

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIERO
MECÁNICO**

**TEMA:
ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL RÍO TOACHI PARA LA
GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA**

**AUTOR:
FRANCISCO HERIBERTO GUTIÉRREZ JIMÉNEZ**

**TUTOR:
WILLIAM GIOVANNY QUITIAQUEZ SARZOSA**

Quito, febrero del 2016

Cesión de derechos de autor

Yo Gutiérrez Jiménez Francisco Heriberto con documento de identificación N° 1721622189, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “Análisis del Potencial Energético del Río Toachi para la Generación Hidroeléctrica”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada.

En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nombre: Gutiérrez Jiménez Francisco Heriberto

Cédula: 1721622189

Fecha: 10 de Febrero de 2016

Declaratoria de coautoría del docente tutor

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación, ANÁLISIS DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DEL RÍO TOACHI PARA LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA realizado por Francisco Heriberto Gutiérrez Jiménez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, diciembre del 2015.



Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa M.Sc.

C.C. 172160976-4

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a Dios por darme la oportunidad de haber estudiado tan hermosa carrera universitaria, a mis padres, Yolanda y Yovanni, por brindarme el apoyo tanto moral como económico, a mi esposa por darme la fuerza necesaria para seguir con esta meta, a mis tíos por su constante preocupación en mí, a mis abuelos por sus constantes bendiciones y amigos que demostraron su lealtad en las buenas y en las malas, porque cada uno me apoyo de una manera muy valiosa.

También dedico este trabajo a mi hija Martina, mis hermanos Johnny y Madeleyne para que les sirva de inspiración y sepan que pueden alcanzar cualquier meta en la vida.

Francisco

Agradecimiento

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana y aquellos docentes que me dieron la oportunidad de adquirir los conocimientos impartidos semestre tras semestre durante toda la carrera de Ingeniería Mecánica.

Al Ing. William Quitiaquez por su colaboración a lo largo del presente trabajo.

Francisco

Índice

1. Introducción.....	1
2. Materiales y Métodos.....	3
2.1 Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón.....	3
2.2 Caudales.....	6
2.3 Caudales Mínimos.....	8
2.4 Caudales para la Generación.....	9
2.5 Cálculo de Escorrentía.....	11
2.5.1 Hidrograma Unitario.....	12
2.5.2 Hidrogramas Sintéticos.....	14
2.5.3 Cálculo del Hidrograma Unitario.....	16
2.5.3.1 Método de Raws.....	17
2.5.3.2 Método de Molchanov.....	18
2.5.3.3 Método de Prevert.....	19
2.5.3.4 Fórmula de Nadal.....	19
2.5.3.5 Formula de Keler.....	20
2.6 Determinación del caudal de diseño de una hidroeléctrica.....	21
2.7 Selección de una turbina.....	22
3. Resultados y Discusión.....	26
4. Conclusiones.....	30
5. Referencias.....	32

Índice de Tablas

Tabla 1. Caudales medios por década desde 1964 al 2010 [2] .	7
Tabla 2. Caudales medios mensuales entre los años 1964 al 2010 [2].	8
Tabla 3. Caudales máximos mensuales entre los años 1964 al 2010 [2].	8
Tabla 4. Caudales mínimos mensuales entre los años 1964 al 2010 [2].	9
Tabla 5. Diferencia entre caudales mínimos, medios y máximos mensuales entre los años 1964 al 2010 [2].	10
Tabla 6. Valores del coeficiente de escorrentía según el Método de Raws [5].	18
Tabla 7. Valores del coeficiente de escorrentía según el Método de Molchanov [5].	19
Tabla 8. Valores del coeficiente de escorrentía según el Método de Prevert [5].	19
Tabla 9. Valores para el uso de la ecuación de Nadal [5].	20
Tabla 10. Valores estimados de una precipitación.	21
Tabla 11. Resumen de centrales de generación según su potencia [6].	22
Tabla 12. Resumen de las centrales de generación según su salto [7].	23
Tabla 13. Clasificación de las turbinas según su velocidad específica [8]- [9].	24
Tabla 14. Hidroeléctricas en Ecuador según su capacidad, caudal y tipo de turbina según CELEC.	26

Índice de Figuras

Figura 1. Vertedero Pilatón.....	4
Figura 2. Casa de máquinas Sarapullo.....	5
Figura 3. Presa Toachi.....	5
Figura 4. Casa de máquinas Alluriquín.....	6
Figura 5. Cuenca del Río Toachi	7
Figura 6. Caudales mínimos, medios y máximos [2].....	9
Figura 7. Distribución de las precipitaciones [3].....	10
Figura 8. Proceso de la Hidrología superficial [4].....	12
Figura 9. Nivel de precipitación en un tiempo unitario [4].....	13
Figura 10. Nivel de precipitación en un tiempo unitario de dos horas [4].....	13
Figura 11. Grafica para establecer hidrogramas sintéticos [4].....	14
Figura 12. Proceso de la Hidrología superficial [4].....	18
Figura 13. Ábaco para selección de turbinas [6].....	25
Figura 14. Modelado y diseño de turbina Francis en SolidWorks.....	27
Figura 15. Modelado y diseño de sistemas auxiliares en Catia V5.....	28
Figura 16. Planos de las turbinas generados en KOMIAC-3D.....	28
Figura 17. Curva característica de operación de la turbina hidráulica tipo Francis [11].	29

Resumen

El presente artículo detalla cómo se especifican los estudios primarios para establecer el caudal de generación de energía eléctrica y principalmente el caudal de diseño de turbinas, el análisis para determinar el caudal de una cuenca es fundamental, además de los métodos que existen para definir el caudal de escorrentía que generan las precipitaciones en las cuencas, las cuales serán estudiadas de acuerdo a los tipos de terreno.

Especificado el caudal de la cuenca del río y el caudal de diseño se establece el tipo de turbina a utilizar, además de determinar la mayor eficiencia posible de la turbina que parte desde la geografía del área conocida en donde se desea construir una hidroeléctrica, valiéndose de los ábacos que determinan el tipo de turbina de acuerdo a parámetros como potencia eléctrica, saltos de altura y potencia. Para el diseño de la turbina y los elementos complementarios se utilizan software como Autocad, Inventor, SolidWorks, Catia V5, entre otros.

Al utilizar los software mencionados anteriormente, para realizar el diseño de casa de máquinas Sarapullo y Alluriquín del proyecto hidroeléctrico Toachi – Pilatón, se determinó que cada estación de generación tendrá tres turbinas tipo Francis de eje vertical con sus sistemas complementarios para su funcionamiento las cuales están destinadas a generar 254,4 megavatios (MW) utilizando un flujo de 33,33 m³/s.

Palabras clave: Caudal, cuenca, energía eléctrica, escorrentía, hidroeléctrica, turbina.

Abstract

This article details how the primary studies are specified to establish the flow of energy power generation and principally the turbines design flow, starting from the analysis of how determine the flow of a basin and also the methods to define the runoff flow which generates the rainfalls in the basins, analyzing the kind of grounds.

When the flow of the river (basin) and design flow are specified, the type of turbine to be used is determined and also define the best efficiency possible, taking into consideration the geography of the zone of the hydroelectric, the abacus help to choose the turbine in agreed to parameters like electricity potency, voltage drops and voltage. By using the above software previously, for the design house Sarapullo and Alluriquín Hydroelectric Project Toachi machines - Pilatón, it was determined that each generating station will have three turbines type Francis of vertical axis with their complementary systems for its operation which are designed to generate 254.4 megawatts (MW) using a flow of 33.33 m³/s.

Keywords: flow, basin, electric power, runoff, hydroelectric, turbine.

1. Introducción

La generación de energía eléctrica se la puede obtener de diferentes formas, en la actualidad se ha incursionado en la utilización de los recursos renovables como la fuerza del agua o del viento, esto con el objetivo de frenar la contaminación ambiental que producen las termoeléctricas o las plantas nucleares. Debido a esta necesidad se han generado estudios para poder aprovechar la fuerza del flujo hídrico de los ríos, es por ello que se han diseñado y construido diversos proyectos hidroeléctricos a lo largo de la historia, en la República de Ecuador hace algunas décadas atrás se han impulsado los estudios necesarios para promover la construcción de hidroeléctricas.

El tipo de infraestructura de una hidroeléctrica es compleja y va a depender directamente de la geografía en la que se encuentra la cuenca del río, es por eso que hay hidroeléctricas que son subterráneas, y solo las presas o captación van construidas sobre el río, pero hay que tomar en cuenta que lo principal es determinar si la cuenca del río abastece el flujo necesario de agua para la utilización en una hidroeléctrica.

En general, el conocimiento de las variables necesarias para asumir un criterio de diseño de una hidroeléctrica son bastante primitivos y escasos para la comprensión, y mucho más si no se tiene la formación en hidráulica para tener una idea clara. Una de las herramientas principales para establecer los parámetros de diseño es el caudal del río donde se pretenda realizar la construcción de una hidroeléctrica.

De tal forma, la cuenca del río Toachi ubicado en el cantón Mejía servirá para evidenciar los criterios del diseño a tomar en cuenta para la construcción de una hidroeléctrica, con los datos de los caudales medios mensuales durante los años comprendidos entre 1964 al 2010, pero se necesita especificar bajo que caudal debe regir el diseño mecánico para poder generar energía eléctrica de forma constante

durante la época invernal así como en la época de estiaje, sin afectar el flujo de energía por falta de caudal en las turbinas.

La presente investigación pretende orientar a los estudiantes de ingeniería sobre los estudios primarios para la construcción de hidroeléctricas y como se seleccionan las turbinas para la generación, esto debido a los numerosas inquietudes que pueden plantearse al observar los varios proyectos hidroeléctricos que están en construcción en la República del Ecuador.

2. Materiales y Métodos

2.1 Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón

En la República del Ecuador en la actualidad se encuentran en desarrollo muchos proyectos hidroeléctricos; entre los más destacados está la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair con una generación de 1500 megavatios (MW), siendo esta la hidroeléctrica más grande en construcción en el país, ubicada entre las provincias de Napo y Sucumbíos, utilizando los ríos Quijos y Salado de los cuales utilizará un caudal de 222 m³/s.

La hidroeléctrica Mazar – Dudas, ubicada en la provincia de Cañar generará 20,82 MW de potencia, dicho proyecto está formado por tres centrales, el primero denominado Alazán, el segundo San Antonio que aprovechan el caudal del río Mazar, el segundo Dudas que utiliza las aguas del río Pindilig, dichas centrales no contienen represa ni embalse.

Otros proyectos grandes se encuentran la hidroeléctrica Agoyan, Manduriacu, Nación, además de varios proyectos más de menor potencia energética, pero un emblemático para el gobierno ecuatoriano es la Hidroeléctrica Toachi Pilatón.

El proyecto hidroeléctrico Toachi – Pilatón actualmente en desarrollo se encuentra ubicado entre las provincias de Pichincha, Cotopaxi y Santo Domingo de los Tsáchilas en la República del Ecuador, y lo conforman los ríos Pilatón y Toachi [1].

El proyecto está financiado por el gobierno ecuatoriano y su entidad de control es CELEC (Corporación Eléctrica del Ecuador). La construcción civil es desarrollada por CWE (China International Water & Electric Corp.), y la construcción electromecánica por la empresa тяжмаш (Tyazhmash).

Está provisto de dos aprovechamientos el primero Pilatón-Sarapullo, con la central de generación Sarapullo que se encuentra conformada por un azud vertedero, obras de toma, y un desarenador de cuatro cámaras ubicado sobre el río Pilatón como muestra la figura 1 en la altitud +1108,000 msnm (metros sobre el nivel del mar) sobre los vertederos.

Sobre el vertedero trabaja una grúa pórtico de 25 toneladas para posicionar la viga pescadora y las compuertas planas de mantenimiento de los vertederos. En la entrada del desarenador se ubica una maquina limpia rejillas y a la salida del mismo se debe instalar otra grúa pórtico de 10 toneladas.



Figura 1. Vertedero Pilatón

La conducción del flujo se efectúa a través de un túnel de presión de 5,9 km de longitud hasta la casa de máquinas Sarapullo indicada en la figura 2 ubicada en la altitud +952,800 msnm prevista de una casa de máquinas y 3 turbinas que en su máxima capacidad deberán generar 16,3 MW de potencia por unidad.



Figura 2. Casa de máquinas Sarapullo.

El segundo aprovechamiento Toachi-Alluriquín se encuentra constituido por una presa de hormigón, sobre el río Toachi, en la altitud +927,000 msnm, en la figura 3 se muestra la presa Toachi en construcción, el lado derecho corresponde al bloque 3 el cual está compuesto por una compuerta plana, una compuerta radial y un blindaje metálico tipo desacelerador, al igual que el bloque 4.



Figura 3. Presa Toachi.

La presa Toachi se encuentra atravesada por la galería de interconexión del túnel de descarga de Sarapullo con el túnel de presión Toachi-Alluriquín, es decir el flujo turbinado se une con el flujo de la cuenca de río Toachi captado por la presa, y serán

conducidos a través de un túnel de presión que tiene una longitud de 8,7 km hasta la casa de máquinas Alluriquín expuesta en la figura 4.



Figura 4. Casa de máquinas Alluriquín

La casa de máquinas Alluriquín está prevista de tres turbinas que generarán 68 MW cada unidad, en la altitud +732,000 msnm. En la presa de la central se ubica una mini central de 1,4 MW. La investigación se basa específicamente a los caudales generados por el río Toachi.

2.2 Caudales

Los caudales del río Toachi fueron estudiados entre los años 1964 y 2010, con mediciones periódicas de los niveles diarios de la crecida o caída del flujo, con estos datos y con la geografía de la cuenca del río Toachi se puede determinar los caudales medios mensuales.

El levantamiento de esta información fue realizado en un inicio por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL), para luego dar paso a la recolección de datos desde el año 1999 al 2010 al Instituto Nacional De Meteorología E Hidrología

(INAMHI). En la figura 5 se aprecia el caudal de la cuenca del río Toachi, en época de sequía.



Figura 5. Cuenca del Río Toachi

Para la recolección de información se utilizan bases pluviométricas y regletas de medición de altura del caudal. En la tabla 1 se detalla los caudales medios por década entre los años comprendidos entre 1964 al 2010 del río Toachi registrados por el INAMHI [2].

Tabla 1. Caudales medios por década desde 1964 al 2010 [2] .

Año	Media Anual (m³/s)
1970	51,93
1980	30,25
1990	23,46
2000	58,93
2010	-
Promedio	27,74

En la tabla 2 se observa los caudales medios mensuales comprendidos entre los años 1964 al 2010. Esta recopilación de información y estos estudios fueron realizados por 46 años.

Tabla 2. Caudales medios mensuales entre los años 1964 al 2010 [2].

Mes	Media Mensual (m³/s)
Enero	46,70
Febrero	71,57
Marzo	74,92
Abril	81,06
Mayo	57,50
Junio	36,48
Julio	24,42
Agosto	18,98
Septiembre	18,66
Octubre	22,13
Noviembre	24,22
Diciembre	29,92
Promedio	42,21

En la tabla 3 se evidencian los caudales máximos mensuales comprendidos entre los años 1946 al 2010. Esta recopilación de información y estos estudios fueron realizados por 46 años.

Tabla 3. Caudales máximos mensuales entre los años 1964 al 2010 [2].

Mes	Máxima Mensual (m³/s)
Enero	110,807
Febrero	150,319
Marzo	137,371
Abril	267,792
Mayo	103,852
Junio	60,909
Julio	35,093
Agosto	28,546
Septiembre	28,733
Octubre	42,034
Noviembre	82,314
Diciembre	104,761
Promedio	96,044

2.3 Caudales Mínimos

Los caudales mínimos, medios y máximos establecidos por el INAMHI en el río Toachi se muestra en la figura 6.

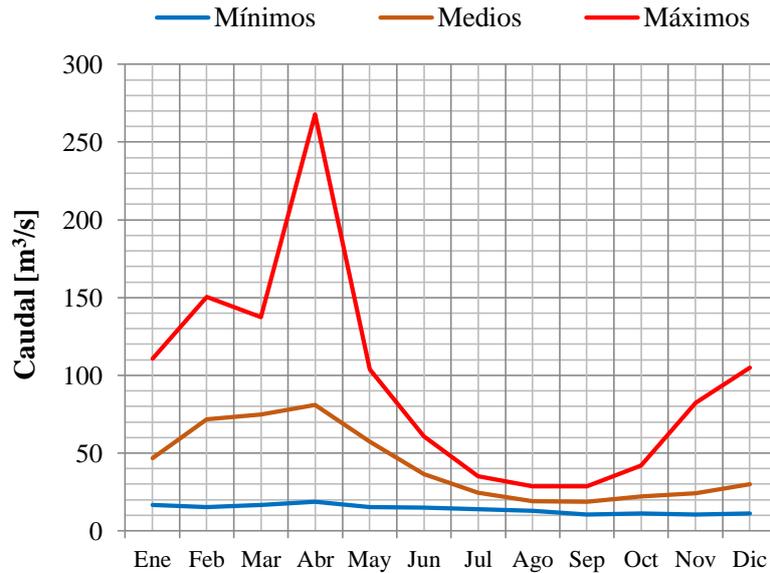


Figura 6. Caudales mínimos, medios y máximos [2].

Se observan los caudales máximos en el mes abril, a causa de las precipitaciones originadas en la cuenca del río Toachi. Entre los meses de agosto y diciembre se tienen los caudales mínimos con los cuales se debe partir para establecer el caudal de diseño, los datos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Caudales mínimos mensuales entre los años 1964 al 2010 [2].

Mes	Media Mínima Mensual (m ³ /s)
Enero	16,48
Febrero	15,11
Marzo	16,72
Abril	18,59
Mayo	15,43
Junio	14,83
Julio	14,05
Agosto	12,80
Septiembre	10,50
Octubre	11,19
Noviembre	10,39
Diciembre	11,29
Promedio	13,95

2.4 Caudales para la Generación

La generación depende de los caudales mínimos del río Toachi, según el INAMHI con los estudios realizados con respecto al flujo, se obtiene como resultado que el caudal mínimo estimado es de 10,39 m³/s en el mes de Noviembre. Entre el caudal máximo

y el caudal mínimo estimado se puede evidenciar que hay una diferencia de $15,79 \text{ m}^3/\text{s}$ en un año relativamente seco al comparar el mes de agosto, y para un año relativamente húmedo se puede encontrar una diferencia de $239,24 \text{ m}^3/\text{s}$ entre los caudales mínimos y máximos.

Tabla 5. Diferencia entre caudales mínimos, medios y máximos mensuales entre los años 1964 al 2010 [2].

Mes	Media Mínima Mensual (m^3/s)	Media Mensual (m^3/s)	Media Máxima Mensual (m^3/s)	Diferencia entre mínima y máxima (m^3/s)
Agosto	12,80	18,98	28,54	15,73
Septiembre	10,50	18,66	28,73	18,22
Octubre	11,19	22,13	42,03	30,83
Noviembre	10,39	24,22	82,31	71,92
Diciembre	11,29	29,92	104,76	93,46

Al confrontar el flujo mínimo ($10,39 \text{ m}^3/\text{s}$) con el flujo máximo ($267,79 \text{ m}^3/\text{s}$) se puede verificar que la diferencia en aumento de caudal en la cuenca es de $257,39 \text{ m}^3/\text{s}$, esto evidencia que el río Toachi se encuentra en una región subtropical húmeda con vegetación moderada y pastizales, esto permite que las precipitaciones de los aguaceros sean constantes y fluyan hacia el río, como se muestra en la figura 7.

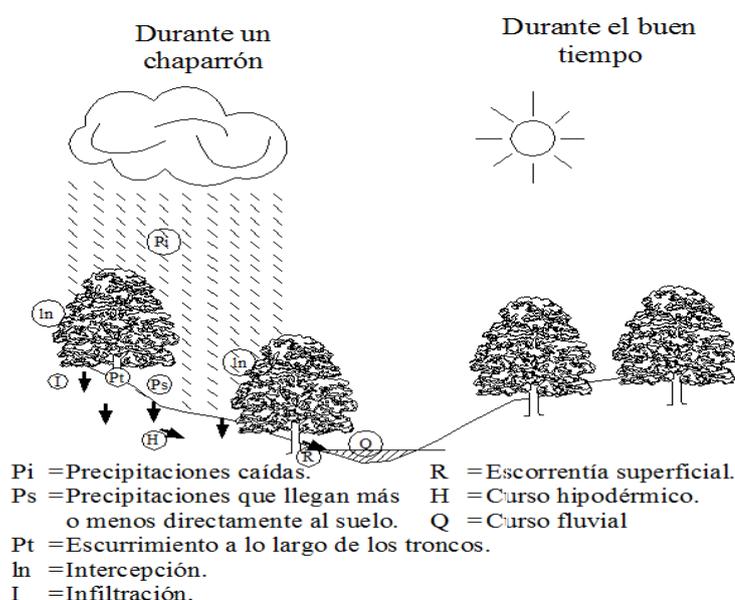


Figura 7. Distribución de las precipitaciones [3].

En cuanto al caudal de diseño, se detallará como plantearlo posteriormente para luego establecer el método de selección de la turbina con la eficiencia de funcionamiento más alta en cuanto al aprovechamiento del agua.

2.5 Cálculo de Escorrentía

La escorrentía es el flujo de una precipitación que fluye por la superficie, resulta determinante en una cuenca, debido a que en base a este dato se puede evidenciar el caudal obtenido por tormentas reales o tormentas de diseño de acuerdo sea el caso de estudio.

Una forma esquemática y detallada de identificar las fases del proceso [4] se define a continuación:

- 1, 2. Separación de la lluvia neta (calcular qué parte de la precipitación caída va a generar escorrentía superficial).
- 3, 4. Cálculo de la escorrentía producida por esa precipitación neta.
- 5. Cálculo de la variación del Hidrograma calculado en el paso anterior a medida que circula a lo largo del cauce, denominado “tránsito de Hidrogramas”.
- 6. Considerar la geometría del cauce en una zona concreta, calcular la altura que alcanzará el agua, y, por lo tanto las áreas que quedarán inundadas cuando el hidrograma calculado en los pasos anteriores pase por allí.

Existen diferentes métodos para el cálculo del caudal de la escorrentía entre los más comunes se consideran:

- Hidrograma unitario.
- Hidrogramas sintéticos.
- Método racional.

La figura 8 evidencia de forma clara lo que se propone en las fases del proceso para la determinación de la escorrentía.

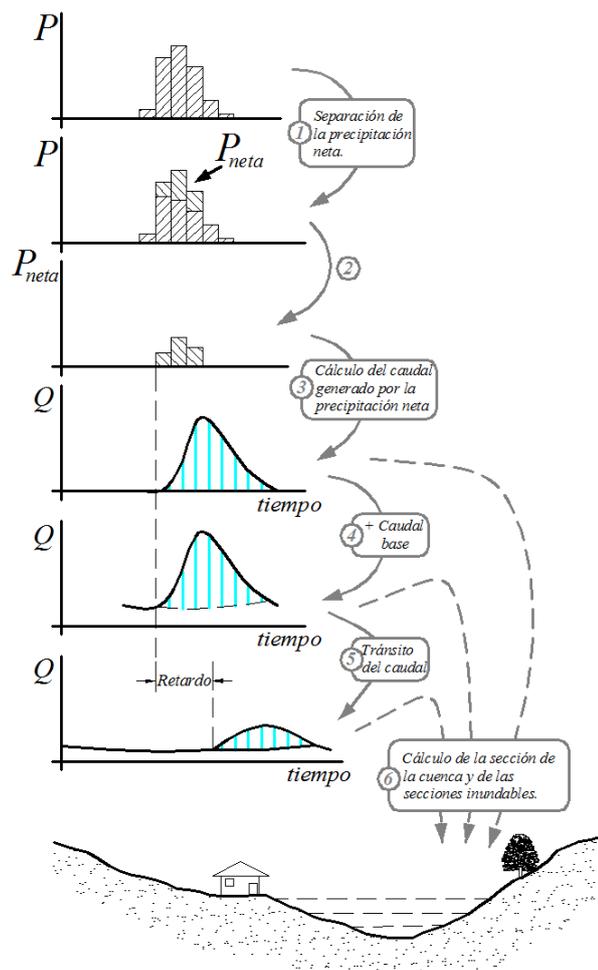


Figura 8. Proceso de la Hidrología superficial [4].

2.5.1 Hidrograma Unitario

Un hidrograma unitario establece la escorrentía producida diariamente si sobre la cuenca en estudio se produjera una precipitación neta en una unidad de duración determinada, esto quiere decir una medida específica del nivel de agua captada por un pluviómetro en el lapso de una hora.

Dicha precipitación tiene que ser homogénea en su intensidad a lo largo del periodo de tiempo y repartida a lo largo de la superficie de la cuenca en estudio, por ejemplo 1 mm de agua captada por un pluviómetro en el lapso de una hora como se muestra en la figura 9, con un valor de 25,4 mm de agua en 2 horas, todo dependerá específicamente de la intensidad de la precipitación. En el caso de tener una medición de 1 mm en 2 horas, se dibujará dos hidrogramas unitarios desplazados 1 hora en sentido horizontal y sumar las ordenadas en esos puntos como se muestra en la figura 10.

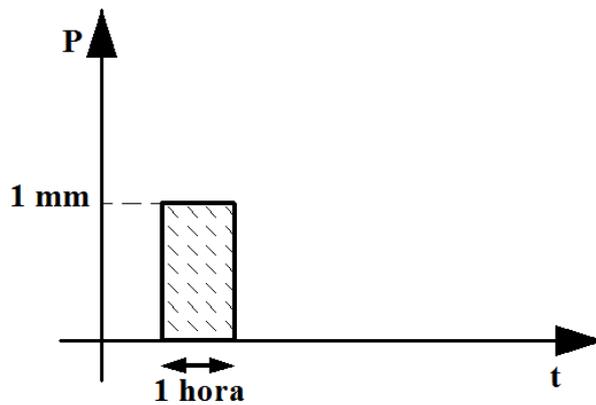


Figura 9. Nivel de precipitación en un tiempo unitario [4].

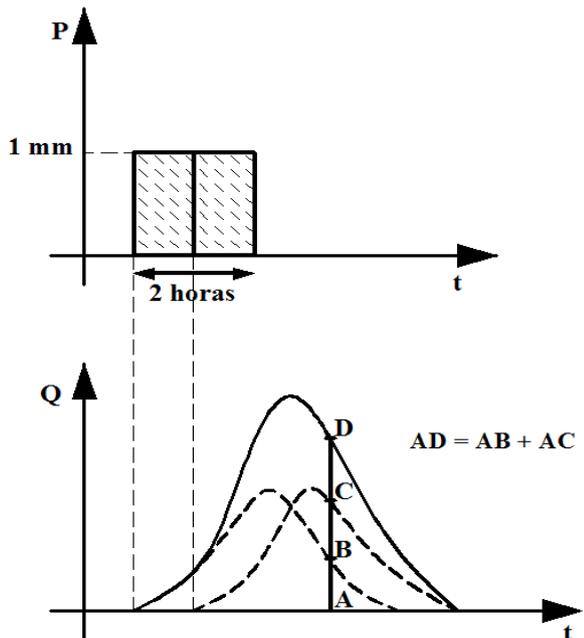


Figura 10. Nivel de precipitación en un tiempo unitario de dos horas [4].

A estos gráficos se los puede combinar para poder obtener un hidrograma en un caso real, se puede dibujar fácilmente un hidrograma de cualquier precipitación producida. Para poder aplicar este método en un caso real es necesario construir el hidrograma unitario para la cuenca en estudio y calcular las precipitaciones efectivas en base a los datos obtenidos por los pluviómetros que son colocadas cerca de la cuenca.

2.5.2 Hidrogramas Sintéticos

Para establecer los hidrogramas sintéticos hay muchas ecuaciones empíricas en las cuales se puede basar dicho estudio, pero una forma esquemática es establecer un triángulo el cual contiene los parámetros necesarios del hidrograma, como el caudal punta (Q_p), el tiempo base (t_b), el tiempo como se produce la punta (t_p) y el tiempo de retardo o respuesta (t_r), la duración de la precipitación y el tiempo de retardo o respuesta, tal como se indica en la figura 11.

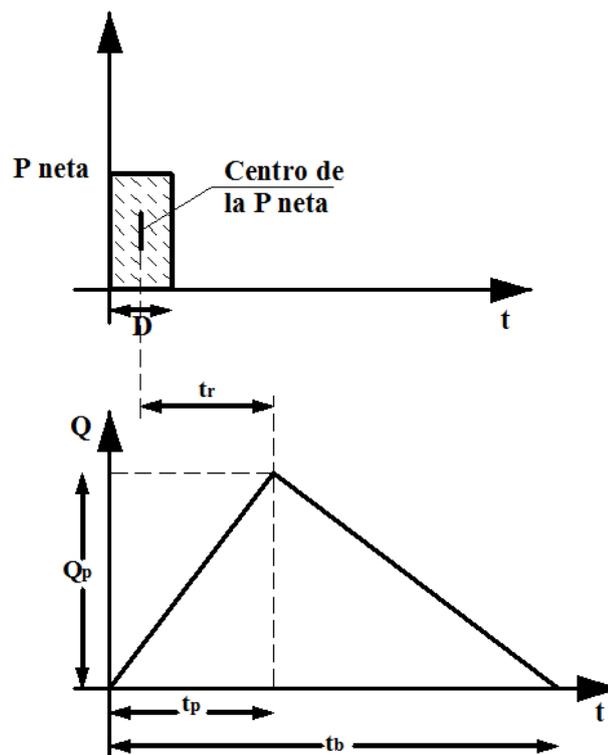


Figura 11. Grafica para establecer hidrogramas sintéticos [4].

Además de cómo establecer los hidrogramas, hay algunas expresiones matemáticas que se han obtenido mediante el estudio de hidrogramas de crecida que fueron provocados por precipitaciones cortas y uniformes en distintas cuencas.

- Tiempo de la punta:

$$t_p = (0,5 \times D) + (0,6 \times t_c)$$

- Tiempo base expresado:

$$t_b = 2,67 \times t_p$$

- Caudal de la punta:

$$Q_p = \frac{P \times A}{1,8 \times t_b}$$

Así en estas expresiones antes mencionadas:

t_p = tiempo de punta (h)

t_c = tiempo de concentración (h)

D = duración de precipitación neta (h)

t_b = tiempo base (h)

Q_p = caudal de punta (m^3/s)

P = precipitación neta (mm)

A = superficie de la cuenca (km^2)

Dentro de los hidrogramas sintéticos existen más formas de elaborarlos, entre los principales están los hidrogramas adicionales de SCS (Servicio de Conservación de Suelos), el cual aborda los mismos parámetros pero se trabaja en base a la relación de Q/Q_p y t/t_p como se muestra en la figura 11 sobre los ejes de coordenadas de los hidrogramas en estudio.

El triángulo del diagrama sintético han sido desarrollados para realizar estudios de cuencas que no cuentan con estudios hidrométricos o registros pluviográficos y es necesario estudiar las precipitaciones de al menos 5 días, esto para encontrar la precipitación neta en un tiempo de duración determinado basándose en el agua captada por los pluviómetros.

Ya obtenida la precipitación neta se define el caudal de punta (Q_p) como el caudal máximo de escurrimiento, dicho flujo es el cual no es absorbido por la superficie del terreno y llega directamente a la cuenca en estudio, esto al igual con el tiempo de punta (t_p) y será el intervalo de tiempo que se demora el caudal de punta en llegar a la cuenca. Así hallados estos datos de estudio de la cuenca para así realizar la relación Q/Q_p y t/t_p , para así establecer la curva real de escurrimiento sobre la superficie del terreno evidenciando así el caudal integrado a la cuenca con forme transcurre en el tiempo la precipitación.

Y los hidrogramas sintéticos de Témez o conocido también como hidrogramas unitarios sintéticos, el concepto es similar al hidrograma sintético de SCS pero se calcula con otro tipo de expresiones matemáticas.

2.5.3 Cálculo del Hidrograma Unitario

La manera más simplificada de calcular la esorrentía es el Método Racional debido a la reducida cantidad de variables a prever, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C \times I \times A}{360} \quad (1)$$

Donde:

Q = Caudal de esorrentía (m^3/s).

C = Coeficiente de esorrentía (%).

I = Intensidad de la precipitación (mm/h).

A = Superficie de la cuenca (Ha).

Para determinar la superficie de la cuenca se lo puede realizar de distintas formas como el uso de un planímetro o con algún software especializado en topografía. Para la aplicación de estos métodos se deben realizar en cuencas relativamente pequeñas que estén dentro de las 30 o 40 hectáreas, sabiendo que 1 km^2 equivale a 100 Ha.

En cuanto a la intensidad de las precipitaciones es inminente evaluar el tiempo en el cual se concentran las precipitaciones en la cuenca, siendo esto un cálculo en el cual se concluye que las precipitaciones más prolongas son las que menos caudal aportan a la cuenca debido a que estas precipitaciones son moderadas, es por eso que la intensidad de las precipitaciones corresponden a una precipitación uniforme tanto en tiempo y que sea uniforme en la cuenca [4]. El coeficiente de esorrentía (C) es determinado por diversos métodos, y depende del tipo de terreno de la zona en donde se enfocan los estudios, los métodos [5] utilizados con mayor frecuencia son:

2.5.3.1 Método de Raws

Este método enfoca directamente a obtener un valor del coeficiente de esorrentía, pero no es exacto ya que los valores son directos y mencionan terrenos con relieves comunes los cuales no siempre se encuentran en las cuencas de un río.

Los valores para C siempre dependerán del tipo de vegetación que se disponga y además del tipo de superficie.

Tabla 6. Valores del coeficiente de escorrentía según el Método de Raws [5].

Tipo de terreno	C
Bosque. Relieve ondulado	0,18
Bosque. Relieve quebrado	0,21
Pasto. Relieve ondulado	0,36
Pasto. Relieve quebrado	0,42
Cultivos. Relieve ondulado	0,60
Cultivos. Relieve quebrado	0,72

En la figura 12 se muestra un ejemplo en el cual se puede verificar que el valor de C es 0,21, debido a que se tiene un terreno quebrado con presencia de bosque y pocas áreas cultivadas.

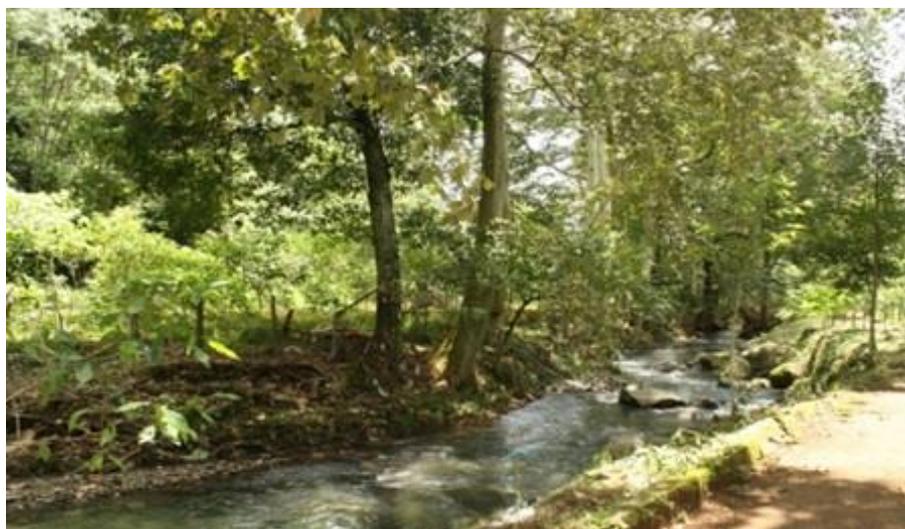


Figura 12. Proceso de la Hidrología superficial [4].

2.5.3.2 Método de Molchanov

Este método expone valores para el coeficiente de escorrentía pero determinados de acuerdo con parcelas forestales. Este método es más complejo para la determinación del valor de C debido a que es necesario identificar el porcentaje de pastoreo en el terreno.

Tabla 7. Valores del coeficiente de escorrentía según el Método de Molchanov [5].

Tipo de escorrentía	Pendiente del terreno (grados)	Densidad y uso de la cubierta vegetal	Tipo de suelo	C %
I	1° - 35°	D > 0,6 Sin pastos	Franco-arenoso	5%
II	5° - 35°	0,5 > D > 0,4 Con pastoreo ocasional	Franco-pedregoso	6 - 25%
III	5° - 40°	0,4 ≥ D ≥ 0,1 Con pastoreo permanente	Franco-pedregoso	25 - 50%
IV	5° - 40°	0,4 ≥ D ≥ 0,1 Con pastoreo intensivo	Franco-pedregoso	50 - 75%
V	5° - 40°	0,4 ≥ D ≥ 0,1 Con pastoreo intensivo	Arcilloso	> 75%

2.5.3.3 Método de Prevert

Este método es usado en Europa y se basa en el mismo principio del Método de Molchanov el cual requiere de datos de parcelas experimentales.

Tabla 8. Valores del coeficiente de escorrentía según el Método de Prevert [5].

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenoso - Limoso. Limoso - Arenoso.	Limoso. Limoso - Arcilloso.	Arcilloso
Bosque	0 - 5	0,10	0,30	0,40
	5 - 10	0,25	0,35	0,50
	10 - 30	0,30	0,40	0,60
	> 30	0,32	0,42	0,63
Pastizal	0,15	0,15	0,35	0,45
	5 - 10	0,30	0,40	0,55
	10 - 30	0,35	0,45	0,65
	>30	0,37	0,47	0,68
Cultivo agrícola	0 - 5	0,30	0,50	0,60
	5 - 10	0,40	0,66	0,70
	10 - 30	0,50	0,70	0,80
	> 30	0,53	0,74	0,84

2.5.3.4 Fórmula de Nadal

La fórmula de Nadal expresa un cálculo de acuerdo a las condiciones que se encuentra la cuenca analizada. Para determinar los valores de las constantes mencionadas en la ecuación 2 se necesita analizar la tabla 7 con varios datos previos de acuerdo a lo requerido por la tabla 9.

$$C = 0,25 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \quad (2)$$

Donde:

K_1 = Factor de extensión de la cuenca.

K_2 = Factor de lluvia media anual.

K_3 = Factor de pendiente y permeabilidad del suelo.

Los datos son muy cercanos a la realidad debido a que se manejan antecedentes reales del área de extensión de la cuenca en estudio en los milímetros (mm) de lluvia que se obtienen en las bases pluviométricas y en el tipo de la cuenca que está en análisis.

Tabla 9. Valores para el uso de la ecuación de Nadal [5].

Extensión		Lluvia media anual		Características de la cuenca	
Km ²	K_1	mm	K_2		K_3
10	2,60	200	0,25		
20	2,45	300	0,50	Llana y permeable	0,5 – 0,7
40	2,15	400	0,75	Ondulada	0,5 – 1,2
100	1,80	500	1,00	Montañosa e impermeable	1,2 – 1,5
200	1,70	600	1,10		
500	1,40	700	1,17		
1000	1,30	800	1,25		
5000	1,00	900	1,32		
10000	0,90	1000	1,40		
20000	0,87	1200	1,50		

2.5.3.5 Formula de Keler

La fórmula de Keler expresa una condición directa para su utilización, que la precipitación media anual sea mayor a 500 mm, y esta se expresa de la siguiente forma:

$$C = \frac{a-b}{P} \quad (3)$$

Donde:

a = Oscila entre 0,88 y 1, si la cuenca es torrencial se aconseja utilizar 1.

b = Oscila entre 350 y 460, para cuencas torrenciales tomar el mínimo valor.

P = Precipitación media anual (mm).

Para establecer el coeficiente de escorrentía es aconsejable analizar en qué tipo de terreno se encuentra ubicada la cuenca y utilizar el método más eficiente. Para determinar la intensidad de la precipitación (mm/h) existen formas, pero la más apropiada es determinar un levantamiento de las precipitaciones que se crean en la cuenca de estudio para tener un valor real del flujo de agua generado.

Para determinar el aumento del caudal de la cuenca debido a las precipitaciones, es fundamental tener un periodo de retorno aceptable de acuerdo el tipo de la cuenca. La tabla 10 expresa datos comparativos del nivel de intensidad de una precipitación, al considerar la cantidad de flujo que se obtiene mediante el uso de pluviómetros.

Tabla 10. Valores estimados de una precipitación.

Intensidad de la lluvia	Acumulación en 1h
Débil	menos de 2 mm
Moderada	entre 2,1 y 15 mm
Fuerte	entre 15,1 y 30 mm
Muy fuerte	entre 30,1 y 60 mm
Torrencial	más de 60 mm

2.6 Determinación del caudal de diseño de una hidroeléctrica

Para determinar el caudal de diseño en una cuenca con un previo levantamiento de información como es el caso del río Toachi, es importante considerar el tipo de aprovechamiento hídrico que se desea obtener para establecer si la generación de energía eléctrica va a ser constante durante un año calendario o si va a variar de acuerdo a la época de estiaje.

El caudal del diseño se puede establecer al determinar los caudales medios, con la finalidad de aprovechar el caudal medio máximo en tiempo de crecidas para el funcionamiento de las turbinas a su máxima capacidad, y en tiempo de estiaje poder tener generación de energía.

Un factor fundamental es que no se puede utilizar todo el flujo del río para el funcionamiento de una hidroeléctrica debido a que se afecta directamente a la biodiversidad de la cuenca, es por eso la importancia de estudios hidrológicos y ambientales previos, pero para determinar el flujo necesario y minimizar el impacto ambiental en la cuenca, es necesario utilizar como máximo el 90% del caudal mínimo, para que el 10% del excedente fluya por la cuenca original del río, así el caudal de diseño será Q_{90} o menor para no generar un gran impacto ambiental. Para el proyecto Toachi-Pilatón se ha utilizado un caudal del 60% del río Pilatón estimando el caudal medio mínimo en relación a los meses se sequía, y para el caso del río Toachi un 50% obteniendo así un $Q_{60} = 13,33 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{50} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

2.7 Selección de una turbina

Para realizar una correcta selección de una turbina es necesario aclarar varios puntos, entre ellos es definir el tamaño de la central hidroeléctrica a diseñar. En la tabla 11 se puede observar la clasificación de acuerdo a los MW que genera una central hidroeléctrica.

Tabla 11. Resumen de centrales de generación según su potencia [6].

Tipo	Potencia
Centrales Grandes	> 50 MW
Centrales Medianas	5 - 50 MW
Centrales Pequeñas	1 - 5 MW
Mini centrales	100 kW - 1MW

Este criterio se lo establece con base en la siguiente ecuación:

$$P = 9,81 \times H_n \times Q \times \eta \quad (4)$$

Donde:

P = Potencia en kilovatios (kW).

H_n = Cabeza neta de diseño (m).

Q = Caudal nominal (m^3/s).

η = Eficiencia de la turbina hidráulica (%).

Al considerar la potencia a generar con el caudal obtenido del río es necesario comprobar el salto que se obtiene entre el nivel de la altitud máxima del agua en el tanque de carga y el nivel al que se encuentra el rodete de la turbina que acciona al generador [7], esto debido a la presión que ejerce el fluido de un punto al otro en una altura determinada, tal como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Resumen de las centrales de generación según su salto [7].

Clasificación	Tipo de salto	Altura (m)
Alta presión	Saltos grandes	$H > 300$
Media presión	Saltos Medianos	$15 < H < 300$
Baja presión	Saltos pequeños	$H < 15$

La velocidad específica [8] es un criterio importante para definir qué tipo de turbina se necesita diseñar para una central hidroeléctrica, el valor de la misma se determina a través de la ecuación 5.

$$N_s = \frac{n_e}{h} \sqrt{\frac{N}{\sqrt{h}}} = \frac{n_e \sqrt{N}}{h^{5/4}} \quad (5)$$

Donde:

N_s = Velocidad específica.

n_e = Revoluciones por minuto (rpm)

N = Potencia del eje o potencia al freno.

h = Altura neta del salto (m)

La velocidad específica (N_s) es el número de revoluciones con las que gira el rotor de la turbina semejante a la que se trata de buscar y que entrega una potencia equivalente y no mayor a un caballo de fuerza (Hp), instalada en un salto de altura unitario [8]. Para determinar N_s es fundamental estudiar previamente el caudal del río para establecer el caudal nominal para el diseño, además, de la factibilidad de obra civil para la construcción de la captación del caudal y de casa de máquinas, esto para obtener la altura del salto, ya que estos parámetros son necesarios para aplicar la expresión matemática de la velocidad específica. La tabla 13 muestra la clasificación de las turbinas según los resultados de la ecuación matemática 5.

Tabla 13. Clasificación de las turbinas según su velocidad específica [8]- [9].

Tipo de turbina	Velocidad específica (N_s)
Pelton con un inyector	5 - 30
Pelton con varios inyectores	30 - 50
Francis lenta	50 - 100
Francis normal	100 - 200
Francis rápida	200 - 300
Francis doble gemela rápida o express	300 - 500
Kaplan o de hélice	> 500

Además, una adecuada selección del tipo de turbina se la realiza con el ábaco mostrado en la figura 13, el cual basa sus datos con respecto a áreas características, las cuales tienen valores determinados por las expresiones matemáticas como el caudal y la capacidad a generar energía eléctrica [10]. Cabe recalcar que estos son los métodos más sencillos para determinar el tipo de turbina a utilizar, pero, para seleccionar la turbina ideal se realizan modelados los cuales permiten obtener la mayor eficiencia de uno u otro tipo de turbina, los cuales permiten al diseñador verificar que tipo de turbina es admisible para el proyecto a ejecutar.

De acuerdo con los parámetros establecidos en el proyecto hidroeléctrico Toachi - Pilatón el tipo de turbina para obtener la eficiencia más alta es de tipo Francis, según lo señalado por el diseñador en cada casa de máquinas se instalarán tres turbinas.

Como consecuencia del método de selección del tipo de turbina para una hidroeléctrica, se han utilizado software de diseño y modelación para desarrollar las turbinas con la mayor eficiencia posible, detallados en el siguiente apartado.

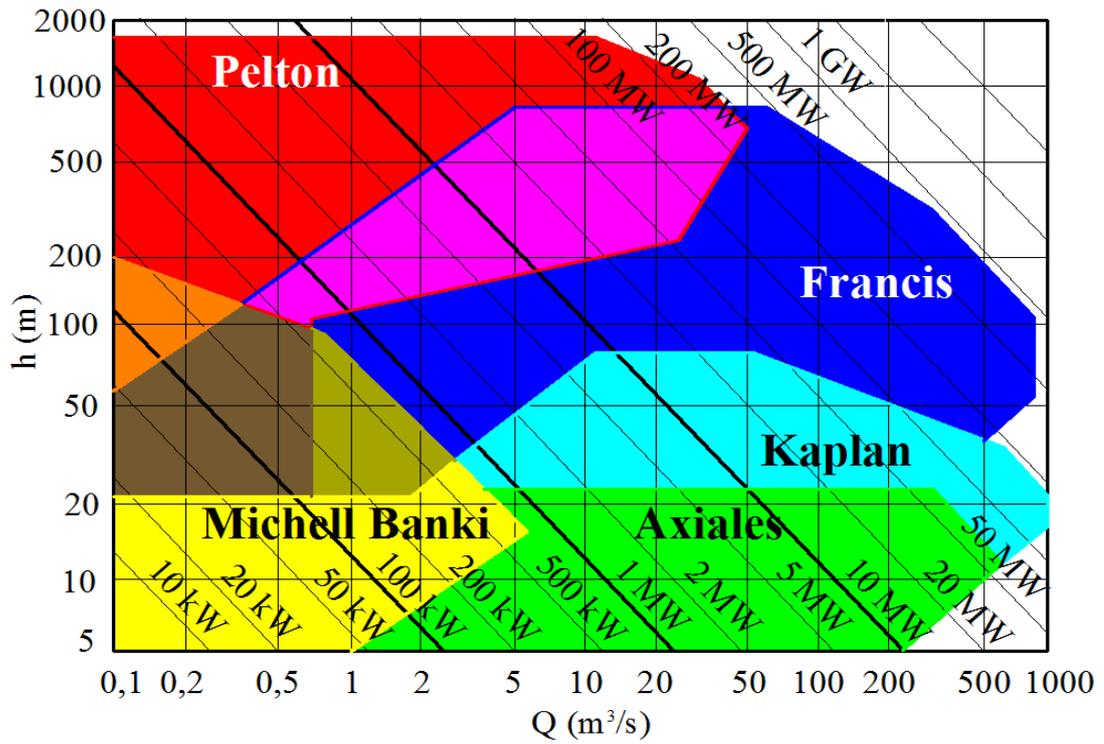


Figura 13. Ábaco para selección de turbinas [6].

3. Resultados y Discusión

Definidos los factores como la intensidad de precipitaciones, la geografía de la cuenca, el análisis hídrico, entre otros, los cuales permitieron determinar qué el caudal de diseño a utilizar en el proyecto hidroeléctrico Toachi - Pilatón será de 33,33 m³/s de agua, del cual serán 13,33 m³/s del río Pilatón y 20 m³/s del río Toachi, ya que los estudios hidrológicos tardaron al menos cuatro décadas.

El proyecto Toachi–Pilatón generará a su máxima capacidad 254,4 MW, demanda eléctrica que será generada por seis turbinas tipo Francis y una mini central, tres turbinas en casa de máquinas Sarapullo con potencia neta de 16,3 MW cada una, la mini central con una potencia nominal de 1,4 MW y casa de máquinas Alluriquín con tres turbinas con capacidad de 68 MW cada una, en la tabla 14 se muestra un listado de las hidroeléctricas en Ecuador.

Tabla 14. Hidroeléctricas en Ecuador según su capacidad, caudal y tipo de turbina según CELEC.

Hidroeléctrica	Tipo de turbina	Ríos	Caudal del río (m ³ /s)	Caudal de diseño (m ³ /s)	Potencia (MW)
Coca Codo Sinclair	Pelton	Coca	287	127	1500
Sopladora	Francis	Paute	150	150	487
Minas San Francisco	Pelton	Jubones	65	48,33	275
Toachi - Pilatón	Francis	Toachi y Pilatón	69,95	33,33	254,4
Delsitanisagua	Pelton	Zamora	47,30	28,32	180
Manduriacu	Kaplan	Guayllabamba	168,90	210	65
Quijos	Francis	Quijos y Pallatanga	29,15	33,96	50
Mazar Dudas	Pelton	Pindilig y Mazar	11,25	11,25	21

A razón de estos resultados y determinado el tipo de turbina que permite instalar la geografía de la cuenca y el caudal obtenido, se han utilizado software de diseño y modelado mecánico, entre los cuales están AutoCAD e Inventor, los cuales pertenecen a Autodesk Inc.

SolidWorks Corp., ha desarrollado un software que se orienta en el modelado de conjuntos mecánicos y gracias al procesamiento y programación de datos, se pueden generar simulaciones de trabajo de conjuntos mecánicos vinculados a la turbina como es el estator, distribuidor de apertura, válvula de admisión de aire, enfriadores de aceite, tuberías de los sistemas de control, entre otros sistemas que conjuntamente trabajan para el buen funcionamiento de la turbina. SolidWorks se empleó para el modelado y diseño de las turbinas Francis para el proyecto Toachi-Pilatón como se observa en la figura 14 por parte del departamento de ingeniería Tyazhmash.

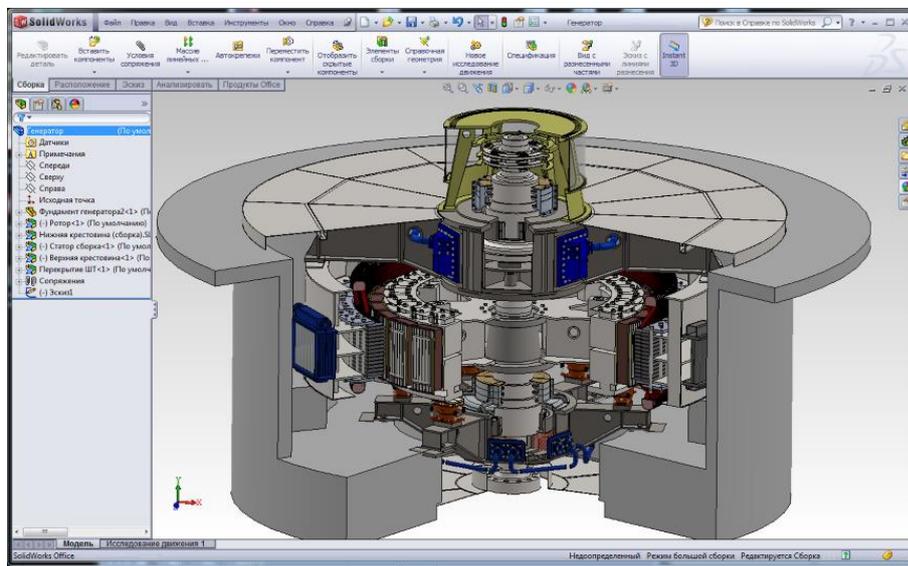


Figura 14. Modelado y diseño de turbina Francis en SolidWorks.

Para la verificación completa del comportamiento de la turbina se utiliza el software CATIA V5. Es desarrollado por Dassault Systèmes, este programa es utilizado para el modelado y diseño en la industria automotriz y aeroespacial, el cual es utilizado para la elaboración de los sistemas auxiliares de las turbinas entre ellos, drenaje, enfriamiento, separadores de agua y aceite, vaciado, los cuales son para el desempeño y para conseguir la mayor eficiencia de la turbina al captar la fuerza del caudal turbinado, en la figura 15 se muestra parte del modelado de las turbinas.

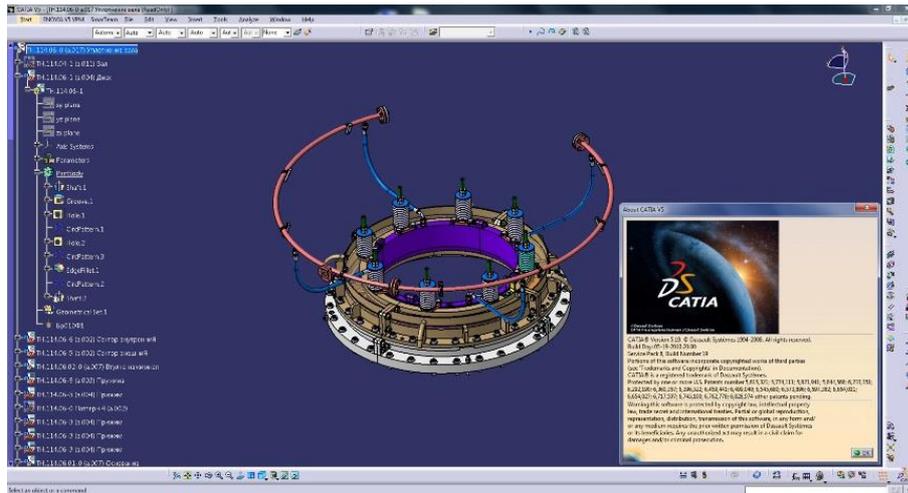


Figura 15. Modelado y diseño de sistemas auxiliares en Catia V5.

KOMIAC-3D (Compass - 3D), es un programa desarrollado por la empresa rusa Ascon, permite crear vistas estándar de cortes, secciones, detalles, entre otras, que se construyen automáticamente luego de diseñar en tres dimensiones la turbina con normas ECKD (ERT - Sistema para documentación de diseño) y СПДС (ASAP - Sistema de documentos de diseño para la construcción). En la figura 16 se observa parte de los planos de detalle generados por el software KOMIAC en base a los diseños generados de las turbinas para el proyecto Toachi-Pilatón.

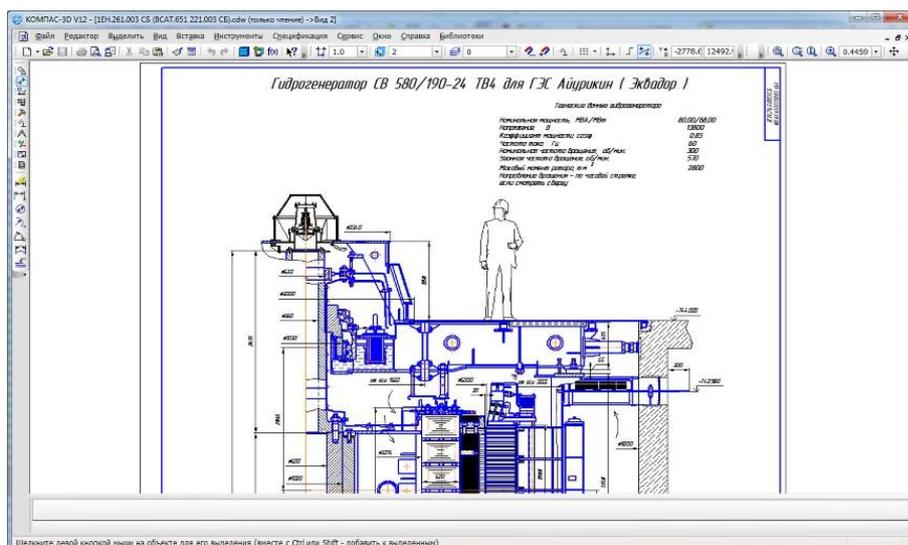


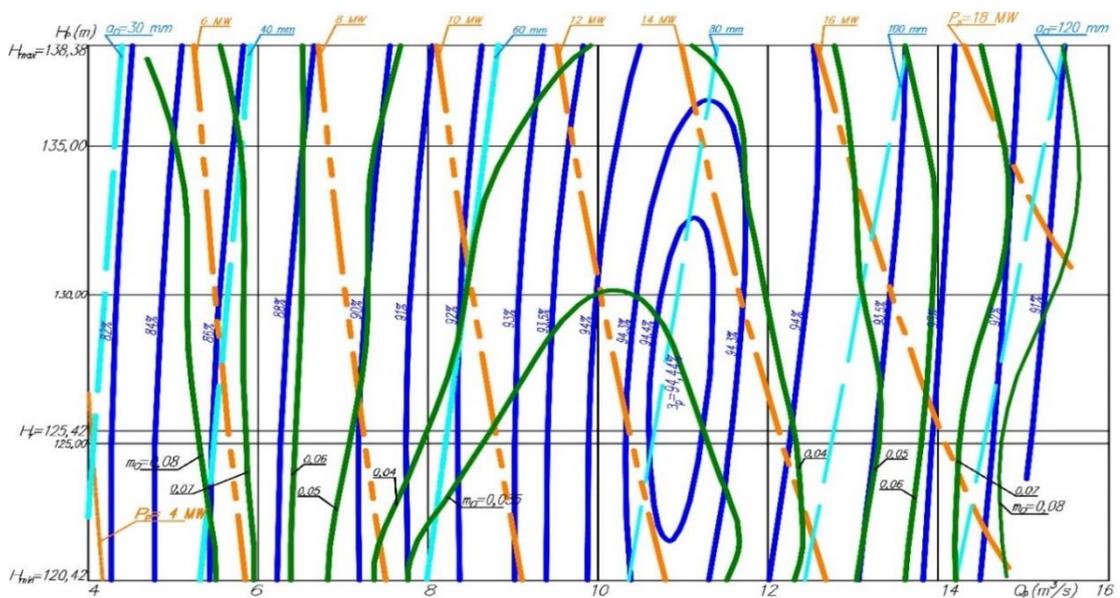
Figura 16. Planos de las turbinas generados en KOMIAC-3D

Para utilizar estos programas se requiere conocimientos y estudios de ingeniería en máquinas hidráulicas para así implantar con criterio los parámetros técnicos ya que es mandatorio para este trabajo la determinación del caudal de diseño.

Definido el diseño preliminar de la turbina, se procede a utilizar maquetas de prueba a escala para verificar las eficiencias.

En la figura 17 se muestran las curvas de eficiencia de las turbinas, la cual considera la apertura del distribuidor, el caudal, la cantidad de energía eléctrica generada, el salto de la turbina y el coeficiente de cavitación.

Para un entendimiento del diagrama de eficiencias siempre se deberá partir por el caudal utilizado en las turbinas y la potencia teórica. Las curvas de cavitación y de apertura del distribuidor son experimentales basándose en pruebas realizadas en maquetas a escala de la turbina hidráulica diseñada para así obtener la mayor eficiencia de trabajo posible.



1. Característica está dibujada por el recálculo con la característica universal de acuerdo con IEC 60193.
2. Simbología:
 - a_0 - apertura del distribuidor de la turbina, mm;
 - H_b - caída neta, m;
 - P_p - potencia de la turbina, MW;
 - Q_b - caudal de la turbina, m^3/s ;
 - η_p - eficiencia hidráulica de la turbina, %;
 - m_0 - coeficiente de cavitación, (-).

Figura 17. Curva característica de operación de la turbina hidráulica tipo Francis [11].

4. Conclusiones

En la actualidad los proyectos energéticos se enfocan en utilizar recursos renovables, para frenar la contaminación ambiental que han generado termoeléctricas y plantas nucleares, debido a ese impacto se ha fomentado la construcción de hidroeléctricas, en países con geografía generosa para su estudio y desarrollo.

Según CELEC la energía generada será para beneficio de cerca de 55300 familias, con un costo de 508 millones de dólares (sin incluir impuestos), y que ayudará a reducir 560 mil toneladas anuales de emisiones de CO₂ (dióxido de carbono) emanadas al ambiente por la utilización de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica.

Se necesita de un tiempo de retorno (tiempo de estudio) no menor a 20 años, pues en base a ésta consideración y la interpretación del caudal de esorrentía se puede determinar si la cuenca tendrá aumento o disminución de flujo por las precipitaciones por un periodo igual o mayor al del cálculo estimado.

Para determinar la factibilidad de la ubicación de las obras de toma y captación, represa, casas de máquinas y subestaciones, es necesario realizar estudios geológicos y topográficos, los cuales ayudará a establecer el tipo de terreno y sedimentos existentes en cada área de construcción del proyecto, identificando los tipos de suelos presentes y analizando los cortes presentes en el terreno como son las zanjas o realizando excavaciones o pozos.

Este tipo de análisis se los realiza con estudios estereoscópicos de fotografías aéreas, estos estudios acompañados de estudios topográficos los cuales se los realiza con estaciones topográficas trabajando en coordenadas geográficas que permiten realizar un levantamiento geométrico de la zona en estudio permitiendo obtener áreas específicas a gran escala y que son fundamentales para comprobar los estudios del

caudal de una cuenca y la potencia eléctrica a generar utilizando el caudal que así definirán el tipo de turbina hidráulica a utilizar para obtener el mayor potencia de trabajo, que para el proyecto Toachi – Pilatón se usará un caudal de 33,33 m³/s para accionar las turbinas Francis que producirán 254,4 MW con una eficiencia neta de 94,44 %.

El uso de los avances tecnológicos en la industria metalmecánica proporcionan como resultados la alta eficiencia obtenida por las turbinas, con ayuda de software para el diseño como Catia V5 y SolidWorks, que se enfocan directamente en proporcionar eficientes simulaciones que permiten obtener análisis estructurales, operativos, funcionales, y matemáticos, para identificar y conocer cuáles son las deficiencias en el diseño y problemas mecánicos para obtener el mayor rendimiento en el trabajo de las turbinas.

Una hidroeléctrica no solo depende de una turbina, sino de varios componentes de ingeniería específica, como las ingenierías oleo hidráulica, estructural, de control, electrónica, eléctrica y civil, las cuales tienen que estar enlazadas para el funcionamiento de la hidroeléctrica.

5. Referencias

- [1] L. E. Ríos Cando, Incidencia de la Variabilidad Climática en los Caudales Mínimos del Ecuador, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2010.
- [2] INAMHI, «INAMHI,» [En línea]. Available:<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/caudales-datos-historicos/>. [Último acceso: 01 04 2015].
- [3] J. y. N. G. Humbert, Influyente de la forêt sur le cycle de l'eau en domaine temperé. Une analyse de la littérature francophone. Estrasburgo, Francia: CEREG, 1992.
- [4] J. Sánchez San Román, «Universidad de Salamanca,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.usal.es/webusal/>.
- [5] M. H. G. J. Ibáñez S., «Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (c),» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2007.
- [6] I. Suescún Monsalve, «Universidad de Antioquia,» [En línea]. Available: <http://jaibana.udea.edu.co/grupos/centrales/files/capitulo%204.pdf>. [Último acceso: 17 Septiembre 2015].
- [7] M. Á. Salazar Márquez, Estudio de factibilidad para el dimensionamiento e implementación de un generador y subestación elevadora para la central hidroeléctrica "Sigchos", Quito, Pichincha, 2007.
- [8] H. García Gutiérrez y A. Nava Mastache, Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.

- [9] L. M. Álvarez Santamaría, «Escuela de Ingenierías de Antioquia,» 14 10 2002.
[En línea]. Available:
http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/sel_turbina_s/turbinas/index.htm. [Último acceso: 18 09 2015].
- [10] F. O. Muñoz Espinoza, Estudio de antecedentes científicos de optimización de álabes de turbinas Francis para el aumento del rendimiento, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2014.
- [11] Stekolshchikov, Chudin y Makarov, «Característica de caudal de operación de la turbina hidráulica de previsión,» TYAZHMASH, Syzran, Rusia, 2014.