción de turbinas cada vez más rápidas, para velocidades específicas n_s mayores de 450, conduce a las turbinas hélice y Kaplan, ya que en las turbinas Francis con N_s del orden de 400, el agua no se puede guiar y conducir con precisión. El rodete está compuesto por unas pocas palas, que le confieren forma de hélice de

⁵³ GALARZA, José. Metodología de diseño de turbinas en pequeñas centrales hidroeléctricas con capacidad menor a 10MV con ejemplo de aplicación [En línea]. Proyecto de titulación previo a la obtención del título de ingeniero en mecánico. Escuela politécnica nacional. Facultad de ingeniería mecánica. Quito. 2015. [Consultado: 11 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9138/1/CD-6092.pdf>

barco; cuando éstas sean fijas, se llama turbina hélice, mientras que si son orientables se denominan turbinas Kaplan; en ambos casos las turbinas funcionan con un único sentido de giro de rotación; son pues turbinas irreversibles. Si además de tener las palas orientables, las turbinas funcionan en los dos sentidos de rotación (turbinas reversibles), y asimismo pueden actuar como bombas hélice accionadas por el propio generador, se las denomina turbinas Bulbo.⁵⁴

Figura 29. Turbina Francis.



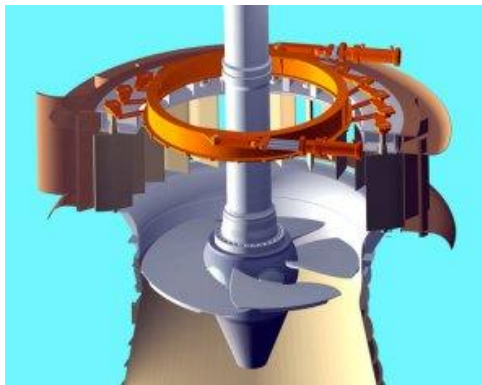
Fuente: Eterno Machinery CO. Turbina Francis, Turbinas [En línea]. China, 2014. [Consultado: 19 de diciembre de 2017]. Disponible en internet en: <http://es.eternohydro.com/turbines/francis-turbines.html>

⁵⁴ FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.93. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

3.84 PARTES DE LA TURBINA KAPLAN

Las carcasas según las dimensiones de la turbina se construyen de acero, concreto armado, solo o con camisa de acero. Su función principal es la de transformar la energía de presión en energía cinética y cubrir las partes internas de la turbina como el distribuidor y el rodete. Pueden tener pequeños álabes difusores o ser sólo tipo voluta. El difusor de la carcasa y los álabes móviles del distribuidor dirigen el agua al rodete con un mínimo de pérdidas y transforman la energía de presión en energía cinética. La movilidad de los álabes del distribuidor permite aumentar o reducir el caudal Q de entrada al rodete, de acuerdo a la demanda de potencia, operando como uno o varios chiflones. Por ejemplo, cuando se demanda mayor potencia, los álabes del distribuidor se abren para admitir el paso de mayor caudal Q y en el caso contrario, se cierran cuando hay una menor demanda o rechazo de carga.

Figura 30. Rodete y mecanismo del distribuidor



Fuente: Anónimo. Imagen de la turbina Kaplan [En línea]. WordPress. [Consultado: 15 de noviembre de 2018]. Disponible en internet: <https://fae2012e4.wordpress.com/2012/03/08/imagen-de-una-turbina-kaplan/>

El rodete es el elemento principal de la turbina, donde se transforma la energía cinética en energía mecánica y es la pieza que gira a la misma velocidad de rotación síncrona N' acoplado al rotor del generador mediante la flecha. Finalmente, el tubo de aspiración está conectado a la salida de la turbina y en su parte final, inicia la conducción hacia la descarga o desfogue. Se le llama tubo de aspiración porque crea una depresión a la salida del rodete y tiene dos funciones principales, la primera recuperar la energía cinética del agua y la segunda transformarla en energía de presión y posición, para conducir el gasto turbinado hacia el desfogue, el cual puede estar a pie de presa o en instalaciones subterráneas (aguas debajo de túneles con longitudes considerables). Generalmente se construyen de acero o concreto armado con o sin blindaje (camisa de refuerzo de acero).

3.85 FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA KAPLAN

El funcionamiento de la turbina Kaplan es muy similar a la Francis, pero los alabes de la turbina Kaplan son móviles, esto puede hacer aumentar los valores del rendimiento de la turbina en condiciones diferentes de operación. La turbina Kaplan funciona en rangos de alturas pequeñas y caudales grandes que pueden ser aprovechados en un río o en una presa hidroeléctrica; el fluido entra a la turbina a través de la carcasa o caracol, incidiendo axialmente sobre el rodete, en donde ocurre el intercambio energético, finalmente a la salida la presión cae siendo crítica la condición de cavitación, y por ese motivo se diseña el conducto difusor que recupera la presión a la salida.

3.86 RENDIMIENTO DE LAS TURBINAS

Como se ha expuesto en el libro de ingeniero Ortiz⁵⁵ lo normal es que la turbina hidráulica suministre constantemente la potencia exigida en tiempo real por el alternador, lo que mantiene constante la frecuencia y el número de revoluciones. Lo anteriormente planteado es la razón por la que resulta importante analizar las variaciones de la eficiencia, al mantener constante el salto H_n y la velocidad n , pero variando el caudal o la potencia.

Como se conoce con anterioridad, el proceso de conversión energética dentro de la turbina, debe realizarse manteniendo las revoluciones constantes, para que la frecuencia de generación no cambie. Normalmente este proceso se realiza con potencia elevada, que se ve representado en proporción de potencia, existen pérdidas, mecánicas hidráulicas y volumétricas que terminan disminuyendo potencia finalmente en el eje. Por definición la eficiencia es:

$$\eta = \frac{P_m}{P_h} \quad (15)$$

La ecuación anterior expone que la potencia entregada al eje es $P_m = \rho * g * Q * H * \eta$, y la potencia entregada por el fluido es $P_h = \rho * g * Q * H$. En la ecuación anterior Q pertenece al caudal total, que en realidad es menor por la existencia de fugas y recirculación en la turbina. De la misma manera ocurre en términos de altura debido a la existencia de pérdidas, observadas como caídas de presión en el sistema. De esta forma la eficiencia equivale a:

$$\eta = \frac{P_m}{P_h} = \frac{\rho * g * Q * H * \eta_{mec}}{\rho * g * Q * H} = \eta_v * \eta_H * \eta_{mec} \quad (16)$$

⁵⁵ ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.331. ISBN 978-958-8675-99-2. [Consultado: 17 de agosto de 2017]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55s/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

3.87 CURVAS CARACTERÍSTICAS

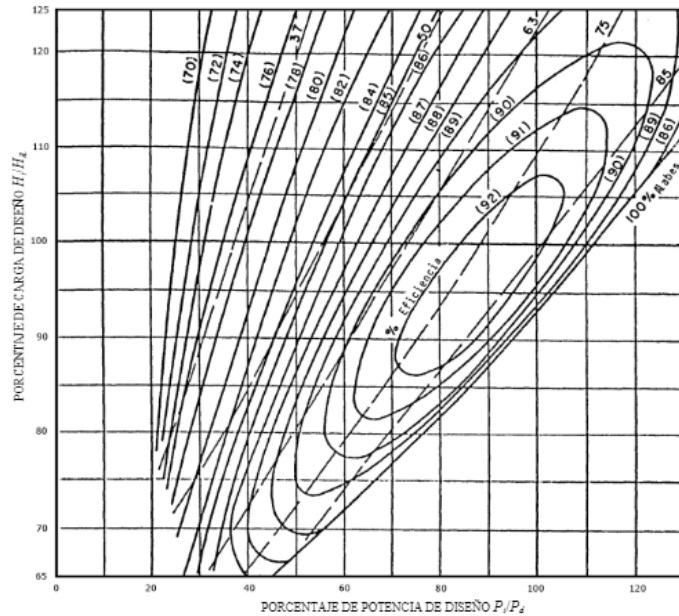
El flujo a través de una turbina de reacción depende de varios parámetros, por ejemplo en la Francis depende de la carga neta, de la velocidad de rotación de la unidad (N) y de la apertura de los álabes del distribuidor (a) (ATA para el caso en que los álabes estén totalmente abiertos o apertura del 100%). En la Kaplan, además de las anteriores, también depende del ángulo de inclinación de los álabes del rodete (que pueden ser ajustables). Por último, en una turbina de impulso Pelton, el flujo es una función solamente de la carga H y de la apertura del chiflón d , que es también el diámetro del chorro.

Las curvas que representan la relación entre los parámetros mencionados al inicio de este capítulo, se conocen como curvas características de la turbina. Éstas permiten predecir el comportamiento de una turbina, por ejemplo cuando varía la carga sobre la misma o cuando cambia el caudal o gasto de descarga, como ya se mencionó.

Algunos ejemplos de curvas características de funcionamiento para turbinas Francis se muestran a continuación, en las cuales, para cada relación de la potencia dada entre la potencia de diseño P_i/P_d , del gasto dado entre el gasto de diseño Q_i/Q_d , ambas con la relación de la carga dada entre la carga de diseño H_i/H_d en porcentaje, se obtiene la eficiencia de la turbina η_t para diferentes aperturas de álabes del distribuidor en porcentaje. En las siguientes se muestran dos ejemplos de curvas características para turbinas Kaplan.⁵⁶

⁵⁶ GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. p.24.

Figura 31. Porcentaje de potencia de diseño – Porcentaje de carga de diseño.



Fuente: GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. p.113.

3.88 VELOCIDAD ESPECÍFICA

Cada turbina está caracterizada por una constante que involucra variables de diseño, que se conoce como velocidad específica (N_s), también llamada número específico de revoluciones, teniendo el mismo valor para las turbinas geoméricamente iguales y que operan en condiciones hidráulicas similares. La siguiente expresión permite calcular a la velocidad específica en el sistema internacional:

$$N_s = \frac{N * P_t^{0,5}}{H_d^{1,25}} \quad (17)$$

El valor de N_s generalmente se ha determinado en el sistema métrico decimal, expresando la potencia en CV. En la actualidad este valor involucra a la potencia en

kW como se observa en la ecuación anterior y de acuerdo al sistema internacional de unidades. Se recomienda observar las unidades empleadas en las publicaciones que se refieren a este concepto. Así N_s con unidades en kW = 0.8577 N_s con unidades en CV. Si en la ecuación anterior que expresa el valor de N_s se introduce a la potencia en función de H_d , N_s queda como una función de H_d . La experiencia ha demostrado que esta relación entre las dos variables (N_s , H_d) toma en cuenta también los requerimientos técnicos, económicos, problemas de fabricación y tipo de turbina, es decir $N_s = f(H_d)$

Una clasificación del tipo de turbina está dada utilizando la potencia en CV y los rangos son:

TURBINAS PELTON	$N_s \leq 100$
TURBINAS FRANCIS	$50 \leq N_s \leq 350$ (400)
TURBINAS KAPLAN	$N_s \geq 300$

Como se puede observar en esta clasificación, el rango de las Francis es tan amplio que abarca parte del rango de las Pelton y también de las Kaplan, con tendencias a ser cada vez mayor con valores de N_s del orden de 400. Para las Francis se pueden tener de manera aproximada los siguientes rangos:

LENTA	$50 \leq N_s < 150$ ($D_1 > D_3$)
NORMAL	$150 \leq N_s < 250$ ($D_1 \cong D_3$)
RÁPIDA	$250 \leq N_s \leq 350$ ($D_1 < D_3$) ⁵⁷

3.89 TEORÍA DE MODELOS O LEYES DE SEMEJANZA

Las máquinas hidráulicas se consideran homólogas cuando la relación de las dimensiones en todas las direcciones es la misma, o cuando los ángulos característicos correspondientes son los mismos. Las máquinas hidráulicas homólogas también tienen similitud hidráulica.

Si el gasto de descarga, potencia, velocidad y eficiencia de un rodete de una turbina de diámetro dado son conocidos para una carga dada, el gasto de descarga, potencia y velocidad de un rodete homólogo de otro diámetro bajo una carga

⁵⁷ GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. p.9.

también diferente para la misma eficiencia, se pueden calcular con las expresiones de similitud siguientes.

Para diámetro constante:

$$Q2/Q1 = (H2/H1)^{0.5}$$

$$P2/P1 = (H2/H1)^{1.5}$$

$$n2/n1 = (H2/H1)^{0.5}$$

Para carga constante:

$$Q2/Q1 = (D2/D1)^2$$

$$P2/P1 = (D2/D1)^2$$

$$n2/n1 = (D1/D2)$$

Las ecuaciones anteriores son exactas para la mayoría de los propósitos, sin embargo, la suposición de que la eficiencia sea la misma para diferentes tamaños de máquinas hidráulicas no es correcta. Las diferencias en las pérdidas de fricción debida a la rugosidad de la superficie y la longitud de los conductos y ligeras variaciones en la similitud geométrica, requieren ajustar la eficiencia entre las máquinas hidráulicas aparentemente homólogas.⁵⁸

3.90 CRITERIOS PARA DISEÑO DE TURBINAS

Los métodos utilizados para su estudio son, el analítico, el experimental y el análisis dimensional. El método analítico se fundamenta en el estudio del movimiento del fluido a través de los álabes, según los principios de la Mecánica de Fluidos. El método experimental, se fundamenta en la formulación empírica de la Hidráulica, y la experimentación. El análisis dimensional ofrece grupos de relaciones entre las variables que intervienen en el proceso, conformando los coeficientes de funcionamiento de las turbo máquinas, al igual que los diversos números adimensionales que proporcionan información sobre la influencia de las propiedades del fluido en movimiento a través de los órganos que las componen.⁵⁹

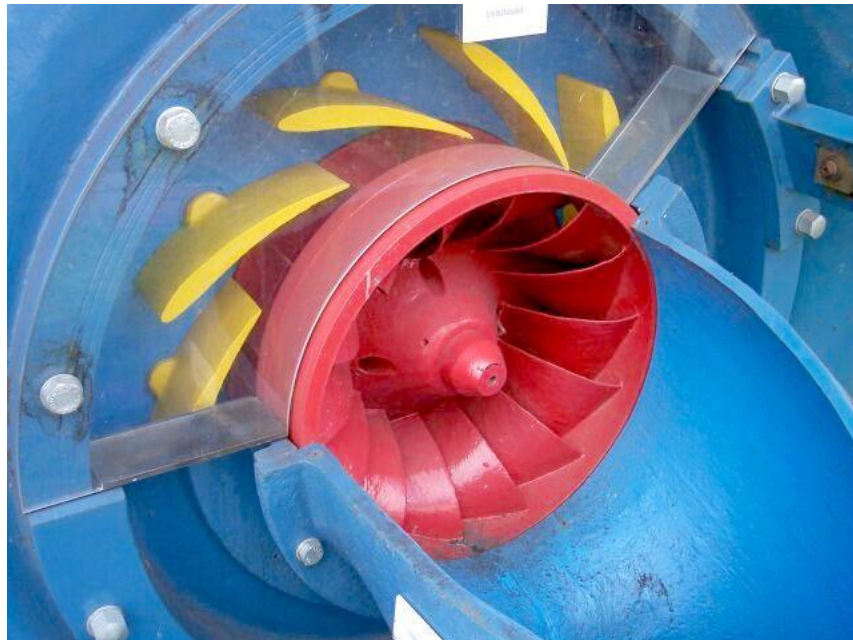
⁵⁸GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. p.106.

⁵⁹FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.1. [Consultado: 24 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

3.91 REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Las turbinas hidráulicas son máquinas que deben girar a las revoluciones que el generador eléctrico le solicite; esto para poder obtener la frecuencia fija utilizada en Colombia de 60 Hz, por este motivo se requiere una regulación de la velocidad que puede ser a través de la variación del caudal, a continuación presentamos diversos tipos de regulación en los 3 tipos de turbinas mencionados anteriormente.

Figura 32. Alabes Fink en distribuidor para regulación de velocidad de la turbina.



Fuente: Anónimo. Distribuidor [En línea]. [Consultado: 24 de septiembre de 2017].
Disponibile en internet: <http://energielehrpfad-glonn.de/station/kothmuehle/>

3.92 REGULACIÓN DE VELOCIDAD POR REGULACIÓN DE CARGA

Regulación de turbina Pelton: La acción del regulador se realiza sobre la válvula de aguja del inyector, y también en el deflector. Por tales circunstancias, estas turbinas disponen de la denominación doble regulación, que establece una exacta correspondencia entre la posición de la válvula de aguja y el deflector.

Regulación de turbinas Francis: Tanto en éstas, como en las turbinas de hélice, la regulación actúa sólo y exclusivamente sobre las palas directrices del distribuidor, según hemos repetido en varias ocasiones.

Regulación de turbinas Kaplan: Este tipo de turbinas son las que disponen de un sistema de regulación más complejo, ya que cuenta con mecanismos necesarios para el gobierno de las palas del rodete, así con el adecuado posicionamiento de las mismas se pueda obtener el rendimiento idóneo, incluso con grandes variaciones de caudal y de altura de salto. Cuando se trata de grupos pequeños, la regulación se lleva a efecto por un regulador con dos válvulas distribuidoras, con dependencia recíproca, de forma que siempre se logra la posición exacta de las palas del rodete respecto de las palas del distribuidor. En el caso de grupos de grandes dimensiones, un regulador auxiliar externo, interconectado con el regulador gobierna al distribuidor, controla la orientación de las palas del rodete.⁶⁰

3.93 CAVITACIÓN EN TURBINAS

Es un fenómeno que ocurre por un cambio de estado, de líquido a gaseoso, debido a un descenso de la presión hasta la presión de saturación. Este fenómeno produce como consecuencias la formación de "burbujas" que impresionan durante el recorrido del fluido ocasionado daños severos en su recorrido. En turbomáquinas es bastante común, y se observan los daños en la superficie de los alabes. En las turbinas hidráulicas de reacción como la turbina Kaplan y la turbina Francis la cavitación se presenta debido a que el paso del fluido a través de la turbo magina ocasiona un descenso en la presión, que puede llegar a ser menor que la presión atmosférica y ocasionar la evaporación del líquido que al impresionar puede

⁶⁰ Anónimo. Regulación de velocidad de las turbinas hidráulicas. Colombia, 2014. [Consultado: 28 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/document/354978817/Regulacion-de-Velocidad-de-Las-Turbinas-Hidraulicas6>

ocasionar daños irreversibles, o puede llenar de gas la cámara de la turbina y hacer ineficiente la generación eléctrica.⁶¹

La mitigación de la cavitación en turbinas se hace a través de la creación de una tubería de aspiración a la salida de la misma, que tiene como fin, la recuperación de la presión estática, con la disminución de la velocidad y con ello evitar la generación de cavidades dentro de la tubería. El coeficiente de thoma que se observa que a mayor salto H_n menor será la altura de aspiración H_s , este mismo define el límite de la cavitación, y se expone a continuación:

$$\sigma = \frac{\frac{P_{atm} - P_2}{\gamma} - H_s}{H_n} \quad (18)$$

3.94 BOMBAS USADAS COMO TURBINAS

En el libro del profesor Ortiz⁶² se explica cómo los costos de los equipos electromecánicos por unidad de potencia, aumentan exponencialmente en la medida en que son de menor potencia, esto dificulta su implementación, es especial a nivel de micro centrales. Reducir los costos de los equipos electromecánicos, se lograría si existiese una producción nacional seriada, con la que aún no se cuenta; una solución sería el uso de bombas hidráulicas puestas en funcionamiento como turbinas, teniendo en cuenta que ya se fabrican una amplia gama de equipos funcionales en diferentes rangos, además se pueden poner en funcionamiento, motores asíncronos como generadores. El uso de estas mismas podrá tener implicaciones en la eficiencia del sistema turbogenerador, que no va a tener mayor relevancia, debido a que generalmente y por la falta de producción nacional, los

⁶¹ FANDOM. Turbo máquinas: Cavitación [En línea]. [Consultado: 19 de noviembre de 2017]. Disponible en internet en: http://es.ucvmecanica.wikia.com/wiki/Turbom%C3%A1quinas:_Cavitaci%C3%B3n

⁶² ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. P.351. ISBN 978-958-8675-99-2. [Consultado: 17 de agosto de 2017]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55s/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

equipos se importan sobredimensionados y su trabajo no lo realizan en puntos de máxima eficiencia, lo que en términos del uso de bombas, no los diferencia notablemente, sin embargo cuando hablamos de generación mayores a micro centrales, la eficiencia cae y se recomienda el uso de un sistema cotidiano.

3.95 TRANSMISIONES MECÁNICAS

Debido a razones que tienen que ver con la velocidad de una turbina, y a la que debe girar un generador, es necesario usar diferentes tipos de transmisiones mecánicas, que se encarguen de la transmisión del torque y la velocidad, entre la turbina y el generador; para esta labor existen diferentes tipos de transmisión con diversas características en términos de mantenimiento, costo y eficiencias. Ver figura 37.

3.96 EQUIPOS ELÉCTRICOS

En un proyecto hidroeléctrico, son tres grandes disciplinas que intervienen para que el funcionamiento final sea sinérgico y eficiente, lo son, la parte civil encargada de todas las obras de captación y acondicionamiento del fluido, la parte mecánica que se encarga de la conducción del fluido y su paso por la casa de máquinas, el control del mismo e intercambio energético entre la turbo máquina y el fluido, para llevar finalmente la energía al eje en forma de potencia de eje. En conclusión, el fin último de una hidroeléctrica es la generación y transmisión de la energía. Los componentes eléctricos, no solo son los impulsores de más de un sistema mecánico en una

hidroeléctrica, también son los encargados de la generación, preparación y envío del producto final a través de líneas de conexión.

3.97 GENERADORES

Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica. Lo consigue gracias a la interacción de los dos elementos principales que lo componen: la parte móvil llamada rotor, y la parte estática que se denomina estator. Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) para que el otro lo transforme en electricidad (actúa como inducido).

Los generadores eléctricos se diferencian según el tipo de corriente que producen. Así, nos encontramos con dos grandes grupos de máquinas eléctricas rotativas: los alternadores y las dinamos. Los alternadores generan electricidad en corriente alterna. El elemento inductor es el rotor y el inducido el estator. Un ejemplo son los generadores de las centrales eléctricas, las cuales transforman la energía mecánica en eléctrica alterna. Las dinamos generan electricidad en corriente continua. El elemento inductor es el estator y el inducido el rotor. Un ejemplo lo encontraríamos en la luz que tiene una bicicleta, la cual funciona a través del pedaleo.⁶³

Los alternadores se pueden clasificar en síncronos y asíncronos.

⁶³ ENDESA. Los generadores eléctricos [En línea]. Madrid, España. TWenergy. 2014. (Consultado: 05 febrero 2018.) Disponible en internet: https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores

Tabla 5. Tipos de transmisiones mecánicas.



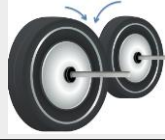

FORMAS DE TRANSMISION	IMAGEN	TIPOS
Transmision flexible por correas		B. PLANAS: En aplicaciones de diámetros pequeños B. TRAPEZOIDALES : Sincronizacion no tan importante B. DENTADAS: Bandas sincronas que no deslizan
Transmision flexible por cadenas		Con este sistema se impiden los deslizamientos, problemas de ruido y mantenimiento.
Transmision por ruedas de friccion		Existen del modo cilindrico de ejes paralelos, de ejes transversales y conicas.
Transmision por engranajes		Transmision de altos torques, muy eficientes, costosos y limites de espacio y lubricacion

Figura 33. Alternador Volvo trifásico síncrono 88 kVA.



Fuente: LONGKAI. Alternador Volvo trifásico síncrono 88KV [En línea]. [Consultado: 25 de noviembre de 2017]. Disponible en internet en: http://es.ucvmecanica.wikia.com/wiki/Turbom%C3%A1quinas:_Cavitaci%C3%B3n
http://sp.longkaipower.com/products_list2/pmclId=43.html

3.98 SÍNCRONOS

Los generadores síncronos trifásicos son la fuente principal de toda la energía eléctrica que se consume. Estas máquinas son los convertidores de energía más grandes del mundo. Convierten energía mecánica en energía eléctrica en potencias de hasta 1500 MW.

Los generadores síncronos comerciales se construyen con un campo magnético de corriente directa estacionario o rotatorio.

Un generador de campo magnético rotatorio conforme gira, induce un voltaje trifásico en el estator, cuyo valor depende de la velocidad de rotación y de la corriente directa de excitación del campo (I_x). La frecuencia del voltaje depende de la velocidad y del número de polos en el campo.

$$F = \frac{RPM * NoPo}{120} \quad (19)$$

Donde:

F: Frecuencia de la red eléctrica [Hz]

NoPo: Numero de polos en el rotor

RPM: Velocidad del rotor [Rev/min]

Desde el punto de vista eléctrico, el estator de un generador síncrono es idéntico al de un motor de inducción trifásico. Se compone de un núcleo cilíndrico laminado que contiene un conjunto de ranuras que portan un devanado trifásico imbricando.

El devanado siempre está conectado en Y, y el neutro está conectado a tierra. Se prefiere la conexión en Y a delta porque el voltaje por fase es de 58% del voltaje entre líneas, por consiguiente, se puede reducir la cantidad de aislante en las ranuras, lo que a su vez permite incrementar el diámetro de los conductores. Un conductor más grande permite incrementar la corriente y por ende la salida de potencia de la máquina.

El voltaje de línea nominal de un generador síncrono no depende de su capacidad de kVA. En general, mientras más grande es la capacidad de potencia, más alto es el voltaje. Sin embargo, el voltaje nominal entre líneas rara vez excede los 25kV.

Figura 34. Estator de generador síncrono trifásico.



Fuente: Anónimo. Motor Catalog: Stators [en línea]. Eurton Electric Motor. Estados Unidos de America. (2018). [Consultado: 14 de abril de 2018]. Disponible en Internet: http://eurtonelectric.com/catalog/stators/marathon_pancake_332csa5214_stator_rewind

Los generadores síncronos se construyen con dos tipos de rotores: rotores de polos salientes y rotores cilíndricos lisos. Por lo general, los de polos salientes son impulsados por turbinas hidráulicas de baja velocidad y los cilíndricos por turbinas de vapor de alta velocidad.

Rotores de polos salientes: La mayoría de las turbinas hidráulicas tienen que girar a velocidades entre 50 y 300 r/min. Como el rotor está directamente acoplado a la turbina y como se requiere una frecuencia de 50 o 60 Hz se necesita un gran número de polos en el rotor.

Además del devanado de campo de corriente directa, con frecuencia se agrega un devanado de jaula de ardilla insertado en las caras polares. En condiciones normales, este devanado no transporta corriente porque el rotor gira a velocidad síncrona. Sin embargo, cuando la carga del generador cambia de repente, la

velocidad del rotor comienza a fluctuar y se producen variaciones de velocidad momentáneas por encima y por debajo de la velocidad síncrona. Esto induce un voltaje en el devanado de jaula de ardilla que hace que fluya una gran corriente dentro de él. La corriente reacciona con el campo magnético del estator y produce fuerzas que amortiguan las oscilaciones del rotor. Por esta razón el devanado de jaula de ardilla también se conoce como devanado amortiguador.⁶⁴

3.99 ASÍNCRONOS

La mayoría de las turbinas eólicas del mundo utilizan un generador asíncrono trifásico (de jaula bobinada), también llamado generador de inducción, para generar corriente alterna. Fuera de la industria eólica y de las pequeñas unidades hidroeléctricas, este tipo de generadores no está muy extendido; aunque, de todas formas, el mundo tiene una gran experiencia en tratar con ellos: Lo curioso de este tipo de generador es que fue inicialmente diseñado como motor eléctrico. De hecho, una tercera parte del consumo mundial de electricidad es utilizado para hacer funcionar motores de inducción que muevan maquinaria en fábricas, bombas, ventiladores, compresores, elevadores, y otras aplicaciones donde se necesita convertir energía eléctrica en energía mecánica. Otra de las razones para la elección de este tipo de generador es que es muy fiable, y comparativamente no suele resultar caro. Este generador también tiene propiedades mecánicas que lo hace especialmente útil en turbinas eólicas (el deslizamiento del generador, y una cierta capacidad de sobrecarga).⁶⁵

3.100 MOTORES USADOS COMO GENERADORES

Los motores de inducción pueden utilizarse como generadores, pero poseen desventajas frente a los generadores síncronos que son los comúnmente utilizados

⁶⁴ WILDI, Theodore. Maquinas eléctricas y sistemas de potencia. Sexta Edición. Editorial: Pearson 2007. México, p 344-364

⁶⁵ Anónimo. Generadores asíncronos (o de inducción) [en línea]. Danish wind industry association. Dinamarca. (10 de mayo de 2010). [Consultado: 14 de 12 de 2017]. Disponible en Internet: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wtrb/async.htm>

en centrales eléctricas. Los motores de inducción son máquinas asíncronas en las cuales se induce una fuerza electromotriz al rotor a través de un campo magnético giratorio producido en el estator. En el rotor se produce una fuerza magnética de acuerdo con la ley de Lorentz y el circuito empieza a rotar.

Si se invierte el funcionamiento del motor de inducción, se tendría que hacer girar el rotor a una velocidad mayor a la de sincronismo por medio de una turbina y de esta manera se induciría en el estator corriente trifásica que a su vez crearían un campo magnético giratorio que inducirá una gran corriente en el rotor. Cuanto más rápido gire el rotor, mayor será la potencia transferida al estator en forma de fuerza electromagnética y posteriormente convertida en electricidad suministrada a la red eléctrica.

3.101 TRANSFORMADORES

Se denomina transformador o trafo (abreviatura), a un Dispositivo eléctrico que convierte la Energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de la acción de un campo magnético. La Potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (esto es, sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc.

Está constituido por dos o más bobinas de material conductor, aisladas entre sí eléctricamente por lo general enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo.

Figura 35. Transformador WEG



Fuente: Anónimo. Partes y funciones de un transformador [En línea]. 2015. [Consultado: 18 de febrero de 2018]. Disponible en internet: https://www.partesdel.com/partes_y_funcion_de_un_transformador.html

En la Electrotecnia y la Radiotecnia los transformadores encuentran una amplia utilización. Ellos sirven para la transformación del voltaje de la corriente eléctrica alterna, manteniendo la frecuencia.⁶⁶

⁶⁶ Ecu Red. Transformador [En línea]. Cuba. 2016. [Consultado: 18 de enero de 2018]. Disponible en internet: <https://www.ecured.cu/Transformador>

4. DISEÑO HIDRAULICO

4.1 MECÁNICA DE FLUIDOS

Se tienen en cuenta, las relaciones teóricas de la mecánica de fluidos, para el respectivo análisis hidráulico, inicialmente se halla el número de Reynolds, que caracteriza el tipo de flujo, y que permitirá encontrar perdidas en las tuberías, presentes por irreversibilidades del sistema, teniendo en cuenta la velocidad v , el diámetro interno de la tubería D_i y la viscosidad cinemática ϑ , con la ecuación 20.

$$Re = \frac{V * D_i}{\vartheta} \quad (20)$$

Se procede a calcular las propiedades del fluido a tratar en el proyecto, utilizando el software EES, por medio del cual en tiempo real y con datos del lugar donde se realizara el proyecto se obtendrá una ecuación, en donde la variable dependiente sea la temperatura. ⁶⁷

$$\vartheta = 1.78891901E - 06 - 6.02560225E - 08 * T_a + 1.39423718E - 09 * T_a^2 - 1.97185548E - 11 * T_a^3 + 1.21326026E - 13 * T_a^4 \quad (21)$$

Se debe tener en cuenta la relación existente entre la densidad ρ y la viscosidad dinámica μ , ver ecuación 22, pues en muchos manuales o ecuaciones se presenta en forma dinámica.

$$\frac{\mu}{\rho} = \vartheta \quad (22)$$

⁶⁷ EES. Calculo de propiedades físico químicas. Engineering Equation solver. México, D.F., Mc Graw Hill

La siguiente relación de continuidad relaciona el caudal Q, con la velocidad v y el área A:

$$Q = V * A \quad (23)$$

La ecuación de Coolebrook relaciona el factor de fricción f, utilizado en el diseño de tuberías y su relación, con el número de Reynolds Re, el diámetro y rugosidad ε ⁶⁸

Ecuación de Coolebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 D_i} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (24)$$

4.2 GOLPE DE ARIETE

En el cálculo del fenómeno del golpe de ariete, se halla la sobrepresión generada en dicho punto, para esto se iniciará calculando el periodo de repetición de esta sobrepresión en la instalación, esta dependerá de la celeridad y la longitud de la instalación (l) (en sistema internacional) así:

$$p = \frac{2 * l}{a} \quad (25)$$

La celeridad (a) se calculará con la siguiente expresión, que tiene intrínseco el diámetro (D) y el espesor (e) en mm y un coeficiente k representativo de la elasticidad del material:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + k * \frac{D}{e}}} \quad (26)$$

⁶⁸ MATAIX, Claudio. Turbo máquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI,1984. ISBN: 84-600-6662-2.

En donde respectivamente se tiene que la constante K se halla a través del módulo de elasticidad (ε), que se le asigna el valor de ε así:

$$k = \frac{10^{10}}{\varepsilon} \quad (27)$$

Prosiguiendo con el cálculo se estima el tiempo que dura la variación de velocidad, es decir desde el corte de energía hasta el tiempo de parada del agua, en donde c y k son coeficientes de ajuste, Hm la altura manométrica, l la longitud de la conducción y v la velocidad de circulación del agua. Cabe resaltar que los coeficientes se hallan previamente de graficas empíricas.

$$T = c + \frac{K * L * v}{g * Hm} \quad (28)$$

Existe una longitud crítica de la instalación que está en relación con la propagación de la onda y el tiempo de parada del agua así:

$$Lc = \frac{a * T}{2} \quad (29)$$

Con lo anterior ya es posible calcular el golpe de ariete, de dos formas, la primera para tiempos de parada o maniobras de cierre lento o instalaciones cortas, en donde se utiliza la fórmula propuesta por Michaud:

$$\Delta H = \frac{2 * L * v}{g * T} \quad (30)$$

En este caso el golpe de ariete se dará en el elemento generador de la onda, generalmente una válvula de cierre.

Para tiempos de parada o maniobras de cierre rápidas, o instalaciones largas, en donde utilizaremos la ecuación de Allievi:

$$\Delta H = \frac{a * v}{g} \quad (31)$$

En este caso se dará en algún punto a lo largo de la conducción que quede fuera del tramo de la longitud crítica.⁶⁹

4.3 PÉRDIDA DE CARGA EN TUBERÍAS

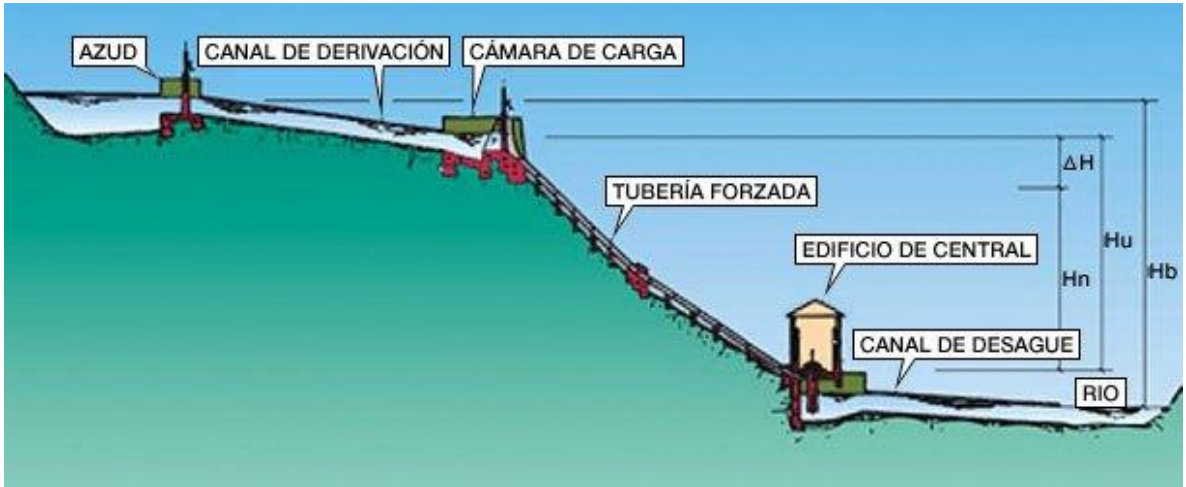
En la Figura 41 se observan diferentes cotas en el lado derecho, (H_b , H_u , H_n y ΔH), el interés está en calcular H_n o la altura neta, esta se utiliza para los cálculos de potencia. La H_n o salto neto ya tiene en cuenta las pérdidas de energía producidas por la fricción del fluido con las paredes de la tubería y accesorios, las pérdidas son la denominadas ΔH en la figura y equivalen a la diferencia entre $H_u - H_n$, donde H_u es la altura útil.

En la literatura podemos encontrar diversas ecuaciones empíricas para el cálculo de pérdida de energía en redes de tuberías, algunas de ellas se utilizan únicamente para cálculo con agua como fluido de trabajo, otras, como la ecuación de Darcy, permiten utilizar cualquier tipo de fluido.

En la ecuación de Darcy, es la que se utilizará en el desarrollo del proyecto para el cálculo de pérdidas en la tubería de presión de la pequeña central, se encuentran 3 números adimensionales explícitos e implícitos que son: factor de fricción de Darcy, Numero de Reynolds y rugosidad relativa del material de la tubería que son de gran importancia para el cálculo.

⁶⁹OLIVERAS FERRET, Jordi. Como calcular el golpe de ariete. HidroING. Barcelona, 2014. [Consultado: 18 de noviembre de 2017]. Disponible en internet en: <http://www.hidrojing.com/como-calculiar-el-golpe-de-ariete/>

Figura 36. Tubería forzada, Carga neta.



Fuente: Adrián, Rebeca, Víctor. Fuentes de energía renovable [En línea]. [Consultado: 18 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://matutebd.wordpress.com/fuentes-de-energia-renovables/>

La ecuación de Darcy (32), se muestra a continuación junto a las ecuaciones de estos números adimensionales: Reynolds (33), Factor de fricción (34), Ecuación: Swamee-Jain, (35) Rugosidad relativa.

$$hl = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (32)$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (33)$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (34)$$

$$\frac{\varepsilon}{D} \quad (35)$$

Respectivamente, cada una de las variables planteadas en las ecuaciones anteriores, se relacionan a continuación:

hl: Pérdida de carga por longitud. [m]

L: Longitud de la Tubería. [m]

D: Diámetro interno de la tubería. [m]

f: Factor de fricción de Darcy (Flujo turbulento).

V: Velocidad media del fluido en la tubería. [m/s]

g: Constante de gravedad. [m/s²]

ε: Rugosidad Absoluta. [m]

Re: Numero de Reynolds.

v: Viscosidad cinemática del fluido. [m²/s]

Se debe aclarar que las pérdidas totales son la suma de dos contribuyentes: pérdida de carga por longitud, que se calcula con la ecuación de Darcy y pérdidas menores o por accesorios que se calculan de una manera similar.

$$h_{acc} = \sum K * \frac{V^2}{2g} \quad (36)$$

hacc: Pérdidas menores o por accesorios.

K: Constante de pérdida del accesorio.

V: Velocidad media en el accesorio.

La sumatoria se realiza siempre y cuando los accesorios estén unidos al mismo diámetro de tubería, ya que en un diámetro diferente la velocidad media cambiaría. En este caso se fraccionan las pérdidas, es decir, se calcula, hacc para cada diámetro de tubería y al final se realiza una suma algebraica.

$$hacc_{total} = hacc_{D1} + hacc_{D2} + hacc_{D3} + \dots + hacc_{Dn} \quad (37)$$

Donde cada D equivale a un tramo de tubería con diferente diámetro. El procedimiento anterior también se aplica al cálculo de pérdidas por longitud, ya que estas también dependen de la velocidad media en la tubería. Se explicará brevemente el procedimiento para el cálculo de pérdidas que conllevará a un buen resultado:

- Se calcula Re para cada tramo de tubería. Esto con el fin de determinar el tipo de flujo (Laminar o Turbulento). Para ello antes se debe buscar en tablas la viscosidad cinemática del fluido a la temperatura de trabajo, además de calcular la velocidad media del flujo en cada tramo de tubería de diferente diámetro.
- Una vez verificado el tipo de flujo, en este caso turbulento (Agua), se procede al cálculo de los factores de fricción para cada tramo de tubería.
- Se cuantifican los accesorios y se hallan sus constantes para cada tramo de tubería.
- Se procede al cálculo pérdidas de carga por longitud, para cada tramo de tubería haciendo uso de la longitud del tramo y su diámetro interno.
- Se realiza la misma operación anterior, pero para las pérdidas por accesorios.
- Finalmente se suman todas las pérdidas

Atención: El procedimiento anterior se debe realizar en una línea continua de flujo. En caso de haber bifurcaciones o divisiones del flujo, el caudal cambiará y será desconocido además será imposible conocer la velocidad del flujo, a menos que se cuente con sistemas de medición de caudal. En caso de no contar con ellos, deberá realizarse un proceso iterativo o utilizar un software que se encargue de ello.

4.4 DISEÑO HIDRÁULICO DE TURBINAS

La importancia del diseño hidráulico en la fabricación de turbo máquinas, ha llevado a la humanidad a evolucionar en la forma en que analiza, estudia y determina las variables que afectan el movimiento de un fluido; el diseño hidráulico tiene diversas formas de manejarse, sean la teórica, la experimental y el análisis dimensional. El diseño de una turbina hidráulica exige el análisis del fluido entrante, como se distribuye por la cámara espiral e intercambia energía con el rodete, que a su vez ha sido analizado hidrodinámicamente, para que sus perfiles garanticen eficiencia y economía en la generación.

4.4.1 Diseño hidráulico de la turbina Pelton Con el cálculo de la velocidad específica, se permitirá realizar un acercamiento a los tipos de turbinas, y a sus dimensiones, en ella se relaciona n como revoluciones, Pot como la potencia de la turbina y H como la altura neta:

$$N_s = \frac{n * \sqrt{Pot}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (38)$$

Teniendo en cuenta la ecuación de continuidad y el área de la boquilla de la tobera, se podrá calcular el diámetro del chorro, en donde C_1 es la velocidad absoluta de entrada a la turbina o velocidad del chorro real.

$$Q_{dis} = C_1 * \frac{\pi * D_{chorro}^2}{4} \quad (39)$$

$$C_o = \sqrt{2 * g * Hn} \quad (40)$$

$$d = \sqrt{\frac{Q_{dis} * 4}{C_o * \pi}} \quad (41)$$

Donde C_0 : Corresponde a la velocidad del chorro ideal.

Para el cálculo de la velocidad absoluta a la entrada de la turbina tenemos el análisis energético a la salida de la tobera, que viene dado por la ecuación de Torricelli, o por la aplicación de Bernoulli, que además tiene una corrección planteada en el libro de Claudio Mataix:

$$C_1 = K_{c1} \sqrt{2 * g * H_n} \quad (42)$$

K_{c1} es el coeficiente de velocidad del inyector sobre la turbina, que tiene forma de tobera, este coeficiente varía entre 0,97 y 0,99.⁷⁰ Se linealizó la curva que relaciona al Reynolds con el coeficiente de velocidad del inyector, así:⁷¹

$$X = \log_{10}(Re_2) \quad (43)$$

$$K_{c1} = (-2.35368700E + 00 + 4.82564023E + 00 * X - 3.21800026E + 00 * X^2 + 1.15254946E + 00 * X^3 - 2.26405934E - 01 * X^4 + 2.29976634E - 02 * X^5 - 9.45583809E - 04 * X^6)$$

K_{u1} es el Coeficiente de velocidad Periférica. En la práctica se tiene para un rendimiento óptimo un valor comprendido entre 0.45 y 0.49, el valor teórico es 0.5, que corresponde a la máxima eficiencia hidráulica.⁷² La velocidad U_1 es la velocidad periférica de la turbina, que se halla con K_{u1} como corrección.

$$U_1 = K_{u1} * \sqrt{2 * g * H_n} \quad (44)$$

Donde K_{u1} : Coeficiente de velocidad periférica.

⁷⁰ MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. 2ª. Ed. Madrid: Ediciones del Castillo, 1970. p.528.

⁷¹ DE SIERVO, F. and LUGARESI, A. "Modern trends in selecting and Designing Pelton Turbines", Water Power and Dam Construction, Vol. 30, No.12, 1978.

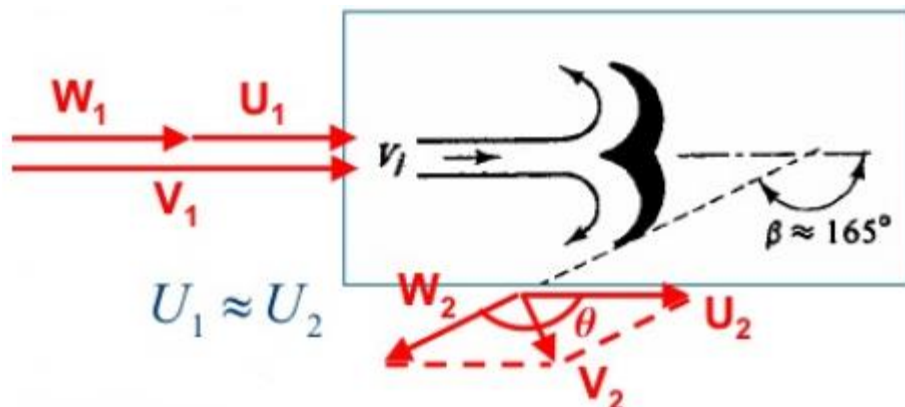
⁷² II Curso latinoamericano de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas. Manual de pequeñas centrales hidroeléctricas. Bucaramanga. Octubre, 1985, vol 4

Para el análisis del triángulo de velocidades (Figura 42), una vez conocida la velocidad tangencial de entrada y la velocidad absoluta, haciendo uso del triángulo de velocidades, se podrá calcular la velocidad relativa.

Para determinar el diámetro principal de la turbina Pelton se hace uso de un coeficiente adimensional Δ que depende del diámetro de la tobera.

Dependiendo de la relación de los diámetros, se escogen los valores más adecuados de funcionamiento, en el libro de Claudio Mataix, se plantean las limitaciones a cumplir, que en dado caso no se realicen, se buscará una adecuación de las revoluciones. Según Mataix⁷³, las relaciones de diámetros más favorables se encuentran en el siguiente rango: $0.066 \leq \Delta \leq 0.0909$

Figura 37. Triángulo de velocidades en turbina pelton.



Fuente: Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos. Turbinas hidráulicas. España 2006. [Consultado: 22 de marzo de 2018]. Disponible en internet: <https://es.slideshare.net/78inactivo/turbinas-13964533>

⁷³ MATAIX, Claudio. Turbomáquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

$$Dp = \frac{U1 * 60}{\pi * n} \quad (45)$$

$$\Delta = \frac{d}{Dp} \quad (46)$$

La potencia de la turbina estará dada por la siguiente expresión:

$$Pt = \rho_{agua} * g * Hn * Qdis * \eta_{Tur} \quad (47)$$

Como se ingresarán al programa valores de revoluciones de generadores comerciales, se halla el diámetro de la Pelton y su respectiva relación de velocidades. Para el cálculo del número de cucharas (Figura 42) y sus respectivas dimensiones (Figura 43), Mataix⁷⁴ hace las siguientes recomendaciones:

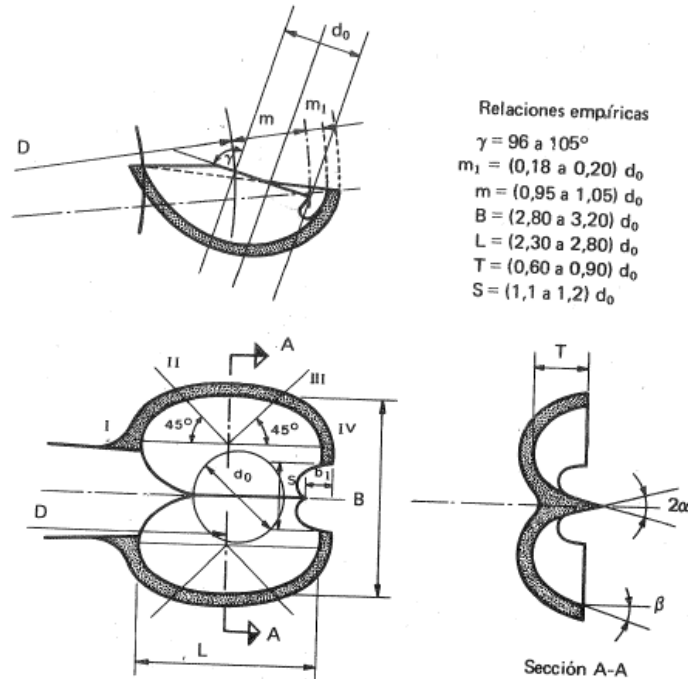
Tabla 6. Numero de cucharas en función de la Ns.

Nº esp. revol. n_s	4	6	8	10	12	14	18	22	26	32
Nº de cazoletas x	40	37	34	30	28	26	22	20	17	15

Fuente: FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [Imagen]. España, 2017. p.2. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pdf>

⁷⁴ MATAIX, Claudio. Turbomáquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

Figura 38. Dimensiones principales de la cazoleta.



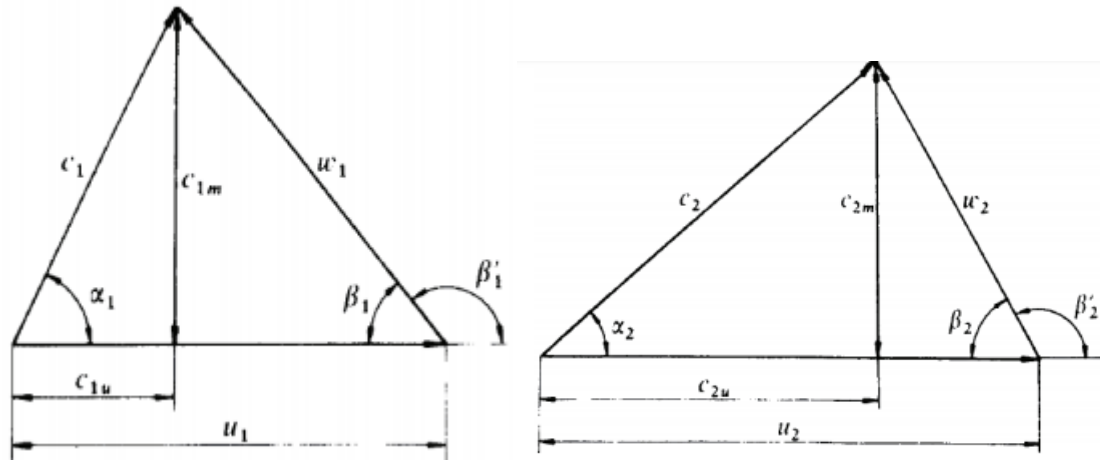
Fuente: MATAIX, Claudio. Turbomáquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

NOTA: Ver en anexos, el diagrama de flujo del diseño planteado anteriormente.

4.4.2 Diseño hidráulico de la turbina Francis. A continuación, se plantearán las ecuaciones y correlaciones utilizadas en el diseño hidráulico de la turbina Francis.

4.4.2.1 Calculo Triángulos de velocidad. Se inicia planteado los triángulos de velocidad a la entrada y salida del rodete.

Figura 39. Triángulos de velocidades de entrada y salida.



Fuente: MATAIX, Claudio. Turbo máquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. p.327. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

Por medio del análisis anterior vectorialmente podemos plantear las siguientes ecuaciones para conocer las velocidades, donde w_1 es la velocidad relativa, los subíndices u son tangenciales y m meridionales y las relaciones de la salida subíndice 2.

$$C_1 = W_1 + U_1 \quad (48)$$

$$C_{1u} = C_1 * \cos(\alpha_1) \quad (49)$$

$$C_{1m} = C_1 * \sin(\alpha_1) \quad (50)$$

$$U_1 = \frac{P_i * D_1 * n}{60} \quad (51)$$

$$C_2 = W_2 + U_2 \quad (52)$$

$$C_{2u} = C_2 * \cos(\alpha_2) \quad (53)$$

$$C_{2m} = C_2 * \sin(\alpha_2) \quad (54)$$

$$U2 = \frac{P_i * D2 * n}{60} \quad (55)$$

Las condiciones de rendimiento máximo a la salida son $\alpha_2=90^\circ$ ⁷⁵. Planteando las ecuaciones anteriores de turbinas tenemos:

Se procede al cálculo de la velocidad específica de la turbina, relacionado en la ecuación 38; además para las siguientes correlaciones, se utilizarán las ecuaciones empíricas del profesor Fernández⁷⁶, apoyadas con tablas, se plantean a continuación:

$$C1 = \varphi_1 \sqrt{2 * g * Hn} \quad (57)$$

$$\tan(\beta_1) = \frac{c1 \cos(\alpha_1)}{u1 - c1 \sin(\alpha_1)} \quad (58)$$

$$\tan(\beta_2) = \frac{c2 \cos(\alpha_2)}{u2 - c2 \sin(\alpha_2)} \quad (59)$$

$$U1 = \xi_1 \sqrt{2 * g * Hn} \quad (60)$$

La siguiente ecuación se utiliza para la determinación de los diámetros 1, 2 y 3 que son parte de las dimensiones geométricas de la turbina

$$D1 = \frac{U1 * 60}{\pi * n} \quad (61)$$

Para el diámetro del rodete a la salida se utiliza ecuación de Mataix:

$$D2 = \sqrt[3]{\frac{100 * Q}{n}} \quad (62)$$

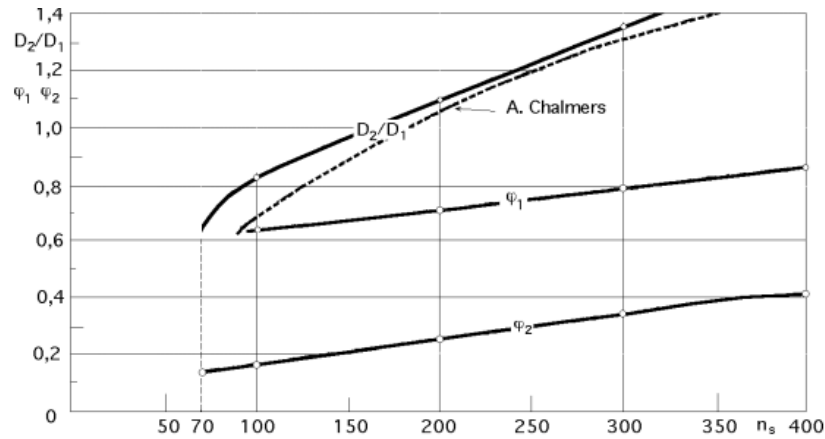
⁷⁵MATAIX, Claudio. Turbo máquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. p.327. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

⁷⁶ FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.93. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

Utilizando la correlación interpuesta por Gutiérrez⁷⁷ con la base de datos de turbinas existentes tenemos:

$$D1' = \frac{D2}{0,96 + 0,00038 * Ns} \quad (63)$$

Figura 40. Tablas de selección constantes φ .

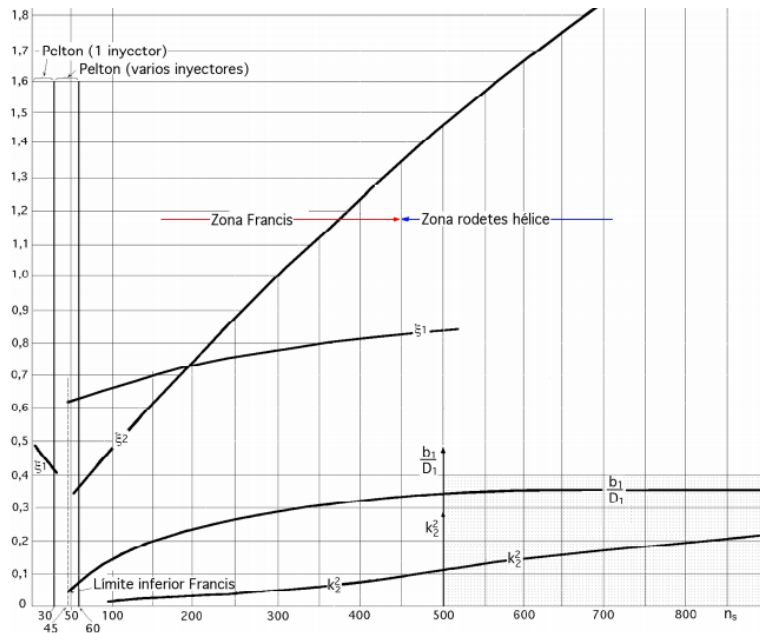


Fuente: FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.93. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

Se tiene además una relación entre la velocidad específica y la razón (B/D1) y el valor de entrada de las velocidades alpha 1, como se expone a continuación:

⁷⁷ GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. p.24.

Figura 41. Tablas de selección constantes b y ξ



Fuente: FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.93. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

4.4.2.2 Cámara espiral. Para el diseño de la cámara espiral se debe garantizar un valor de velocidad invariable dentro de la misma y que depende del tipo de material. La cámara espiral de metal, se expone en la siguiente ecuación empírica.

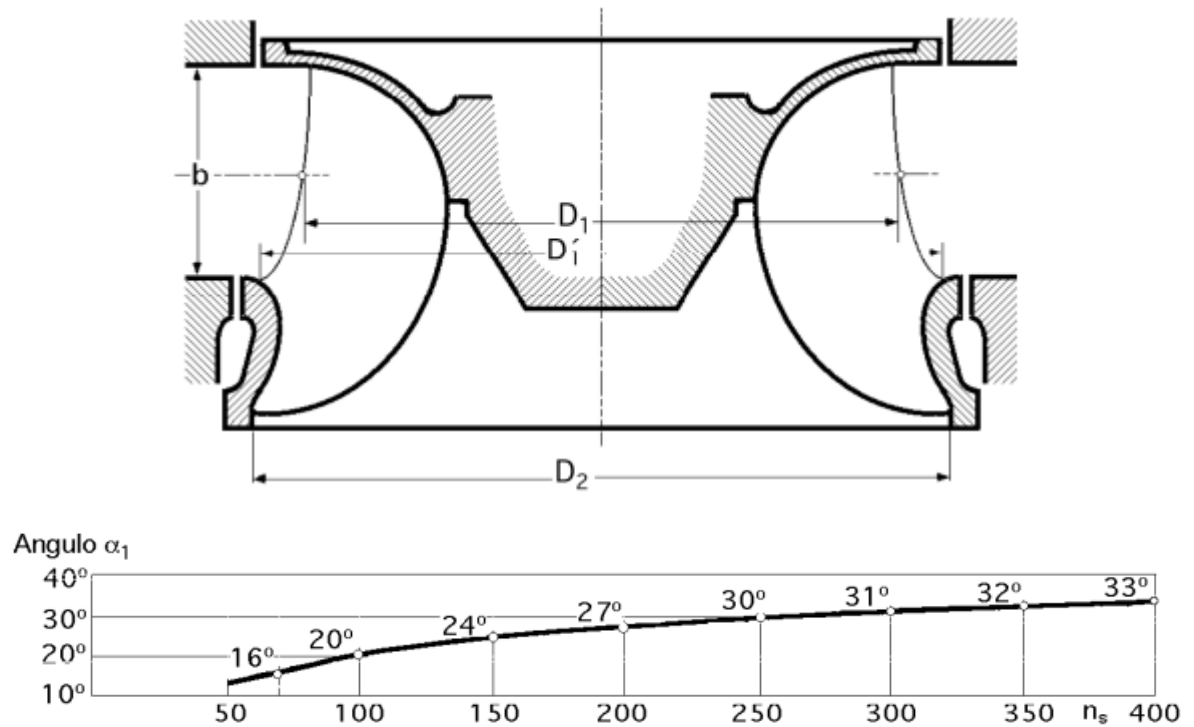
$$C_e = 0,18 + 0,28 * \sqrt{2 * g * Hn} \quad (64)$$

Debido a que se debe garantizar la continuidad del fluido dentro de la misma, se tiene:

$$Q = A_i * C_e \quad (65)$$

$$Q = \frac{\pi * d_1^2}{4} * c_e \quad (66)$$

Figura 42. Rodete de la turbina Francis y curva de Alpha.



Fuente: FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.93. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

Y de esta manera teniendo en cuenta que la cámara estará dividida en 8 secciones, se tendrá el valor del diámetro para cada una:

$$\begin{aligned}
 d1 &= \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * Ce}} & d2 &= \sqrt{\frac{7}{8}} * d1 & d3 &= \sqrt{\frac{3}{4}} * d1 \\
 d4 &= \sqrt{\frac{5}{8}} * d1 & d5 &= \sqrt{\frac{1}{2}} * d1 & d6 &= \sqrt{\frac{3}{8}} * d1 \\
 d7 &= \sqrt{\frac{1}{4}} * d1 & d8 &= \sqrt{\frac{1}{8}} * d1
 \end{aligned}
 \tag{67}$$

Para la creación de la tubería de aspiración se debe tener en cuenta que existe una longitud mínima que evita que el fenómeno de la cavitación aparezca, además se plantea una relación entre el coeficiente de thoma y la velocidad específica de las turbinas que se muestra a continuación:

$$\sigma = \frac{\frac{Patm - P2}{\gamma} - Hs}{Hn}
 \tag{68}$$

$$Hs = \frac{Patm - P2}{\gamma} - \sigma * Hn
 \tag{69}$$

Tabla 7. Tabla de relación Ns y coeficiente de Thoma.

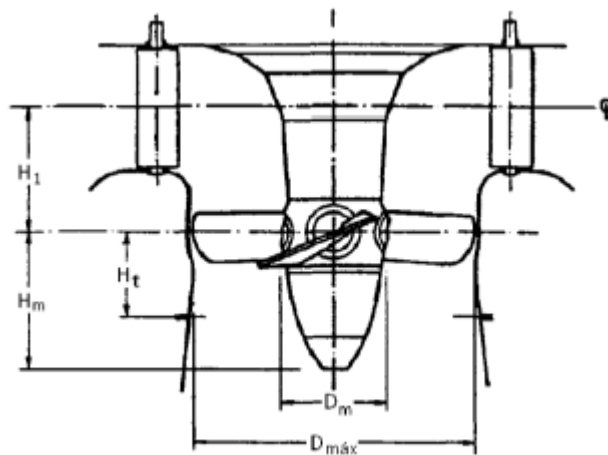
n_s	50	100	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
σ	0,04	0,05	0,08	0,13	0,22	0,31	0,45	0,6	0,7	0,9	1,5	2,1
Tipo turbina	Francis lenta	Francis lenta	Francis normal	Francis normal	Francis rápida	Francis rápida	Francis extra	Francis extra	Hélice y Kaplan			

Fuente: FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas [En línea]. España, 2017. p.93. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet: <http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/03Turb.Hidr.pdf>

4.4.3 Diseño hidráulico de TK Para las turbinas Kaplan se procedió a utilizar una metodología empírica que utiliza correlaciones experimentales, obtenidas a través de la búsqueda de información referente a centrales hidroeléctricas actuales y funcionales, en donde se exponen cada una de las dimensiones principales de los sistemas hidromecánicos, con respecto a la variación de la velocidad específica, iniciando con el planteamiento del coeficiente de velocidad periférica:

$$\phi = 0,79 + (1,61 * 10^{-3} * Ns) \quad (70)$$

Figura 43. Dimensiones de la turbina Kaplan, relacionadas con N_s .



Fuente: GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. p.24.

Inicialmente se determina el diámetro máximo que depende de la altura de diseño, las revoluciones y el coeficiente de velocidad periférica. Con esto se procede al cálculo de las dimensiones del rodete de la turbina

$$D_{max} = 84,5 * \phi * \frac{\sqrt{Hd}}{N} \quad (71)$$

$$D_m = \left(0,25 + \frac{94,64}{N_s} \right) * D_{max} \quad (72)$$

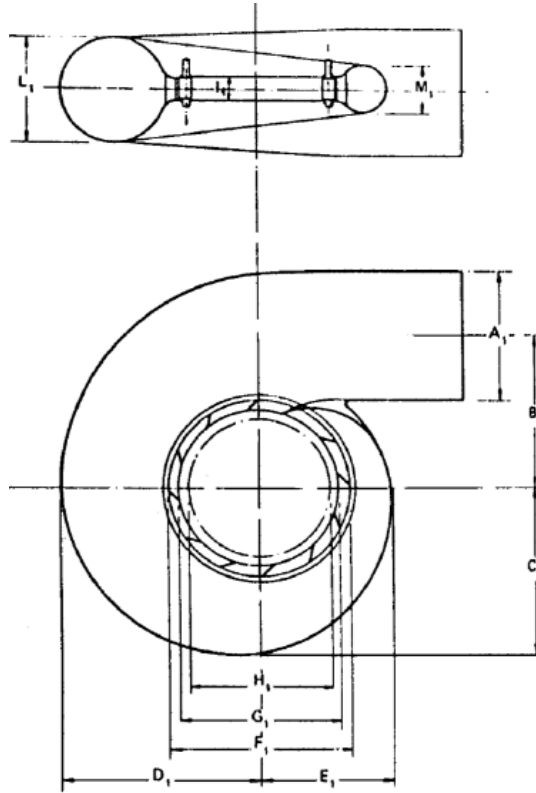
$$H_m = (6,94 + N_s^{-0.403}) * D_{max} \quad (73)$$

$$H_1 = (0,38 + (5,17 * 10^{-5}) * N_s) * D_{max} \quad (74)$$

$$H_t = (0,24 + (7,82 * 10^{-5}) * N_s) * D_{max} \quad (75)$$

Se asumirá de Nuevo la carcasa de acero debido a que se tiene en cuenta que es un proyecto de mini centrales. Para lo que utilizaran las siguientes correlaciones:

Figura 44. Dimensiones de la carcasa



Fuente: GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. p.24.

$$A_1 = D_M * (0.4 * (N_S^{0.2})) \quad (76)$$

$$B_1 = D_M * (1.26 + (3.79 * 10^{-4} * N_S)) \quad (77)$$

$$C_1 = D_M * (1.46 + (3.24 * 10^{-4} * N_S)) \quad (78)$$

$$D_1 = D_M * (1.59 + (5.74 * 10^{-4} * N_S)) \quad (79)$$

$$E_1 = D_M * (1.21 + (2.71 * 10^{-4} * N_S)) \quad (80)$$

$$F_1 = D_M * \left(1.45 + \left(\frac{72.17}{N_S} \right) \right) \quad (81)$$

$$G_1 = D_M * \left(1.29 + \left(\frac{41.63}{N_S} \right) \right) \quad (82)$$

$$H_1 = D_M * \left(1.13 + \left(\frac{31.86}{N_S} \right) \right) \quad (83)$$

$$I_1 = D_M * \left(0.45 - \left(\frac{31.80}{N_S} \right) \right) \quad (84)$$

$$L_1 = D_M * (0.74 + (8.7 * 10 - 4 * N_S)) \quad (85)$$

$$M_1 = D_M * \left(\frac{1}{2.06 - (1.20 * 10 - 3 * N_S)} \right) \quad (86)$$

Finalmente, las correlaciones para la creación de la geometría de del tubo de aspiración, que como se explicó en la parte teórica, tiene 2 funciones sobre el sistema, una aspiradora y otra difusora; lo anterior se plantea a continuación:

$$H_t = D_M * (0.24 + (7.82 * 10 - 5 * N_S)) \quad (87)$$

$$N = D_M * (2.00 - (2.14 * 10 - 6 * N_S)) \quad (88)$$

$$O = D_M * (1.40 - (1.67 * 10 - 5 * N_S)) \quad (89)$$

$$P = D_M * \left(1.26 - \left(\frac{16.35}{N_S} \right) \right) \quad (90)$$

$$Q = D_M * \left(0.66 - \left(\frac{18.40}{N_S} \right) \right) \quad (91)$$

$$R = D_M * (1.25 - (7.98 * 10 - 5 * N_S)) \quad (92)$$

$$S = D_M * \left(4.26 + \left(\frac{201.51}{N_S} \right) \right) \quad (93)$$

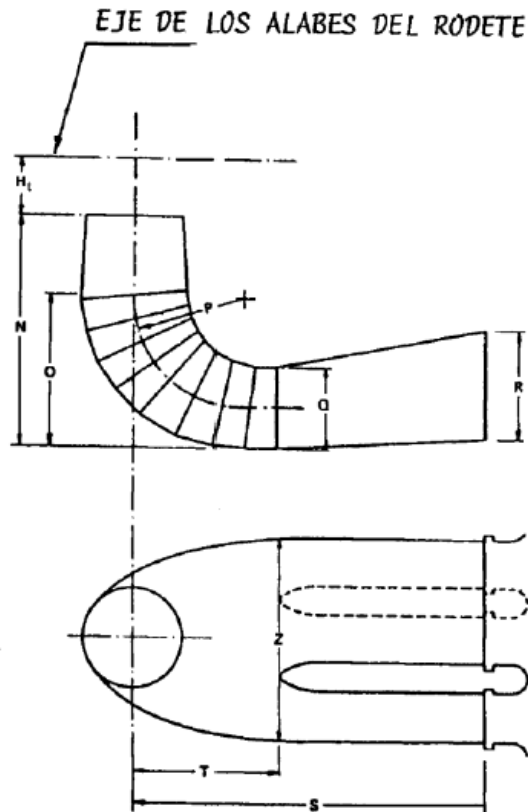
$$T = D_M * (1.20 + (5.12 * 10 - 4 * N_S)) \quad (94)$$

$$Z = D_M * \left(2.58 + \left(\frac{102.66}{N_S} \right) \right) \quad (95)$$

$$U = D_M * (0.15) \quad (96)$$

$$V = D_M * (2.91) \quad (97)$$

Figura 45. Dimensiones del tubo de aspiración



Fuente: GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. p.24.

Nota: Ver en ANEXOS, el diseño hidráulico de la turbina axial Kaplan.

5. MANTENIMIENTO

Como se ha planteado por varios autores en el manual de capacitación⁷⁸, el mantenimiento es una actividad que busca mantener en las mejores condiciones de funcionamiento, toda la maquinaria, equipos de trabajo y servicios presentes en una planta o industria, realizado de manera ordenada y planificada, y cuyo fin último u objetivo es el de mantener en constante funcionamiento todas las operaciones realizadas dentro de un proceso. Existen distintas formas de realizar mantenimiento, una anticipada a cualquier tipo de falla y con tecnología de punta conocida como mantenimiento predictivo, en la que los encargados realizan a través de medición de variables fisicoquímicas, una aproximación a cualquier tipo de falla futura que pueda presentarse, con métodos como el análisis a través de tintas penetrantes, la medición y análisis de vibraciones, los estudios tribológicos de fluidos lubricantes etc. Uno de los problemas presentados con este tipo de mantenimiento es que es de alto costo para las compañías, por lo que se recomienda realizar un estudio de costo beneficio por parte de la compañía.

El mantenimiento preventivo es una forma anticipada a la falla, en donde se tienen procesos de revisión para el análisis oportuno de un posible fallo, que son combatidos desde la ingeniería para que un proceso sea continuo y funcional; existen diversas formas de programar cambios de piezas y maquinaria justo antes de fallar, como una parada de planta programada en donde se estudia el funcionamiento de la maquinaria y la frecuencia en que esta falla, para proseguir con las respectivas acciones de mantenimiento. Algunas maneras de medir variables de mantenimiento que se conocen como indicadores de mantenimiento básico que buscan aumentar la disponibilidad de los equipos y otros índices como

⁷⁸ BRICEÑO, Eduardo; ESCOBAR, Rafael; RAMIREZ., Saúl. Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas. Lima.2008. P.84. ISBN N° 978-9972-47-148-3.

mantenibilidad, confiabilidad y otros que se plantean en el proyecto de LLamba⁷⁹ y se exponen a continuación:

Tiempo medio entre fallas (MTBF) o confiabilidad

Este indicador permite medir la frecuencia entre fallas promedio transformándose en una medida de la confiabilidad de los equipos o dispositivos.

$$MTBF = \frac{\#Equipos \times \text{Tiempo Operativo}}{\#De fallas} \quad (98)$$

Disponibilidad (DISP)

La disponibilidad de un equipo o activo se define como el porcentaje de tiempo en que está operativo, o disponible a funcionar en cualquier instante. Las unidades de medida pueden ser horas, días, etc.

$$DISP = \frac{\text{Tiempo de operacion} - \text{Tiempo de parada}}{\text{Tiempo de operacion}} \quad (99)$$

Intervalos de búsqueda de falla (FFI), está dado por la expresión

$$FFI = 2 \times (100\% - \text{Disp}\%) \times MTBF \quad (100)$$

Confiabilidad (CONF)

$$CONF = \frac{\text{Hrs de Periodo} - \sum \text{Hrs Mtto correctivo}}{\text{Hrs de Periodo}} \quad (101)$$

⁷⁹ LLAMBA FARINANGO, William Santiago. Elaboración del plan de mantenimiento centrado en Confiabilidad (RCM) de la central hidráulica illuchi n° 2 [En línea]. Proyecto de titulación previo a la obtención del título de ingeniero en electromecánica. Universidad de las fuerzas armadas. Departamento de ingeniería electromecánica. Latacunga. 2014. [Consultado: 14 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8442/1/T-ESPEL-EMI-0256.pdf>

5.1 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN BOCATOMAS

“En la mayoría de los casos, necesita poco mantenimiento. Generalmente en la época de avenidas, los ríos traen consigo grandes piedras, vegetación y arena que se deposita en la parte previa de la presa, lo que puede ocasionar taponamiento del canal, por lo que será necesario retirarlos. Se pueden generar rajaduras que en época de estiaje deberán ser reparados con resane con mortero de concreto, impermeabilizando temporalmente”⁸⁰.

5.2 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN CANALES

“La mayoría de pico, micro y mini centrales hidroeléctricas, tienen alguna forma de canal para llevar agua de la bocatoma a la cámara de carga. Una de las consideraciones más importantes debe ser la velocidad del fluido en el canal, ya que si esta se sobrepasa la erosión podría aparecer; y si esta fuera menor, los sedimentos taponarían el canal, debe existir un mantenimiento preventivo, que evite fugas y las repare al aparecer,, además una inspección periódica que remueva vegetación, piedras y sedimentos”⁸¹.

5.3 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN DESARENADORES

“El desarenador determina el deterioro por erosión del rodete de la turbina. En este la velocidad se disminuye permitiendo que las partículas en suspensión se decanten

⁸⁰ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.247.

⁸¹ *Ibíd.*, p.248.

al fondo, los sedimentos se eliminarán a través de la apertura de la compuerta de purga, que además en periodos secos deberá ser reparada y en otros casos lubricada, es necesario recalcar que en periodo de lluvia el mantenimiento aumentara por mayor sedimentación”⁸².

5.4 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN CÁMARAS DE CARGA

Como plantean en el manual de Perú⁸³ La cámara de carga es el punto donde se conecta la tubería forzada al canal de conducción, esta se compone de una rejilla, un rebosadero y una válvula de control del caudal a la turbina. La rejilla requerirá limpieza debido a la cantidad de elementos flotantes que evitan pasar a la turbina y su mantenimiento depende de ello. Además, las rajaduras deben ser analizadas y la sedimentación que finalmente puede entrar hacia la turbina, y hacer caer índices de eficiencia de la misma.

5.5 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN TUBERÍAS

La tubería forzada lleva el agua de la cámara de carga a la turbina. Las más recientes se emplea el uso del PVC. Las tuberías de acero requieren poco mantenimiento, aunque algunas uniones podrían gotear, en uniones espiga campana la soldadura de plomo ayudara, mientras que si la unión es con bridas, bastara ajustar los pernos. Un problema muy grande en tuberías es la corrosión, cuya solución en dado caso se recomienda las pinturas anticorrosivas. En tuberías viejas, la limpieza de calcáreas del interior, podría reducir el espesor y la debilitación

⁸² COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.248.

⁸³ *Ibíd.*, p. 248.

del material. El PVC recomendable se aleja del sol o se entierra, evitando daños por rayos y la fractura por algún golpe⁸⁴.

5.6 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN VÁLVULAS

“Las válvulas son instaladas al final de la tubería, en la mayoría de los casos, en la casa de máquinas, el cambio de los sellos es usual, pues suelen presentar fugas en la prensaestopas. Las válvulas se diseñan para trabajar en una disposición abierta o cerrada, pues las posiciones intermedias no solo ocasionan fuertes pérdidas en la línea de presión, sino que empiezan a parecer daños en el obturador”⁸⁵.

5.7 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN TURBINAS HIDRÁULICAS

“En el medio que se plantea, las turbinas presentes son la pelton, la Kaplan y la Francis. En las turbinas el mantenimiento disminuirá si el fluido entra limpio a la casa de máquinas. En el caso de incrustación de un elemento en la turbina, será necesario desmontar los inyectores de la pelton, o retirar la inspección de la Francis. Otro punto especial son los rodamientos o apoyos al eje, acatando ruidos y sobrecalentamientos. En cuanto al desgaste se recomienda anualmente hacer revisión del mismo para oportunamente solicitar una revisión del mismo”⁸⁶.

⁸⁴ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.250.

⁸⁵ *Ibíd.*, p. 249.

⁸⁶ *Ibíd.*, p. 250.

5.8 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN ACOPLAMIENTOS, RODAMIENTOS Y TRANSMISIÓN

Los acoplamientos están conformados por ejes, poleas, fajas y rodamientos. Este tipo de acoplamientos, conocido como acoplamiento indirecto requiere ser inspeccionado con frecuencia, con el fin de detectar, vibraciones a causa de desalineamientos; el tensado de las bandas (si existen en el sistema), deben ser de acuerdo a recomendaciones del fabricante, en caso contrario el alternador estar acoplado directamente, lo que requiere únicamente la revisión de pernos de sujeción del acople. Finalmente existen 2 tipos de rodamientos, los antideslizantes y los de rodadura, los primeros trabajan con baño de aceite, haciendo que los de grandes dimensiones sean provistos de sistemas de refrigeración, además requieren ser inspeccionados con cierta frecuencia analizando la holgura entre el eje y la pista, donde d es el diámetro del eje en mm y H la holgura en mm:⁸⁷

$$H = \frac{dx1,12}{1000} \quad (102)$$

5.9 ACCIONES DE MANTENIMIENTO EN REGULADORES

La función del gobernador o regulador de la velocidad como se plantea en el manual de micro centrales⁸⁸ es mantener la velocidad constante de la turbina a pesar de las fluctuaciones de potencia, mediante dispositivos se controla la admisión de caudal a la turbina, estos deben ser inspeccionados a diario verificando anomalías en las correas y en el sistema general donde las piezas deben estar perfectamente lubricadas, además existen reguladores de carga que ante la aparición de sobresaltos, los deriva hacia un tanque de resistencias, su mantenimiento simplemente consiste en la limpieza ante el polvo y las partículas mismas.

⁸⁷ COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos. 1 ed. Perú. 1996, p.251.

⁸⁸ *Ibíd.*, p. 256.

Figura 46. Mantenimiento del rodete y eje de una turbina Francis.



Fuente: Mitsubishi. Reparación de una turbina Francis [Imagen]. [Consultado: 12 de noviembre de 2017]. Disponible en internet en: www.turbodual.com

5.10 HOJA DE VIDA DE EQUIPOS

El mantenimiento requiere un adecuado orden de presentación de la información, por este motivo inicialmente se debe contar con un ordenado sistema de codificación el cual garantice dentro de la planta, tener conocimiento de cada uno de los equipos que tienen funcionamiento en la misma, seguido a esto se debe conocer cuál de los equipos presenta un mayor grado de indispensabilidad y a

través de un análisis de criticidad se obtiene dicha información, para proseguir con el estudio de los equipos y piezas. Las hojas de vida de los equipos, permiten tener un control de las acciones, falencias y datos en tiempo real que pueden ser obtenidas a través de rutinas de mantenimiento, para esto se debe contar con un formato que permita obtener los datos, básicos de la máquina, su descripción y las novedades que se registren a diario, para su posterior análisis.

5.11 REPUESTOS Y HERRAMIENTAS PARA MANTENIMIENTO

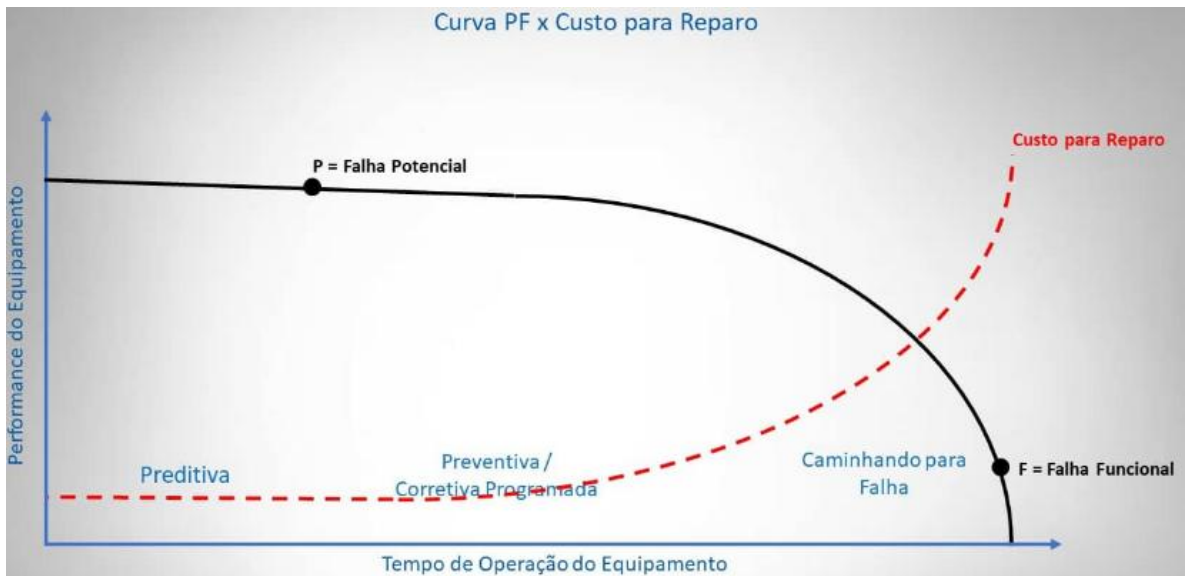
En el mantenimiento de equipos, es muy importante tener disponibilidad de herramientas de ajuste, medición, manipulación, seguridad y hasta de software que faciliten la medición y registro de información de maquinaria y equipos previamente inventariados; la siguiente lista, expone las herramientas mínimas necesarias utilizadas en mantenimiento. Para observar el listado de herramientas utilizado, se propone revisar Anexos.

5.12 DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Existen muchos modos en los cuales un equipo o pieza puede fallar, el momento en el que se produce los primeros inconvenientes se le llama aparición de falla o falla potencia, momento en el que a través de mantenimiento predictivo se puede predecir y evitar, a través del mantenimiento preventivo se puede encontrar, analizar y reparar sin que este equipo haya fallado aun, y finalmente cuando ya la falla potencial apareció y no se solucionó, se transita a un estado de falla funcional, que

es crítico debido a que los equipos dejan de funcionar y cumplir con sus objetivos y la única solución, la constituye un mantenimiento correctivo.

Figura 47. Curva P-F.



Fuente: Egeteles. Curva PF y Curva de costos [Imagen]. BRASIL, 2017. [Consultado: 15 de noviembre de 2017]. Disponible en internet en: <https://engeteles.com.br/curva-pf/>

NOTA: Ver en ANEXOS, recomendaciones de mantenimiento.

6. ANÁLISIS ECONOMICO

El análisis económico de un proyecto de ingeniería, es un aspecto muy importante al momento de tomar decisiones con respecto a la viabilidad del mismo, además de tener en cuenta que, como cualquier otro negocio, la tasa de retorno constituye una información que cualquier financiero quisiera saber antes de realizar una inversión.

Para el gobierno colombiano, la generación y suministro de fluido eléctrico en las zonas no interconectadas ZNI, es un costo alto que se tiene que pagar debido a que el suministro eléctrico es indispensable y además muy complicado de hacer llegar a esos sitios. Por este motivo disminuir los costos de un proyecto de generación eléctrica, podría ser un motor de incentivación al uso de energías renovables aprovechando recursos presentes en cada zona.

Para el análisis desde el punto de vista económico y el estudio de la viabilidad, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones y criterios:

6.1 CONSIDERACIONES BÁSICAS

Para un análisis económico completo, se deben tener en cuenta factores variables en el tiempo como lo son:

El valor actual de las monedas más comerciales: Dólar \$2.925.67 Euro: \$3.343.22

El valor de la inflación en Colombia: 3,4% pronosticado para el año 2018.

Tasa social de descuento: de 12%

Costos específicos de la energía y de los equipos.

Estos valores considerados inicialmente, permitirán a través de los análisis económicos, llegar a cifras que tengan valor en el análisis de proyectos, y de su viabilidad económica.⁸⁹

6.2 TASA SOCIAL DE DESCUENTO

Como lo plantea Correa⁹⁰, en el consumo se usa un bien directamente con el fin de la obtención de un provecho, generalmente en proyectos ese retorno no es directo y tiene que ver con el tiempo posterior a la inversión; la tasa de descuento es una relación entre el consumo presente de un bien y los beneficios futuros que serán aprovechados, lo que en términos económicos sería, una gran tasa de descuento implica la preferencia por el consumo presente, pero con menores beneficios futuros. Socioeconómicamente, esta mide la tasa a la cual una población, está dispuesta a cambiar un consumo presente por uno futuro, o el valor del tiempo que una sociedad asigna a la postergación.

6.3 CRITERIOS DE VIABILIDAD ECONÓMICA DE UN PROYECTO

La viabilidad económica de un proyecto, busca analizar si se es capaz o no de asumir sus costos; es decir si será rentable bajo las condiciones propuestas. Para ello se debe consultar inicialmente el presupuesto o costos detallados, en caso de que la entidad contratante o solicitante lo haya especificado, o en su defecto, se

⁸⁹ Banco de la república- Colombia. Indicadores financieros diarios [en línea]. (12 de mayo de 2018). [Consultado: 13 de mayo de 2018]. Disponible en internet: <http://www.banrep.gov.co/es/bie>

⁹⁰ CORREA Restrepo, Francisco, La tasa social de descuento y el medio ambiente, Lecturas de Economía, núm. 64, Colombia, 2006, pp. 93-116.

parte de reconocer el valor del recurso financiero destinado para la ejecución, con relación a las actividades previstas y el tiempo para su implementación. Por lo tanto, este análisis parte de la identificación de actividades, el consecuente listado detallado de recursos requeridos para su realización, el tiempo con que se cuenta para ello y los productos y resultados esperados. Esta valoración es entonces simultánea al análisis de la viabilidad técnica, pues implica la revisión del proceso operativo.⁹¹

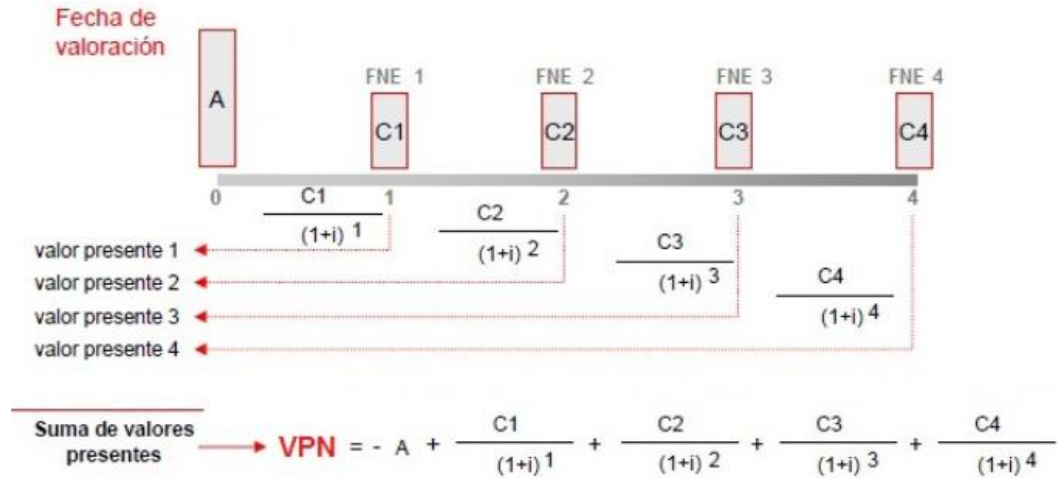
6.3.1 VALOR PRESENTE NETO (VPN)

En finanzas, el valor presente neto (VPN) de una serie temporal de flujos de efectivo, tanto entrantes como salientes, se define como la suma del valor presente (PV) de los flujos de efectivo individuales. El Valor Presente Neto es una herramienta central en el descuento de flujos de caja (DCF) empleado en el análisis fundamental para la valoración de empresas cotizadas en bolsa, y es un método estándar para la consideración del valor temporal del dinero a la hora de evaluar elegir entre los diferentes proyectos de inversión disponibles para una empresa a largo plazo. Cada entrada de efectivo y salidas se descuenta a su valor presente (PV). Luego se suman. Por lo tanto, VPN es la suma de todos los términos.⁹²

⁹¹ Asociación Colombiana de Universidades, Red Nacional de Extensión Universitaria. Documento de trabajo sobre políticas de extensión. Octubre de 2007. Revisado y corregido por la Universidad de Antioquia, Vicerrectoría de Extensión. P. 10.

⁹² Enciclopedia financiera. Valor presente neto [Imagen]. Colombia, 2012. [Consultado: 23 de febrero de 08]. Disponible en internet en: <https://www.encyclopediainanciera.com/finanzas-corporativas/valor-presente-neto.htm>

Figura 48. Estimación del VPN.



Fuente: Enciclopedia financiera. Valor presente neto [Imagen]. Colombia, 2012. [Consultado: 23 de febrero de 08]. Disponible en internet en: <https://www.encyclopediainanciera.com/finanzas-corporativas/valor-presente-neto.htm>

6.3.2 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión. Es decir, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto.

Es una medida utilizada en la evaluación de proyectos de inversión que está muy relacionada con el Valor Actualizado Neto (VAN). También se define como el valor de la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero, para un proyecto de inversión dado. También se puede definir basándonos en su cálculo, la TIR es la tasa de descuento que iguala, en el momento inicial, la corriente futura de cobros con la de pagos, generando un VAN igual a cero:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+TIR)} + \frac{F_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (103)$$

F_t son los flujos de dinero en cada periodo t

I_0 es la inversión realiza en el momento inicial ($t = 0$)

n es el número de periodos de tiempo

El criterio de selección será el siguiente donde “ k ” es la tasa de descuento de flujos elegida para el cálculo del VAN:

- ✓ Si $TIR > k$, el proyecto de inversión será aceptado. En este caso, la tasa de rendimiento interno que obtenemos es superior a la tasa mínima de rentabilidad exigida a la inversión.
- ✓ Si $TIR = k$, estaríamos en una situación similar a la que se producía cuando el VAN era igual a cero. En esta situación, la inversión podrá llevarse a cabo si mejora la posición competitiva de la empresa y no hay alternativas más favorables.
- ✓ Si $TIR < k$, el proyecto debe rechazarse. No se alcanza la rentabilidad mínima que le pedimos a la inversión.⁹³

6.3.3 PERIODO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (N)

Cuando se realiza una inversión inicial en un proyecto empresarial es más que aconsejable conocer el periodo de recuperación de la inversión y para ello hay que recurrir a la fórmula del payback. Y es que calcular el plazo de recuperación de la inversión es imprescindible para estimar la viabilidad de un proyecto y decidir si embarcarte en él o no. Por tanto, el cálculo del payback permitirá que reduzcas la situación de incertidumbre que siempre se genera cuando se va a crear una empresa y conozcas qué puedes esperar de un nuevo de negocio en sus primeros años de andadura, en concreto, el plazo que tienes que esperar para recuperar la inversión realizada en los inicios. El grado de incertidumbre de un negocio será mayor cuanto mayor sea el plazo de recuperación de la inversión inicial. Por el contrario, cuanto menor sea plazo, se genera mayor liquidez y se reduce el riesgo financiero de una empresa.

⁹³ Economipedia. Tasa interna de retorno, Haciendo fácil la economía. 2015. [Consultado: 24 de Abril de 2018]. Disponible en internet en: <http://economipedia.com/que-es-economipedia>

En el caso de que los flujos de caja sean iguales todos los años, la fórmula para realizar su cálculo será la siguiente, donde I_0 es inversión inicial y F los flujos de caja:⁹⁴

$$PRI = \frac{I_0}{F} \quad (104)$$

6.3.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA COSTO/BENEFICIO

La relación Beneficio-Coste (B/C) compara de forma directa los beneficios y los costes. Para calcular la relación (B/C), primero se halla la suma de los beneficios descontados, traídos al presente, y se divide sobre la suma de los costes también descontados.

Para una conclusión acerca de la viabilidad de un proyecto, bajo este enfoque, se debe tener en cuenta la comparación de la relación B/C hallada en comparación con 1, así tenemos lo siguiente:

$B/C > 1$ indica que los beneficios superan los costes, por consiguiente, el proyecto debe ser considerado.

$B/C=1$ Aquí no hay ganancias, pues los beneficios son iguales a los costes.

$B/C < 1$, muestra que los costes son mayores que los beneficios, no se debe considerar.⁹⁵

⁹⁴ Empeñe pyme. Calcular periodo de recuperación de la inversión. 2016. [Consultado: 24 de enero de 2018]. Disponible en internet en: <https://www.empeñepyme.net/calcular-el-periodo-de-recuperacion-de-la-inversion.html>

⁹⁵ Gestionpolis. Calculo de la relación costo, beneficio. 2018. [Consultado: 24 de enero de 2018]. Disponible en internet en: <https://www.gestionpolis.com/calculo-de-la-relacion-beneficio-coste/>

7. SISTEMAS BÁSICOS DE CONTROL EN LA GENERACIÓN

7.1 EQUIPOS DE CONTROL DEL SISTEMA DE GENERACIÓN

Los principales instrumentos de medición que se encuentran en el tablero de control son: voltímetro, amperímetro, frecuencímetro y kilovatímetro. Estos y otros instrumentos de control y medición se describen a continuación:

7.1.1 Voltímetro, amperímetro y medidor de frecuencia

Se proporcionan para cada generador como elementos básicos. Normalmente son intercambiables entre fases. Estos tres instrumentos están normalmente situados con un suministro de entrada o salida, tales como una entrada o salida de transformador. Es normal controlar estos instrumentos de medición y control cada hora, particularmente el voltaje y la frecuencia que afecta directamente al cliente.

7.1.2 Watímetro y medidor de energía (kW-h)

Son tres instrumentos de fase para controlar la potencia de salida de los generadores a los alimentadores. El watímetro da una lectura instantánea de potencia, estrechamente relacionada con la potencia en el eje producida por la turbina. El contador o medidor de energía (kW-h) registra la energía total generada y es del mismo tipo que los contadores de consumo doméstico o industrial. Generalmente se toman lecturas horarias de los medidores para utilizarlos en el momento de calcular el rendimiento y eficiencia de la PCH.

7.1.3 Medidor del factor de potencia y medidor reactivo (kVA)

Proporcionan lecturas instantáneas del “componente reactivo” de la energía eléctrica generada o transmitida. Esto representa un uso ineficaz del equipo y necesita un ajuste para “compensar” el control de excitación con el fin de fijar el factor de potencia lo más cercano posible a la unidad, reduciendo así al máximo el componente reactivo

7.2 EQUIPOS QUE CONTROLAN LA VELOCIDAD DE LA TURBINA

Como se ha explicado, uno de los inconvenientes más grandes en la generación, lo constituye la frecuencia eléctrica de generación que para Colombia debe ser de 60Hz, está directamente relacionada con la velocidad síncrona del generador, que debe ser constante, para poder garantizarla; por esta razón existen equipos que se encargan de mantener la velocidad de la turbina constante, a través de la medición de variables con sensores en tiempo real, y la toma de acciones de control, para mantener dichas variables constantes en el tiempo, a la magnitud deseada. A continuación, se explica la función del regulador:

Un generador eléctrico, produce tal voltaje y frecuencia estable sólo si es impulsado a velocidad constante. En la práctica, la carga o demanda de potencia en un sistema es variable, lo que produce variaciones de velocidad y por consiguiente variaciones o fluctuaciones en el voltaje. Para mantener tales variaciones dentro de límites aceptables, es necesario incorporar un controlador de la turbina, también llamado REGULADOR. Esto se puede lograr básicamente de dos maneras: regulando el caudal o regulando la carga.

Figura 49. Tablero de control en generación hidroeléctrica

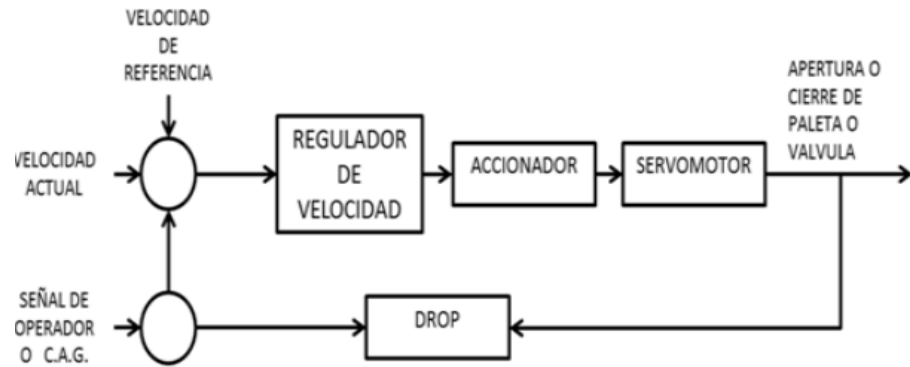


Fuente: VIBRAN. Soluciones de control en turbinas, soluciones avanzadas de ingeniería [En línea]. Bogotá, 2018. [Consultado: 22 de enero de 2018]. Disponible en internet en: <http://www.vibran.com.co/web/soluciones/soluciones-de-control-en-turbinas>

7.2.1 Regulador de caudal:

Este método regula el flujo de caudal a través de la turbina de acuerdo a la carga o demanda de potencia sobre el grupo turbina generador. A mayor carga permite un ingreso mayor de agua e inversamente a menor carga reduce el ingreso de agua de tal forma que se mantiene constante la velocidad de giro de la turbina.

Figura 50. Control de velocidad en un proceso de generación.

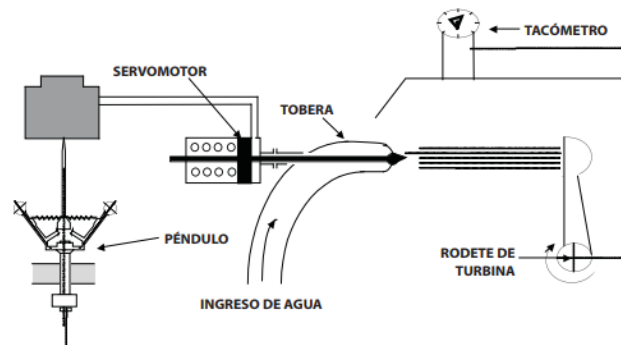


Fuente: BRICEÑO, Eduardo; ESCOBAR, Rafael; RAMIREZ., Saúl. Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas. Lima. 2008. P.84. ISBN N° 978-9972-47-148-3.

Cabe resaltar que la regulación por caudal en turbinas Francis y Kaplan se realiza a través del distribuidor Fink y en la Kaplan, además se requiere una variación del ángulo de la hélice, para evitar la caída del rendimiento de la turbina.

Una característica negativa de las turbinas hélice es el bajo rendimiento de las mismas a cargas distintas de la nominal o diseño. En las turbinas Kaplan, las paletas directrices del distribuidor también son móviles lo cual permite mejorar la regulación, pues al cambiar la inclinación de los álabes del rodete se consigue mantener bastante elevado el rendimiento para un extenso margen del grado de apertura del distribuidor.

Figura 51. Regulación de caudal para Pelton.



Fuente: BRICEÑO, Eduardo; ESCOBAR, Rafael; RAMIREZ., Saúl. Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas. Lima. 2008. P.84. ISBN N° 978-9972-47-148-3.

7.2.2 Regulador de carga:

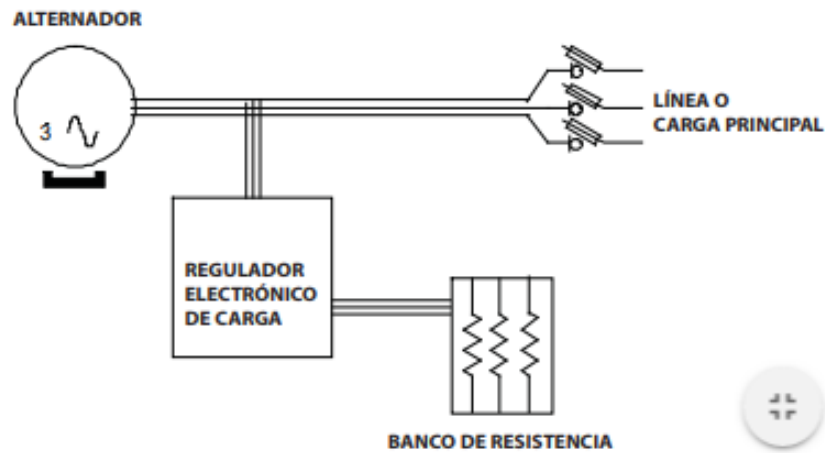
En este método, el flujo de agua a través de la turbina se mantiene constante y la carga debe ser mantenida constante dentro de los límites tolerables. Esto se logra, hoy día, principalmente con controladores electrónicos que transfieren la carga no consumida por los usuarios a un circuito o banco de resistencias, manteniendo de esta forma la carga total constante, esto para centrales Pico y ciertas microCHE's.

7.2.3 Sistema de control digital y excitación de maquina sincrónicas

El objetivo fundamental del control de excitación o sistema de excitación, o sistema de control de excitación (usaremos estas denominaciones indistintamente) es realizar el ajuste automático de la corriente de campo del generador sincrónico de modo que se mantenga constante el voltaje de salida del generador de acuerdo a los valores especificados de consigna.

Desde el punto de vista de su funcionamiento, el sistema de control de excitación (SCE) debe ser capaz de responder a perturbaciones, tanto transitorias como estacionarias, sin alterar la operación normal del generador.⁹⁶

Figura 52. Regulación de Carga.



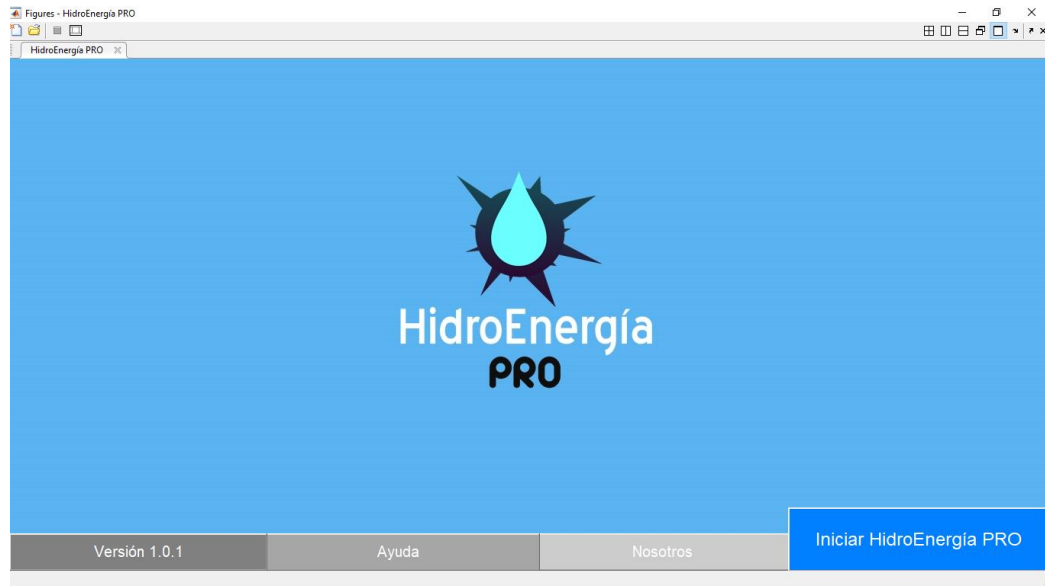
Fuente: BRICEÑO, Eduardo; ESCOBAR, Rafael; RAMIREZ., Saúl. Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas. Lima. 2008. P.84. ISBN N° 978-9972-47-148-3

Nota: Ver informe en ANEXOS y tener en cuenta que en el capítulo 7, se expone la interrelación del informe de control y su exposición en el software.

⁹⁶ BRICEÑO, Eduardo; ESCOBAR, Rafael; RAMIREZ., Saúl. Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas. Lima. 2008. P.84. ISBN N° 978-9972-47-148-3

8. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA

Figura 53. Pantalla principal HidroEnergía PRO



8.1 ASPECTOS TÉCNICOS DE LA HERRAMIENTA

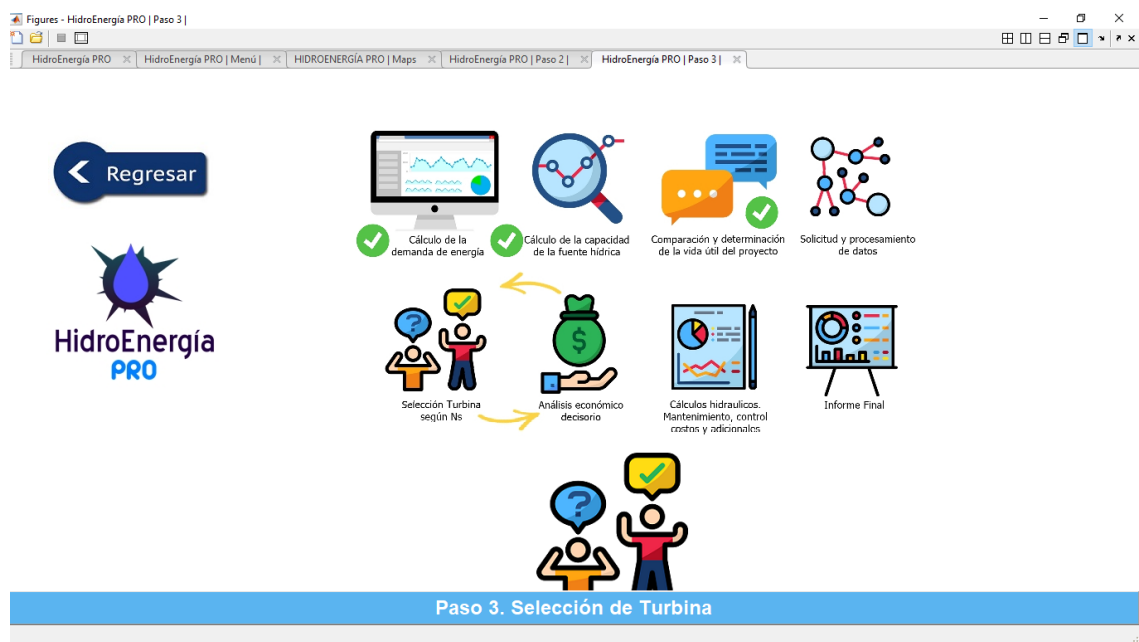
HidroEnergía PRO, nombre que recibe la herramienta computacional desarrollada, fue escrita en lenguaje m de Matlab; esto debido a su lenguaje sencillo, comodidad a la hora de realizar operaciones matriciales y vectoriales. Además, Matlab permite la creación de una interfaz gráfica amigable con el usuario.

Otras ventajas de utilizar Matlab se encuentran en su compatibilidad con el paquete ofimático de Microsoft Office, donde herramientas como Excel, Word y Power Point interactúan de manera sencilla con el programa. Permitiendo la generación de reportes en Word y tanto importación como exportación de datos matriciales a Excel.

8.1.1 Características principales de la Interfaz

En cuanto a uso, la interfaz es atractiva al usuario, permite la navegación entre ventanas ya sea haciendo uso de las pestañas superiores o de botones.

Figura 54. Navegación entre pestañas.



Otra característica del programa es la utilización de ventanas emergentes para solicitud de datos al usuario, también para informar de posibles errores o simplemente proveer ayuda. El programa detecta cuando el usuario no introduce toda la información solicitada, arrojando alertas de manera inmediata y evitando que el usuario avance erróneamente.

Figura 55. Paso a paso de HidroEnergía PRO



Requerimientos mínimos para el uso adecuado de la herramienta:

- Sistema operativo Windows 7 o superior de 64 bits.
- Matlab 2017 o superior para sistemas operativos de 64 bits. Licenciado
- Microsoft Office Excel 2010 o superior.
- Conexión a Internet 2Mb o superior.

La secuencia lógica utilizada para el desarrollo de la herramienta se muestra en la figura 58. Donde se observa como el programa de manera ordenada inicia realizando un análisis de la demanda de la población, posteriormente compara la demanda con el potencial de generación de la fuente hídrica seleccionada, informa de la viabilidad o no viabilidad, seguido a esto procede a la selección de la turbina y determinación de dimensiones principales. Se realiza un análisis económico y por último se presenta un informe con la información calculada con recomendaciones de control, mantenimiento y captación del recurso hídrico.

8.2 PROGRAMACIÓN

En la carpeta de instalación de HidroEnergía PRO se encuentran los siguientes archivos de mayor relevancia que se utilizan durante la ejecución del software. Se realizará una revisión previa antes de profundizar en algunos de ellos.

Tabla 8. Explicación de los componentes del Software desarrollado.

Nombre del archivo	Breve descripción
HidroEnergíaPRO.m	Pantalla principal de la herramienta, en ella se encuentra la información básica del software tal como: versión, autores y ayuda. Permite iniciar un nuevo proyecto y asignar información general que posteriormente se utilizará en la exportación del informe final.
Menu.m	Una vez introducida la información de un nuevo proyecto, HidroEnergía PRO redirecciona al usuario al menú principal, en él se muestra al usuario de manera general los pasos a seguir durante la ejecución del programa. Pasos tales como: Calculo de la demanda, potencial hidroenergético, selección de la turbina, análisis económico, mantenimiento y control. En el Menú se encuentra el acceso al paso 1 que corresponde al cálculo de la demanda.
SaltoyTuberia.m	Es un paso previo al cálculo del potencial hidroenergetico de la fuente hídrica seleccionada para la realización del proyecto. En este paso el usuario calcula el salto bruto disponible y realiza una aproximación de la longitud de la tubería. Esto con el fin de conocer el salto neto. En este paso se hace uso de mapas digitales y se requiere conexión a internet.
PotencialHidro.m	Asumiendo una eficiencia global del sistema de 0.5 (Criterio de diseño) se procede al cálculo del caudal de diseño, conociendo previamente la potencia de demanda en kW, la densidad del agua a una temperatura promedio y el salto bruto de la instalación. Una vez obtenido el caudal de diseño y haciendo uso de información histórica de caudales del afluente se procede a verificar su viabilidad.
MaterialTuberia.m	Determinado el caudal de diseño, se procede a calcular el diámetro de la conducción o tubería de presión, haciendo uso de una ecuación que optimiza las pérdidas de energía y el costo de la tubería. Este diámetro interno calculado debe corregirse seleccionando un diámetro nominal de tubería que se ajuste al requerimiento. Para el cálculo del material de la tubería se consideran 2 materiales: Polietileno y Acero, mediante un análisis de presión producida por golpe de ariete se selecciona el material.

Tabla 8. (Continuación)

RPMCalculator.m	Calculado el salto neto y el caudal de diseño se procede a realizar el cálculo preliminar de revoluciones de giro de la turbina, haciendo uso de dos parámetros. El primero de ellos es la velocidad específica y el segundo el diagrama Salto vs Caudal disponible en la literatura, donde se muestra la zona de aplicación de cada turbina. Para este proyecto se hace uso de turbinas Pelton, Francis y Kaplan. RPMCalculator haciendo uso de las ecuaciones empíricas (108, 109 y 110), calcula la velocidad específica para cada turbina en una aproximación inicial, gracias a esta información es posible calcular las RPM a la que giraría cada turbina, luego por el criterio de velocidad síncrona de un generador se busca encontrar la o las turbinas que cumplan con el uso de un generador comercial. Para definir cuál turbina seleccionar y así obtener las RPM. Se comparan los resultados con el diagrama Salto-Caudal.
ProgInicial.m	Haciendo uso de la RPM calculada y conociendo la potencia de demanda y el salto neto se calcula la velocidad específica de la turbina y se selecciona de acuerdo con este valor.
SelecciónTurbina.m	En este punto ya se conoce la turbina seleccionada y se procede a realizar su respectivo diseño hidráulico. Se presenta información preliminar al usuario y se habilita para que continúe con el análisis económico.
AnálisisEconomico.m	Se pide al usuario información económica básica como % de inflación pronosticada para el año próximo, tasa de cambio del dólar a pesos colombianos, costos específicos de energía en \$/kW-h, tasa social de descuento entre otros. Esta información es utilizada por la herramienta para calcular 4 factores económicos que me adviertan de una factibilidad o no factibilidad del proyecto tales como: VPN, TIR, tiempo de recuperación y relación costo/beneficio. Haciendo uso de las ecuaciones de ingeniería económica donde se tiene en cuenta el valor del dinero en el tiempo.
CostosCalculator.m	Recibe los datos obtenidos desde la interfaz de Análisis Económico y realiza mediante uso de ecuaciones económicas una línea del tiempo donde se ubican los ingresos y egresos pronosticados en el proyecto durante su vida útil. Se simplifican los cálculos suponiéndose un valor de mercado igual a cero el último año. Además, es el encargado de calcular el valor en dólares por kW instalado del proyecto, este valor se obtiene reemplazando el valor de la potencia de demanda en una ecuación obtenida empíricamente de un análisis de centrales hidroeléctricas de baja potencia existentes en Colombia. Además, divide el costo inicial calculado del proyecto en porcentajes de acuerdo con datos históricos donde se asigna un % de costo a cada ítem de importancia en una central, tales como: obras civiles, equipo electromecánico, seguros, estudios, imprevistos entre otros.

Tabla 8.(Continuación)

REPORTE.m	Matlab posee una buena comunicación con el paquete ofimático de office. Se creó una plantilla en Word que permite la exportación de datos y presentación ordenada y amigable con el usuario.
DEMANDA.xlsm	Archivo de Excel donde se desarrolla el cálculo de la demanda por potencia y energía de la comunidad para n años de vida útil del proyecto. Se hace uso potencias nominales de electrodomésticos comunes en el hogar. La hoja de cálculo realiza la estimación de la potencia teniendo en cuenta 3 sectores o principales consumidores: sector residencial, sector comercial y servicios públicos. Además, se hace uso de proyecciones de crecimiento de la demanda de energía en Colombia para calcular la energía y potencia año tras año.
CAUDALES.xlsm	Este archivo de Excel permite al usuario introducir información hidrológica del afluente tal como caudales diarios, semanales, quincenales o mensuales. Esta información se importa al programa y se procesa para el cálculo de la energía firme y viabilidad del proyecto.
Pariete.xlsx	Archivo de Excel propiedad de: http://www.hidrojing.com utilizado para el cálculo de sobrepresión por golpe de ariete para la posterior selección del material de la tubería de presión. Debe destacarse que se realizaron modificaciones con el fin de adaptarse al programa HidroEnergía PRO.

8.2.1 Demanda

En cuanto a cálculo de la demanda, HidroEnergía PRO provee de dos opciones al usuario. La primera asume que el usuario conoce la demanda y la vida útil estimada del proyecto. Este es el camino sencillo y rápido, según Corpoema⁹⁷ la vida útil de pico y minicentrales oscila entre los 5 y 30 años. Ver Figura 64.

⁹⁷CORPOEMA, consorcio energético; UPME. Plan nacional de fuentes no convencionales de energía [En línea]. Bogotá, 2010. [Consultado: 13 de febrero de 2018]. Disponible en internet: http://www.upme.gov.co/sigic/informes/informe_avance_01.pdf

Tabla 9. Vida útil de pico y minicentrales hidroeléctricas.

Tecnología de Generación	Vida equipos (yr)	Fuera de red		Minired		Conectados a red	
		Capacidad (W)	Factor Capacidad (FC%)	Capacidad (kW)	Factor Capacidad (FC%)	Carga base	
						Capacidad (MW)	Factor Capacidad (FC%)
Geotermicas binarias	20			200	70		
Geotermicas binarias	30					20	90
Geotermicas flash	30					50	90
Solar FV	20, 25	50, 300	20	25	20	5	20
Centrales solares con almacenamiento	30					30	50
Centrales solares sin almacenamiento	30					30	20
Eólica - generación electricidad	20	300	25	100	20	10, 100	30
Híbridos Solar-Eólico	20	300	20	100	20		
Gasificador de Biomasa	20			100	80	20	90
Vapor de biomasa	20					50	90
Gas de relleno sanitario	20					5	80
Biogas	20			60	80		
Hidro Pico	5	300	30				
Hidro Pico	15	1000	30				
Hidro Pico	30			100	30		
Hidro Mini	30					5	45
Nuclear	40					1000	90

Fuente: CORPOEMA, consorcio energético; UPME. Plan nacional de fuentes no convencionales de energía [En línea]. Bogotá, 2010. [Consultado: 13 de febrero de 2018]. Disponible en internet: http://www.upme.gov.co/sigic/informes/informe_avance_01.pdf

Las obras civiles de un proyecto poseen una vida útil mayor a los elementos electromecánicos, para estos casos de aproximadamente 50 años. En HidroEnergía PRO Se deja la posibilidad de seleccionar una vida útil de hasta 35 años para el proyecto completo, vida útil que puede alcanzarse fácilmente con un adecuado mantenimiento de la central.

En la cuarta columna el factor A, representa el % de utilización del electrodoméstico en cada rango horario, esto debido a que algunos electrodomésticos trabajan de manera intermitente o ahorran energía consumiendo menos potencia de la nominal. El porcentaje de utilización A oscila entre un valor de 0 y 1. 1 corresponde al 100% de utilización a potencia nominal durante todo el periodo de tiempo.

8.2.1.1 Demanda haciendo uso de hoja de cálculo.

Se definen los 3 objetivos principales de la hoja de cálculo:

- Conocer la demanda de potencia pico en un día normal en el año cero, es decir que en un instante del día el consumo de potencia simultáneo será mayor a todos los demás. La central debe ser capaz de suplir esta demanda de potencia así ocurra solo en un instante del día.
- Conocer o estimar el consumo de potencia y energía año tras año durante la vida útil de proyecto para diseñar la central en base a la demanda del último año.
- Estimar la hora del día en la que existe mayor demanda de potencia.

Para conocer la demanda pico de potencia se hace uso de la tabla mostrada en la figura 65.

En esta hoja de Excel se le permite al usuario, calcular tanto demanda residencial como industrial y de servicios públicos básicos.

Por simplicidad, solo se muestra la tabla para el cálculo de demanda residencial, en el Anexo C puede consultar la tabla completa

La tabla contiene una lista de electrodomésticos comunes en los hogares con sus respectivas potencias nominales dadas en Watts. En la columna 3 el diseñador debe

poner el número de familias que tienen o poseerán cada uno de los electrodomésticos de la lista. Los electrodomésticos que no aparecen en la lista y existan en la comunidad, podrán agregarse manualmente a la hoja de cálculo.

Tabla 10. Cuadro de demanda.

1. DEMANDA RESIDENCIAL																	
UTILIDAD	POTENCIA	n	A	HORARIO DE USO (Horas) <i>Escriba el numero 1 si usa energía en ese rango horario. Ver ejemplo</i>												Energía kW-h	
Item	Watts	#	%	0-2am	2-4am	4-6am	6-8am	8-10am	10-12m	12-2pm	2-4pm	4-6pm	6-8pm	8-10pm	10-12pm	Día	Año
<i>Ejemplo (Televisor)</i>	150	300	0,80					1	1	1			1	1			
Iluminación sala	60	0	0,80														
Iluminación cocina	60	0	0,80														
Iluminación hab, 1	60	0	0,80														
Iluminación hab, 2	60	0	0,80														
Iluminación hab, 3	60	0	0,80														
Iluminación baño	60	0	0,50														
Iluminación entrada	60	0	1,00														
Nevera	250	0	0,25														
Licuadaora	350	0	0,10														
Estufa eléctrica	2000	0	0,25														
Horno Microondas	1000	0	0,20														
Televisor	150	0	0,80														
Equipo de sonido	120	0	0,30														
Grabadora	40	0	0,80														
Ventilador	100	0	0,40														
Modem WiFi	12	0	0,80														
Télefono	25	0	0,80														
Plancha	1070	0	0,20														
Maquina de coser	110	0	0,20														
Lavadora	1050	0	0,65														
Otros	0	0	0,00														
Subtotal	0															0	0

En las siguientes columnas de la tabla se encuentran los horarios de uso en rangos de 2 horas, comenzando desde la 00:00h hasta las 24:00h teniendo en total 12 rangos horarios. Se establecieron de esta manera por comodidad del usuario, debido a que este debe llenar la hoja de cálculo, entre menor sean los rangos mayor cantidad de datos se deben introducir.

El usuario debe asignar un número 1 en la celda donde se intercepte el rango horario y el electrodoméstico utilizado en él.

La hoja de cálculo internamente realiza la siguiente operación para calcular el consumo de potencia en este rango horario.

$$Pot_{total_{12-2pm}} = POTENCIA(W) \times n \times A \quad (105)$$

Multiplica la potencia nominal de cada electrodoméstico, por el número total de estos y multiplicado el factor de utilización.

En cada casilla donde el usuario asigne un número 1. Se realizará este cálculo interno de potencia total.

Una vez llena la tabla, esta automáticamente realiza una sumatoria de potencias en cada rango horario (las celdas están ocultas, se dejan visibles para mejor comprensión de la explicación). Ver Figura 66.

Tabla 11. Sumatoria de potencias de demanda en diferentes rangos horarios.

Item	Watts	#	%	0-2am		2-4am		4-6am		6-8am	
<i>Ejemplo (Televisor)</i>	150	300	0,80								
Iluminación sala	60	50	0,80	2400	1	0		0		2400	1
Iluminación cocina	60	60	0,80	0		0		0		2880	1
Iluminación hab, 1	60	40	0,80	0		1920	1	0		0	
Iluminación hab, 2	60	60	0,80	0		2880	1	0		0	
Iluminación hab, 3	60	13	0,80	0		0		0		0	
Iluminación baño	60	25	0,50	0		750	1	0		0	
Iluminación entrada	60	45	1,00	2700	1	2700	1	2700	1	0	
Nevera	250	100	0,25	6250	1	6250	1	6250	1	6250	1
Licuadaora	350	0	0,10	0		0		0		0	
Subtotal	42580			11350		14500		8950		11530	

11350 W es el consumo de potencia en el rango horario de 0-2am, 14500 W ese el consumo de potencia en el rango horario de 2-4am, 8950 es el consumo de potencia en el rango horario de 4-6am, etc.

La Tabla 11 es solo un ejemplo, ya que no se muestran los demás rangos horarios. El usuario deber repetir el procedimiento de poner números 1 en los rangos horarios donde se utilice el ítem correspondiente en las demandas Comerciales y de Servicios públicos.

Una explicación más detallada sobre el uso del Excel por parte de un usuario se encuentra en el Manual de usuario. Ver ANEXO B

La hoja de cálculo deber evaluar el rango horario en el que se presenta el mayor consumo de potencia total (Residencial, Comercial y Servicios públicos.)

$$Pot_{pico} = (Pot_{residencial} + Pot_{comercial} + Pot_{servicios}) \max \quad (106)$$

En la tabla de la Figura 67. Se ponderan los resultados de la demanda residencial (R), demanda Comercial (C) y demanda de servicios públicos (SP) en los distintos rangos horarios.

Tabla 12. Ponderación de potencias.

DEMANDA	HORARIO DE USO (Horas)												Ganador
	0 a 2	2 a 4	4 a 6	6 a 8	8 a 10	10 a 12	12 a 14	14 a 16	16 a 18	18 a 20	20 a 22	22 a 24	Watts
R	7392	11136	2688	11136	7392	6432	6432	7392	11136	2688	11136	7392	11136
C	112500	112500	112500	112500	0	0	112500	961500	961500	961500	112500	0	961500
S P	357500	357500	357500	275000	357500	357500	357500	357500	357500	357500	357500	275000	357500
TOTAL	477392	481136	472688	398636	364892	363932	476432	1326392	1330136	1321688	481136	282392	1330136

El rango horario con la potencia total dada en W de mayor valor, corresponde a la potencia tentativa de diseño. Únicamente hace falta tener en cuenta la variación de la demanda con el tiempo, en la que se supondrá un crecimiento. Anualmente la demanda de potencia se incrementará en un porcentaje respecto al año anterior.

Tabla 13. Proyección de demanda de energía y potencia UPME.

PROYECCIÓN DEE TOTAL NACIONAL %				PROYECCIÓN DPMÁX TOTAL NACIONAL %			
Año	Esc. Alto	Esc. Medio	Esc. Bajo	Año	Esc. Alto	Esc. Medio	Esc. Bajo
2017	3,4%	2,2%	0,9%	2017	8,1%	4,1%	0,3%
2018	5,6%	4,3%	3,1%	2018	3,5%	3,5%	3,6%
2019	3,2%	3,2%	3,2%	2019	2,2%	2,2%	2,2%
2020	3,2%	3,2%	3,3%	2020	2,5%	2,5%	2,6%
2021	3,2%	3,2%	3,2%	2021	2,6%	2,6%	2,7%
2022	2,7%	2,7%	2,7%	2022	1,9%	1,9%	1,9%
2023	2,3%	2,3%	2,3%	2023	1,4%	1,4%	1,4%
2024	2,5%	2,5%	2,5%	2024	1,6%	1,6%	1,6%
2025	2,6%	2,6%	2,6%	2025	1,7%	1,7%	1,7%
2026	2,6%	2,6%	2,6%	2026	1,8%	1,8%	1,8%
2027	2,7%	2,7%	2,7%	2027	1,8%	1,8%	1,8%
2028	2,7%	2,7%	2,7%	2028	1,8%	1,8%	1,8%
2029	2,8%	2,8%	2,8%	2029	1,9%	1,9%	1,9%
2030	2,8%	2,8%	2,8%	2030	1,9%	1,9%	1,9%
2031	2,9%	2,9%	2,9%	2031	2,1%	2,1%	2,0%

Fuente: SIEL. Electricidad: Sistema de información eléctrico colombiano [En línea]. Bogotá, Colombia. (Recuperado en 05 febrero 2018.) Disponible en: http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/UPME_Proyeccion_Demanda_Energia_Julio_2017.pdf

8.2.2 Potencial Hidroenergético

El cálculo del potencial hidroenergetico depende de 2 variables principalmente: el salto neto y el caudal. El software permite al usuario realizar una estimación del salto neto haciendo uso de algoritmos que mediante información geográfica

obtienen el salto bruto disponible en el proyecto, posteriormente mediante un análisis de pérdida de carga en tubería se calculan las pérdidas mayores y menores. Conjuntamente se calcula el caudal de diseño, el diámetro de la tubería y su material.

$$H_n(m) = H_b(m) - h_{pérd}(m) \quad (106)$$

Hn: Salto neto [m]

Hb: Salto bruto [m]

hpérd: Sumatoria de pérdidas mayores y menores. [m]

Se debe confrontar la información de la demanda y el potencial hidroenergetico para determinar la viabilidad del proyecto. La principal limitante es el caudal y para conocer su disponibilidad se debe realizar un estudio hidrológico del afluente.


HidroEnergía PRO permite al usuario importar estos datos hidrológicos y de manera automática verificar la viabilidad del proyecto conociendo a priori el caudal de diseño requerido.

$$Q_{diseño} \left(\frac{m^3}{s} \right) = \frac{Pot_{demanda}(kW)}{\rho \times g \times Hn \times \eta_{global}} \quad (107)$$

Para ello se hace uso de la curva de caudales clasificados. HidroEnergía PRO tiene como criterio que la suma del caudal de diseño más el caudal ecológico debe ser como mínimo igual o superior a unQ75, que corresponde a un caudal con un % de excedencia del 75% a lo largo del año.

En la figura 69 se muestra el formato de Excel utilizado por la herramienta para solicitar la información al usuario. Esta información puede presentarse en diferentes frecuencias según se requiera, HidroEnergía PRO permite introducir datos diarios, semanales, quincenales o mensuales para mayor comodidad del usuario.

Tabla 14. Hoja de Excel para introducir datos históricos de caudales.

		Hidro Energía PRO CALCULOS HIDROLOGICOS EN BASE A DATOS HIDRICOS Introduzca en el cuadro los datos hídricos según sea su naturaleza El calculo sera más certero entre mas cantidad de datos sean ingresados Nota: la mínima cantidad de datos aceptada sera la de un año y la recomendada de 10 años		
1. INGRESO DE DATOS SEGÚN SU ESTRUCTURA EN m ³ /s				
Llene solo una columna con los datos de caudal según corresponda				
UNIDAD	Promedio diario [m3/s]	Promedio semanal [m3/s]	Promedio quincenal [m3/s]	Promedio mensual [m3/s]
1		0,0135		
2		0,013		
3		0,012		
4		0,0121		
5		0,012		
6		0,011		
7		0,0115		
8		0,0118		
9		0,0119		
10		0,012		
11		0,0122		
12		0,0123		
13		0,0128		
14		0,0132		
15		0,0155		

8.2.3 Selección de la Turbina

HidroEnergía PRO determina el tipo de turbina más conveniente basado principalmente en el criterio de velocidad específica. Como es sabido, en el cálculo de la velocidad específica intervienen parámetros tales como: salto neto, potencia y revoluciones de la turbina.

Las revoluciones de la turbina no se conocen de antemano y deben calcularse para poder obtener la velocidad específica. Para ello HidroEnergía PRO hace uso de correlaciones empíricas obtenidas de la experiencia de muchos años, en la construcción de centrales hidroeléctricas, dichas correlaciones permiten calcular la velocidad específica de la turbina en función únicamente de su altura de trabajo o salto neto.

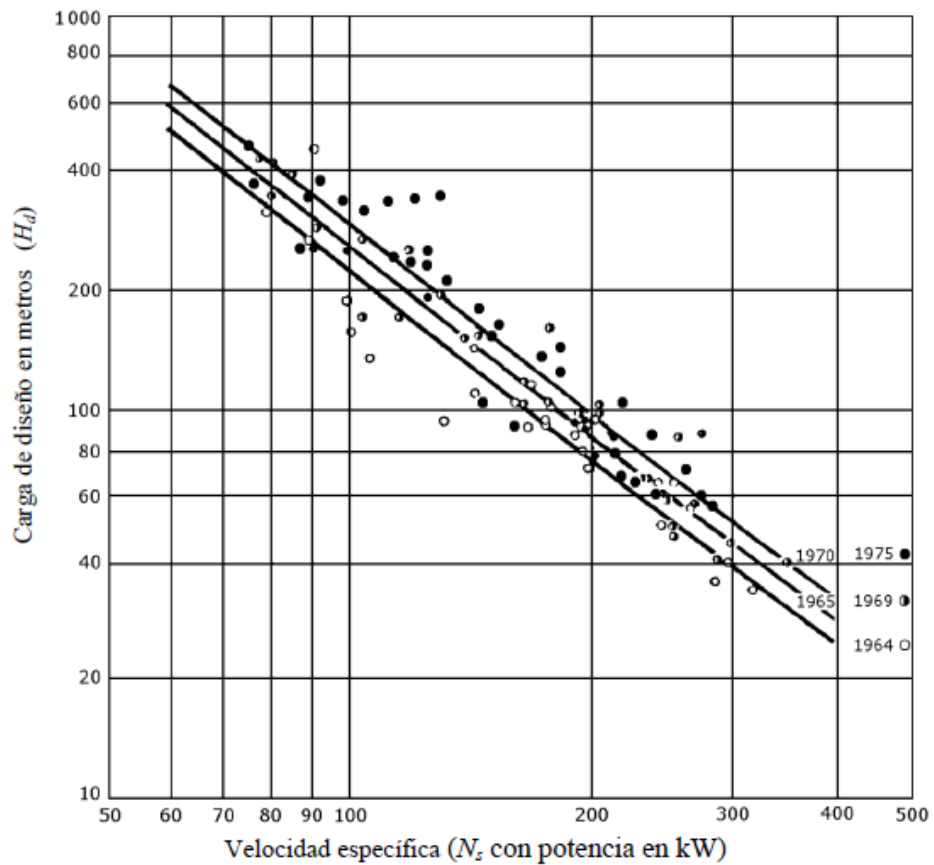
A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para cada una de las turbinas de interés en este proyecto.

$$N_{S_{Francis}} = 3470 \times H_n^{-0.625} \quad (108)$$

$$N_{S_{Kaplan}} = 2419 \times H_n^{-0.489} \quad (109)$$

$$N_{S_{Pelton}} = 85.49 \times H_n^{-0.243} \quad (110)$$

Figura 56. Gráfico de dispersión para turbinas Francis.



Fuente: GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. 121p.

Al reemplazar el salto neto en las correlaciones se obtienen 3 velocidades específicas diferentes. El programa realiza un cálculo inverso, partiendo del conocimiento de la potencia de la turbina, el salto neto y la velocidad específica para calcular las revoluciones por minuto o RPM de la turbina para cada tipo de ellas.

Una vez determinada las 3 revoluciones el programa calcula el número de polos requeridos por un generador síncrono acoplado directamente al eje de la turbina y se utiliza este criterio para descartar a la turbina que exija un número de polos inferior a 2 o un número de polos superior a 48. De la siguiente manera.

$$NoPo = 120 \times \frac{f}{RPM_{turbina}} \quad (111)$$

$$2 \leq NoPo \leq 48 \quad (112)$$

No necesariamente se obliga al usuario a adquirir un generador de número de polos elevado, debido a su alto coste, como alternativa ha de utilizarse un multiplicador o sistema de transmisión como, por ejemplo: correas.

Aun así, limitando el número de polos, se puede que los tres tipos de turbinas cumplan con el requerimiento, en este punto el programa hace uso del conocido diagrama Salto-Caudal para selección de turbinas.

HidroEnergía PRO tiene una subrutina que selecciona el tipo de turbina en función de estos dos parámetros (Salto y Caudal) y posteriormente compara este resultado con el resultado del proceso anteriormente realizado. Seleccionando así a la turbina y obteniéndose una primera estimación de la velocidad de rotación de esta.

Con la velocidad de rotación seleccionada, se recalcula el Ns debido a que las velocidades específicas estaban calculadas con la potencia en kW y en la literatura encontramos este parámetro en función de la potencia en CV.

Una vez hecho esto, notaremos un leve incremento en el valor de la velocidad específica y se procede a la selección de la turbina de manera definitiva.

8.2.4 Costos

La forma utilizada para calcular en una primera aproximación el costo de una pequeña central es mediante comparación con de centrales construidas. Cada una de estas posee un costo por unidad de kilovatio generado. USD\$/kW.

Haciendo uso de los datos mostrados en la figura 71 se obtiene la curva representada en la figura 72. Curva de color rojo punteada. La curva posee un error muy alto, pero puede utilizarse como primera aproximación, ya que, si se observa, tiene un comportamiento que oscila entre valores de costo unitario.

Tabla 15. Costos unitarios de PCH's.

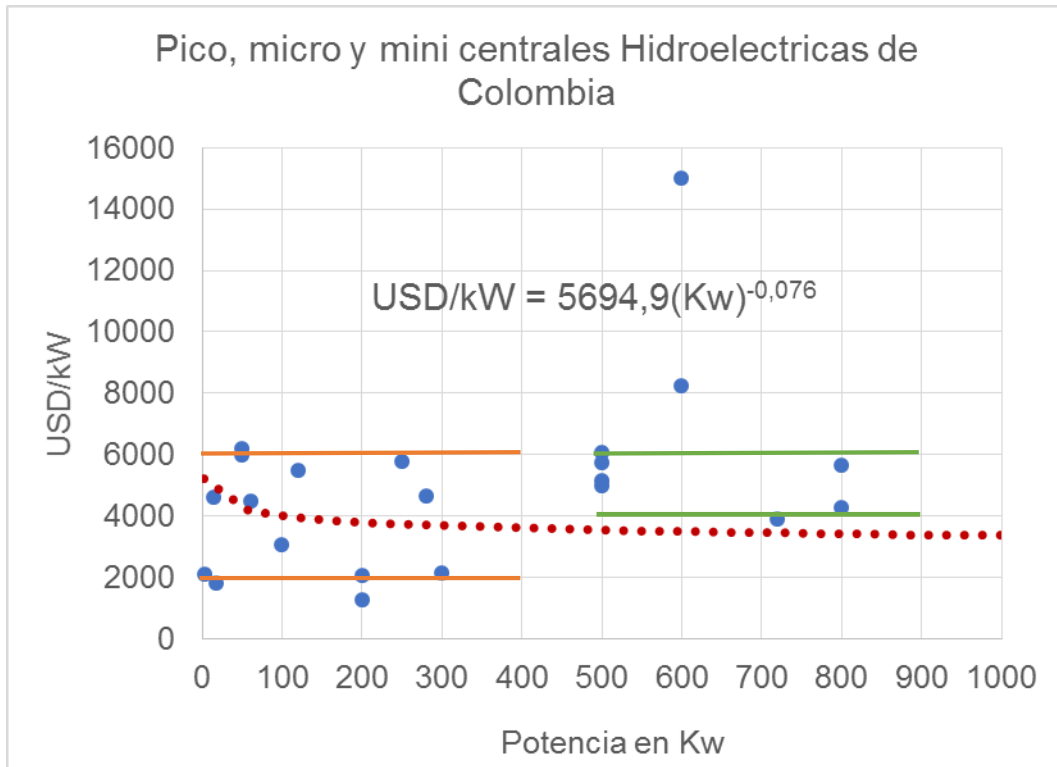
PROYECTO	Potencia Kw	Costo US\$/Kw	FACTOR DE LA PLANTA
PATICO ETAPA I	1,400	3,217	0.60
PATICO ETAPA II 92 mts	12,500	1,738	0.90
PATICO ETAPA II 119 mts	16,300	1,703	0.90
PISBA	61	4,500	0.55
GUACAMAYAS	50	6222	0.55
PAYA	50	6000	0.55
MOCOA	22,000	1450	0.55
TAME	2,000	3400	0.55
YOPAL-AGUAZUL	4,800	2900	0.55
BAHIA SOLANO	2,220	4510	0.55
ALTAQUER	2,000	2623	0.55
LOPEZ-PUERTO SERGIO	600	15000	0.55
SANTA ROSA	500	4985	0.55
JURADO	800	4275	0.55
UNGUIA	1,100	5780	0.55
EL CALVARIO	200	2060	0.55
MITU	3,200	3500	0.55
SAN PEDRO	15,000	1310	0.55
MESETAS	720	3900	0.55
NUNCHIA	500	6071	0.55
SALINA	500	5171	0.55
ACANDI	250	5800	0.55
MACARENA	600	8250	0.55
GUAPI-NADY	13,500	3000	0.55
GUAPI-BRAZO SECO	16,400	2244	0.55
TIMBIQUI-BRIZO	800	5654	0.55
TIMBIQUI-PORVENIR	500	5745	0.55
CALI I-II	1,710	2450	0.55
LA RIVERA	280	4650	0.55
RIO FRIO	1,700	1950	0.55
PALMOR	300	2144	0.55
RIO PIEDRAS	200	1266	0.55
CARACOLI	100	3060	0.55
MACHOSOLO	17	1800	0.55
SAN LUCAS	120	5500	0.55
RIO FRIO II	9,800	1826	0.55
GORGONA	15	4600	0.55
DELICIAS	3	2100	0.55

Fuente: CORPOEMA, consorcio energético; UPME. Plan nacional de fuentes no convencionales de energía [En línea]. Bogotá, 2010. [Consultado: 13 de febrero de 2018]. Disponible en internet: http://www.upme.gov.co/sigic/informes/informe_avance_01.pdf

Haciendo la gráfica de dispersión se observa como en centrales de potencia inferior a 400 kW el precio específico por kW oscila entre 2000 y 6000 dólares

aproximadamente, en cambio para centrales de más de 500 kW el precio específico oscila entre 4000 y 6000 dólares.

Figura 57. Precio específico en centrales de diferente capacidad.



No se presentan los datos con potencias superiores a 1000 kW debido a que están fuera del rango de operación de la herramienta computacional, pero si se graficaran se vería como el costo específico disminuye al incrementar la potencia.

Corpoema⁹⁸ hace la siguiente recomendación de costo específico (USD/kW) en función de la potencia.

Tabla 16. Proyección de costos en pico y microCHE en función de la potencia.

Capacidad	2010	2015	2020
300 W	1.676	1.659	1.642
1 kW	2.994	2.876	2.848
100 kW	2.904	2.759	2.737

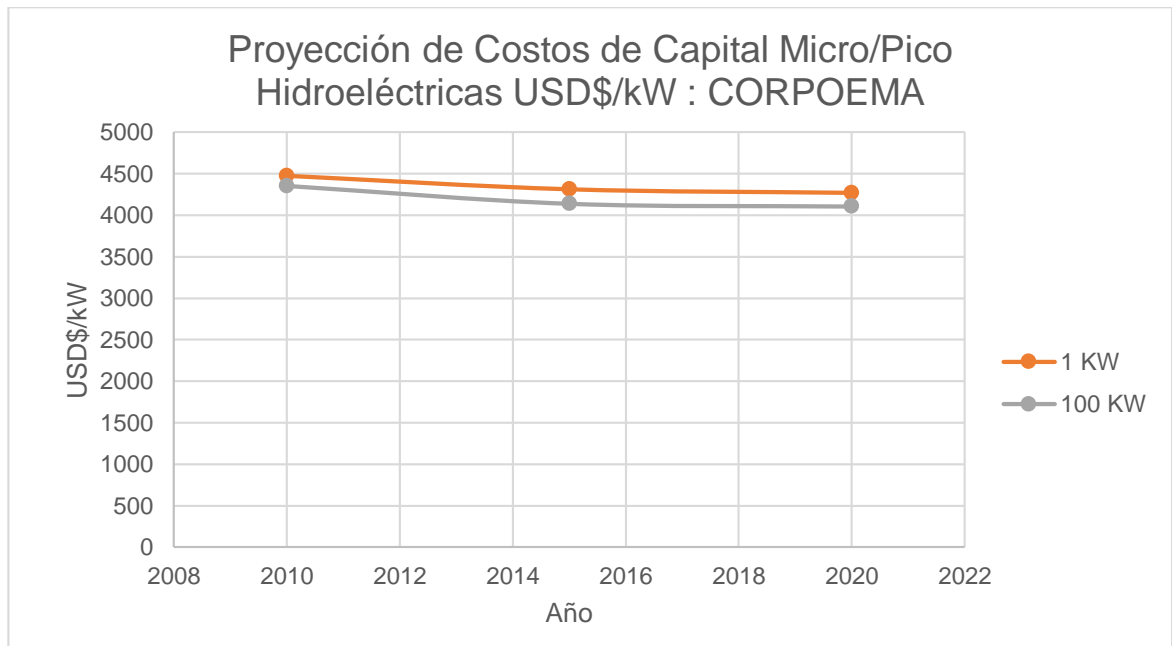
Fuente: CORPOEMA, consorcio energético; UPME. Plan nacional de fuentes no convencionales de energía [En línea]. Bogotá, 2010. [Consultado: 13 de febrero de 2018]. Disponible en internet: http://www.upme.gov.co/sigic/informes/informe_avance_01.pdf

“Para la proyección de costos de generación se ha considerado que en los últimos años el precio se ha mantenido, y tiende a disminuir de acuerdo al libre mercado de equipos.”⁹⁹

⁹⁸ CORPOEMA, consorcio energético; UPME. Plan nacional de fuentes no convencionales de energía [En línea]. Bogotá, 2010. [Consultado: 13 de febrero de 2018]. Disponible en internet: http://www.upme.gov.co/sigic/informes/informe_avance_01.pdf

⁹⁹ *Ibíd.*, p. 3.

Figura 58. Datos linealizados de la figura 73.

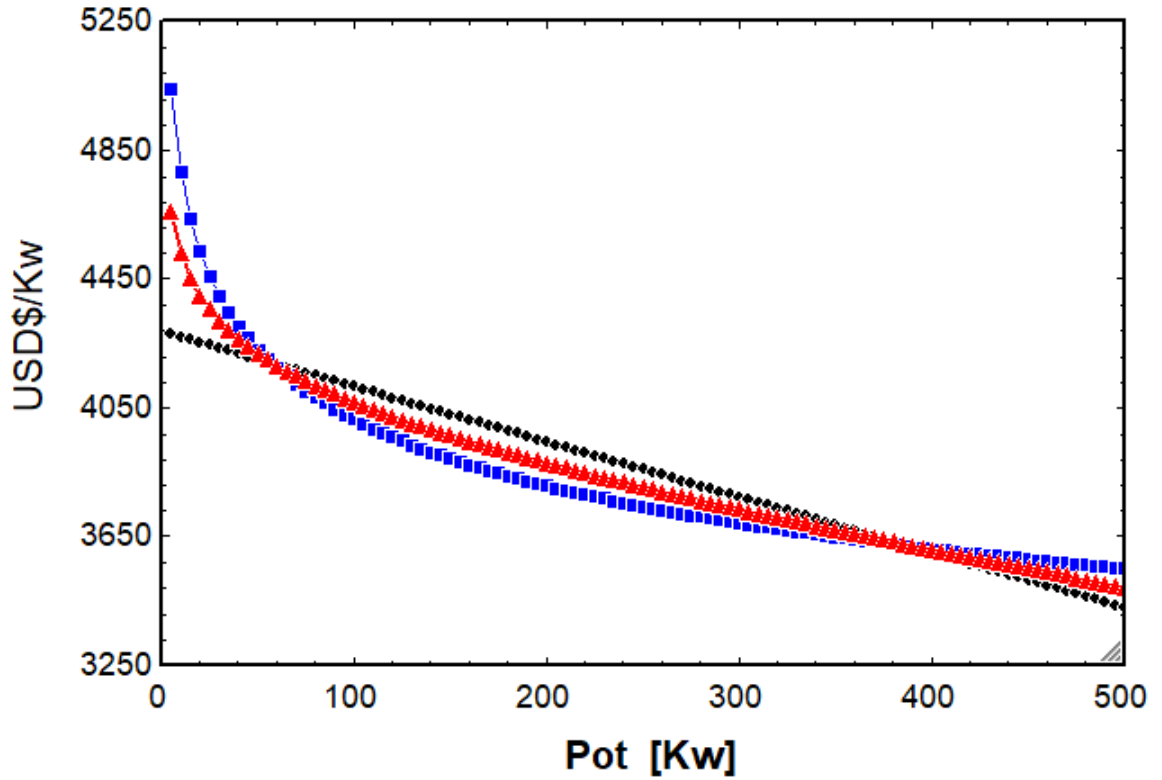


Realizando esta interpolación se logró obtener la siguiente ecuación que estimar en el año 2018 el costo por kW para centrales entre 1 y 100 kW.

$$\left(\frac{USD\$}{kW}\right)_{corpoema} = -1,713 * Potencia(Kw) + 4290,51 \quad (113)$$

Se grafica la ecuación de Corpoema junto a la ecuación obtenida de regresión. Se agrega una tercera curva de color rojo Ver figura 75. Que representa el valor medio de estas dos curvas (Azul y negro).

Figura 59. Costo por kW.



$$\frac{USD\$}{kW} = \left(\left(\frac{USD\$}{kW} \right)_{corpoema} + \left(\frac{USD\$}{kW} \right)_{INEA} \right) / 2 \quad (114)$$

Una vez obtenido el costo unitario, se multiplica por la potencia de demanda y se obtiene el precio inicial estimado del proyecto.

Ahora se deben asignar porcentajes de costo inicial a cada uno de partes principales de las que se compone un proyecto hidroeléctrico.

Cuatro fuentes analizadas arrojaron los siguiente % de costo inicial, a cada uno de los ítems de la tabla, se halló el promedio, luego se realizó un ajuste en el valor para que se lograra en la sumatoria un valor igual o cercano al 100%. Los valores ajustados tuvieron en cuenta que no debían sobrepasar o ser menores a los valores de la tabla.

Tabla 17. Analisis de fuentes para el % de costos.

Item	% Costo Inicial				%	%
	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	Fuente 4	PROMEDIOS	AJUSTADOS
Obras civiles	30	38	41,61	46,1	38,9	37
Hidrogrupo	24	33,5	29,72	19,1	26,6	25
Accesorios equipo	11,5	10			10,8	10
Diseño, Ingeniería y otros.	20	18,5	9,67	11	14,8	13
Imprevistos y Seguros			6,81	9,7	8,3	6,81
Estudios y gastos iniciales e inversión social	10		11	8,9	10,0	8,9
Otros	4,5	0	1,19	5,2	2,7	
TOTAL					112,0	100,71

Con ello se dispuso de las siguientes proporciones de costo inicial.

$$Obras_{civiles} = 0.37 * Costo_{inicial} \quad (115)$$

$$Hidrogrupo = 0.25 * Costo_{inicial} \quad (116)$$

$$Accesorios_{equipo} = 0.1 * Costo_{inicial} \quad (117)$$

$$Diseño_{Ingeniería} = 0.13 * Costo_{inicial} \quad (118)$$

$$Estudios = 0.089 * Costo_{inicial} \quad (119)$$

$$Imprevistos = 0.068 * Costo_{inicial} \quad (120)$$

9. PRUEBAS Y RESULTADOS

Tabla 18. Análisis de métodos para el estudio de turbomáquinas.

Metodos para el estudio y diseño de maquinas hidraulicas	Concepto	Ventajas	Desventajas
Metodo analitico	Fundamentado en el estudio del movimiento del fluido a traves de los alabes, según principios de mecanica de fluidos	Modelos matematicos con variables de entrada y salida, rapido y directo despues de solucionar ecuaciones	Existen limites, a veces se idealiza y simplifica mucho, lo que los aleja de lo real
Metodo experimental	Fundamentado en la formulacion empirica de la hidraulica y la experimentacion	Se utilizan datos reales, a escala o en condicion de operaci3n, los resultados suelen ser buenos	Suelen ser mas costosos, y con un tiempo de duracion mas extenso
Metodo de analisis numericos	Ofrece relaciones entre variables que interactuan en el proceso, confirmando coeficientes de funcionamiento y numeros adimensionales	Aunque en el metodo tambien existen simplificaciones, suele ser mas exacto que el analitico dependiendo el analisis	Suelen ser mas costosos y con necesidad de mas tiempo para representar todas las variables

9.1 ANÁLISIS ENTRE EL MÉTODO TRADICIONAL Y EL PLANTEADO EN EL PROYECTO.

9.1.1 Método tradicional

El método tradicional de diseño hidroeléctrico se caracteriza por ser lento, costoso y por tener diversos pre-análisis que deben ser calculados por separado, por ejemplo: para la creación de una central de pequeña escala, se debe realizar un estudio socioeconómico, que puede generar costos y tiempo, un análisis por un tiempo considerable de las cuencas hidrográficas con potencial energético que también acarrearán costos indirectos, el diseño y construcción civil, que aparece luego de los estudios previos y paralelamente el diseño hidráulico, que es necesario finalmente para la selección del sistema turbogenerador, únicamente si es viable el proyecto.

Es necesario realizar también un análisis económico que garantice al operador de la planta, operar con una tasa de retorno que permita por lo menos superar el total de los gastos generales, por construcción, operación y mantenimiento de la misma, costos que, en este momento en el país, son muy altos por la forma en que se suministra energía en las ZNI.

9.1.2 Método desarrollado a través de la herramienta computacional

Como se planteó en el capítulo anterior, el proyecto del software de diseño hidráulico HidroEnergía PRO, se creó para facilitar la laboriosa tarea que se requiere, en el análisis de viabilidad de un proyecto hidroenergético.

El software HidroEnergía PRO:

- Calcula la posible demanda energética de una comunidad no interconectada, llevándola además a futuro, para que el proyecto tenga durabilidad y funcionalidad en el tiempo.
- Realiza los cálculos respectivos referentes al caudal que ofrece el río, y el caudal ecológico que se debe respetar del mismo; esto para analizar la viabilidad que, en términos de flujo de agua y altura geodésica, son potencialmente aprovechables en una zona específica; además tiene en cuenta las pérdidas por tubería de presión, que permiten analizar la verdadera altura potencialmente aprovechable en el sistema.
- Da información de la posibilidad del proyecto, y se encarga de realizar la selección de la respectiva turbomáquina que cumple con las condiciones de generación relacionadas con los datos anteriormente expuestos.
- Realiza el diseño hidráulico aportando al usuario, las respectivas dimensiones de la turbina hidráulica, dependiendo del tipo seleccionado.

Finalmente arroja un informe en el que se exponen todos los valores y variables de interés, además se dan unas recomendaciones de mantenimiento y control de equipos en las mismas.

El programa HidroEnergía PRO utiliza para el diseño en general:

- Ecuaciones de la mecánica de fluidos, para el diseño de tuberías, turbinas y ducto de aspiración
- Correlaciones empíricas generadas de proyectos existentes
- Correlaciones experimentales analizadas en laboratorio
- Ecuaciones para el análisis estadístico de costos y demanda energética
- Ecuaciones y métodos propuestos por MIN ambiente para el cálculo del caudal ecológico en un posible proyecto.

Todo el proceso planteado anteriormente, resulta extenso y en muchos casos algo complicado; el software HidroEnergía PRO, tiene como misión principal, disminuir

la complejidad del análisis económico y del diseño hidráulico de una pico micro y mini CHE, con aras en la aplicación y uso del software en proyectos en las ZNI, muchas de las cuales no cuentan con suministro eléctrico.

Tabla 19. Comparacion 1 entre el diseño comun y el asistido por el software.

TABLA COMPARATIVA ENTRE EL DISEÑO SIN SOFTWARE Y EL ASISTIDO POR LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HIDROENERGÍA PRO		
CRITERIO	DISEÑO TRADICIONAL	DISEÑO CON SOFTWARE
Facilidad del proceso	Se debe tener conocimiento de los datos, búsqueda, cálculo e identificación de variables para el cálculo hidráulico, requiere de tiempo y cuidado, además de personal y recursos.	La utilización de una herramienta computacional, sintetiza cada uno de los pasos del diseño, requiriendo menor personal multidisciplinario, para un acercamiento inicial del proyecto
Aplicabilidad	Es el utilizado comúnmente, y únicamente puede ser desarrollado por personal competente, que finalmente es quien da resultado del proceso. Es más utilizado en el diseño y construcción	Cualquier persona, con conocimientos básicos de ingeniería, puede hacer uso de la herramienta, por su facilidad y por la ayuda que representa en la planeación de un proyecto al realizar una aproximación inicial.
Alcance	El objetivo principal de diseño tradicional es obviamente la obtención de un diseño real y aplicable; este diseña o selecciona cada uno de los elementos presentes en un proyecto hidroeléctrico.	El software está diseñado para su uso especialmente en análisis de viabilidad de proyectos, dimensionamiento y acercamiento al costo del diseño, pues no cuenta con el 100% de las variables de un proyecto. Sin embargo es una buena fuente objetiva y conservativa para ser utilizada como punto de partida.
Certeza	La certeza en el diseño tradicional es alta, pues debe ser realizado por personal capacitado, y los resultados son aplicables al proyecto.	Se programaron la mayoría de ayudas, criterios y procedimientos, lo que le da un alto grado de acercamiento, sin embargo no cubre, las posibles subjetividades de cada proyecto
Interacción con el usuario	Son utilizados manuales, teoría y correlaciones de diseño, que muchas veces son de interpretación compleja.	Es muy eficiente la interfaz, asiste al usuario llevándolo a cada paso fácilmente y evitando errores.
Economía	Generalmente se hace uso de consultoría en ingeniería para determinar la viabilidad económica de un proyecto, incrementando el costo inicial del mismo.	Es muy útil, especialmente en el estudio de viabilidad de proyectos, pues analiza todas las variables principales sin la necesidad de terceros haciéndolo mucho más económico y sinérgico.

Tabla 20. Comparacion 2 entre el diseño comun y el asistido por el software.

TABLA COMPARATIVA ENTRE EL DISEÑO SIN SOFTWARE Y EL ASISTIDO POR LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL HIDROENERGÍA PRO		
CRITERIO	DISEÑO TRADICIONAL	DISEÑO CON SOFTWARE
Flujo y análisis de información	El diseño no es completamente secuencial. Es común ver la participación de diferentes entidades en la revisión de cálculos de ingeniería para evitar posibles errores humanos.	El flujo de información es ordenado y secuencial, con ayuda de sistemas Poka Yoke se evitan los errores que un usuario pueda cometer en el proceso de diseño.
Tiempo de respuesta	Los tiempos pueden ser largos, y pueden estar sujetos al trabajo de diferente personal.	Se eliminan los tiempos largos de respuesta siendo eficiente, útil y rápido
Uso de herramientas externas	Se pueden utilizar herramientas externas que faciliten y ayuden a realizar el proceso de diseño.	El software cuenta con la interacción programada de ayudas externas como la herramienta google MyMaps, que permite conocer datos geográficos y el trazado de tramos de tubería en el mismo.
Presentación de resultados	Requiere de tiempo, trabajo y orden para la presentación de un informe final con dimensiones, recomendaciones etc.	La herramienta arroja un informe detallado de los datos calculados y recomendaciones, con un documento de fácil comprensión.
Beneficio de ZNI	Gran parte de las falencias energéticas en las ZNI son los altos costos iniciales representados por estudios requeridos para determinación de la viabilidad de un proyecto hidroeléctrico.	La herramienta computacional está diseñada para su aporte social y medioambiental en ZNI, disminuyendo costos de planificación y facilitando con el informe de resultados la creación de proyectos hidroenergeticos

9.1.3 Ventajas del software sobre el método tradicional.

Desarrolla estudios previos de factibilidad, sin necesidad de altos costos en el proceso, y además generando información que puede ser comparada con proyectos existentes o con datos de potencial energético estatales.

Mejora en términos económicos los costos de los análisis previos al diseño de una central hidroeléctrica, además aprovechando los bancos de información que poseen

el IDEAM, la UPME y otras entidades estatales, evitando la toma de datos hidrológicas y haciendo más viable un proyecto de esta envergadura.

Facilita al diseñador los cálculos hidráulicos y permite un acercamiento a la posible turbina seleccionada, contribuyendo a tener información económica previa, que haga a los proyectos hidráulicos competitivos con otras formas de generación más costosas y dañinas para el medio ambiente.

Brinda información y recomendaciones básicas arrojadas por el software, que además solo exige el ingreso de datos por parte del usuario, teniendo además una interfaz gráfica amigable que facilita todo el proceso y por medio de la cual la información se recibe con más facilidad.

De la herramienta computacional programada se recalca la sinergia existente y funcional que se puede aprovechar por parte del operador que lo emplee, en donde este mismo, con el hecho de tener información actualizada y real, que a su vez puede obtener de las entidades estatales; puede llegar a obtener un análisis de requerimientos energéticos para una comunidad, cálculo del caudal ecológico para la obtención del caudal de diseño, diseño hidráulico de la turbina a seleccionar, viabilidad económica del proyecto y recomendaciones en términos de mantenimiento y control para el mismo.

9.2 PRUEBA COMPARATIVA

A través de una tabla comparativa, se realizan las respectivas comparaciones y análisis que puedan hacer comprender de una mejor forma, la metodología que utiliza la herramienta computacional creada; de esta manera cualquier proyecto, del rango pico, micro y mini CHE's, se podrá evaluar y analizar antes y después de su puesta en funcionamiento.

Tabla 21. Comparación y análisis entre HidroEnergia PRO y el proyecto de pico central.

ANALISIS COMPARATIVO UTILIZANDO LOS DOS MODELOS DE DISEÑO			
CRITERIOS	Hidro Energia PRO	Proyecto Pico central	Analisis
Demanda de potencia	5 kW	5 kW	Para la realizacion del analisis comparativo entre los dos tipos de diseño, se igualan las potencias de diseño
Caudal ecologico	11.8 (l/s)	No lo tuvieron en cuenta	En el proyecto de la pico central, no se tuvo en cuenta, el parametro ambiental que especifica un caudal minimo, que garantice la menor alteracion al habitat, en la zona de influencia del proyecto
Caudal de diseño	9.3 (l/min)	10 (l/min)	En cuanto al potencial hidroenergetico del afluente, el software determino la no viabilidad debido a que no cumplia el parametro medioambiental, Q ecologico.
Altura bruta	110 m	110 m	Para la realizacion del analisis comparativo entre los dos tipos de diseño, se igualan las alturas de diseño
Altura neta	89.97m	89.78 m	Debido a que ambos tipos de diseño, utilizan una longitud de tuberia dada, y seleccionan por costos economicos el mismo material de tuberia, las variaciones entre altura neta, no tienen una variacion considerable.
Diametro Pelton	214 mm	245 mm	El uso de un criterio distinto entre la relacion del diametro de la pelton y el diametro del inyector, pudo haber ocasionado una leve diferencia entre el dimensionamiento ,sin embargo ambos criterios se encuentran en rangos tolerables y aplicables.
Numero de cucharas	20	22	Debido a que la velocidad especifica es mayor, el software obtiene menor numero de cucharas, esto por el criterio que relaciona el numero de cucharas y la velocidad especifica, haciendo que a mayor velocidad, se requieran menor numero de cazoletas
Diametro del inyector	16.8 mm	17.5 mm	La variacion entre el diametro de chorro de los 2 diseños, esta explicada en la menor cantidad de caudal que debera pasar por este accesorio.
RPM	1800	1472 rpm	Cabe resaltar, que en el diseño hidraulico, se tiene en cuenta la velocidad sincronica de un generador, motivo por el cual en el proyecto de pico central se utilizo una reduccion sobre la velocidad de giro de la turbina, evitando el uso de generadores con mas numeros de polos.

ANALISIS COMPARATIVO UTILIZANDO LOS DOS MODELOS DE DISEÑO			
CRITERIOS	Hidro Energia PRO	Proyecto Picocentral	Analisis
Costo inicial del proyecto	USD 23.000	\$30.000.000 USD 10.526	La herramienta HidroEnergia PRO, estima un valor de costos del proyecto, teniendo en cuenta tanto materiales, como montaje y costos por diseño ingenieril, por esto puede ser normal que el costo del proyecto de grado sea menor, pues en el no se tuvo en cuenta, los costos ingenieriles ni el trabajo que ellos mismos realizaron sobre el proyecto.
Valor presente neto	USD -10.262	\$29.168.371 USD 10.234	Debido a que los costos del proyecto, diseño y generacion son tan altos, especialmente en proyectos de menor potencia, se observa como la herramienta computacional , que es conservativa, propone inviabilidad en el porcentaje de ingresos traídos a presente, y expone un valor de perdida financiera.
Periodo de recuperacion de la inversion	14 años	7 años	Al observar que el proyecto según el software es casi del doble de costoso, se aprecia como para la recuperacion de dicha inversion ,debera ser del doble de tiempo
Material de tuberia	Polietileno	Polietileno	Los materiales planteados en el software, pueden cambiar, a medida que las condiciones lo pidan; en este caso ambos proyectos coincidieron en la selección del mismo en eternos economicos.
Velocidad especifica	21.66	16.5	La velocidad especifica de la turbina fue diferente en ambos casos, debido a que el proyecto de picocentral, le añade un sistema de reduccion con poleas, mientras el sotware, utiliza el sincronismo con un generador, acoplados directamente.

Se observaron en la comparación, dos aspectos importantes, el primero que la herramienta HidroEnergia PRO, resulta aplicarse al proceso previamente realizado en el proyecto de grado de la picocentral, con variaciones en criterios de diseño, que no dejaron de hacerlos a ambos aplicables y certeros; en relación con el caudal del rio, el software analizo los datos ingresados, estimando un recurso insuficiente, que además violaba los requisitos medioambientales del libre paso de un caudal ecológico. En segunda instancia, el software permite realizar una estimación de un

requerimiento energético, que además sea aplicable a futuro, por esta razón, la potencia que se planteaba de 5 kW, aumenta a ser de 6,72 kW, con el fin de hacer aplicable y eficiente el proyecto, durante los 20 años de vida del mismo

10. CONCLUSIONES

- ✓ La utilización sinérgica de conocimientos y la teoría de turbo máquinas hidráulicas, el uso del lenguaje de programación y la utilización de herramientas estadísticas y de análisis económico, permitieron desarrollar un instrumento integral que permite realizar la estimación del potencial hídrico y la altura aprovechable, necesarios para la planeación de proyectos de ingeniería hidráulica y con un acercamiento considerable a las dimensiones de la posible turbo máquina.

- ✓ El desarrollo de la herramienta HidroEnergía PRO, permitió disminuir la dificultad que estaba inherente a la proyección de proyectos en una zonas apartadas, ya que con la utilización de un modelo de estimación cuantitativo, se permitió recolectar la información para llegar al valor de la demanda energética y así compararla con los datos del potencial hídrico existente, permitiendo de esta forma definir la viabilidad de un posible proyecto de generación y a través de un código previamente establecido, obtener datos generales y necesarios para inicio de su implementación.

- ✓ Se simularon los datos correspondientes a un proyecto existente de una picocentral de 5kW, y por medio del programa HidroEnergía PRO, se observó que aunque el proyecto se construyó y colocó en funcionamiento, existieron falencias en cuanto a la aplicación de la normatividad del ministerio de medio ambiente, en la regulación referente al caudal máximo aprovechable del río; otro resultado que se expone en el informe final, muestra que desde el punto de vista del análisis económico, el proyecto podría no haber sido viable,

debido a su alto costo inicial, aclarando que el software cuenta con una ecuación de costos trazada con valores altos, siendo conservativa ante las variaciones del valor del proyecto.

- ✓ La creación inicial del software HidroEnergía PRO, buscaba mejorar las condiciones de vida de las comunidades en las ZNI, muchas de las cuales no cuentan con servicio de energía eléctrica, existiendo falta de planeación y soluciones a corto plazo; a través de este programa se pueden disminuir considerablemente los costos de planeación, incentivando el desarrollo de proyectos hidroenergéticos y además presentando un informe detallado de los datos que pueden tomarse como referente de viabilidad, lo que permite un desarrollo económico y social de estas comunidades.

- ✓ Con el incremento de la oferta del mercado chino en cuanto equipos hidráulicos y sistemas auxiliares para la generación hidráulica, se espera con el pasar de los años una disminución considerable de los costos iniciales de inversión, lo cual repercutirá en un aumento en proyectos hidroeléctricos de baja escala para zonas no interconectadas, y se espera que mediante el uso de esta herramienta se disminuyan aún más los costos, debido a que es una fuente fiable y provee información importante y utilizada en los estudios de prefactibilidad.

- ✓ Si se lograra una estandarización de los equipos requeridos para pequeñas centrales hidroeléctricas, existiría una repercusión positivamente en el valor o costo de un posible proyecto hidráulico. Es bien sabido que en Colombia la mayoría de los equipos se importan, y en caso de avería se debe contar con repuestos difíciles de conseguir en el mercado nacional, dando dos únicas

opciones al operador de la central, en las que el beneficio es mínimo, y son: fabricar la pieza o elemento requerido ó solicitar e importar el repuesto.

- ✓ Haciendo uso del módulo de análisis económico de Hidrogenaría PRO, se pudo observar como en algunos proyectos de baja envergadura (Pico CHE) requieren un mayor tiempo de vida de la central para la completa recuperación de su inversión inicial, y generación de valor agregado. Esto debido a que, a menor potencia, el precio específico USD/kW se incrementa en comparación con proyectos de mayor capacidad.

- ✓ Las bombas usadas como turbinas son una alternativa llamativa para proyectos Pico y Micro CHE por su bajo costo en comparación al de las turbinas.

- ✓ Los generadores síncronos son más costosos que los asíncronos. Estos últimos poseen algunas ventajas en cuanto a los síncronos, pero su mayor debilidad radica en que bajo carga no mantienen constante el voltaje de línea, y esto no es favorable debido a que se debe suministrar a la red un voltaje lo más constante posible $\pm 3\%$ del voltaje nominal. Sin embargo, investigaciones han demostrado que haciendo uso de electrónica de potencia, es posible subsanar esta falencia al menos en proyectos de baja potencia, esto resulta tentador y augura un futuro próspero para las pequeñas centrales hidroeléctricas en Colombia.

11. RECOMENDACIONES

- ✓ En la estimación de la demanda, se utilizaron datos provistos por la UPME en su informe anual de proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia del año 2017, estos valores corresponden al porcentaje de incremento esperado anualmente hasta el año 2031; visto de una manera objetiva y sin discriminar por tipo de consumidor. De esta manera se está incurriendo en un posible sobredimensionamiento de la demanda, debido a que las comunidades de las ZNI, (para las cuales está enfocado el proyecto) poseen un consumo y desarrollo económico menor, comparado con las zonas interconectadas. Se recomienda realizar un estudio de crecimiento de la demanda energética para ZNI, generando así una proyección más realista de la demanda.

- ✓ Para dar continuidad al proyecto se recomienda la creación de una base de datos hidrológicos online, que cuenten con información precisa, histórica y además actualizada de la mayor cantidad posible de afluentes del país; esta información puede ser provista por el IDEAM, en conjunto con la UPME, que son las principales entidades encargadas de la recopilación, análisis y procesamiento de estos datos.

- ✓ Para el fortalecimiento de la herramienta computacional HidroEnergía PRO, se recomienda adquirir información económica actual y cuantificada, referente a turbinas hidráulicas, que fortalezcan los criterios de selección y toma de decisiones.

- ✓ En la sección del diseño Hidráulico, se realizaron cálculos generales basados en la experiencia (Ecuaciones empíricas), estos criterios brindan un análisis preliminar que permite estimar las dimensiones generales de una turbina; las cuales deben estar apoyadas en herramientas de simulación, que permitan realizar optimizaciones haciéndolas más hidrodinámicas y por ende más eficientes. Como proyección para una posible mejora del software HidroEnergía PRO, se recomienda la implementación de estos algoritmos.

- ✓ La herramienta computacional HidroEnergía PRO, se encarga de seleccionar la tubería de presión basada principalmente en el criterio de resistencia a la máxima presión soportada, y paralelamente verifica que el material de dicha tubería sea el más económico posible; con limitantes en el número de materiales disponibles en la herramienta. Se recomienda realizar la integración de la mayor cantidad de materiales utilizados en proyectos de este tipo, conociendo además sus propiedades fisicoquímicas y su respuesta ante un ambiente específico.

- ✓ La herramienta hace uso de ecuaciones empíricas obtenidas de datos de dispersión de diferentes proyectos hidroeléctricos desarrollados en el país, estas ecuaciones indican el valor por unidad de kW en función de la potencia nominal del proyecto. Con el fin de obtener un análisis de costos más cercano a la realidad, se recomienda hacer uso de correlaciones que estén en función de más de un parámetro como por ejemplo el salto y el caudal.

- ✓ En el cálculo del diámetro óptimo de la tubería se hace uso de una ecuación empírica que es un criterio de diseño, se propone realizar un modelo que simule la utilización de diferentes criterios encontrados en la literatura, y encontrar el que posea resultados más fiables tanto económica como

energéticamente, para su posterior uso en la herramienta, dando así soluciones más óptimas.

BIBLIOGRAFIA

ALFARO, Omar. Centrales hidroeléctricas de pequeña escala, la experiencia de la fundación Solar en Guatemala. 2013

BRICEÑO, Eduardo; ESCOBAR, Rafael; RAMIREZ., Saúl. Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas. Lima.2008. 84p. ISBN N° 978-9972-47-148-3.

CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. TERMODINAMICA 1a. ed. MEXICO: MCGRAW-HILL, 1999. 954p.

COLOMBIA. ANLA. Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental. Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. [En línea].Bogotá D.C. 2013. [Consultado: 12 de enero de 2018]. Disponible en internet: http://www.anla.gov.co/documentos/institucional/Metodologia_Caudal_Ambiental.pdf

COZ, Federico, et al. Manual de mini y micro centrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos.1 ed. Perú. 1996, 274p

Crane. Flujo de Fluidos en Válvulas Accesorios y Tuberías, Constantes de pérdida en accesorios de tubería. McGRAW-HILL, Traducido por Valfisa [Consultado: 23

de mayo de 2017]. Disponible en internet en:
<https://mecanicafluidos.wikispaces.com/file/view/CRANE+Flujo+de+Fluidos.pdf>

CREG. Historia de la energía eléctrica en Colombia: Comisión de regulación de energía y gas [En línea]. Bogotá, Colombia. (Recuperado en 05 febrero 2018.)
Disponible en : <http://www.creg.gov.co/index.php/sectores/energia/historia-energia>

D'CROZ, Néstor Raúl. Curso de actualización de pequeñas centrales hidroeléctricas. Bucaramanga, Edición UIS. 1987. 124p.

ENDESA. Los generadores eléctricos [En línea]. Madrid, España. TWenergy. 2014.
(Consultado: 05 febrero 2018.) Disponible en internet:
https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores

ESPAÑA, MINISTERIO DE EDUCACION, CULTURA Y DEPORTE. Energía hidráulica. 2016

FERNANDEZ, Pedro. Turbinas hidráulicas. España, 2017. 122p. [Consultado: 22 de octubre de 2017]. Disponible en internet:
<http://files.pfernandezdiez.es/Turbinas/Hidraulicas/PDFs/01Turb.Hidr.pdf>

FEYNMANN, Richard. Energía. En: The Feynman Lectures on Physics. 1964. Volume I. 4-1.

GALARZA, José. Metodología de diseño de turbinas en pequeñas centrales hidroeléctricas con capacidad menor a 10MV con ejemplo de aplicación [En línea]. Proyecto de titulación previo a la obtención del título de ingeniero en mecánico. Escuela politécnica nacional. Facultad de ingeniería mecánica. Quito. 2015. [Consultado: 11 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9138/1/CD-6092.pdf>

GARCIA, Héctor; NAVA, Arturo. Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas. Universidad nacional autónoma de México, Departamento de ingeniería hidráulica. México, 2013. 121p.

INSTITUTO TECNOLOGICO DE CANARIAS. Energías renovables y eficiencia energética. ITC S.A. Santa Cruz, 2008. 24p.

LLAMBA FARINANGO, William Santiago. Elaboración del plan de mantenimiento centrado en Confiabilidad (RCM) de la central hidráulica illuchi n° 2 [En línea]. Proyecto de titulación previo a la obtención del título de ingeniero en electromecánica. Universidad de las fuerzas armadas. Departamento de ingeniería electromecánica. Latacunga. 2014. [Consultado: 14 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8442/1/T-ESPEL-EMI-0256.pdf>

MATAIX, Claudio. Turbomáquinas Hidráulicas. España: Editorial ICAI, 1984. 1363p. ISBN: 84-600-6662-2. [Consultado: 21 de diciembre de 2017]. Disponible en internet: <https://es.scribd.com/doc/128048235/Turbomaquinas-Hidraulicas-Claudio-Mataix-3ra-Edicion>

MINMINAS. Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas – FAZNI. Ministerio de minas y energía [En línea], 2 de enero de 2018. Disponible en internet en: <https://www.minminas.gov.co/fazni>.

MOTWANI, K H; JAIN, S V y PATEL R N. Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants – a case study. NUiCONE. 2012.

OLIVERAS FERRET, Jordi. Como calcular el golpe de ariete. HidroING. Barcelona, 2014. [Consultado: 18 de noviembre de 2017]. Disponible en internet en: <http://www.hidrojing.com/como-calcular-el-golpe-de-ariete/>

ORTIZ FLOREZ, Ramiro. Pequeñas centrales hidroeléctricas. Programa THERMIE. 1era Ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011. 384P. ISBN 978-958-8675-99-2. [Consultado: 11 de enero de 2018]. Disponible en internet: <http://download.e-bookshelf.de/download/0003/5742/55/L-G-0003574255-0006890464.pdf>

PUIG, Josep; COROMINAS Joaquim. La ruta de la energía. Anthropos editorial, 1990.p.214

SANCHEZ, Javier. Construcción de una curva de caudales clasificados [En línea]. Curvas de caudales clasificados. España. (Septiembre de 2013), 12p. [Consultado: 13 de enero de 2018]. Disponible en Internet: <https://uao.libguides.com/c.php?g=529806&p=4412778>.

SERWAY, Raymond A.; JEWETT, John W. Física para ciencias e ingeniería. Vol. 1, 7th ed. USA: CENGAGE LEARNING, 2008. 733p.

SIEL. Electricidad: Sistema de información eléctrico colombiano [En línea]. Bogotá, Colombia. (Recuperado en 05 febrero 2018.) Disponible en: <http://www.siel.gov.co/Inicio/Normatividad/tabid/65/Default.aspx>

UPME. Quienes somos. Unidad de planeación minero energética [En línea], 2 de enero de 2018. Disponible en internet en: <http://www1.upme.gov.co/Entornoinstitucional/NuestraEntidad/Paginas/Quienes-Somos.aspx>

WILDI, Theodore. Maquinas eléctricas y sistemas de potencia. Sexta Edición. Editorial: Pearson 2007. México, 937p.