UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

DETERMINACIÓN DE LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UN SISTEMA DE VARIACIÓN DE FLUJO DE AGUA UTILIZANDO TUBOS VENTURI

Trabajo de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Ahuqui Helme Vega Lema

DIRECTOR:

Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc

Ibarra, 2025

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA
   - En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003421847		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Vega Lema Ahuqui Helme		
DIRECCIÓN:	Otavalo		
EMAIL:	ahvegal@utn.edu.ec / ahuqui@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	S/N	**TELÉFONO MÓVIL:**	0961049532

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Determinación de la generación hidroeléctrica mediante un sistema de variación de flujo de agua utilizando tubos Venturi
AUTOR (ES):	Vega Lema Ahuqui Helme
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	24/02/2025
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Eléctrico
ASESOR / **DIRECTOR:**	Ing. Jhonny Javier Barzola Iza MSc./ Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 24 días del mes de Febrero de 2025

EL AUTOR:
(Firma).....
Nombre: Aluqui Helme Vega Lema

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Yo, Julio Esteban Guerra Masson en calidad de director del señor estudiante Vega Lema Ahuqui Helme certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "**DETERMINACIÓN DE LA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UN SISTEMA DE VARIACIÓN DE FLUJO DE AGUA UTILIZANDO TUBOS VENTURI**".

Para la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, aprobado la defensa, impresión y empastado.

Ing. Julio Esteban Guerra Masson MSc.

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIAS

Con todo mi cariño y gratitud dedico este trabajo de grado a mis padres Luis Vega y Ana Lema que han sido pilar fundamental en esta trayectoria de mi vida y me han apoyado en los momentos de dificultad dándome sus sabios consejos e inspirándome con sus fortalezas para enfrentar las adversidades que se han presentado y lograr cumplir esta meta en mi vida. Soy afortunado en tenerlos conmigo y los quiero mucho.

Quiero dedicar este trabajo a mis queridos hermanos que siempre hemos sido un gran equipo unido apoyándonos en todas nuestras dificultades y fortaleciéndonos mutuamente aprendiendo de cada uno, este logro también es de ustedes y seguiremos avanzando como familia.

Y con mucho cariño también a mis abuelitos que siempre han orado y pedido a Dios por mí para que no me falte fuerza y salud para seguir adelante, los quiero mucho.

A mis amigos Ricardo, Tatiana, Lizeth, Emerson, Milton y por último a Sebastián que ha sido una de las personas más brillantes que he conocido. Siempre me quedará de recuerdo los buenos momentos que hemos pasado juntos en la vida universitaria. Por último, también a mi buen amigo Omar que fue uno de mis primeros compañeros al entrar a la universidad.

Finalmente, a todos quienes han formado parte de esta trayectoria en mi vida universitaria.

Ahuqui Vega

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por cuidarme y bendecirme en todo momento, su amor incondicional me ha permitido avanzar con firmeza durante este trayecto y cumplir mis objetivos.

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a mi tutor MSc. Julio Guerra por ser un excelente docente y mentor al guiarme con sus conocimientos y experiencia para poder concretar con éxitos esta investigación de trabajo de grado. Su profesionalismo ha sido inspiración para mí y modelo a seguir académicamente.

Agradecer a mi asesor MSc. Jhonny Barzola por sus excelentes sugerencias que fueron parte fundamental para las mejoras de esta investigación, también como un buen docente por su paciencia y dedicación que fomentó a mi confianza y mis capacidades.

También a los excelentes docentes que conforman la Carrera de Electricidad por transmitir sus conocimientos e incentivar el pensamiento crítico. Por su dedicación para formar a excelentes profesionales y que se los recordará con admiración por su huella que han dejado en mi formación académica.

Por último, a mi querida “Universidad Técnica del Norte” que lo llevaré siempre en mi corazón y en cada momento de mi vida estaré orgulloso de haber pertenecido a tan excepcional institución.

Ahuqui Vega

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I 16

INTRODUCCIÓN 16

Tema: Determinación de la generación eléctrica mediante un sistema de variación de flujo de agua utilizando tubos Venturi. 16

1.1. Problema de investigación 16

1.2. Formulación de la pregunta de investigación 17

1.3. Objetivo General 17

1.4. Objetivos específicos 17

1.5. Alcance y delimitación 17

1.6. Justificación 18

CAPÍTULO II 20

MARCO TEÓRICO 20

2.1. Antecedentes 20

2.2. Componentes para la generación hidroeléctrica 22

2.3. La generación hidroeléctrica convencional 23

2.4. Disponibilidad de áreas adecuadas 23

2.5. Acceso a fuentes de agua con caudales constantes 24

2.6. Modelos de turbinas para generación hidroeléctrica 25

2.7. Turbina Michell Banki 26

2.8. Turbina Turgo 26

2.9. Turbinas Pelton 27

2.10. Turbina Francis 29

2.11. Teorema de Bernoulli 30

2.12. Tubo Venturi y su aplicación en la variación del flujo de agua 30

2.13. Diseño de tubos Venturi para la generación hidroeléctrica 31

CAPÍTULO III 33

MATERIALES Y MÉTODOS 33

3.1. Enfoque metodológico 33

3.2. Procedimiento. 34

3.3. Herramientas para determinar la generación eléctrica. 36

3.3.1. Referencia base de especificaciones reales de turbina a generador. 36

3.3.2. SolidWorks 37

3.3.3. Matlab 38

3.4. Expresiones matemáticas para el cálculo del sistema de generación. 39

3.4.1. Potencia Generada 39

3.4.2. Ecuación de Caudal 40

3.4.3. Ecuación Salto Hidráulico 40

3.4.4. Ecuación de Bernoulli 41

3.4.5. Número de Reynolds 41

3.4.6. Potencia Eléctrica 42

CAPITULO IV 44

RESULTADOS Y ANÁLISIS 44

4.1. Desarrollo de Modelos 3D de altura de caída en SolidWorks 45

4.1.1. Modelos 3D 45

4.1.1.1. Modelo 1 45

4.1.1.2. Modelo 2 49

4.1.1.3. Modelo 3 51

4.2. Resultados de los modelos simulados 52

4.2.1. Modelo 1 52

4.2.2. Modelo 2 54

4.2.3. Modelo 3 55

4.3. Cálculo turbulencia del flujo de agua 57

4.4. Cálculo de potencial mecánico de turbina 57

4.4.1. Modelo 1 57

4.4.2. Modelo 2 58

4.4.3. Modelo 3 58

4.5. Conversión de Energía en Matlab/Simulink 58

4.5.1. Modelo 1 59

4.5.2. Modelo 2 62

4.5.3. Modelo 3 63

4.6. Determinación de la generación eléctrica 65

4.6.1. Modelo 1 66

4.6.2. Modelo 2 67

4.6.3. Modelo 3 67

4.7. Análisis y comparativa de los 3 Modelos 68

Conclusiones 71

Recomendaciones 73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Central hidroeléctrica típica con embalse [9]. 23

Figura 2. Comportamiento de trabajo de la turbina Banki [16]. 26

Figura 3. Aspas de la Turbina Turgo [17]. 27

Figura 4. Giro de turbina por chorro de agua [27]. 27

Figura 5. Típico arreglo de una turbina Pelton [19]. 28

Figura 6. Mallado de turbina Francis [30]. 29

Figura 7. Boceto del tubo Venturi [24]. 31

Figura 8. Diagrama de bloques de procedimiento de trabajo de grado. 34

Figura 9. Depósito de caudal [36]. 45

Figura 10. Tubería caída de agua. 46

Figura 11. Tubo Venturi completo. 47

Figura 12. Medio Venturi boca estrecha. 47

Figura 13. Turbina Francis [35]. 48

Figura 14. Circuito hidráulico Modelo 1. 49

Figura 15. Tubería curva. 50

Figura 16. Circuito hidráulico Modelo 2. 50

Figura 17. Circuito hidráulico con medio Venturi Modelo 3. 52

Figura 18. Diseño general de Simulink para generación eléctrica. 59

Figura 19. Generación eléctrica Modelo 1 Simulink. 60

Figura 20. Producto de constantes Modelo 1 Simulink. 61

Figura 21. Ángulo de la potencia, Rpm y Potencia Eléctrica Modelo 1. 61

Figura 22. Generación eléctrica Modelo 2 Simulink. 62

Figura 23. Producto de constantes Modelo 2 Simulink. 62

Figura 24. Ángulo de la potencia, Rpm y Potencia Eléctrica Modelo 2. 63

Figura 25. Generación eléctrica Modelo 3 Simulink. 64

Figura 26. Producto de constantes Modelo 3 Simulink. 64

Figura 27. Ángulo de la potencia, Rpm y Potencia Eléctrica Modelo 3. 65

Figura 28. Generación del potencial eléctrico final Modelo 1. 66

Figura 29. Generación del potencial eléctrico final Modelo 2. 67

Figura 30. Generación del potencial eléctrico final Modelo 3. 68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ficha Técnica de turbina y generador [34]. 37

Tabla 2. Valores de flujo Modelo 1. 53

Tabla 3. Valores de flujo Modelo 2. 55

Tabla 4. Valores de flujo Modelo 3. 56

Tabla 5. Resumen General de los tres modelos. 68

RESUMEN

El crecimiento exponencial de la generación hidroeléctrica ha tenido un impacto significativo en cuanto al sector eléctrico por el aprovechamiento del flujo de agua hacia las turbinas acopladas al generador eléctrico, pero a su vez, este tipo de modelo enfrenta limitaciones específicamente en regiones donde no es posible aprovechar el flujo de agua por la limitación de la altura de caída de agua. Este trabajo de titulación aborda el problema de esa falta de altura proponiendo como solución un cambio en el modelamiento del sistema hidroeléctrico adjuntando tubos Venturi para variar y compensar el flujo de agua que necesita la turbina y determinar la generación eléctrica final. El propósito de este trabajo de grado es simular en SolidWorks y analizar la variación de flujo de agua dentro del tubo Venturi como la presión, la velocidad y el caudal. Se realizó un enfoque cuantitativo detallado en tablas para los resultados de la simulación de los tres mejores modelos con las variables asociadas al flujo antes y después de entrar al tubo Venturi. Los datos de flujo resultantes fueron utilizados para determinar la potencia final en un generador síncrono de Simulink. Los resultados indican que la integración del tubo Venturi ayuda a compensar la velocidad de flujo de agua cuando existe limitación de altura de caída de agua. En conclusión, el modelo propuesto ofrece garantizar la generación eléctrica disminuyendo la caída de agua en este caso de 10 metros a un mínimo de 1.93m de altura.

Palabras clave:

Venturi, flujo, hidroeléctrica, presión, simulación.

ABSTRACT

The exponential growth of hydroelectric generation has significantly impacted the electric sector by harnessing water flow directed toward turbines coupled with electric generators. However, this model faces limitations, particularly in regions where water flow cannot be efficiently utilized due to insufficient water head height. This thesis addresses the issue of limited water head by proposing a modification to the hydroelectric system's design through the incorporation of Venturi tubes to adjust and optimize the water flow required by the turbine, thereby determining the final electrical generation. The objective of this study is to simulate and analyze water flow variations, including pressure, velocity, and discharge, within the Venturi tube using SolidWorks. A quantitative approach was employed, presenting simulation results in detailed tables for the three best models, focusing on variables before and after the Venturi tube. The flow data obtained were further used to estimate the final power output in a synchronous generator modeled in Simulink. The results demonstrate that the integration of a Venturi tube compensates for reduced water velocity when water head height is limited. In conclusion, the proposed model ensures consistent electricity generation, reducing the required water head height from 10 meters to as low as 1.93 meters, making it a viable solution for low-head hydroelectric applications.

Keywords: Venturi, flow, hydroelectric, pressure, simulation.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Tema: Determinación de la generación hidroeléctrica mediante un sistema de variación de flujo de agua utilizando tubos Venturi.

1.1. Problema de investigación

En la generación hidroeléctrica convencional, se utiliza la energía cinética del agua en movimiento para impulsar las turbinas. La eficiencia de este proceso depende en gran medida de la caída o diferencia de altura del agua, también conocida como pendiente o desnivel. Cuanto mayor sea la pendiente, mayor será la energía cinética del agua que impulsará a la turbina y, por lo tanto, mayor será la capacidad para generar electricidad. Sin embargo, la no disponibilidad de áreas adecuadas o las limitaciones de altura para el aprovechamiento del potencial cinético se convierte en un desafío para determinar la generación eléctrica. Esto suele llevar hacer gastos muy elevados con cimientos para compensar esa falta de altura como en el caso de los embalses artificiales.

Como muchos lugares no cuentan con la pendiente suficiente para generar electricidad de manera rentable, no se aprovecha en totalidad el acceso a fuentes de agua con caudales constantes, esto restringe la ubicación y asentamiento para la construcción hidroeléctrica en determinadas regiones.

1.2. Formulación de la pregunta de investigación

¿Cómo varía el potencial producido de un generador hidroeléctrico a través de cambios en el flujo de agua mediante tubos Venturi?

1.3. Objetivo General

Determinar la generación hidroeléctrica mediante un sistema de variación de flujo de agua para bajas potencias.

1.4. Objetivos específicos

- Describir las tecnologías de hidro generación y la influencia del caudal y altura en las mismas.
- Modelar el sistema de cambio de flujo de agua a través de tubos Venturi reduciendo la altura de la pendiente y aumentando el caudal.
- Realizar pruebas en simulación del sistema de modificación de flujo para el estudio de la cantidad de generación eléctrica

1.5. Alcance y delimitación

Es importante destacar que la altura de la represa donde ésta contiene el agua tiene una energía potencial dependiendo el caudal y a qué altura se encuentra y eso hace que la energía cinética del agua afecte a las turbinas que hacen funcionar el generador hidroeléctrico.

En este trabajo se procederá a variar este sistema reduciendo la pendiente necesaria. Y para no afectar el flujo de agua se utilizará tubos Venturi y geometrías similares como solución al cambio del sistema sin afectar el funcionamiento y capacidad del generador hidroeléctrico.

El teorema de Bernoulli será completamente relevante en esta investigación para explicar el diseño de los tubos que varían los flujos del agua.

Para demostrar que la potencia eléctrica no será afectada se va a partir de un generador con especificaciones donde requiera un caudal y cierta altura que determinan un flujo específico para su funcionamiento. Se lo hará funcionar con la misma potencia usando el nuevo sistema a ser desarrollado.

Se elegirá el modelo de turbinas a usar dependiendo al desarrollo del diseño del sistema como las Michell Banki, Turgo, Pelton o Francis.

Todo este proyecto se va a simular y obtener los resultados en el software computacional para los comportamientos de fluidos, los elementos que componen el sistema para generación hidroeléctrica y de esa manera determinar la generación hidroeléctrica.

1.6. Justificación

Con este aporte de investigación se propone una nueva forma de efectuar el arranque de las turbinas que a su vez hace funcionar el generador hidroeléctrico utilizando los tubos Venturi para variar el flujo del agua, pero sin afectar el caudal necesario por la disminución de la pendiente; haciendo que en un espacio donde por estudios topográficos no haya disponibilidad de construir una represa con una pendiente necesaria sea este estudio de gran utilidad.

Su importancia radica a una solución alternativa al funcionamiento del generador hidroeléctrico sin que se vea afectada su capacidad de generación de energía eléctrica.

El tubo de Venturi un conducto con un estrechamiento corto entre dos tramos de forma cónica. Disponiendo de dos medidores de presión, uno en la sección ancha y otro en la estrecha, se puede determinar la disminución exacta de dicha presión y la velocidad del fluido.

Con el empleo de este dispositivo es posible, por tanto, variar la velocidad de circulación del flujo de agua.

La pertinencia en esta investigación da la solución a sistemas de generación eléctrica de baja potencia que requieren una solución cuando se dispone de limitados componentes como altura y caudal de agua para el funcionamiento requerido en el generador eléctrico.

La capacidad de variar el flujo de agua mediante los tubos Venturi también contribuye a la estabilidad y la seguridad operativa del generador hidroeléctrico. Al tener un control preciso, se pueden evitar condiciones de flujo inestables o indeseables, como formación de burbujas o golpes que son causados por los cambios bruscos de presión y velocidad del fluido que podrían dañar el equipo y reducir la vida útil del generador.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se trata la descripción de la estructura del sistema de generación hidroeléctrica detallando todos los elementos que éste compone. Se explicará de los elementos que servirán para el desarrollo de este nuevo sistema, como las turbinas, el generador y su capacidad; el caudal de agua, y los tubos Venturi o figuras geométricas similares. También se va a explicar mediante teoremas cómo los tubos afectarán a estos flujos de agua que se requieren para el funcionamiento del hidro generador.

2.1. Antecedentes

"Si bien la energía hidroeléctrica se considera un recurso renovable, hay que contemplar que el desarrollo de electricidad a gran escala puede provocar daños ambientales y conflictos sociales, particularmente en el caso de las centrales hidroeléctricas basadas en el almacenamiento dentro de los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PAHs), los cuales mitigan los impactos ambientales asociados a los sistemas de producción de electricidad debido a que no requiere la inundación de grandes terrenos ni produce residuos contaminantes"[1].

"La generación hidroeléctrica (HG) es altamente susceptible al flujo de la corriente y se ve afectada negativamente por las sequías de la corriente. Sin embargo, hay una falta de estudios sobre el impacto de la sequía del flujo de corriente en HG" [2].

"La construcción de represas hidroeléctricas a gran escala ha aumentado en las últimas décadas en el Sur Global y en las economías emergentes. El reasentamiento de la población es uno de los impactos socioeconómicos más graves causados por la construcción de presas. Los procesos destinados a mitigar sus impactos y restablecer los medios de vida a menudo se describen como inadecuados" [3].

"Los impactos socio ecológicos negativos generados por las represas hidroeléctricas a gran escala se han reportado ampliamente en la literatura" [4].

"Las presas con embalse han sido utilizadas por el ser humano desde hace al menos 5.000 años con la finalidad de regular las variaciones del ciclo del agua para poder disponer de ese recurso más previsiblemente a lo largo del año y, de esta manera, poder cubrir necesidades tan variadas como el riego, la piscicultura, la producción de agua potable, la navegación, la atenuación de extremos hídricos (sequías e inundaciones) y el aprovechamiento recreacional. Desde el último cuarto del siglo XIX, las presas también permiten generar energía eléctrica a partir de una fuente renovable" [5].

"Las centrales hidroeléctricas con embalses también juegan un papel importante en las inundaciones, controlando el nivel del río y utilizando mejor el recurso hídrico para la generación de energía. El gran problema con las inundaciones es que, dado que ocurren en poco tiempo durante las estaciones lluviosas, pueden exponer a las represas a un riesgo potencial" [6].

"El efecto Venturi se emplea en una variedad de aplicaciones en este estudio. Antes de que el conducto Venturi pueda emplearse en diversos sectores, se deben caracterizar sus cualidades mecánicas. Además, el enfoque de elementos finitos se utiliza para modelar el conducto Venturi

con el fin de evaluar el rendimiento mecánico del elemento impreso, incluida la estructura estática, la presión y la representación de la velocidad para el flujo" [7].

"El flujo de agua en un conducto se puede clasificar de diferentes formas para ayudar al análisis de los problemas hidráulicos. El flujo laminar describe el flujo regular de agua con una velocidad relativamente baja. Cuando el agua fluye en un conducto se mueve en capas paralelas sin corrientes cruzadas. Conforme la velocidad se incrementa, el flujo se vuelve más irregular con corrientes cruzadas pulsantes dentro del conducto. Este tipo de flujo recibe el nombre de flujo turbulento" [8].

2.2. Componentes para la generación hidroeléctrica

Para la generación hidroeléctrica, algunos de los componentes comunes para el sistema incluyen presas, turbinas, generadores, tubos de conducción, canales de desvío y equipamiento auxiliar. Las presas proporcionan la diferencia de altura necesaria para generar energía, mientras que las turbinas convierten la energía cinética del agua en energía mecánica. Los generadores transforman esta energía mecánica en energía eléctrica. Los tubos de conducción y los canales de desvío permiten el flujo controlado del agua, y el equipamiento auxiliar incluye compuertas, comportas, válvulas y sistemas de control.

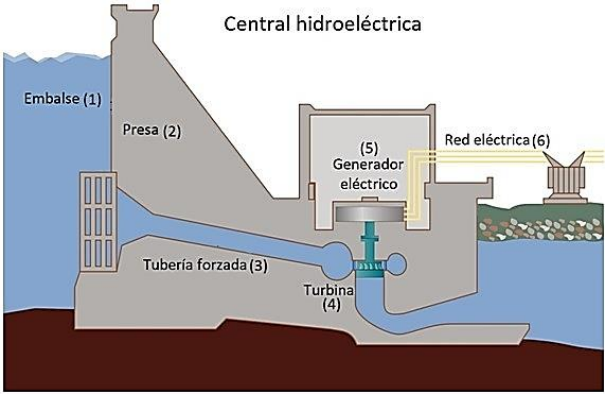


Figura 1. Central hidroeléctrica típica con embalse [9].

2.3. La generación hidroeléctrica convencional

Uno de los inconvenientes que tiene la generación hidroeléctrica y por ende se habla en este capítulo es la altura de la pendiente necesaria que está directamente ligado a la generación de electricidad y que en ciertos lugares existe la dificultad para construir represas donde almacenamiento de agua no logra obtener una energía cinética necesaria y de esta forma no se termina aprovechando el potencial del generador. A esto repara la construcción de grandes represas que implica la inundación de extensas áreas de tierra, lo que puede resultar en la pérdida de hábitats naturales, la destrucción de ecosistemas y la reubicación forzada de comunidades locales. Además, la creación de embalses puede alterar los patrones de flujo de los ríos y afectar negativamente a la flora y fauna de la región [31]. También la construcción de grandes represas puede ser costosa y llevar mucho tiempo.

2.4. Disponibilidad de áreas adecuadas

Según Montoya y varios autores [10], indica que los estudios científicos recientes que describen las problemáticas propias de los megaproyectos para la producción de energía

hidroeléctrica y de sus entornos son bastante críticos frente a la construcción y entrada en operación de los embalses. Estos han tenido algunos efectos como poner en cuestión la calificación de verde o sustentable de dicho tipo de energía, y posicionar la discusión tanto en la agenda nacional como en la internacional y han concluido, casi unánimemente, con base en casos de estudio y en generalizaciones cuantitativas que los riesgos, efectos negativos e impactos problemáticos en términos ambientales, sociales, geológicos y financieros superan con creces las ventajas de la intervención.

La disponibilidad de áreas adecuadas en este caso a bajas potencias para generar electricidad se utiliza principalmente en lugares alejados donde se dispone de recursos hidroeléctricos que sean sostenibles a largo plazo [11].

2.5. Acceso a fuentes de agua con caudales constantes

Para que el funcionamiento del generador hidroeléctrico esté presente durante todo el año, es necesario tener un flujo de agua constante, ya que desde este apartado se concentra todo el sistema de generación.

El acceso a caudales constantes para la generación hidroeléctrica varía según las condiciones y recursos hídricos que hay en cada ubicación.

Para empezar, la construcción de embalses o represas en ríos o arroyos puede proporcionar un acceso controlado a caudales constantes. El embalse almacenará agua durante períodos de mayor caudal y permitirá la liberación gradual de agua para mantener un flujo constante hacia la central hidroeléctrica [12].

Canales y tuberías de derivación: Se pueden construir canales de derivación para desviar una parte del caudal de un río o arroyo hacia la central hidroeléctrica. Estos canales pueden regularse para mantener un flujo constante de agua y al igual que los canales de derivación, las tuberías de derivación permiten redirigir una porción del caudal de un cuerpo de agua hacia la central hidroeléctrica. Las tuberías pueden ser más eficientes en términos de pérdidas de agua y pueden adaptarse mejor a terrenos difíciles. [13].

La elección de los accesos a caudales constantes dependerá de las características específicas de la ubicación y los recursos hídricos disponibles.

2.6. Modelos de turbinas para generación hidroeléctrica

Debido a que existen variaciones en las características de recursos hídricos disponibles para la generación hidroeléctrica se tiene varios modelos de turbinas para cada uso específico, ya sea por la altura de la presa, el nivel de caudal y entre otras varias situaciones.

A continuación, se explica de las turbinas potencialmente útiles para el empleo del nuevo sistema propuesto y de éstas se escoge la más adecuada para el uso en conjunto con el circuito hidráulico propuesto.

Los componentes que en conjunto determinan las opciones de flexibilidad y la producción total de energía a partir del flujo de agua son las turbinas de impulso, como las turbinas Pelton, de flujo cruzado y Turgo, para lugares con una alta altura de caída [14].

2.7. Turbina Michell Banki

Se ha tomado en cuenta esta turbina porque tiene un inyector que posee una pared superior envolvente la cual guía el fluido con la menor pérdida obteniendo el mayor aprovechamiento de la energía de flujo [15].

En relación de esta turbina que se muestra en la Figura 2, con el tubo Venturi, es una opción viable debido a que esta turbina trabaja eficientemente con caudales más bajos y altas velocidades de flujo. Se emplean turbinas de flujo cruzado para estos sistemas de baja escala debido a que es mucho más viable su construcción en términos de costo, diseño y vida útil. Sin embargo, hay que tener en cuenta a comparación de una turbina como las Pelton, en términos de eficiencia máxima es mucho más baja [15].

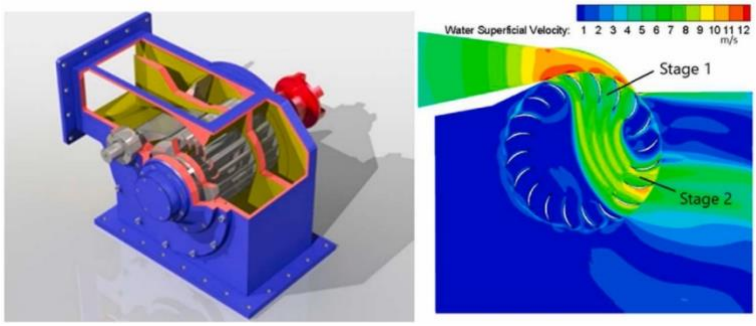


Figura 2. Comportamiento de trabajo de la turbina Banki [16].

2.8. Turbina Turgo

El funcionamiento de las turbinas Turgo se basa en el principio de la conversión de energía cinética del agua en energía mecánica. Estas turbinas son del tipo de impulso, lo que significa que el agua pasa a través de una tobera de alta velocidad antes de golpear los álabes de la turbina. El

chorro de agua impacta directamente en los álabes de la turbina, generando una fuerza que hace que la turbina gire.

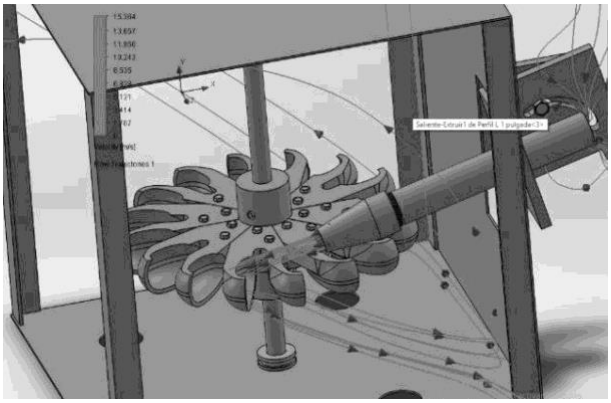


Figura 3. Aspas de la Turbina Turgo [17].

2.9. Turbinas Pelton

Una turbina hidroeléctrica potencial puede ser la turbina Pelton. La turbina Pelton es ampliamente utilizada en proyectos de generación hidroeléctrica de gran altura, donde hay una gran diferencia de altura (pendiente) entre el nivel superior e inferior del agua.

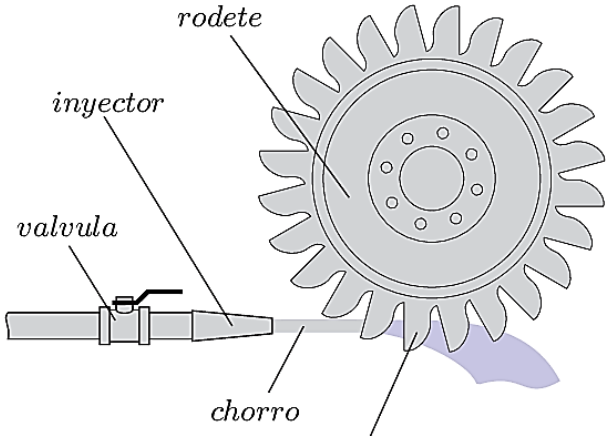


Figura 4. Giro de turbina por chorro de agua [27].

Los tubos Venturi pueden utilizarse para controlar y variar el flujo de agua hacia la turbina. Como estos tubos tienen una sección estrecha en el centro que acelera la velocidad del agua compensando la altura, lo que es beneficioso para el diseño de la turbina Pelton con aspas en forma de cuchara, que de esta forma no habría inconveniente respecto a la energía cinética del agua.

La turbina Pelton consiste en una serie de toberas que dirigen chorros de agua de alta velocidad hacia paletas o cucharas en forma de cubeta montadas en una rueda de turbina. Estas paletas capturan la energía cinética del agua, lo que provoca la rotación de la rueda de la turbina. Luego, esta rotación se transfiere a un generador para producir electricidad [20].

Al reducir la pendiente de la represa, la energía potencial del agua será menor, pero aún se puede aprovechar la energía cinética del agua utilizando la turbina Pelton. La velocidad del agua se puede ajustar mediante los tubos Venturi para adaptarse a las condiciones específicas del flujo de agua disponible.

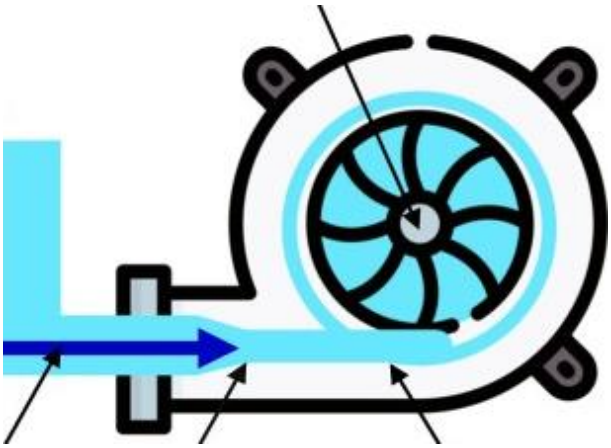


Figura 5. Típico arreglo de una turbina Pelton [19].

2.10. Turbina Francis

Debido a su diseño circular de caracol donde sus álabes móviles se encuentran alineados de manera espiral, resulta mejor en el manejo del fluido y este puede trabajar a distintas alturas de caída de agua con un buen rendimiento que puede ser observable a plena carga [28].

Este tipo de turbina se alinea muy bien al tipo de sistema de variación de flujo propuesto por su capacidad de manejar caudales constantes elevados y llevar el flujo de agua desde su entrada mientras se va reduciendo la presión continuamente hasta la salida del rodete [29].

El flujo de agua que recorre por dentro de esta turbina golpea la superficie de las palas del rodete y esta gira a una velocidad constante que a su vez esa velocidad se ha transferido en forma de energía mecánica al generador a través del eje por lo que finalmente se produce la electricidad [29].

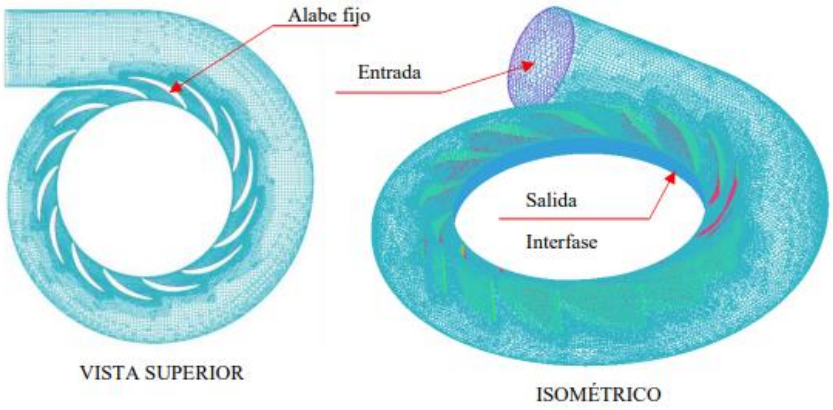


Figura 6. Mallado de turbina Francis [30].

2.11. Teorema de Bernoulli

Según M. Ruiz Garrido explica que un fluido se refiere a una sustancia capaz de sufrir deformaciones con facilidad cuando se le somete a fuerzas cortantes o tangenciales, incluso si estas son mínimas. La mecánica de fluidos es un área de investigación que se concentra en el estudio del movimiento de los fluidos, empleando los principios fundamentales de la mecánica clásica. Esta disciplina forma parte de la Mecánica de los Medios Continuos, que a su vez constituye una rama de la Física [22], por lo que es fundamental aplicarlo en este trabajo de grado debido al cambio de presión que por consiguiente afecta el fluido que es suministrado a la turbina conjunto con el generador eléctrico.

2.12. Tubo Venturi y su aplicación en la variación del flujo de agua

El tubo Venturi tiene la característica de tener dos áreas disparejas uno más pequeño que el otro, esto es útil en cuanto se requiere variar un flujo de agua donde la parte más estrecha tendrá su presión y velocidad más alta a comparación del área más grande [19].

Para calcular los valores dentro de este tubo se tiene el teorema de Bernoulli que explica el comportamiento de los fluidos mecánicos. Este teorema es útil para llevar a cabo este proyecto de titulación debido a que los apartados mencionados en el anterior párrafo deben ser calculados con precisión para el funcionamiento requerido en el generador hidroeléctrico.

Los tubos Venturi son componentes estándar utilizados para regular el flujo de líquidos. A continuación, se detallan los principios de cómo miden el caudal. Cuando un fluido que fluye a través de una tubería llega a la sección de estrangulamiento del tubo Venturi, se produce una reducción en el flujo del líquido y, como resultado, la velocidad del flujo aumenta. Al mismo

tiempo, la presión diferencial estática disminuye, generando una diferencia de presión entre la parte delantera y trasera de la garganta del tubo Venturi [21].

2.13. Diseño de tubos Venturi para la generación hidroeléctrica

En este tipo de instrumentos, los fluidos por lo general tienen turbulencia provocando así fluctuaciones y remolinos que adicionan transferencia de movimiento y energía, también se relacionan con coeficientes de fricción, transferencia de calor y transferencia de masa [23].

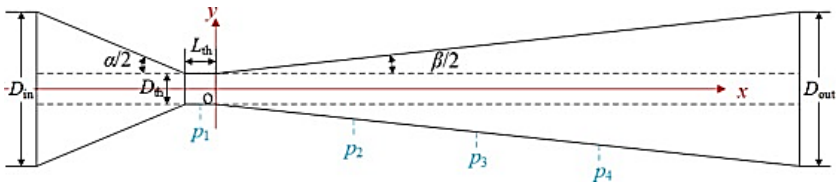


Figura 7. Boceto del tubo Venturi [24].

Lo fundamental de utilizar este tipo de tubos es la facilidad que otorga a la regulación de la presión interna requerida. Y para saber si existe un flujo de agua con mucha turbulencia o si es laminar, acudimos al número adimensional de Reynolds que explica que si hay un valor menor a 2300 entonces hay flujo laminar, si en cambio hay valores entre 2300 a 4000 se puede considerar un intermedio que está próximo a ser turbulento, y cuando hay valores superiores a 4000 entonces se tiene una turbulencia extrema [23].

La aplicación del tubo Venturi es ir variando el flujo de agua para que a mayor presión haya más velocidad en la continuidad del agua [24], esto hará girar las turbinas que están acopladas al generador y con esto determinar la energía eléctrica.

En el trabajo de tesis de Mejía Rómulo, en palabras exactas, menciona que, de acuerdo con ley de conservación de la energía, en este caso, la presión disminuye y esto ocasiona que la energía cinética aumente [25].

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se da a conocer los métodos y materiales utilizados en el desarrollo del sistema propuesto para determinar la generación eléctrica. También se detallan los métodos de cada actividad utilizados para conseguir cumplir los objetivos propuestos de este trabajo de grado.

3.1. Enfoque metodológico

La metodología de este trabajo tiene un enfoque basado en el método práctico de diseño experimental de simulación computacional de un sistema de variación de flujo de agua utilizando tubos Venturi para determinar la cantidad de potencia que puede producir un generador eléctrico debido a la importancia de obtener un valor numérico medido.

Durante el desarrollo de este trabajo, se realizó las investigaciones bibliográficas en base al conjunto de elementos que determinan la generación hidroeléctrica, siendo estos como el embalse, las turbinas, las tuberías que son ajustables para estructurar la producción y determinación de energía eléctrica requerida.

Teniendo en cuenta el objetivo principal de este trabajo, es fundamental evaluar los comportamientos de flujo de agua con la altura disminuida haciendo un análisis del resultado obtenido y observando las dificultades de haber realizado este cambio de altura de caída de agua.

En el software de SolidWorks, se realizó el modelamiento del tubo Venturi que después iniciando las simulaciones se pudo observar cómo el flujo varía afectando la generación de electricidad. Se optó esta técnica por la facilidad de acceso a las herramientas que se necesitan para

simular el comportamiento real de un fluido dentro del tubo Venturi. La finalidad de esta simulación es entregar al generador la misma potencia eléctrica al igual que en un sistema de caída de agua convencional.

3.2. Procedimiento.

En este apartado se detalla cada una de las actividades realizadas respecto a los objetivos generales planteados que sirvieron para desarrollar el sistema de generación eléctrica propuesta.

A continuación, en la Figura 8 se desglosa los ítems de las actividades respecto a cada objetivo específico:

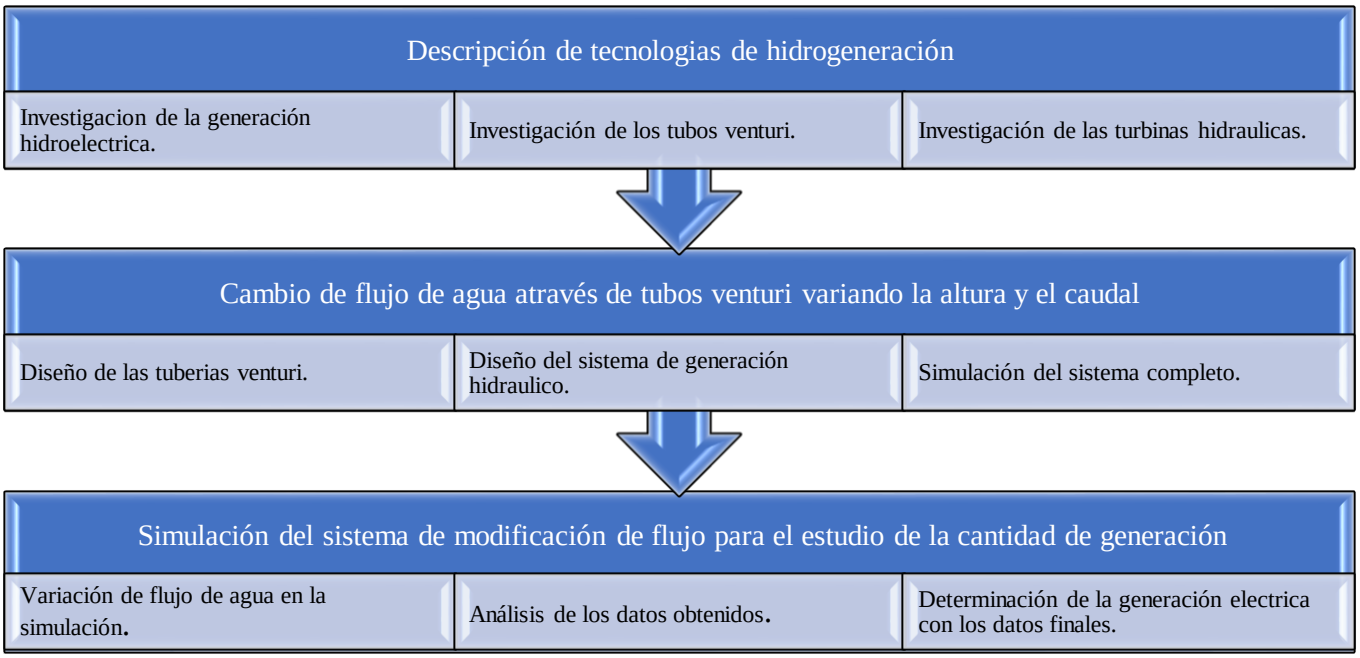


Figura 8. Diagrama de bloques de procedimiento de trabajo de grado.

A continuación, la metodología utilizada a partir de las actividades propuestas se basa en la aplicación del paradigma mixto que incluyen los enfoques cualitativos (revisión bibliográfica) y cuantitativos (análisis numérico) para demostrar el resultado final del trabajo de grado que en

los siguientes párrafos se desglosa a detalle los métodos utilizados para definir la metodología de este trabajo de grado.

Dentro del primer objetivo se detallan las actividades de investigación referentes a la generación hidroeléctrica, a los tubos Venturi y a las turbinas hidráulicas, siendo estas búsquedas pertenecientes al método bibliográfico debido a la necesidad de una revisión exhaustiva con información actualizada de esos temas mencionados para así con buen criterio elegir trabajos de otros autores que servirán de apoyo a la elaboración de este trabajo de grado.

Siguiendo con las actividades del segundo objetivo se tiene el modelamiento del sistema de generación hidroeléctrica donde primero se diseña las tuberías Venturi esquematizando las medidas necesarias del diámetro en la salida y entrada de la tubería, seguido, se diseña el circuito hidráulico desde el depósito de caudal seguido por las tuberías con medidas de altura de caída reducidas, la turbina y el generador. Precisamente la tubería Venturi es adjuntado en la parte final a las tuberías normales. Finalmente simular el sistema completo y obtener a detalle los resultados cuantitativos. Todo esto forma parte del método experimental en el segundo objetivo por la razón de que se trabaja con variables que se pueden manipular y operar como en el caso de las medidas del sistema para la caída y velocidad del flujo de agua y la generación eléctrica final obtenida.

En el tercer objetivo, después de tener diseñado el sistema propuesto de generación, el método utilizado es el de método de investigación-acción porque se varía el flujo de agua en diferentes cantidades donde se puede observar los cambios en el comportamiento respecto a la generación eléctrica final que se determina por las variables controladas como el caudal o la altura de la caída asignada en el diseño computacional. Con estos datos cuantitativos obtenidos se hace

un análisis para comprobar si los resultados son los esperados respecto a la potencia que se desea generar en el generador hidroeléctrico.

Por último, en la actividad final del tercer objetivo se exponen los datos finales de la simulación que cumplen para determinar la generación eléctrica deseada.

3.3. Herramientas para determinar la generación eléctrica.

3.3.1. Referencia base de especificaciones reales de turbina a generador.

Se dispone a tomar como punto de referencia una ficha técnica de una generación hidroeléctrica real con especificaciones donde la potencia final sea definida por las variables como la altura de caída de agua, el diámetro tubular y el caudal recomendado para su debido funcionamiento. Con esos datos disponibles se propone una comparación de la generación eléctrica real de la ficha técnica con la simulación realizada en los programas computacionales de generación eléctrica con la variación de altura y caudal propuestos en este trabajo de grado.

A continuación, se detalla la ficha técnica presentada en la Tabla 1. Una microturbina Francis de 5kW convencional conjunto al generador eléctrico también de 5kW con las siguientes especificaciones:

Especificaciones Turbina Francis 5kW				
Modelo	Altura de Caída (m)	Caudal (m^3/s)	Potencia Salida (kW)	Velocidad de giro (RPM)
ECOHL110-LJ-20	10	0.075	5	1200
Especificaciones del Generador				
Modelo	Potencia (kW)	Voltaje (V)	Velocidad (RPM)	Válvula (mm)
ECOSFL5-6/340	5	380	1200	250

Tabla 1. Ficha Técnica de turbina y generador [34].

De la Tabla 1 presentada anteriormente, se tiene la variable del caudal con 0.075m^3/s llegando soportar hasta 0.15m^3/s según el fabricante y la altura con una caída de 10 metros, este valor principal es la referencia con la que se pretende comparar el comportamiento en la generación eléctrica con el nuevo modelo propuesto en este trabajo de titulación que pretende partir de esa altura y disminuirla sin que tenga que verse afectada la generación final.

3.3.2. SolidWorks

Es un software para diseño CAD 3D para el modelamiento de piezas y ensamblaje en 3 dimensiones. Este software tiene una alta gama de herramientas para el desarrollo de soluciones, ofreciendo la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar y gestionar los datos del proceso del diseño [32].

Algunas de las ventajas de utilizar SolidWorks son: Dinámica de fluidos computacional, Factores de confort térmico, Visualización de simulaciones, Análisis de flujo de fluidos, Análisis térmico de fluidos [33].

Se optó por este software con licencia de uso otorgada por la Universidad Técnica del Norte al estudiante, por la capacidad que ofrece de diseñar el circuito hidráulico y además simular el flujo de agua dentro de este mismo y obtener datos como la velocidad del flujo de agua que es una variable importante para observar el comportamiento real en el sistema, la cantidad de caudal ya que este parámetro se puede ajustar y asignar al diseño de depósito de agua soportable, la altura de la caída de agua, las dimensiones de la estructura del circuito hidráulico, entre otras variables que servirán para validar el diseño propuesto.

Dentro de este software se encuentra el complemento "Flow Simulation" que es de mucha utilidad, también por la opción del Wizard que permite colocar los parámetros adecuados para la simulación de flujo ya sea teniendo en cuenta la gravedad o también las condiciones de flujo que en este caso es interno y el fluido es simplemente agua.

En este software los materiales utilizados para desarrollar la simulación son:

- Tuberías de acero inoxidable.
- Tanque.
- Codos para tubería.
- Turbina.
- Flujo de agua.

3.3.3. Matlab

Por otro lado, después de obtener los datos de la simulación en SolidWorks desde el depósito de agua hasta la turbina se procede a la siguiente simulación desde la turbina al generador ahora en el software de Matlab utilizando las licencias que otorga la Universidad Técnica del Norte

al estudiante. Por consiguiente, con los datos obtenidos del sistema hidráulico en el software de SolidWorks se diseña un circuito en la sección de Simulink en Matlab y se realiza la simulación desde la turbina hasta el generador para determinar la potencia disponible generada por el conjunto de datos obtenidos.

3.4. Expresiones matemáticas para el cálculo del sistema de generación.

3.4.1. Potencia Generada

Para calcular el potencial en la generación hidroeléctrica en base al sistema de variación de flujo de agua entregada a la turbina diseñado en este trabajo de grado se presenta la siguiente ecuación:

$$P_{mecánica} = \rho * g * Q * H * \eta \quad (1)$$

Donde:

- Pmecánica es la energía potencial generada (vatios o julios).
- ρ es la densidad del agua (kg/m^3).
- g es la aceleración debida a la gravedad (9.81m/s^2).
- Q es el caudal de agua (m^3/s).
- H es el salto o altura netos (metros).
- η es la eficiencia total del sistema.

En cada variable de la Ecuación 1 se calcula cada apartado reemplazando con los datos obtenidos de la simulación de todo el sistema y por último lograr obtener datos reales que detallen

el resultado final de generación que fue determinado por la variación de flujo de agua en la tubería Venturi y disminuyendo la pendiente necesaria.

3.4.2. Ecuación de Caudal

Para calcular específicamente el caudal que existe dentro del tubo Venturi y que entrega a la turbina, se precisa de la ecuación de continuidad debido a que relaciona la sección transversal del conducto con la velocidad del fluido que provocó la parte estrecha del Venturi teniendo así la siguiente ecuación a continuación:

$$Q = v * S \tag{2}$$

Donde:

- Q es el caudal ($^{m^3}/_{s}$)
- v es la velocidad del fluido ($^{m}/_{s}$)
- S es la sección transversal por donde pasa el fluido (m^2)

Este apartado es importante calcular debido a que se debe tener en cuenta la cantidad de caudal con la que se está trabajando específicamente a la salida del tubo Venturi y a la entrada de la turbina.

3.4.3. Ecuación Salto Hidráulico

Para evaluar el potencial generado respecto a las medidas específicas utilizadas por el sistema propuesto, se tiene la siguiente ecuación:

$$H = H_{entrada} - H_{salida} \tag{3}$$

Donde:

- H(entrada) es la altura del nivel del agua en la entrada aguas arriba.
- H(salida) es la altura del nivel del agua en la salida aguas abajo.

3.4.4. Ecuación de Bernoulli

Al usar un tubo Venturi con una entrada y salida de diferente medida y un fluido como el agua que cambia muy poco en su densidad respecto a cambios en la presión, lo más conveniente es utilizar la ecuación de Bernoulli que se muestra a continuación:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (4)$$

Donde:

- p es la presión del fluido.
- ρ es la densidad del fluido.
- v es la velocidad del fluido.
- g es la aceleración debido a la gravedad.
- y es la altura sobre un punto de referencia.

3.4.5. Número de Reynolds

En este apartado, también es importante determinar que el flujo dentro del sistema es laminar o turbulento. Este dato es fundamental para elegir una turbina con palas que resistan el flujo provocado por el tubo Venturi que se adjunta en la entrada de la turbina. Por esta razón se opta utilizar el número de Reynolds.

A continuación, la ecuación (5) muestra como calcular el número adimensional de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * v * L}{\mu} \quad (5)$$

Donde:

- ρ es la densidad del fluido (kg/m^3)
- v es la velocidad del flujo del fluido (m/s)
- L es el diámetro transversal del fluido (metros).
- μ es la viscosidad dinámica del fluido (Pa*s)

Por consiguiente, Cuando *Re* es bajo (menor a 2000), el flujo tiende a ser laminar, con capas de fluido que fluyen en paralelo unas sobre otras sin mezclarse significativamente. Y cuando *Re* es alto (mayor a 4000), el flujo tiende a ser turbulento con movimientos caóticos y aleatorios.

En otro aspecto, refiriéndose a la densidad de fluido, esta variable se considera trabajar a temperatura ambiente ya que el diseño del sistema es relativamente pequeño y no contempla factores que influyan en la densidad del agua. De la misma manera, la viscosidad del agua también se toma en cuenta con valor a temperatura ambiente.

3.4.6. Potencia Eléctrica

En última instancia, después de haber obtenido y calculado todos los datos necesarios hasta la turbina Francis, se tiene la siguiente ecuación para calcular la energía eléctrica que entrega el generador:

$$P_{eléctrica} = P_{mecánica} * eficiencia\ del\ generador \quad (6)$$

Donde:

- *Peléctrica* es la potencia eléctrica generada por el generador (vatios, W).
- *Pmecánica* es la potencia mecánica generada por la turbina (vatios, W).
- La eficiencia del generador es un número adimensional con valor entre 0 y 1.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados y análisis obtenidos de la simulación del sistema de variación de flujo de agua utilizando tubos Venturi diseñado en los softwares computacionales con datos reales.

Se presentan los resultados finales de la variación de flujo de agua por el cambio de la altura de la pendiente que afecta a la caída de agua y por ende al potencial de esta que impulsa a la turbina. Esta disminución antes mencionada se compensa con la adjunción de la tubería Venturi a la salida de la tubería de presión y entrada de la turbina para obtener el flujo que necesita la turbina para ser impulsada adecuadamente y esto por consiguiente el resultado de la potencia eléctrica generada no es perjudicada respecto a los valores de la ficha técnica de referencia de funcionamiento.

Es imprescindible documentar las medidas utilizadas en cada componente para el ensamble y construcción del sistema de variación de flujo por lo que en este capítulo también se va detallando los componentes conformados en el circuito hidráulico con sus respectivas medidas y explicando la selección de estas y cómo infiere en los resultados finales.

También cabe destacar que varios de los componentes utilizados en la simulación han sido obtenidos de librerías con enfoque CAD con diseños pertenecientes a varios autores que sirvieron para agilizar el proceso de este diseño de variación de flujo de agua, y modificados a partir de lo requerido por el autor de este trabajo de grado.

4.1. Desarrollo de Modelos 3D de altura de caída en SolidWorks

En esta sección se realizó el diseño de los modelos en un intervalo de 20 cm de caída de agua teniendo como altura máxima 10 metros que es la altura requerida, con una boca de entrada de flujo a la turbina de 25 cm y con un caudal de 0.075 m^3/s recomendado y llegando a soportar hasta 0.15 m^3/s sin estresar a la turbina. De estos modelos presentados se obtuvo los tres mejores resultados con las siguientes geometrías.

4.1.1. Modelos 3D

4.1.1.1. Modelo 1

Para la simulación del primer modelo en SolidWorks se detallan cada una de las piezas que conforman el diseño del circuito hidráulico. A continuación, en la Figura 9 se presenta la primera pieza que es el depósito de agua donde a este se le asigna el caudal respectivo para el correcto funcionamiento de generación eléctrica deseado en la simulación.

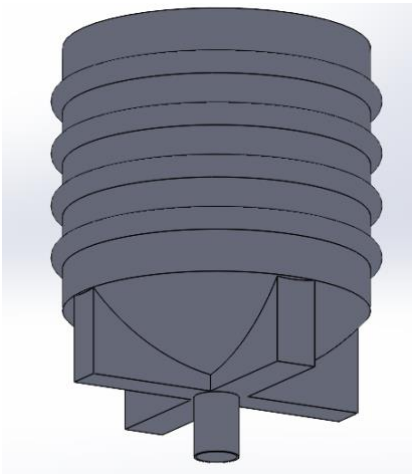


Figura 9. Depósito de caudal [36].

Con la capacidad programable de SolidWorks de ofrecer la opción de crear tapas a las cavidades de los objetos por donde es posible el paso del flujo de agua, se asigna una tapa a la entrada superior del tanque para determinarlo como flujo inicial con un caudal de 0.15 m^3/s desde la tapa inicial del depósito de flujo de agua recorriendo todas las piezas hasta llegar a la salida de la Turbina Francis.

Seguido se detalla en la Figura 10 la tubería con la medida longitudinal vertical de 1.25 metros de caída de agua. El material asignado para este componente es de acero inoxidable comúnmente utilizada en circuitos hidráulicos capaz de soportar la presión del agua y más resistente a la oxidación.

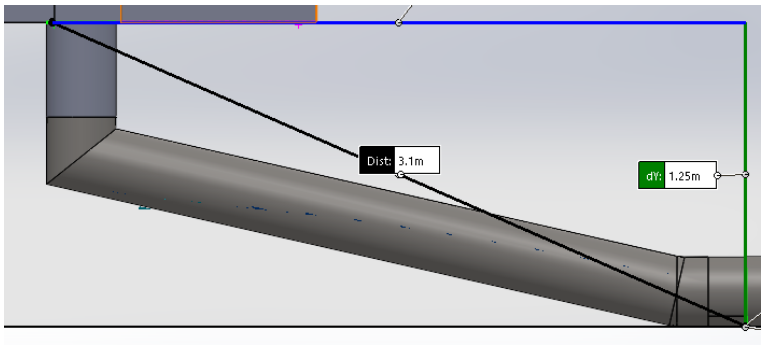


Figura 10. Tubería caída de agua.

Se presenta en la Figura 11 el diseño del tubo Venturi con un diámetro interno de 0.25 metros para su boca más ancha (entrada y salida). También esta pieza cuenta con el mismo material de acero inoxidable debido a que esta parte es donde existe más variación en la presión.

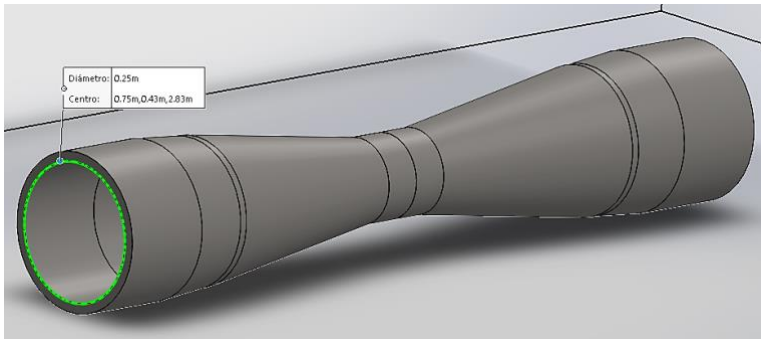


Figura 11. Tubo Venturi completo.

En la Figura 12 se detalla la parte más estrecha de la tubería Venturi con un diámetro interno de 0.12 metros, esta parte es la que más varia respecto a la presión y velocidad con la que el flujo de agua se dirige a la turbina Francis.

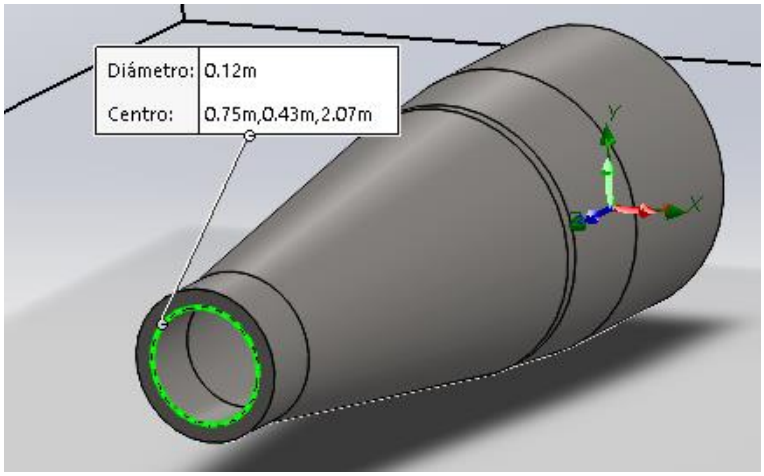


Figura 12. Medio Venturi boca estrecha.

A continuación, el modelo de la turbina Francis [35] que se muestra en la Figura 13 se utilizó para todos los diseños en general de este trabajo de grado.

La medida de su boca de entrada para el flujo de agua es de 0.25 metros de diámetro con dos tapas, una en su parte superior y otra en su parte inferior. Específicamente la parte inferior de

la turbina de la Figura 12 ha sido seleccionada para la salida final del caudal utilizado en la simulación del software de SolidWorks.

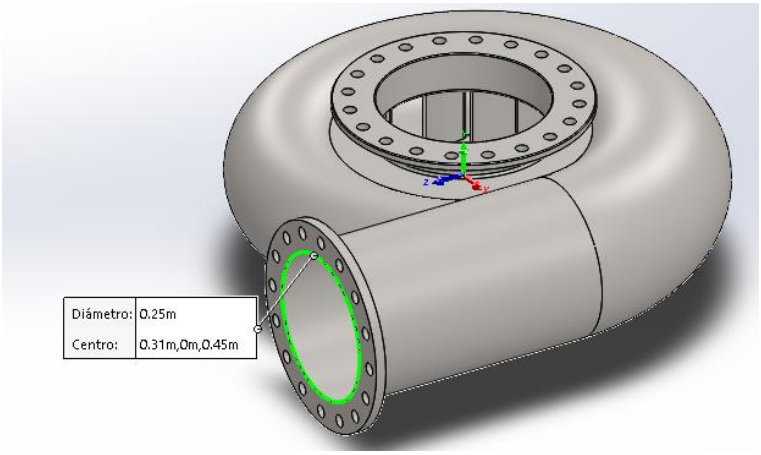


Figura 13. Turbina Francis [35].

Finalmente, se ensambló las piezas presentadas anteriormente en este capítulo consiguiendo construir el circuito hidráulico que se muestra en la Figura 14 donde se estudiará la variación de flujo debido al cambio de presión, velocidad y altura obtenidos de este modelo a través de la simulación en SolidWorks en el apartado de “Flow Simulation”.

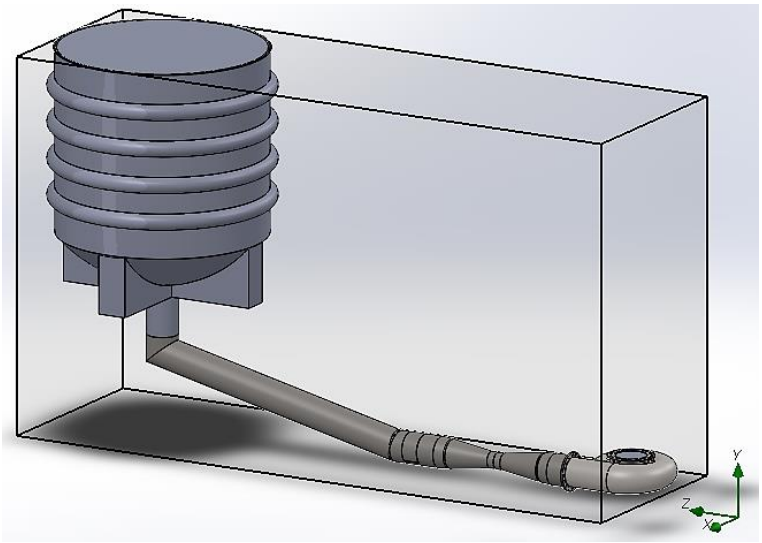


Figura 14. Circuito hidráulico Modelo 1.

El primer diseño completo presentado en la Figura 14 cuenta con una altura de caída de agua de 1.25 metros desde la base del depósito de agua hasta la tubería de tope en el suelo. En el punto bajo de la tubería se adjunta el tubo Venturi llegando a aumentar la velocidad del flujo de agua hasta la turbina hidroeléctrica, con esta estructura se observa los datos diferentes antes y después de que el flujo pase por dentro del tubo Venturi.

4.1.1.2. Modelo 2

En este segundo diseño se presenta una variación en el diseño de la tubería de la caída de agua adjuntada antes del tubo Venturi. Esta variación en la tubería se hizo con el propósito de obtener una menor inclinación a comparación de las otras tuberías y así variar la velocidad y presión del flujo de agua que es entregada y después disparada por el Venturi hacia la turbina Francis obteniendo un flujo controlado.

Se presenta la tubería en la Figura 15 con una caída de agua con una altura de 1.55 metros.

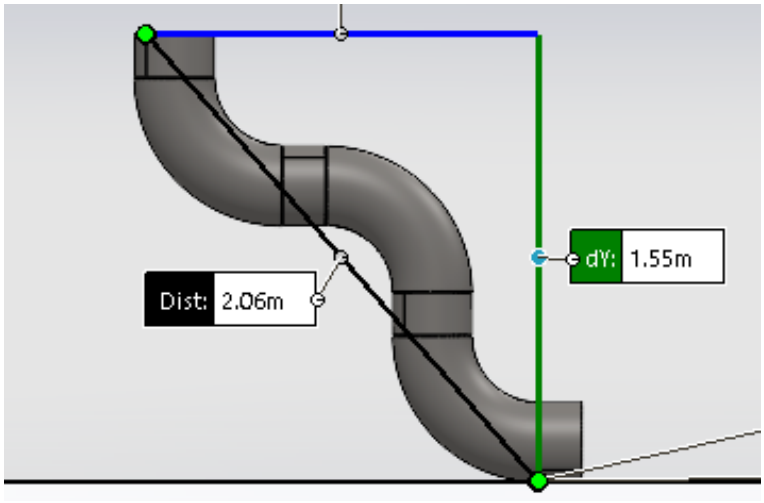


Figura 15. Tubería curva.

A continuación de haber presentado la variación de la tubería en la Figura 15, se ensambló en el SolidWorks conjunto con todas las piezas presentadas anteriormente obteniendo finalmente el Modelo 2 como se muestra en la Figura 16.

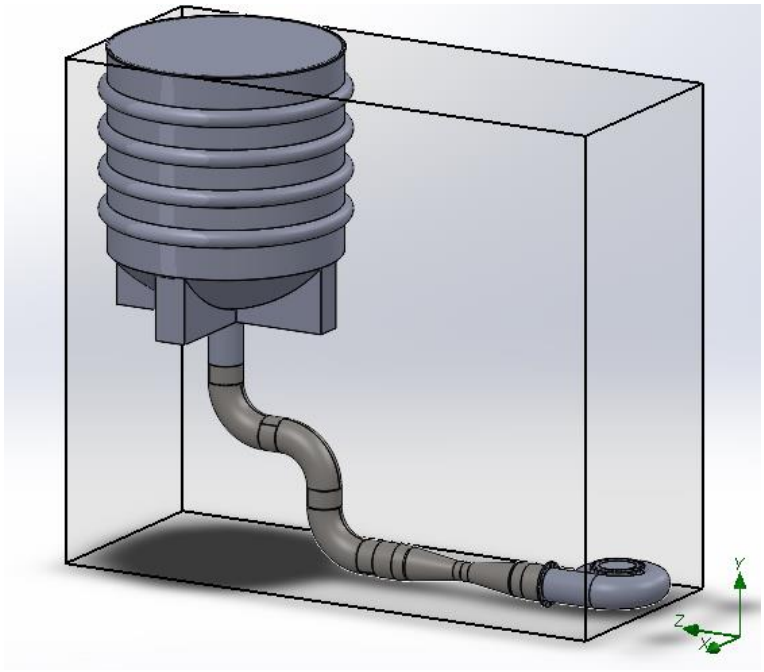


Figura 16. Circuito hidráulico Modelo 2.

En este diseño (Figura 16), la configuración de la tapa inicial del depósito de agua es el valor de 0.075m^3/s y donde su valor cambiará dentro del tubo Venturi para entregar un flujo adecuado a la turbina con respecto a la disminución de la altura recomendada.

4.1.1.3. Modelo 3

En este tercer modelo se aplica una media tubería Venturi (Figura 12) a la entrada de la turbina por la razón de aprovechar la máxima velocidad de flujo que provoca su parte estrecha.

Se realizó un ajuste en sus dimensiones haciendo que su parte estrecha obtenga la medida longitudinal de 0.25 metros de diámetro. De esta manera se ensambló directamente la parte más estrecha de la tubería Venturi a la turbina Francis. En ese contexto, el estudio del flujo de agua indica un cambio significativo donde se busca el máximo de los resultados al pasar por la sección estrecha de la tubería y llegando a la turbina Francis directamente, específicamente obtener la velocidad del flujo de agua aumentada y la presión disminuida conforme al principio de Bernoulli que es lo que puntualmente se busca de esta sección en el diseño del Modelo 3.

Como resultado del ensamble en SolidWorks con la media tubería Venturi e incluyendo las demás piezas presentadas anteriormente que la conforman se obtuvo el siguiente Modelo 3 presentada a continuación en la Figura 17.

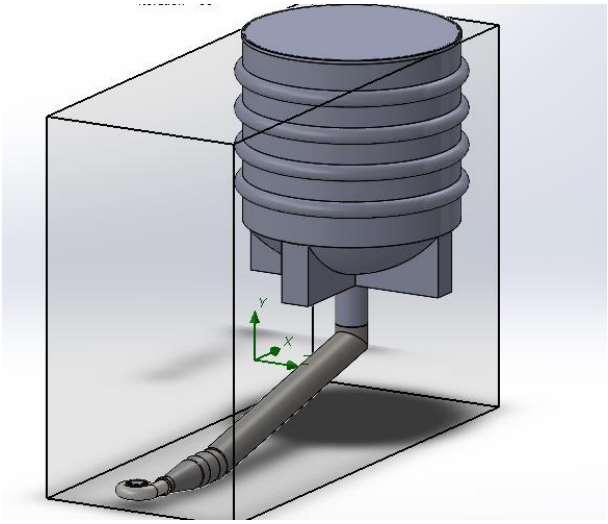


Figura 17. Circuito hidráulico con medio Venturi Modelo 3.

Para la Figura 17, la configuración en la tapa inicial del depósito de agua es de 0.075m^3/s. En los resultados se presentarán a detalle el cambio en el flujo de agua debido a la integración de la tubería Venturi.

4.2. Resultados de los modelos simulados

Debido a la aplicación del tubo Venturi dentro del circuito hidráulico para la generación eléctrica es preciso detallar las características del flujo al entrar y salir del tubo Venturi, siendo esta última la utilizada por la turbina Francis.

A principio de las tres simulaciones en SolidWorks en el depósito del caudal se asigna el valor inicial de 0.075m^3/s, este número como se muestra en la Tabla 1 es sugerido por el fabricante de la turbina y generador del cual es referencia para el diseño de este trabajo de grado.

4.2.1. Modelo 1

Para el primer diseño se presentan los resultados simulados en SolidWorks en las condiciones antes de que el flujo de agua ingrese al tubo Venturi con sus respectivos valores

obtenidos y seguido se presenta el nuevo valor después que el flujo pase por la sección estrecha del Venturi y llegue a la entrada de la turbina.

Valores de flujo antes del Venturi				
Velocidad	Presión	Temperatura	Altura de caída de agua	Densidad del agua
3.32547m/s	170985Pa	20.05°C	1.25m	997.562kg/m^3
Valores de flujo parte estrecha del Venturi				
Velocidad	Presión	Temperatura	Altura de caída de agua	Densidad del agua
16.2697m/s	30564.9Pa	20.02°C	1.25m	997.57kg/m^3
Valores de flujo después del Venturi				
Velocidad	Presión	Temperatura	Altura de caída de agua	Densidad del agua
9.68244m/s	114562Pa	20.05°C	1.25m	997.562kg/m^3

Tabla 2. Valores de flujo Modelo 1.

Para el cálculo del caudal con la Ecuación 2 en primer lugar se hizo la conversión del diámetro tubular interno con un valor de 0.25 metros a Área transversal de la sección con un resultado de 0.04908m^2. Este valor se usó para el cálculo de los 3 modelos por la razón de tener la misma medida de diámetro tubular interno entre la tubería Venturi y la turbina Francis.

A continuación, de acuerdo a los datos obtenidos en la Tabla 2 pertenecientes al Modelo 1 se aplicó estos valores con la ecuación de Bernoulli (Ecuación 4) se despeja “v2” para obtener la velocidad de flujo en la parte más ancha del tubo Venturi la cual está conectada directamente a la turbina Francis, por lo que despejando se tiene la raíz cuadrada de la fracción cuyo numerador es dos por la diferencia de la presión 1 (30564.9Pa) y presión 2 (114562Pa), todo esto dividido por

la densidad del agua (997.57kg/m^3). A esto se le suma el producto de dos por la gravedad (9,81m/s^2) por la diferencia entre la altura de la parte estrecha (0.12m) y ancha (0.25m) del tubo Venturi, más el cuadrado de la velocidad 1 "v1" (16.2697m/s). Como resultado se obtuvo la velocidad 2 "v2" con un valor de 9.68244 m/s.

Obtenido los valores anteriores de las variables de Área transversal y velocidad, se procedió a calcular el caudal que es entregado a la entrada de la turbina. Aplicando el producto entre la velocidad 2 "v2" con un valor de 9.68244 m/s y el Área transversal del tubo Venturi con un valor de 0.04908 m^2 se obtuvo el resultado de 0.475214 m^3/s para el caudal del Modelo 1.

4.2.2. Modelo 2

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 3 pertenecientes al Modelo 2 se calcula la velocidad de flujo que entrega el Venturi a la turbina, teniendo lo siguiente:

Valores de flujo antes del Venturi				
Velocidad	Presión	Temperatura	Altura de caída de agua	Densidad del agua
1.72636m/s	146501Pa	20.05°C	1.93m	997.562kg/m^3
Valores de flujo parte estrecha del Venturi				
Velocidad	Presión	Temperatura	Altura de caída de agua	Densidad del agua
11.2311m/s	65852.9Pa	20.05°C	1.93m	997.566kg/m^3
Valores de flujo después del Venturi				
Velocidad	Presión	Temperatura	Altura de caída de agua	Densidad del agua
6.7346m/s	104874Pa	20.05 °C	1.93m	997.562kg/m^3

Tabla 3. Valores de flujo Modelo 2.

Nuevamente, con la ecuación de Bernoulli (Ecuación 4) se despejó “v2” para obtener la velocidad de flujo en la parte más ancha del tubo Venturi la cual está conectada directamente a la turbina Francis, por lo que despejando se tiene la raíz cuadrada de la fracción cuyo numerador es dos por la diferencia de la presión 1 (65852.9Pa) y presión 2 (104874Pa), todo esto dividido por la densidad del agua (997.57kg/m^3). A esto se le suma el producto de dos por la gravedad (9,81m/s^2) por la diferencia entre la altura de la parte estrecha (0.12m) y ancha (0.25m) del tubo Venturi, más el cuadrado de la velocidad 1 “v1” (11.2311m/s). Como resultado se obtuvo la velocidad 2 “v2” de 6.7346m/s.

Se procedió a calcular el caudal que es entregado a la entrada de la turbina. Aplicando la Ecuación 2 que es el producto entre la velocidad 2 “v2” con un valor de 6.7346m/s y el Área transversal del tubo Venturi con un valor de 0.04908 m^2 se obtuvo el resultado de 0.330534m^3/s para el caudal del Modelo 2.

4.2.3. Modelo 3

De acuerdo con los datos obtenidos en la Tabla 4 pertenecientes al Modelo 3 se calcula la velocidad de flujo que entrega el Venturi a la turbina, teniendo lo siguiente:

Valores de flujo antes del Venturi				
Velocidad	Presión	Temperatura	Altura de caída de agua	Densidad del agua
0.363682 m/s	233962Pa	20.05 °C	2.66m	997.562kg/m^3
Valores de flujo después del Venturi				
Velocidad	Presión	Temperatura	Altura de caída de agua	Densidad del agua
3.17937m/s	231726Pa	20.05 °C	2.66m	997.562kg/m^3

Tabla 4. Valores de flujo Modelo 3.

Con la ecuación de Bernoulli (Ecuación 4) se despejó “v2” para obtener la velocidad de flujo en la parte más ancha del tubo Venturi la cual está conectada directamente a la turbina Francis, por lo que despejando se tiene la raíz cuadrada de la fracción cuyo numerador es dos por la diferencia de la presión 1 (233962Pa) y presión 2 (231726Pa), todo esto dividido por la densidad del agua (997.57kg/m^3). A esto se le suma el producto de dos por la gravedad (9,81m/s^2) por la diferencia entre la altura de la parte estrecha (0.12m) y ancha (0.25m) del tubo Venturi, más el cuadrado de la velocidad 1 “v1” (0.363682 m/s). Este cálculo se obtuvo como resultado el valor de la velocidad 2 “v2” de 3.17937m/s.

Finalmente, se calculó el caudal para el Modelo 3 aplicando el producto entre la velocidad 2 “v2” con un valor de 3.17937m/s y el Área transversal del tubo Venturi con un valor de 0.04908 m^2 se obtuvo el resultado de 0.156043m^3/s para el caudal del Modelo 3.

Para apreciar gráficamente los cambios de la presión dentro de las tuberías se los puede encontrar en los Anexos sección Anexo b para los 3 modelos.

4.3. Cálculo turbulencia del flujo de agua

Se realizó el cálculo con el número de Reynolds (Ecuación 5) para detallar cómo cambió el flujo de agua a la salida del tubo Venturi.

Para el Modelo 1 se calculó en base a los datos ya adquiridos por lo que se tiene el producto entre la densidad del agua (997.562kg/m^3), la velocidad obtenida a la salida del tubo Venturi (9.68244m/s) y el diámetro transversal del tubo (0.25m) y todo esto dividido por la viscosidad del fluido que en este caso se trabajó con agua (0.001Pa*s) y se obtuvo un resultado de 2,414.709

Para los siguientes modelos se hizo el mismo procedimiento, obteniendo un resultado de 1,679.545 para el Modelo 2 y un valor de 792,905 para el Modelo 3.

En comparativa con los tres resultados, el Modelo 2 demuestra obtener un flujo turbulento, pero más equilibrado teniendo en cuenta el caudal inicial con el que fue asignado y la altura de caída que se diseñó, Por lo tanto, la energía cinética del agua se ha maximizado de modo que compensa la altura de caída de agua reducida.

4.4. Cálculo de potencial mecánico de turbina

4.4.1. Modelo 1

Para el cálculo del potencial generado por la turbina Francis en la simulación de SolidWorks del primer modelo se aplicó la Ecuación 1 donde obtenidos los datos de la densidad del agua (997.562kg/m^3), la gravedad (9,81m/s^2), el caudal (0.475214m^3/s), la altura de (1.25m) y la eficiencia de la turbina (0.85), se hizo el producto de estas variables y se obtuvo como resultado un valor para el potencial mecánico de 4.94kW para el Modelo 1.

4.4.2. Modelo 2

A continuación, para el Modelo 2 el cálculo del potencial generado (Ecuación 2) de la turbina Francis se hizo el producto entre la densidad del agua (997.562kg/m^3), la gravedad (9,81m/s^2), el caudal (0.330534m^3/s), la altura de (1.93m) y la eficiencia de la turbina (0.85), dando un resultado de 5.31kW.

4.4.3. Modelo 3

Por último, para el Modelo 3 el cálculo del potencial generado (Ecuación 2) de la turbina Francis se hizo el producto entre la densidad del agua (997.562kg/m^3), la gravedad (9,81m/s^2), el caudal (0.156043m^3/s), la altura de (2.66m) y la eficiencia de la turbina (0.85), dando un resultado de 3.45kW.

4.5. Conversión de Energía en Matlab/Simulink

Obtenidos los valores del cálculo de la potencia mecánica de la turbina Francis, se agrega ese valor a la entrada “Pm” del bloque del generador eléctrico síncrono simplificado en el diseño de Simulink obteniendo la generación eléctrica final y las revoluciones por minuto para su correcto funcionamiento.

El circuito (Figura 18) se basó en el ejemplo disponible del software de Simulink que utiliza una fuente de voltaje trifásica ideal con impedancia valor a “cero” que indica que no ofrece ninguna resistencia o impedancia al paso de la corriente que es representado por el bloque “Three-Phase Programmable Voltage Source”.

El ejemplo (Figura 18) simula la respuesta dinámica de un generador síncrono ante un cambio brusco en la potencia mecánica aplicada, mostrando cómo varía el ángulo de potencia, la velocidad y la potencia eléctrica con el paso del tiempo.

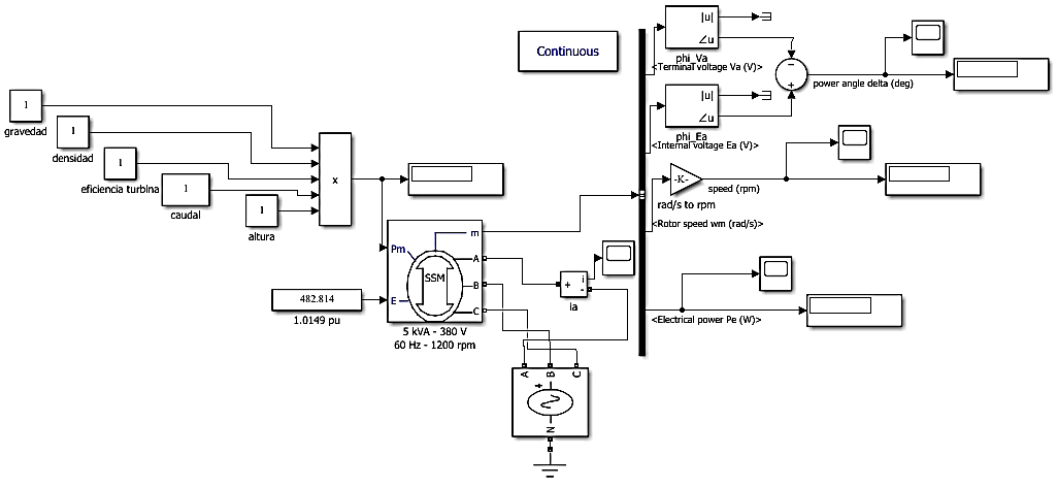


Figura 18. Diseño general de Simulink para generación eléctrica.

Seguido se realizó las modificaciones y la configuración respectiva del generador síncrono (Figura 18) de tal manera que el valor de la generación mecánica introducida en la entrada “Pm” sea el mismo valor sin pérdidas para la generación eléctrica final.

4.5.1. Modelo 1

Se presenta en la Figura 19 la simulación completa en forma de bloques y sus conexiones en Simulink y el resultado numérico de su funcionamiento.

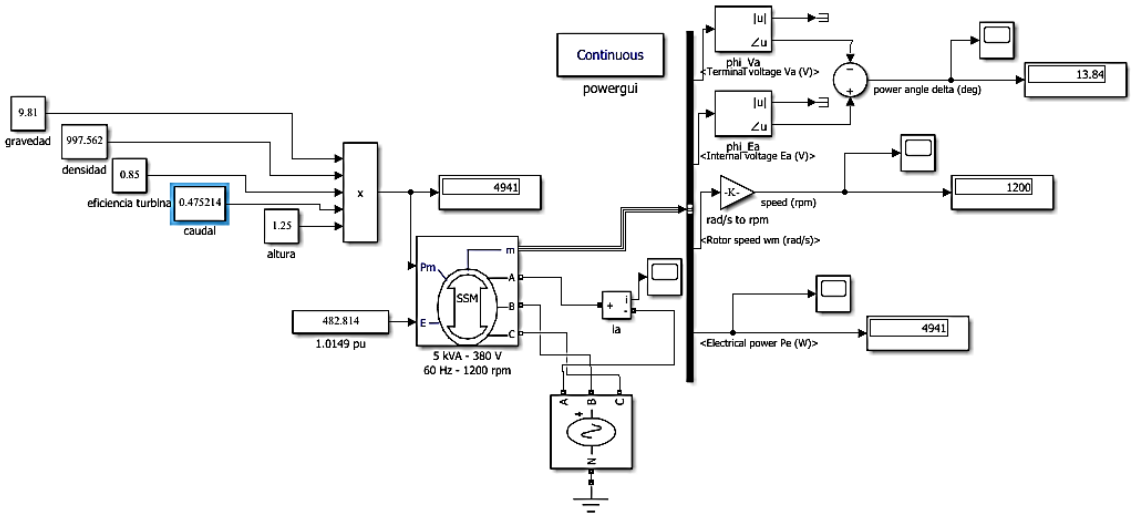


Figura 19. Generación eléctrica Modelo 1 Simulink.

Para representar a las variables como el caudal obtenido por el tubo Venturi (0.475214), altura (1.25), gravedad (9.81), densidad del agua (997.562) y eficiencia de la turbina (0.85) se utilizó el bloque “constant” para cada uno los resultados obtenidos por parte de la simulación en SolidWorks.

De esta manera en cada bloque es asignado el valor respectivo con número constante para cada una de las variables antes mencionadas. Posteriormente se utilizó el bloque “product” para multiplicar los valores de la potencia mecánica resultante e ingresar ese valor a la entrada “Pm” del generador síncrono. Todo esto se presenta a continuación en la Figura 20.

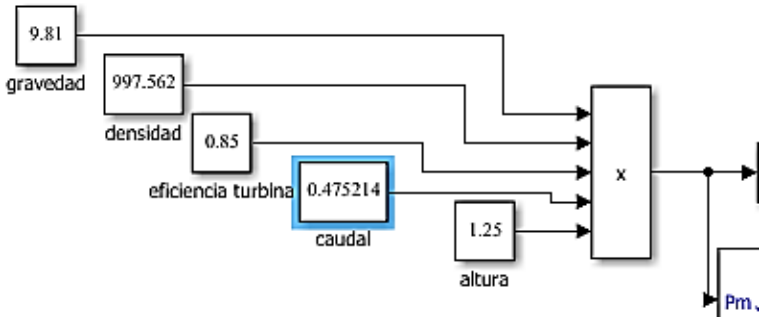


Figura 20. Producto de constantes Modelo 1 Simulink.

Finalmente, para este primer modelo en el circuito eléctrico de Simulink presentado en la Figura 18 se utilizó el bloque "Bus Selector" conectada a la entrada de medición "m" del generador síncrono donde se obtuvo una generación eléctrica de 4941W con una velocidad de 1200 revoluciones por minuto. Por otro lado, el ángulo de la potencia indica un valor de 13.84° lo que significa que el sistema está operando en condiciones estables por ende el diseño de este modelo puede soportar aumentos en la carga sin perder sincronismo. Todo este apartado se presenta a continuación en la Figura 21.

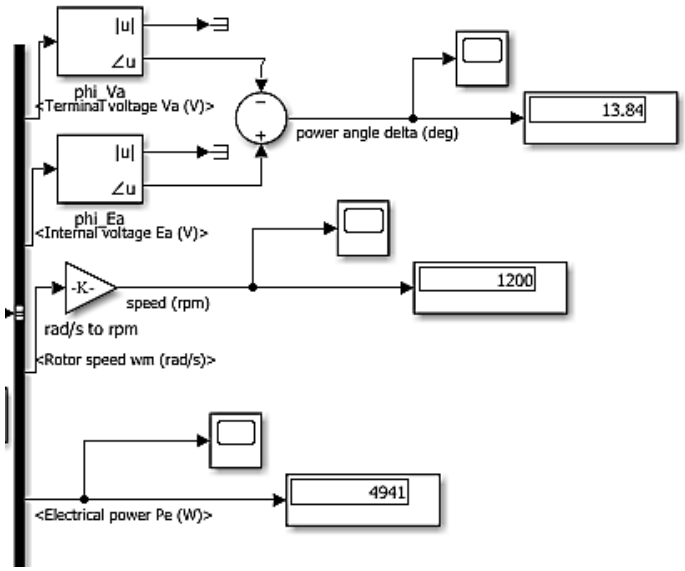


Figura 21. Ángulo de la potencia, Rpm y Potencia Eléctrica Modelo 1.

4.5.2. Modelo 2

A continuación, para el segundo modelo en Simulink se presenta en la Figura 22 el diseño completo con los resultados obtenidos en la simulación de la potencia eléctrica generada, las revoluciones por minuto y el ángulo de potencia.

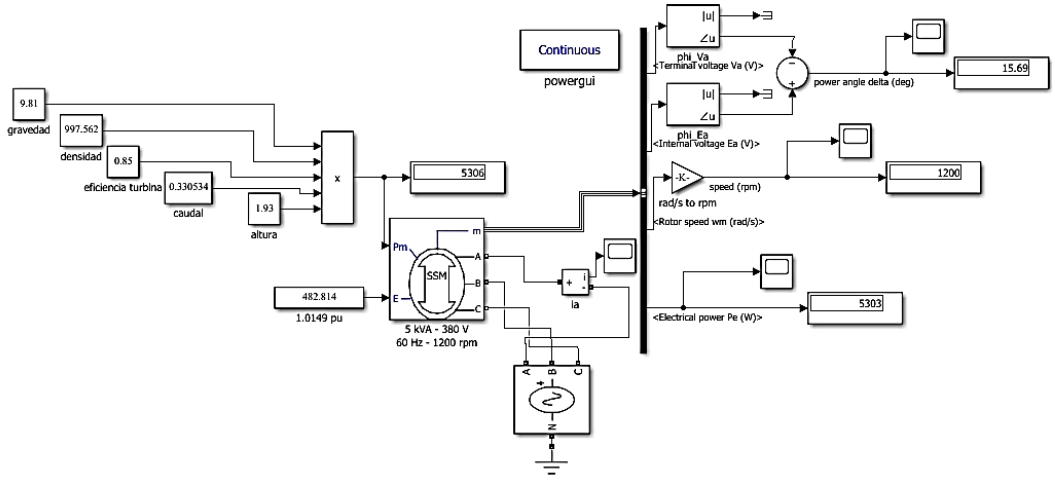


Figura 22. Generación eléctrica Modelo 2 Simulink.

Se presenta la multiplicación de las constantes para el Modelo 2 de Simulink con una variación en la altura de 1.93 metros y el caudal obtenido por el tubo Venturi de 0.330534m^3/s.

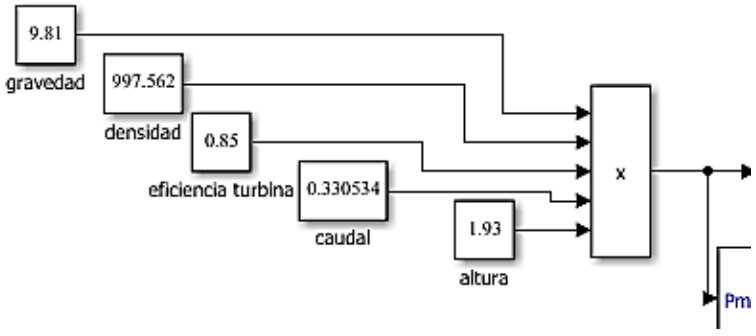


Figura 23. Producto de constantes Modelo 2 Simulink.

Por consiguiente, en la Figura 24 se obtuvo el resultado de la generación una potencia eléctrica de 5306W a 1200 revoluciones por minuto con un ángulo que oscila por los 15.69° que indica que a pesar de sobrepasar el potencial eléctrico de 5000W se encuentra dentro del rango optimo de funcionamiento sin sobrecarga del generador.

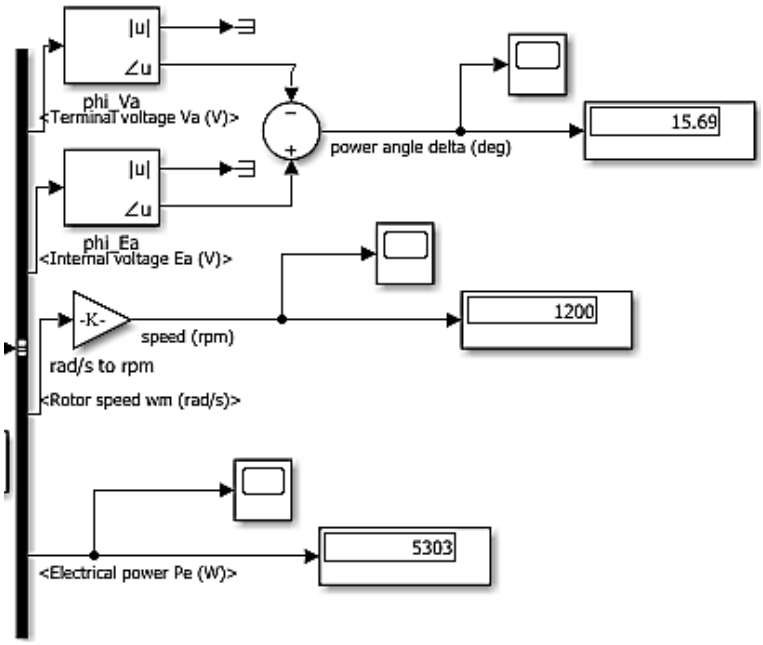


Figura 24. Ángulo de la potencia, Rpm y Potencia Eléctrica Modelo 2.

La variación de flujo de agua para este diseño de la Figura 22 demostró un mejor rendimiento entre caudal y altura por lo que cumple sin mayor dificultad la generación del potencial eléctrico esperado a comparación del anterior Modelo 1.

4.5.3. Modelo 3

Se presenta el Modelo 3 (Figura 25) el diseño en Simulink para la generación del potencial eléctrico. El caudal y altura para este tercer modelo cambia significativamente debido al ensamble de un medio Venturi (Figura 12) a la entrada de la turbina Francis.

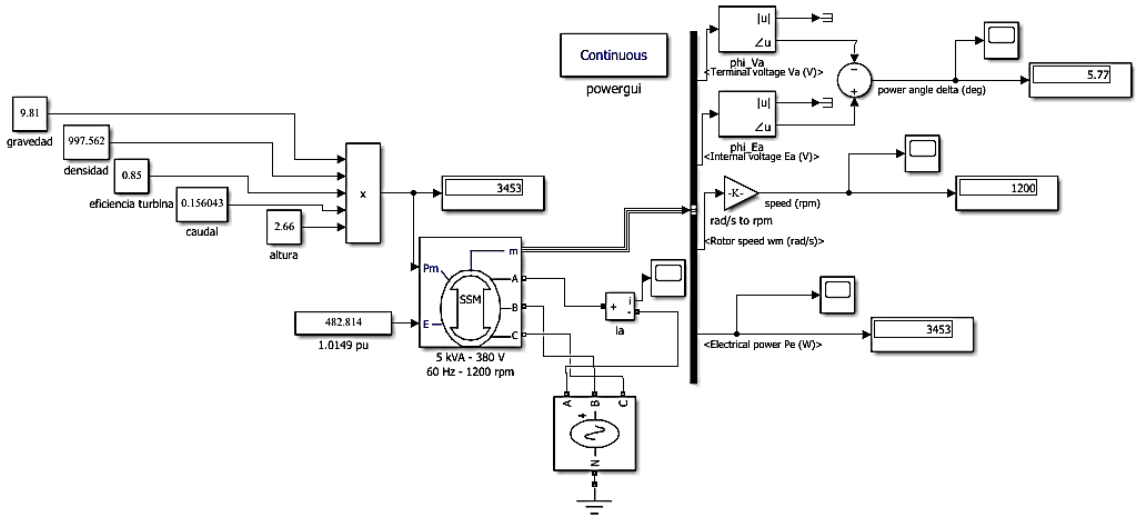


Figura 25. Generación eléctrica Modelo 3 Simulink.

La variación en cuanto a este diseño cuenta con una altura de 2.66 metros y un caudal obtenido del tubo Venturi de 0.156043m^3/s que fue asignado al bloque de constantes (Figura 26).

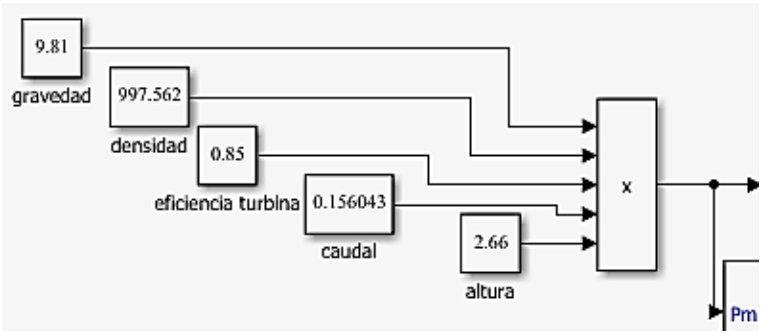


Figura 26. Producto de constantes Modelo 3 Simulink.

Finalmente, se presenta la generación del potencial eléctrico para el Modelo 3, donde se obtuvo una generación eléctrica 3453W a 1200 revoluciones por minuto con un ángulo de 5.77°, en esta simulación a pesar de obtener una altura mayor a comparación de las dos anteriores simulaciones mostró una menor generación en las mismas condiciones de caudal inicial, por lo

que el ensamble del medio Venturi (Figura 12) hacia la turbina para este diseño no mostró logros significativos.

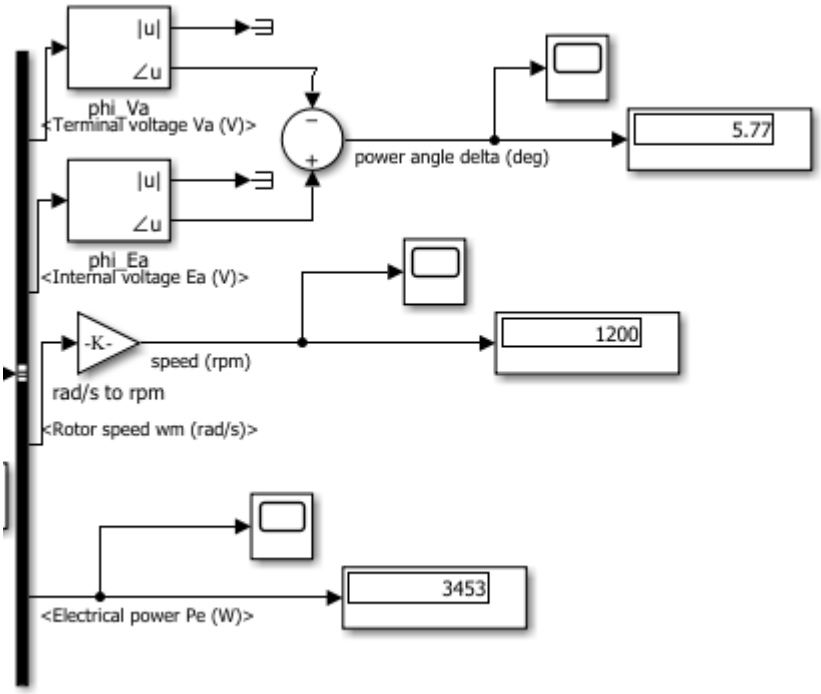


Figura 27. Ángulo de la potencia, Rpm y Potencia Eléctrica Modelo 3.

4.6. Determinación de la generación eléctrica

Para este trabajo de grado los tubos Venturi fueron parte esencial en cuanto al cambio de flujo de agua que, por ende, esto llevó a un estudio exhaustivo de su comportamiento para hallar con precisión el valor exacto del potencial mecánico y eléctrico producido por este cambio entorno a condiciones ideales de turbina-generador.

En esta última sección se presenta el comportamiento gráfico de la generación del potencial eléctrico y de esta manera demostrar una medición precisa de la cantidad de vatios generada.

4.6.1. Modelo 1

Para este primer modelo, en base a todos los cálculos realizados se muestra el resultado de la gráfica final de la generación eléctrica, donde este diseño llegó a obtener los 4941W teniendo en cuenta que este Modelo 1 se diseñó con la menor altura de caída de agua.

Al momento del inicio del generador se observa una caída mínima en el arranque que en milésimas de segundos logró estabilizarse hasta llegar a una generación continua con el valor de 4941W como se observa en la Figura 28.

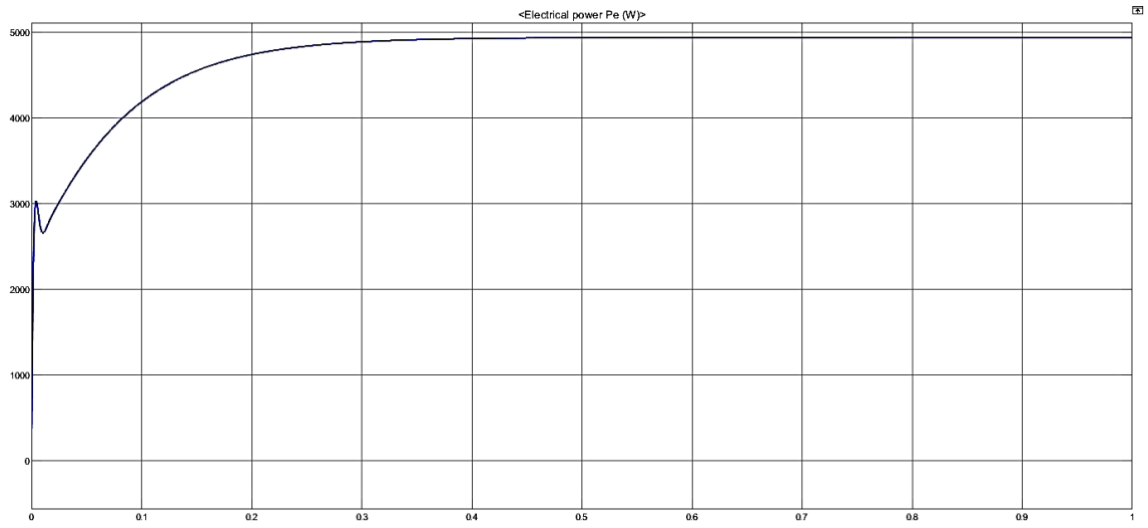


Figura 28. Generación del potencial eléctrico final Modelo 1.

La oscilación de menora a mayor presión dentro de la tubería Venturi no afectó el rendimiento y tampoco existen perturbaciones en la generación final por parte de la simulación del generador por lo que evidentemente a pesar de que no se obtuvo los 5000W exactos, se determinó que el sistema completo del Modelo 1 logró alcanzar un potencial eléctrico muy acercado con la reducción de la altura de la caída de agua y el aumento del caudal.

4.6.2. Modelo 2

Para el segundo modelo, se presenta en la Figura 29 el comportamiento del generador con una pequeña caída en su arranque y continuamente una estabilización de milésimas de segundos.

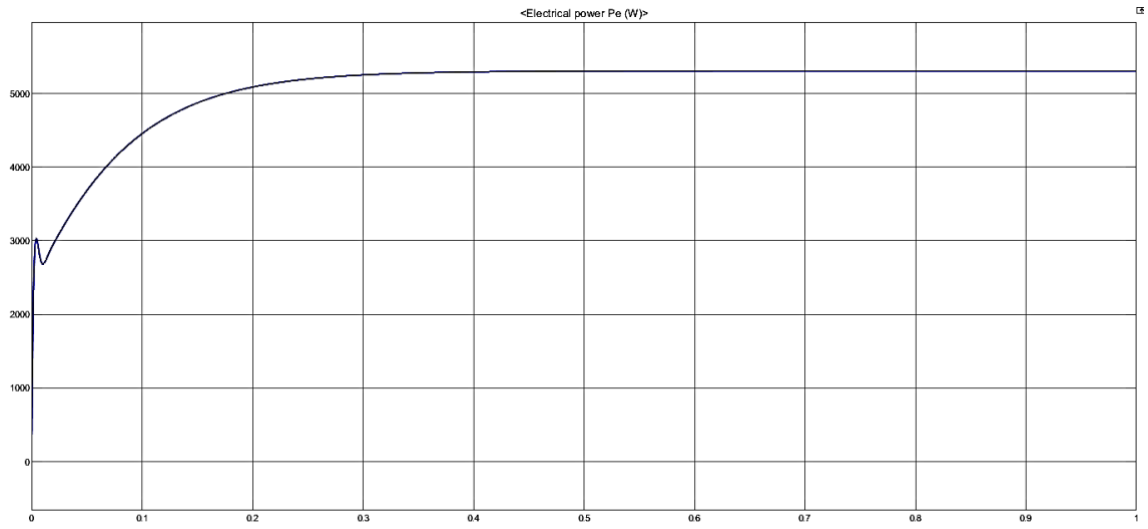


Figura 29. Generación del potencial eléctrico final Modelo 2.

En este caso, el sistema completo del Modelo 2 logró determinar una generación elevada en el potencial eléctrico obteniendo 5306W como se presenta en la Figura 29. Consecuencia de optar por una altura de 1.93 metros y el diseño de la tubería forzada que conectada a la tubería Venturi hizo que el flujo de agua sea mayormente veloz y que el caudal aumente.

4.6.3. Modelo 3

Se presenta el resultado gráfico del potencial eléctrico generado para el Modelo 3 obteniendo un similar comportamiento de arranque en comparación a los dos modelos anteriores.

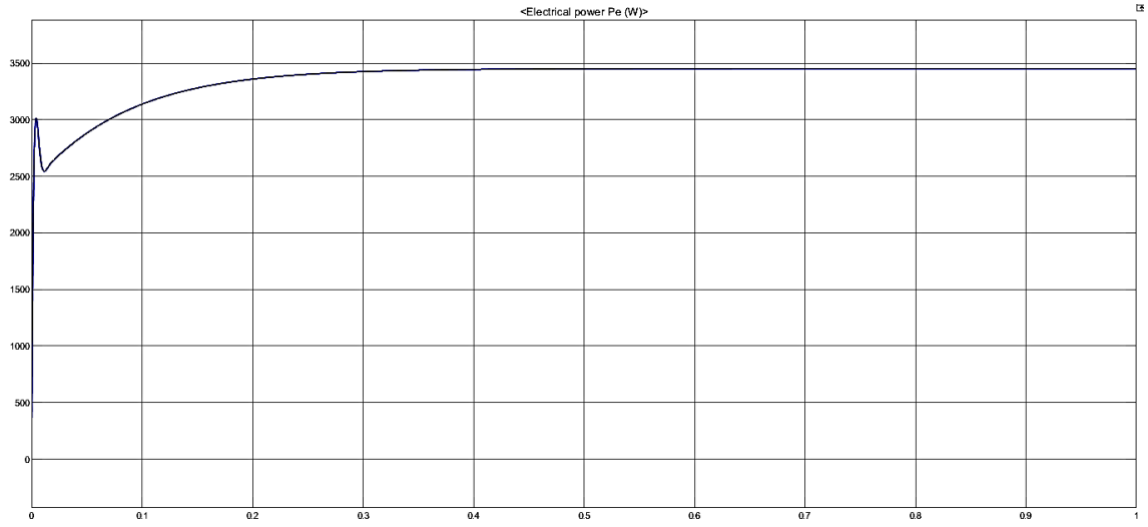


Figura 30. Generación del potencial eléctrico final Modelo 3.

Se determinó el valor de vatios obtenidos por el sistema completo en el Modelo 3 con una cantidad de 3453W continuos por lo que no se observa perturbaciones o desincronización por parte del generador diseñado en Simulink.

4.7. Análisis y comparativa de los 3 Modelos

Se presenta en la Tabla 5 un cuadro general de la generación eléctrica final para cada modelo con las principales variables modificadas en la simulación (caudal y altura).

	Modelo 1(Venturi completo)	*Modelo 2(Venturi completo)*	*Modelo 3(medio Venturi)*
Caudal original	0.15m^3/s	0.075m^3/s	0.075m^3/s
Caudal aumentado por el Venturi	0.475214 m^3/s	0.330534m^3/s	0.156043m^3/s
Altura de caída de agua	1.25m	1.93m	2.66m
Generación eléctrica	4941W	5306W	3453W

Tabla 5. Resumen General de los tres modelos.

Previo haber presentado los resultados de los 3 Modelos diseñados en SolidWorks y Simulink, en esta sección se realizará un análisis detallado de los resultados obtenidos de cada modelo.

En primer lugar, el Modelo 1 fue diseñado tal como una generación hidroeléctrica común (Figura 14), puntualmente cabe destacar su tubería forzada geométricamente inclinada como se observa en la Figura 10 para el recorrido del flujo de agua. Al haber ensamblado la tubería Venturi a este sistema, el flujo del agua a la entrada de la turbina cambia el valor del caudal con el cual inicialmente fue asignado, tal es el caso que en la simulación de SolidWorks la pieza cilíndrica del tanque el cual cumple la función del depósito de agua inicial se le asignó en su tapa superior un caudal de 0.15m^3/s y este flujo de agua al realizar el recorrido por la tubería forzada y llegar al tubo Venturi cambia en su valor a 0.475214m^3/s donde este nuevo valor es entregado a la turbina Francis y al realizar su recorrido dentro de esta, el caudal a la salida de la turbina vuelve a obtener el valor de 0.15m^3/s cumpliendo así con el aumento del caudal y disminución de la altura.

Se optó por tomar el valor inicial de 0.15m^3/s (que es el caudal máximo soportable para el sistema) debido a que este Modelo 1 es con el que menor altura de caída fue diseñada. Como resultado en la simulación de Simulink el generador síncrono alcanzó la cantidad de 4941W vatios generado por lo que alcanza a cumplir la función principal por la cual fue realizado este sistema.

A continuación, en el análisis del Modelo 2 se optó por un diseño tubular curvo como se observa en la Figura 15 con una altura de caída de agua de 1.93 metros. En este caso, para este sistema se asignó un caudal inicial de 0.075m^3/s en la tapa superior del depósito de agua y al

recorrer la tubería forzada y llegar a la tubería Venturi este valor en el flujo de agua cambió su valor en el caudal a un 0.330534m^3/s que es directamente entregado a la turbina.

Nuevamente, al momento que el flujo de agua termine su recorrido por todo el sistema y pase por la salida de la turbina Francis, el valor del caudal final vuelve a ser de 0.075m^3/s. Como resultado en la simulación de Simulink la generación del potencial eléctrico obtuvo un 5306W, por lo que este sistema es el que mayor generación obtuvo sin aumentar al extremo el caudal inicial.

Por último, siguiendo con el Modelo 3, el diseño tubular en este sistema vuelve a ser geométricamente perpendicular similar al Modelo 1 con una altura de caída de agua de 2.66 metros, sin embargo, en este caso varió el ensamble del tubo Venturi ahora adjuntando su parte más estrecha directamente a la entrada de la turbina mostrada en la Figura 17, se decidió realizar este modelo para obtener la velocidad máxima que el tubo Venturi puede otorgar.

Al asignar el caudal inicial de 0.075m^3/s y pasar el flujo por la parte más estrecha del tubo Venturi, se logró obtener un caudal de 0.156043m^3/s que es directamente entregado a la turbina y nuevamente el caudal a su salida vuelve a tomar el valor de 0.075m^3/s iniciales. A pesar de obtener una caída de agua más elevada que los dos modelos anteriores y el ensamble del medio Venturi a la turbina, los datos resultantes y puestos en la simulación de Simulink no obtuvo una generación del potencial eléctrico requerido llegando a 3453W a pesar de ser diseñado con mayor altura a comparación de los dos anteriores modelos.

Conclusiones

- En la literatura científica se ha detallado que la influencia del caudal y la altura de caída son partes fundamentales al momento de realizar un diseño para la generación hidroeléctrica debido a que la turbina Francis necesita determinado impulso de parte del flujo de agua que mientras haya más altura y caudal y la turbina lo soporte se genere potencial, por esa razón es sustancial el ensamble del tubo Venturi para disminuir esa altura desde donde cae el agua y por consecuencia del resultado del ensamble el caudal también obtiene aumento haciendo que esta sea una forma de maximizar su construcción cuando por motivos topográficos no existe pendiente suficiente. De esta forma el tubo Venturi da solución a este problema sin tener que usar otro tipo de máquinas costosas que intervengan en la presión para darle velocidad y fuerza al flujo de agua que entra en la turbina.
- En la comparación de los resultados finales de los tres modelos presentados en este trabajo de grado, se cumplió con el objetivo principal de determinar la generación del potencial eléctrico con el Modelo 1 y Modelo 2, mientras que el Modelo 3 no alcanza con lo requerido. Puntualmente el Modelo 2 es el más equilibrado en cuanto a la modificación del aumento del caudal y la disminución altura que gracias al ensamble del tubo Venturi y su análisis en SolidWorks mostró obtener el potencial mecánico requerido para generar el potencial eléctrico que en este caso es de 5000W al generador eléctrico.
- Las pruebas realizadas en las simulaciones de los softwares computacionales (SolidWorks y Simulink) fueron realizadas entorno a condiciones ideales debido que al ser una micro generación no se tomó en cuenta las pérdidas de carga, por ende, respondiendo a la pregunta del problema el potencial producido varía entorno al caudal inicial asignado que

al pasar por el tubo Venturi este aumenta en su velocidad de flujo haciendo que el caudal también aumente y por esta razón la altura de caída de agua puede ser reducida hasta más de la mitad (el mejor caso el Modelo 2). Este diseño computacional puede ser utilizado para la determinación de la generación del potencial eléctrico por cambio de flujo para situaciones reales donde se desea observar los cambios en el flujo de agua después del recorrido en el tubo Venturi para realizar los cálculos de la generación final pertinentes.

Recomendaciones

- Este trabajo de grado al ser un diseño computacional donde se trabaja en condiciones ideales se sugiere realizar para futuras investigaciones un diseño práctico real donde sea observable el flujo de agua y el cambio que ocurre después del tubo Venturi y de esta manera puntualmente analizar el arranque de la turbina y del generador eléctrico para identificar su desgaste o estrés excesivo en los primeros segundos de funcionamiento debido al cambio de presión.
- A pesar de que las simulaciones obtuvieran buenos resultados, se tuvo que realizar excesivas simulaciones para encontrar el equilibro en cuanto a la variación de la altura y el caudal para obtener un flujo adecuado con el tubo Venturi por lo que se plantea realizar un diseño computacional para estimar el caudal inicial y la altura óptimos para la generación dependiendo de los vatios que se desea obtener en el generador eléctrico, esto con la finalidad de agilizar los futuros diseños utilizando los tubos Venturi.
- Para este caso el tipo de turbina fue una Francis específicamente que es más soportable a cambios de flujo turbulento por lo que se propone realizar pruebas y análisis con tipos de turbinas que requieran una elevada altura y detallar los hallazgos que se obtengan al implementar la tubería Venturi.

Referencias bibliográficas.

[1]. L. Ponzoni *et al.*, «Implementación de un micro generador de energía hidroeléctrica», 7 de julio de 2022. http://revistas.untref.edu.ar/index.php/innova/article/view/1370

[2]. Z. Xiao-Hu, G. Huang, Y. Li, y C. Lü, «Responses of hydroelectricity generation to streamflow drought under climate change», *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 174, p. 113141, mar. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2022.113141.

[3]. A. Vaninsky, «Efficiency of electric power generation in the United States: Analysis and forecast based on data envelopment analysis», *Energy Economics*, vol. 28, n.o 3, pp. 326-338, may 2006, doi: 10.1016/j.eneco.2006.02.007.

[4]. M. A. García, L. Castro-Díaz, S. Villamayor-Tomás, y M. C. López, «Are large-scale hydroelectric dams inherently undemocratic?», *Global Environmental Change*, vol. 71, p. 102395, nov. 2021, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2021.102395.

[5]. «Usos múltiples del agua embalsada y aspectos ambientales», *Argentina.gob.ar*, 21 de septiembre de 2020. https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/energia-electrica/hidroelectrica/usos-multiples-del-agua-embalsada-y-aspectos-ambientales-0

[6]. S. F. Stefenon, L. O. Seman, L. S. Aquino, y L. D. S. Coelho, «Wavelet-Seq2Seq-LSTM with attention for time series forecasting of level of dams in hydroelectric power plants», *Energy*, vol. 274, p. 127350, jul. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127350.

[7]. J. Sundaram, C. Rajkumar, S. Salunkhe, As. Praveen, S. Muniamuthu, y S. Ganesan, «Fabrication and mechanical characterization of venturi duct using fused deposition modelling through finite element approach», *Materials Today: Proceedings*, mar. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.433.

[8]. J. E. Gribbin, *Introducción a la hidráulica e hidrología con aplicaciones para la administración del agua pluvial (4a. ed.).* 2017.

[9]. D. Tsuanyo, B. Amougou, A. N. Aziz, B. N. Nnomo, D. Fioriti, y J. Kenfack, «Design models for small run-of-river hydropower plants: a review», *Sustainable Energy Research*, vol. 10, n.o 1, feb. 2023, doi: 10.1186/s40807-023-00072-1.

[10]. N. M. Restrepo, S. Y. Ríos-Gallego, y J. G. Hincapié-Pérez, «Planificación de áreas de influencia de embalses. Propuesta desde la Capacidad de Acogida», *Bitácora Urbano Territorial*, vol. 29, n.o 2, pp. 99-108, may 2019, doi: 10.15446/bitacora.v29n2.72178.

[11]. F. Romero, L. Velásquez, y E. Chica, «Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki», *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, n.o 1, pp. 23-46, oct. 2020, doi: 10.18273/revuin.v20n1-2021003.

[12]. X. Guan, P. Jiang, Y. Meng, H. Qin, y H. Lv, «Study on Production, Domestic and Ecological Benefits of Reservoir Water Supply Based on Emergy Analysis», *Processes*, vol. 8, n.o 11, p. 1435, nov. 2020, doi: 10.3390/pr8111435.

[13]. V. Markantonis *et al.*, «Can the Implementation of the Water-Energy-Food Nexus Support Economic Growth in the Mediterranean Region? The Current Status and the Way Forward», *Frontiers In Environmental Science*, vol. 7, jul. 2019, doi: 10.3389/fenvs.2019.00084.

[14]. D. Tsuanyo, B. Amougou, A. N. Aziz, B. N. Nnomo, D. Fioriti, y J. Kenfack, «Design models for small run-of-river hydropower plants: a review», *Sustainable Energy Research*, vol. 10, n.o 1, feb. 2023, doi: 10.1186/s40807-023-00072-1.

[15]. F. Romero, L. Velásquez, y E. Chica, «Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki», *Revista UIS Ingenierías*, vol. 20, n.o 1, pp. 23-46, oct. 2020, doi: 10.18273/revuin.v20n1-2021003.

[16]. E. Quaranta, J. P. Perrier, y R. Revelli, «Optimal design process of crossflow Banki turbines: Literature review and novel expeditious equations», *Ocean Engineering*, vol. 257, p. 111582, ago. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.111582.

[17]. T. Reyna, M. Lábaque, B. Irazusta, y C. Riha, «MICROTURBINAS HIDRÁULICAS. DISEÑO, ADAPTACIONES PARA ENSEÑANZA DE MICROGENERACIÓN RESUMEN», *ResearchGate*, sep. 2018, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/328108201_MICROTURBINAS_HIDRAULICAS_DISENO_ADAPTACIONES_PARA_ENSENANZA_DE_MICROGENERACION_RESUMEN

[18]. K. Kumar, G. Saini, A. Kumar, R. M. Elavarasan, Z. Said, y V. Terzija, «Effective monitoring of Pelton turbine based hydropower plants using data-driven approach», *International Journal Of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 149, p. 109047, jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109047.

[19]. Y. Nishi, R. Suzuo, D. Sukemori, y T. Inagaki, «Loss analysis of gravitation vortex type water turbine and influence of flow rate on the turbine's performance», *Renewable Energy*, vol. 155, pp. 1103-1117, ago. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.03.186.

[20]. L. D. Pérez, «Evaluación de la producción eléctrica de una turbina Turgo», 2020. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.11912/8653

[21]. Y. Chen, Y. Li, X. Zhou, y Y. Xie, «A multi-level assessment and correction method for Venturi tube flow measurements», *Nuclear Engineering And Design*, vol. 379, p. 111262, ago. 2021, doi: 10.1016/j.nucengdes.2021.111262.

[22]. M. Ruiz Garrido, «Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD», 2022. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/10251/147877

[23]. S. L. B. T. Masgo, «Estudio experimental y numérico de la presión del flujo de agua en un tubo Venturi», *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*, n.o 23, pp. 9-22, dic. 2019, doi: 10.17163/ings.n23.2020.01.

[24]. S. Xu, X. Long, J. Wang, H.-Y. Cheng, y Z. Zhang, «Experiment on flow dynamics and cavitation structure in an axisymmetric venturi tube based on x-t diagrams and proper orthogonal decomposition», *Experimental Thermal And Fluid Science*, vol. 136, p. 110648, ago. 2022, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2022.110648.

[25]. E. Mejía Rómulo, «APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE UN VENTURI EN EL PROCESO DE AIREACIÓN EN UN ESTANQUE ACUÍCOLA DE UN SISTEMA DE RECIRCULACIÓN, APLICANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL», Universidad Autónoma del Estado de México, 2020. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.11799/138552

[26]. M. Á. Zamora-Juárez, C. R. F. Ortiz, V. H. Guerra-Cobián, B. M. López-Rebollar, I. G. Alarcón, y D. García-Pulido, «Parametric assessment of a Pelton turbine within a rainwater harvesting system for micro hydro-power generation in urban zones», *Energy*

For Sustainable Development, vol. 73, pp. 101-115, abr. 2023, doi: 10.1016/j.esd.2023.01.015.

[27]. A. T. Córdoba, «Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas...», *ResearchGate*, sep. 2017, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/323907454_Modelado_de_micro-central_hidraulica_para_el_diseno_de_controladores_con_aplicacion_en_regiones_aisladas_de_Honduras

[28]. M. S. J. Elías, «Análisis de parámetros de operación y su impacto en la eficiencia de turbinas Francis en la mini central hidroeléctrica de CC. NN. Betania, Perú 2022», 2022. https://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/7149

[29]. P. Kumar, S. K. Singal, y P. P. Gohil, «A technical review on combined effect of cavitation and silt erosion on Francis turbine», *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 190, p. 114096, feb. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114096.

[30]. Á. G. Nicolás, «Análisis de la dinámica de flujo en la turbina FRANCIS 99 con inyecciones de fluido a carga parcial», 2023. [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/1992/69229

[31]. É. R. Oviedo-Ocaña, «Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental», *Revista de la Universidad Industrial de Santander/Salud UIS*, vol. 50, n.o 3, pp. 191-192, jul. 2018, doi: 10.18273/revsal.v50n3-2018003.

[32]. SolidBi, «SOLIDWORKS Flow Simulation - Dinámica de fluidos | SolidBI», *SolidBI*, 6 de octubre de 2023. https://solid-bi.es/solidworks-flow-simulation/

[33]. SolidBi, «SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve», *SolidBI*, 30 de octubre de 2023. https://solid-bi.es/solidworks/

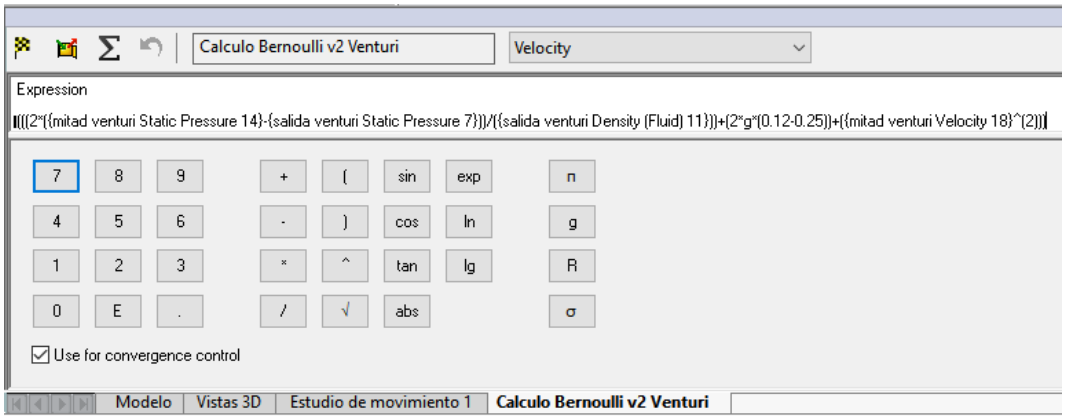
[34]. «Productos de ECODITEC». https://ecoditec.cl/productos.htm

[35]. E. Avdic, «Free CAD designs, files & 3D models | The GrabCAD Community Library», 13 de octubre de 2017. https://grabcad.com/library/francis-turbine-7

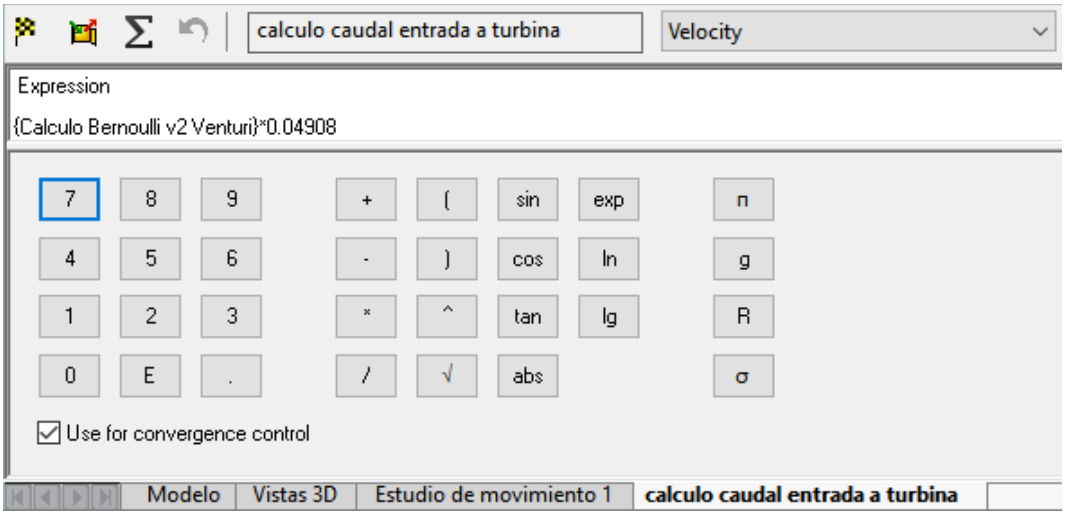
[36]. A. Osama, «Free CAD designs, files & 3D models | The GrabCAD Community Library», 17 de abril de 2024. https://grabcad.com/library/water-tank-215

ANEXOS

Anexo A: Resultados numéricos en el software SolidWorks para la generación mecánica desde depósito de agua hasta turbina incluyendo el flujo dentro de la tubería Venturi desde su entrada, la parte estrecha y la salida de esta. La ecuación de Bernoulli despejado la variable "v2" en la sección "Equation Goal" para calcular la velocidad final que entrega el Venturi después de pasar el flujo de agua por la parte estrecha.

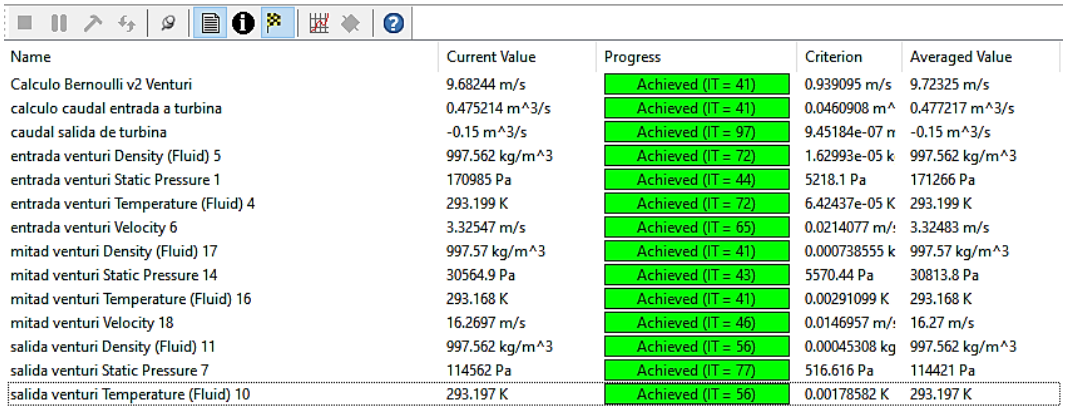


Se añadió a la siguiente ecuación el cálculo "v2" anterior para el cálculo de caudal.



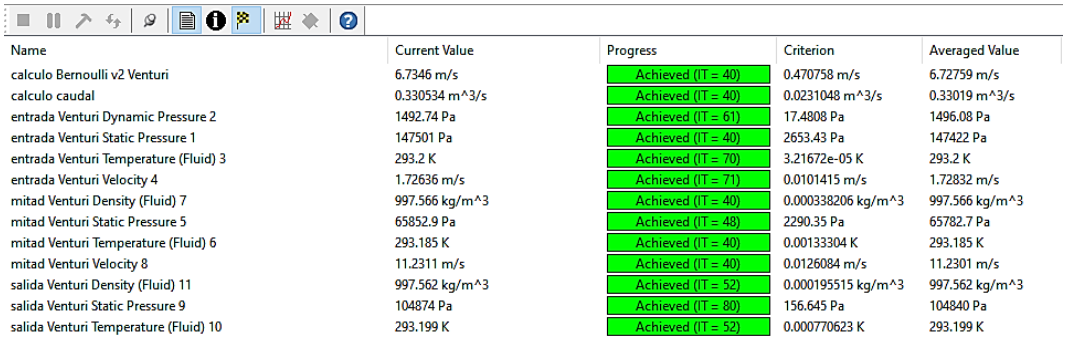
Al compilar la simulación se obtiene todos los datos sin despreciar los decimales. Variables calculadas en esta sección del Solver perteneciente a la simulación de flujo en el SolidWorks: presión en la mitad y salida del Venturi, densidad del agua, temperatura, caudal.

Modelo 1



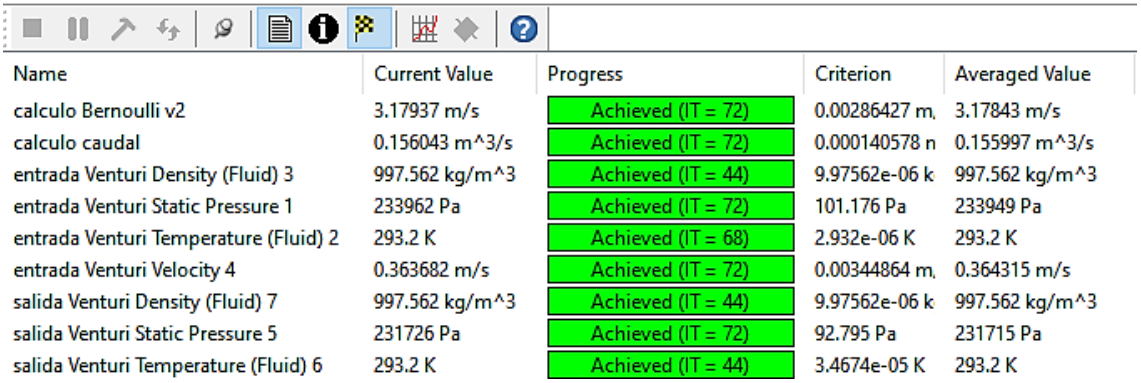
Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
Calculo Bernoulli v2 Venturi	9.68244 m/s	Achieved (IT = 41)	0.939095 m/s	9.72325 m/s
calculo caudal entrada a turbina	0.475214 m^3/s	Achieved (IT = 41)	0.0460908 m^	0.477217 m^3/s
caudal salida de turbina	-0.15 m^3/s	Achieved (IT = 97)	9.45184e-07 m	-0.15 m^3/s
entrada venturi Density (Fluid) 5	997.562 kg/m^3	Achieved (IT = 72)	1.62993e-05 k	997.562 kg/m^3
entrada venturi Static Pressure 1	170985 Pa	Achieved (IT = 44)	5218.1 Pa	171266 Pa
entrada venturi Temperature (Fluid) 4	293.199 K	Achieved (IT = 72)	6.42437e-05 K	293.199 K
entrada venturi Velocity 6	3.32547 m/s	Achieved (IT = 65)	0.0214077 m/s	3.32483 m/s
mitad venturi Density (Fluid) 17	997.57 kg/m^3	Achieved (IT = 41)	0.000738555 k	997.57 kg/m^3
mitad venturi Static Pressure 14	30564.9 Pa	Achieved (IT = 43)	5570.44 Pa	30813.8 Pa
mitad venturi Temperature (Fluid) 16	293.168 K	Achieved (IT = 41)	0.00291099 K	293.168 K
mitad venturi Velocity 18	16.2697 m/s	Achieved (IT = 46)	0.0146957 m/s	16.27 m/s
salida venturi Density (Fluid) 11	997.562 kg/m^3	Achieved (IT = 56)	0.00045308 kg	997.562 kg/m^3
salida venturi Static Pressure 7	114562 Pa	Achieved (IT = 77)	516.616 Pa	114421 Pa
salida venturi Temperature (Fluid) 10	293.197 K	Achieved (IT = 56)	0.00178582 K	293.197 K

Modelo 2



Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
calculo Bernoulli v2 Venturi	6.7346 m/s	Achieved (IT = 40)	0.470758 m/s	6.72759 m/s
calculo caudal	0.330534 m^3/s	Achieved (IT = 40)	0.0231048 m^3/s	0.33019 m^3/s
entrada Venturi Dynamic Pressure 2	1492.74 Pa	Achieved (IT = 61)	17.4808 Pa	1496.08 Pa
entrada Venturi Static Pressure 1	147501 Pa	Achieved (IT = 40)	2653.43 Pa	147422 Pa
entrada Venturi Temperature (Fluid) 3	293.2 K	Achieved (IT = 70)	3.21672e-05 K	293.2 K
entrada Venturi Velocity 4	1.72636 m/s	Achieved (IT = 71)	0.0101415 m/s	1.72832 m/s
mitad Venturi Density (Fluid) 7	997.566 kg/m^3	Achieved (IT = 40)	0.000338206 kg/m^3	997.566 kg/m^3
mitad Venturi Static Pressure 5	65852.9 Pa	Achieved (IT = 48)	2290.35 Pa	65782.7 Pa
mitad Venturi Temperature (Fluid) 6	293.185 K	Achieved (IT = 40)	0.00133304 K	293.185 K
mitad Venturi Velocity 8	11.2311 m/s	Achieved (IT = 40)	0.0126084 m/s	11.2301 m/s
salida Venturi Density (Fluid) 11	997.562 kg/m^3	Achieved (IT = 52)	0.000195515 kg/m^3	997.562 kg/m^3
salida Venturi Static Pressure 9	104874 Pa	Achieved (IT = 80)	156.645 Pa	104840 Pa
salida Venturi Temperature (Fluid) 10	293.199 K	Achieved (IT = 52)	0.000770623 K	293.199 K

Modelo 3



Name	Current Value	Progress	Criterion	Averaged Value
calculo Bernoulli v2	3.17937 m/s	Achieved (IT = 72)	0.00286427 m,	3.17843 m/s
calculo caudal	0.156043 m^3/s	Achieved (IT = 72)	0.000140578 n	0.155997 m^3/s
entrada Venturi Density (Fluid) 3	997.562 kg/m^3	Achieved (IT = 44)	9.97562e-06 k	997.562 kg/m^3
entrada Venturi Static Pressure 1	233962 Pa	Achieved (IT = 72)	101.176 Pa	233949 Pa
entrada Venturi Temperature (Fluid) 2	293.2 K	Achieved (IT = 68)	2.932e-06 K	293.2 K
entrada Venturi Velocity 4	0.363682 m/s	Achieved (IT = 72)	0.00344864 m,	0.364315 m/s
salida Venturi Density (Fluid) 7	997.562 kg/m^3	Achieved (IT = 44)	9.97562e-06 k	997.562 kg/m^3
salida Venturi Static Pressure 5	231726 Pa	Achieved (IT = 72)	92.795 Pa	231715 Pa
salida Venturi Temperature (Fluid) 6	293.2 K	Achieved (IT = 44)	3.4674e-05 K	293.2 K

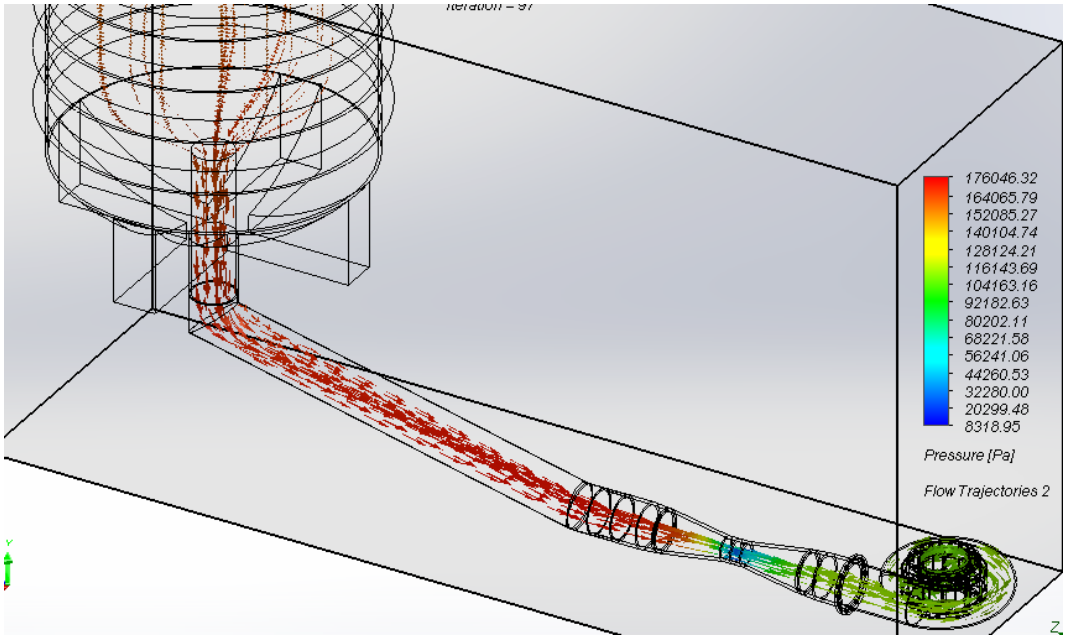
Anexo b: Simulación gráfica de SolidWorks

Cambios de la presión en cada sección tubular.

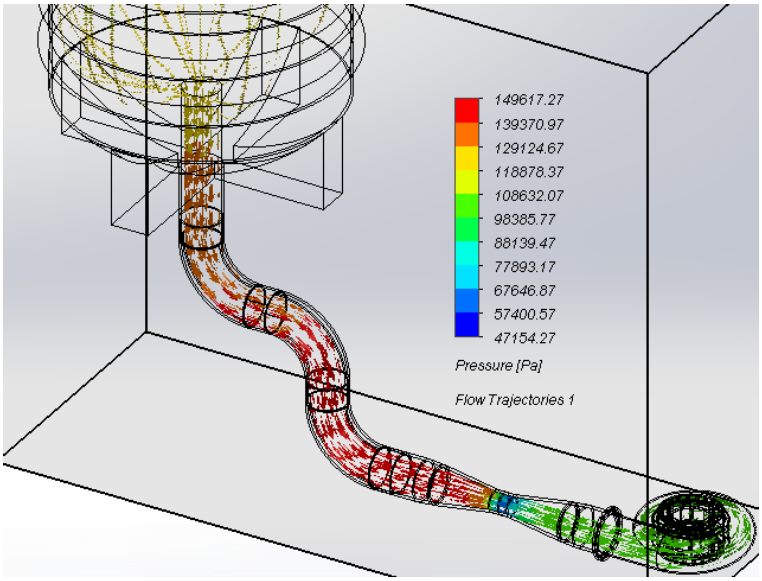
De manera general se en las siguientes tres imágenes se puede observar como la presión varía según la localidad de las tuberías, es importante dar a conocer que la presión después de pasar por el Venturi nuevamente vuelve a aumentar su presión, sin embargo, dicha presión ahora es más reducida a la que inicialmente era.

La figura del Modelo 3 simplemente reduce la presión desde principio a fin debido a que se ha adjuntado la mitad de la tubería Venturi, es decir la parte más trecha directamente a la boca de la turbina.

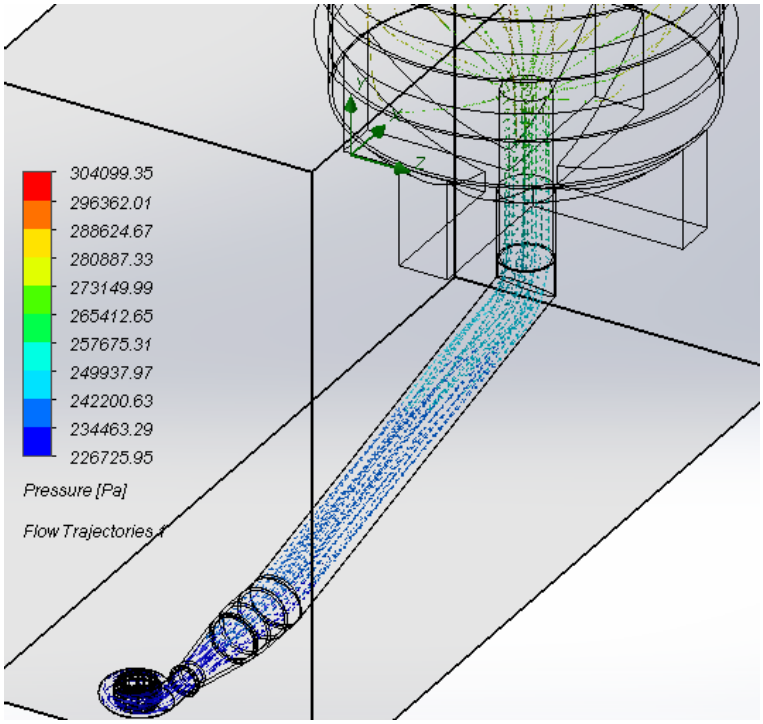
Modelo 1.



Modelo 2.



Modelo 3.


304099.35
296362.01
288624.67
280887.33
273149.99
265412.65
257675.31
249937.97
242200.63
234463.29
226725.95
Pressure [Pa]
Flow Trajectories 1