



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto de Investigación previo
a la obtención del Título de
Ingeniero Mecánico.

Título de Proyecto de Investigación

**DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROKINÉTICA DE EJE VERTICAL
PARA EL ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA DE LOS PRINCIPALES
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE INFLUYEN EN EL
COEFICIENTE DE POTENCIA**

Autor:

Jonathan Daniel Mendoza Acosta

Director de Tesis:

Ing. Luis Gabriel Pico Saltos

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2018



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Jonathan Daniel Mendoza Acosta**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se citan en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo; puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

F. _____

Jonathan Daniel Mendoza Acosta



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Mec. Luis Gabriel Pico Saltos**, docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Jonathan Daniel Mendoza Acosta**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA DE EJE VERTICAL PARA EL ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE INFLUYEN EN EL COEFICIENTE DE POTENCIA**”, previo a la obtención del título de **Ingeniero Mecánico**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Ing. Mec. Luis Gabriel Pico Saltos

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

Por medio del presente me permito certificar, que el Sr. **MENDOZA ACOSTA JONATHAN DANIEL**, con cédula N°.- **0940665490**, estudiante egresado de la Carrera de Ingeniería Mecánica presencial del paralelo “A”, una vez que se revisó el proyecto de investigación titulado “**DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROKINÉTICA DE EJE VERTICAL PARA EL ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE INFLUYEN EN EL COEFICIENTE DE POTENCIA**”, tengo a bien informar que se realizó la revisión respectiva por medio del sistema Urkund, con un porcentaje favorable del 3 %.

Se adjunta imagen del sistema **Urkund**

| URKUND | |
|-----------------------|--|
| Documento | Tesis turbina hidrocineéticas - Daniel Mendoza A.docx (D41642488) |
| Presentado | 2018-09-21 01:20 (-05:00) |
| Presentado por | jonathan.mendozaa@uteq.edu.ec |
| Recibido | lpico.uteq@analysis.orkund.com |
| Mensaje | TESIS DE GRADO - DANIEL MENDOZA ACOSTA Mostrar el mensaje completo 3% de estas 61 páginas, se componen de texto presente en 12 fuentes. |

Ing. Pico Saltos Luis Gabriel.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

“DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA DE EJE VERTICAL PARA EL ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE INFLUYEN EN EL COEFICIENTE DE POTENCIA”

Presentado al Consejo Académico como requisito previo a la obtención de título de Ingeniero Mecánico.

Aprobado por:

Ing. Ángel Heriberto Llumiquinga Chingay

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE TESIS

Ing. Ernesto Javier Ruano Herreria

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE TESIS

Ing. José David Barros Enriquez

MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE TESIS

QUEVEDO – LOS RÍOS - ECUADOR

2018

AGRADECIMIENTO

La vida se encuentra colmada de retos, oportunidades y metas que cumplir, una de ellas es la Universidad. Estar integrado en ella, va más allá de conseguir un título de tercer nivel, es una base no solo para mi conocimiento de campo ingenieril en el que me he visto inmerso, sino para lo que concierne a la vida ética, laboral y disposición de mi futuro.

Agradecido a mi madre, hermanas y familiares que son parte de mi diario vivir, con su motivación, apoyo económico y anhelo por dejarme el mejor legado que es la educación e integrarme como un profesional en la rama de Ingeniería Mecánica.

A mis compañeros, amigos, docentes presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, experiencias durante este trayecto de cinco años para lograr que este sueño se haga realidad.

Jonathan Daniel Mendoza Acosta

“La diferencia entre dónde estuviste Ayer y dónde vas a estar Mañana, es lo que piensas, digas y hagas Hoy”

DEDICATORIA

Dedico esta investigación a Dios, por concederme la vida y darme las fuerzas necesarias que me permite luchar en el vivir diario para romper todas las barreras que se me presentan.

A mi madre, Ana Acosta Vera que gracias a sus esfuerzos y dedicación me han permitido desenvolverme con valores éticos como un excelente humano y competitivo como profesional.

A mi familia que con su apoyo y compañía en el transcurso de mi vida estudiantil me enseñaron a desarrollar aptitudes, ser cada vez mejor persona y no perder la humildad.

Además, a los docentes que conforman el cuerpo de ingenieros mecánicos de la FCI, por haberme asesorado y compartido su conocimiento durante el lapso de estudio académico.

Jonathan Daniel Mendoza Acosta

RESUMEN EJECUTIVO

La ciencia busca mejoras tecnológicas que sorprendan, porque a través de estos se dan solución a incontables problemas: sean estos de carácter científico, energéticos, biotecnológicos, técnicos, entre otros. La necesidad de sustentarse de fuentes de energía ha incursionado en el desarrollo tecnológico de alternativas para la producción de energía eléctrica, algunas de ellas estipulándose en el aprovechamiento de recursos hídricos de baja potencia como son ríos, canales, esteros. De esta manera, brindando la oportunidad de introducir el uso de turbinas hidrocínicas con rotores de eje vertical e integrar la implantación de proyectos para la generación de energía eléctrica distribuida y autónoma con el aprovechamiento de los potenciales hídricos de los ríos. El proyecto se enfoca en el diseño y simulación de una turbina hidrocínica de eje vertical mediante el análisis de dinámica fluidos computacional, que es representado por métodos de volúmenes finitos para obtener el comportamiento fluido dinámico del agua que pasa a través de la turbina. El diseño se considera basándose en los parámetros geométricos que se han alcanzado de estudios y recopilación de información realizados por investigadores, tomando como referencia estos datos para lograr los objetivos del presente trabajo de investigación, para analizar cómo afectan implícitamente al coeficiente de potencia, variando los diferentes parámetros de la turbina hidrocínica de eje vertical, tales como: la altura, diámetros del rotor, longitud de cuerda, el espesor de las palas, entre otras características. Este proyecto permitirá la enseñanza en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y personas que tengan afinidad por el tema, de esta manera, generar un vínculo entre la teoría de los fluidos, las turbinas hidrocínicas y el análisis dinámico del fluido por computador, simulación CFD; donde se observará, que afectaciones tendrá el modelo antes de poder implantarlo en un proyecto.

Palabras claves:

Turbinas hidrocínicas, parámetros, Simulación CFD, coeficiente de potencia.

EXECUTIVE SUMMARY

Science seeks technological improvements that surprise, because through these solutions are given to countless problems: be they scientific, energetic, biotechnological, technical, among others. The need to sustain energy sources has dabbled in the technological development of alternatives for the production of electricity, some of them stipulating the use of low-power water resources such as rivers, canals, estuaries. In this way, it provides the opportunity to introduce the use of hydroelectric turbines with vertical axis rotors and the implementation of projects for the generation of electrical energy in a distributed and autonomous way with the use of the water resources of the rivers. The project focuses on the design and simulation of a vertical axis hydroelectric turbine by analysing computational fluid dynamics, which is represented by finite volume methods to achieve the fluid behaviour of the water passing through the turbine. The design is based on the geometric parameters to obtain the results of the research study, to analyse how implicitly affect the power coefficient, varying the different parameters of the vertical axis hydroelectric turbine, stories such as height, rotor diameters, rope length, thickness of the blades, among other characteristics. This project allows teaching at the Faculty of Mechanical Engineering of the Universidad Técnica Estatal de Quevedo and people who have an affinity for the subject, thus generating a link between the theory of fluids, hydroelectric turbines and dynamic fluid analysis by computer, simulation CFD, where it will be observed, what effects the model will have before it can be implemented in a project.

Keywords:

Hydrokinetic turbines, parameters, Simulation CFD, power coefficient.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO I CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN..... | 3 |
| 1.1. Problema de investigación..... | 4 |
| 1.1.1. Planteamiento del problema..... | 4 |
| 1.1.2. Formulación del problema..... | 5 |
| 1.2. Sistematización del problema..... | 5 |
| 1.3. Objetivos..... | 6 |
| 1.3.1. Objetivo General..... | 6 |
| 1.3.2. Objetivos Específicos..... | 6 |
| 1.4. Justificación..... | 7 |
| CAPÍTULO II FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN..... | 8 |
| 2.1. Marco conceptual..... | 9 |
| 2.1.1. Energía hidrocínética..... | 9 |
| 2.1.2. Turbina hidrocínética..... | 9 |
| 2.1.3. Volumen de control..... | 9 |
| 2.1.4. Impresión 3D..... | 10 |
| 2.1.5. SolidWorks..... | 10 |
| 2.1.6. Dinámica de fluidos computacional (CFD)..... | 11 |
| 2.2. Marco referencial..... | 12 |
| 2.2.1. Teoría hidrocínética..... | 12 |
| 2.2.1.1. Potencia asociada a un canal de agua..... | 12 |
| 2.2.2. Ley de Betz aplicada a las turbinas hidrocínicas..... | 14 |
| 2.2.3. Revisión del estado del arte en sistemas hidrocínicos de baja potencia..... | 18 |
| 2.2.4. Tipos de turbinas hidrocínicas..... | 19 |
| 2.2.4.1. Turbina Savonius..... | 20 |

| | | |
|------------|---|----|
| 2.2.4.2. | Turbinas Darrieus | 21 |
| 2.2.4.3. | Turbina Gorlov | 22 |
| 2.2.5. | Aerodinámica básica de las turbinas hidrocínicas | 22 |
| 2.2.5.1. | Fuerza de sustentación..... | 23 |
| 2.2.5.2. | Fuerza de arrastre..... | 24 |
| 2.2.5.3. | Fuerzas en turbina con rotor de eje vertical..... | 24 |
| 2.2.6. | Aerodinámica de un perfil alar | 26 |
| 2.2.6.1. | Coefficientes aerodinámicos | 28 |
| 2.2.6.2. | Variación del ángulo de ataque | 29 |
| 2.2.6.3. | Ángulo helicoidal | 30 |
| 2.2.7. | Proceso de transformación de energía en turbinas hidrocínicas..... | 31 |
| 2.2.7.1. | Producción de energía Vs producción de potencia..... | 31 |
| 2.2.8. | Influencia de parámetros dimensionales de turbinas helicoidales..... | 32 |
| 2.2.8.1. | Procedimiento experimental en la modelación numérica..... | 35 |
| 2.2.8.2. | Análisis numérico para la turbina hidrocínica helicoidal | 37 |
| 2.2.9. | Etapas en un análisis CFD | 39 |
| 2.2.9.1. | Discretización espacial | 40 |
| 2.2.9.1.1. | Mallas estructuradas | 41 |
| 2.2.9.1.2. | Mallas no estructuradas | 41 |
| 2.2.9.2. | Métodos finitos | 42 |
| 2.2.9.3. | Condiciones de contorno e iniciales | 43 |
| 2.2.9.4. | Aplicación de los métodos numéricos al CFD | 43 |
| 2.2.9.5. | Flujo en canales abiertos..... | 44 |
| 2.2.10. | Investigación experimental de características de turbina helicoidal | 47 |
| 2.2.10.1. | Configuración del experimento | 47 |
| 2.2.10.2. | Resultados del análisis de la turbina helicoidal | 48 |
| 2.2.11. | Pruebas de un modelo a escala | 51 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.11.1. Selección de material..... | 51 |
| 2.2.11.2. Descripción del flujo | 53 |
| 2.2.11.3. Descripción del pórtico de pruebas | 54 |
| 2.2.11.4. Parámetros del prototipo de turbina..... | 55 |
| 2.2.11.5. Trabajo futuro | 55 |
| 2.2.11.6. Mecanizado de un bloque sólido para manufactura de un álabe | 56 |
| 2.2.11.7. Fundición..... | 56 |
| 2.2.12. Fabricación de hojas compuestas | 56 |
| 2.2.12.1. Proceso por enchufe o molde macho..... | 57 |
| 2.2.12.2. Molde hembra de dos caras | 57 |
| 2.2.12.3. Molde de una sola cara | 58 |
| 2.2.12.4. Materiales de molde..... | 58 |
| CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN | 59 |
| 3.1. Localización..... | 60 |
| 3.2. Tipo de Investigación | 60 |
| 3.2.1. Investigación Aplicada | 60 |
| 3.2.2. Investigación Bibliográfica | 60 |
| 3.2.3. Investigación diagnóstica | 61 |
| 3.3. Métodos de la Investigación | 61 |
| 3.3.1. Metodología del arte..... | 61 |
| 3.3.2. Método analítico | 61 |
| 3.3.3. Método científico..... | 62 |
| 3.4. Fuentes de recopilación de información..... | 62 |
| 3.5. Diseño de la investigación..... | 62 |
| 3.5.1. Diseño no experimental | 62 |
| 3.6. Instrumentos de investigación | 63 |
| 3.7. Tratamiento de datos | 63 |

| | | |
|--|---|----|
| 3.8. | Recursos humanos y materiales de investigación..... | 63 |
| 3.8.1. | Recursos humanos | 63 |
| 3.8.2. | Recursos materiales | 63 |
| CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN | | 65 |
| 4.1. | Resultados..... | 66 |
| 4.1.1. | Recopilación de datos..... | 66 |
| 4.1.1.1. | Perfil NACA | 66 |
| 4.1.1.2. | Solidez de un álabe | 67 |
| 4.1.1.3. | Ángulo de paso helicoidal | 67 |
| 4.1.1.3.1. | Velocidad de punta del álabe (TSR)..... | 68 |
| 4.1.1.4. | Ángulo de ataque | 69 |
| 4.1.2. | Diseño de la turbina hidrocínética..... | 75 |
| 4.1.2.1. | Guía de elaboración del diseño paramétrico de la turbina..... | 75 |
| 4.1.2.1.1. | Selección de datos del perfil | 75 |
| 4.1.2.1.2. | Importación del archivo de texto y creación del plano..... | 76 |
| 4.1.2.1.3. | Selección de plano de trabajo y elaboración de tabla dinámica | 77 |
| 4.1.2.1.4. | Croquis1 del perfil NACA y circunferencia..... | 78 |
| 4.1.2.1.5. | Elaboración del croquis2, plano1 y croquis3 | 78 |
| 4.1.2.1.6. | Elaboración del plano 2 – 3 - 4, croquis4 - 5 - 6 y croquis 3D..... | 80 |
| 4.1.2.1.7. | Construcción del perfil | 82 |
| 4.1.2.1.8. | Extracción de la base, matriz circular del álabe y simetría de la base..... | 83 |
| 4.1.2.1.9. | Extrusión de eje | 85 |
| 4.1.2.1.10. | Modelo de la turbina finalizado..... | 86 |
| 4.1.2.2. | Diseño de la turbina hidrocínética con los parámetros preliminares..... | 87 |
| 4.1.3. | Simulación de la turbina hidrocínética | 92 |
| 4.1.3.1. | Programa en Matlab..... | 92 |

| | |
|---|-----|
| 4.1.3.1.1. Resultados del modelamiento para la turbina hidrocínética por medio del script de Matlab | 94 |
| 4.1.3.2. Simulación de la turbina hidrocínética de eje vertical helicoidal | 101 |
| 4.1.3.2.1. Geometría e importación del modelo – Geometry | 101 |
| 4.1.3.2.2. Mallado – Mesh | 104 |
| 4.1.3.2.3. Condiciones de contorno – Setup | 105 |
| 4.1.3.2.4. Resultados del análisis computacional – Results | 111 |
| 4.1.3.3. Determinación del coeficiente de potencia..... | 116 |
| 4.1.3.3.1. Volumen de control | 117 |
| 4.1.3.3.2. Flujograma del proceso de diseño y simulación..... | 128 |
| 4.1.3.3.3. Análisis de cargas en los álabes..... | 129 |
| 4.1.3.3.4. Dimensionamiento del eje para la turbina | 133 |
| 4.2. Discusión | 138 |
| CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 140 |
| 5.1. Conclusiones..... | 141 |
| 5.2. Recomendaciones | 143 |
| CAPÍTULO VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 144 |
| 6.1. Referencias | 145 |
| CAPÍTULO VII ANEXOS..... | 149 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Ventajas y Desventajas de las diferentes series de NACA..... | 27 |
| Tabla 2. Datos del tanque de remolque. | 48 |
| Tabla 3. Resumen de las opciones de materiales para un modelo de turbina..... | 51 |
| Tabla 4. Rendimiento (C_p) entre turbinas con diferentes números de álabes y velocidades. | 68 |
| Tabla 5. Parámetros para el diseño de la turbina y simulación. | 70 |
| Tabla 6. Coeficientes de potencia Vs TSR con diferentes parámetros geométricos. | 71 |
| Tabla 7. Coeficiente de potencia Vs TSR..... | 72 |
| Tabla 8. Velocidades promedio de manera anual en el río Quevedo (2007 - 2017). | 73 |
| Tabla 9. Datos para el diseño base de la turbina..... | 87 |
| Tabla 10. Rango típico de parámetros de las turbinas hidrocínicas eje vertical..... | 90 |
| Tabla 11. Descripción de configuraciones usadas en el Script de modelamiento..... | 95 |
| Tabla 12. Fuerzas presentes en la turbina para diferentes simulaciones. | 116 |
| Tabla 13. Configuración de los álabes..... | 116 |
| Tabla 14. Determinación de los C_p por volumen de control..... | 125 |
| Tabla 15. Configuración de la turbina hidrocícnica. | 126 |
| Tabla 16. Resistencia estructural de los álabes..... | 132 |
| Tabla 17. Medidas preliminares del diseño de la turbina. | 138 |
| Tabla 18. Resultados de cada perfil con análisis bidimensional. | 138 |
| Tabla 19. Comparación de las variables para la turbina hidrocícnica. | 139 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1. Túnel de agua..... | 12 |
| Ilustración 2. Túnel de agua para una turbina de eje vertical. | 15 |
| Ilustración 3. Esquema de un sistema hidrocínético de baja potencia. | 19 |
| Ilustración 4. Rotor Savonius..... | 20 |
| Ilustración 5. Esquema de una turbina Savonius. | 21 |
| Ilustración 6. Rotor Darrieus..... | 21 |
| Ilustración 7. Turbina Gorlov de eje vertical. | 22 |
| Ilustración 8. Flujo laminar a través de un álabe. | 23 |
| Ilustración 9. Álabe en pérdida. | 24 |
| Ilustración 10. Fuerzas que interactúan en un álabe. | 24 |
| Ilustración 11. Características de un perfil alar..... | 26 |
| Ilustración 12. Fuerzas presentes en un álabe de una turbina. | 28 |
| Ilustración 13. Variación de ángulo de ataque α con respecto al ángulo azimutal θ | 30 |
| Ilustración 14. Esquema del proceso de transformación de energía. | 31 |
| Ilustración 15. Áreas de barrido para a) Rotor vertical recto y helicoidal, b) Rotor horizontal. | 32 |
| Ilustración 16. Aspectos dimensionales de altura H y diámetro D. | 34 |
| Ilustración 17. Ángulo de paso helicoidal δ de la turbina helicoidal. | 35 |
| Ilustración 18. Configuración del dominio computacional de la turbina hidrocínética. | 36 |
| Ilustración 19. Coeficientes de potencia en diámetros de D = 300, 450 y 500 mm de la turbina Gorlov. | 37 |
| Ilustración 20. Potencia vs RPM en D = 300 mm y paso helicoidal $\delta = 60^\circ$ | 38 |
| Ilustración 21. Potencia vs RPM en D = 450 mm y paso helicoidal $\delta = 50^\circ$ | 38 |
| Ilustración 22. Potencia vs RPM en D = 500 mm y paso helicoidal $\delta = 50^\circ$ | 39 |
| Ilustración 23. Esquema de la turbina de corriente helicoidal. | 48 |
| Ilustración 24. D=0.5 m y $\delta=120^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia..... | 49 |
| Ilustración 25. D=0.5 m y $\delta=135^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia. | 49 |
| Ilustración 26. D=0.5 m y $\delta=150^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia. | 49 |
| Ilustración 27. D=0.6 m y $\delta=120^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia. | 50 |
| Ilustración 28. D=0.6 m y $\delta=135^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia. | 50 |
| Ilustración 29. D=0.5 m y $\delta=150^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia. | 50 |
| Ilustración 30. Imágenes de los álabes durante la fabricación..... | 53 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 31. El canal de prueba con turbina y pórtico montado en su lugar..... | 54 |
| Ilustración 32. Ubicación geográfica. | 60 |
| Ilustración 33. Perfil NACA 0018. | 67 |
| Ilustración 34. Gráfica de Coeficiente de potencia [Cp.] Vs TSR [λ]. | 72 |
| Ilustración 35. Velocidades promedias. | 73 |
| Ilustración 36. Selección de datos del perfil. | 75 |
| Ilustración 37. Alineación de datos del perfil. | 76 |
| Ilustración 38. Importación de los datos del perfil. | 76 |
| Ilustración 39. Croquis del perfil. | 77 |
| Ilustración 40. Creación de la tabla dinámica con las variables de la turbina. | 77 |
| Ilustración 41. Acotación de croquis con variables globales. | 78 |
| Ilustración 42. Croquis2 con línea de geometría constructiva para la altura. | 79 |
| Ilustración 43. Elaboración del plano1 perpendicular al croquis2..... | 79 |
| Ilustración 44. Bosquejo del croquis3..... | 80 |
| Ilustración 45. Elaboración del plano2 y croquis4..... | 81 |
| Ilustración 46. Croquis 3D para la trayectoria del perfil..... | 81 |
| Ilustración 47. Selección de los croquis para la solidez del perfil. | 82 |
| Ilustración 48. Sólido del perfil con sus variables..... | 82 |
| Ilustración 49. Croquis7 de la base. | 83 |
| Ilustración 50. Matriz circular del álabe. | 84 |
| Ilustración 51. Simetría de base. | 84 |
| Ilustración 52. Convertir entidad. | 85 |
| Ilustración 53. Extrusión del eje. | 85 |
| Ilustración 54. Modelo paramétrico de la turbina. | 86 |
| Ilustración 55. Demostración del cambio de variables. | 86 |
| Ilustración 56. Descripción de los parámetros de la turbina. | 87 |
| Ilustración 57. Vista frontal de la turbina (600 mm)..... | 88 |
| Ilustración 58. Vista superior de la turbina (450 mm). | 88 |
| Ilustración 59. Transparencia de la base para la visualización del perfil..... | 88 |
| Ilustración 60. Vista frontal de la turbina (Y). | 89 |
| Ilustración 61. Vista superior de la turbina (Y). | 89 |
| Ilustración 62. Transparencia de la base Y para la visualización del perfil..... | 89 |
| Ilustración 63. Triángulo de velocidades de la turbina. | 93 |
| Ilustración 64. Torque por elemento desarrollado alrededor de la turbina (1.05 m/s)..... | 96 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 65. Coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) a (1.05 m/s)..... | 97 |
| Ilustración 66. Torque total de la turbina (1.05 m/s). | 97 |
| Ilustración 67. Potencia extraída de la turbina (1.05 m/s). | 98 |
| Ilustración 68. Coeficiente de potencia (1.05 m/s). | 98 |
| Ilustración 69. Torque por elemento (2.5 m/s). | 99 |
| Ilustración 70. Coeficiente de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) a (2.5 m/s). | 99 |
| Ilustración 71. Torque total de la turbina (2.5 m/s). | 100 |
| Ilustración 72. Potencia extraída de la turbina (2.5 m/s). | 100 |
| Ilustración 73. Coeficiente de potencia (C_p) (2.5 m/s). | 101 |
| Ilustración 74. Dominio computacional de la turbina hidrocínética. | 102 |
| Ilustración 75. Modelo de la turbina hidrocínética helicoidal (mm)..... | 102 |
| Ilustración 76. Vista lateral de la dimensión del dominio..... | 103 |
| Ilustración 77. Vista frontal de la dimensión del dominio. | 103 |
| Ilustración 78. Características del mallado. | 104 |
| Ilustración 79. Características segunda malla a) Lado izquierdo zona-turbina b) Derecho turbina..... | 105 |
| Ilustración 80. Densificación del mallado en la zona de la turbina. | 105 |
| Ilustración 81. Configuración del dominio computacional..... | 106 |
| Ilustración 82. Modelo de turbulencia Standard K- ϵ | 106 |
| Ilustración 83. Condición de Zona para el (entorno). | 107 |
| Ilustración 84. Condición en la (Zona-turbina.)..... | 107 |
| Ilustración 85. Esquematización de las condiciones de zona..... | 108 |
| Ilustración 86. Entrada del fluido tipo (velocity-inlet). | 108 |
| Ilustración 87. Turbina tipo Wall..... | 109 |
| Ilustración 88. Referencias de evaluación. | 109 |
| Ilustración 89. Actividades a calcular. | 110 |
| Ilustración 90. Configuración Run Calculation. | 110 |
| Ilustración 91. Contorno de velocidades en la turbina..... | 111 |
| Ilustración 92. Vectores generadores por la corriente en la turbina – Plano ZX. | 112 |
| Ilustración 93. Vectores del flujo de corriente de manera tridimensional. | 112 |
| Ilustración 94. Corrientes de flujo en la turbina..... | 113 |
| Ilustración 95. Contorno de velocidad a 1.05 m/s. | 114 |
| Ilustración 96. Corrientes de flujo aguas arriba hasta aguas abajo. | 114 |
| Ilustración 97. Fuerzas en los álabes – velocidad 1.05 m/s. | 115 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 98. Fuerzas en los álabes - velocidad 2.5 m/s..... | 115 |
| Ilustración 99. Contorno de velocidades - simulación 1 (1.05 m/s). | 118 |
| Ilustración 100. Contorno de velocidades - simulación 2 (2.5 m/s). | 120 |
| Ilustración 101. Contorno de velocidades - simulación 3 (1.05 m/s). | 121 |
| Ilustración 102. Contorno de velocidades - simulación 4 (2.5 m/s). | 122 |
| Ilustración 103. Contorno de velocidades - simulación 5 (1.05 m/s). | 123 |
| Ilustración 104. Contorno de velocidades - simulación 6 (2.5 m/s). | 124 |
| Ilustración 105. Dimensiones de configuración en la turbina hidrocínética..... | 127 |
| Ilustración 106. Fuerza en los álabes en la componente (X). | 129 |
| Ilustración 107. Fuerza en los álabes componente (Y). | 129 |
| Ilustración 108. Fuerza en los álabes componente (Z)..... | 130 |
| Ilustración 109. Distribución de fuerzas y parte fija para el análisis. | 130 |
| Ilustración 110. Esfuerzos producidos en el álabe – material de aluminio..... | 131 |
| Ilustración 111. Desplazamientos en el álabe (mm) - material de aluminio..... | 131 |
| Ilustración 112. Distinción de factor de seguridad – material aluminio. | 132 |
| Ilustración 113. Fuerzas de arrastre en el eje. | 133 |
| Ilustración 114. Fuerza distribuida en la parte del eje sumergido. | 134 |
| Ilustración 115. Esquema de las fuerzas en el eje de manera puntual. | 134 |
| Ilustración 116. Diagrama de cortante y momento flector..... | 135 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | | |
|--------|---|----|
| EC. 1 | Energía cinética..... | 12 |
| EC. 2 | Potencia hidrocínética o del fluido..... | 13 |
| EC. 3 | Potencia extraída turbina..... | 13 |
| EC. 4 | Relación de coeficiente de potencia..... | 13 |
| EC. 5 | Bernoulli A1..... | 15 |
| EC. 6 | Bernoulli A2..... | 15 |
| EC. 7 | Diferencial de presión..... | 16 |
| EC. 8 | Fuerza axial en dirección del fluido..... | 16 |
| EC. 9 | Aplicación del teorema cantidad de movimiento para la fuerza..... | 16 |
| EC. 10 | Fuerza..... | 16 |
| EC. 11 | Velocidad en la sección del rotor..... | 16 |
| EC. 12 | Factor de inducción axial..... | 16 |
| EC. 13 | Velocidad en la sección media..... | 17 |
| EC. 14 | Velocidad a la salida del flujo..... | 17 |
| EC. 15 | Potencia captada por los álabes..... | 17 |
| EC. 16 | Potencia..... | 17 |
| EC. 17 | Potencia extraída del rotor..... | 17 |
| EC. 18 | Diferencial de potencia con respecto a una variable (a)..... | 17 |
| EC. 19 | Potencia extraída del fluido..... | 18 |
| EC. 20 | Coeficiente de potencia máximo extraído..... | 18 |
| EC. 21 | Ley de continuidad..... | 22 |
| EC. 22 | Continuidad de un fluido..... | 23 |
| EC. 23 | Principio de Bernoulli..... | 23 |
| EC. 24 | Fuerza de sustentación..... | 25 |
| EC. 25 | Fuerza de arrastre..... | 25 |
| EC. 26 | Fuerza de arrastre en función solidez..... | 25 |
| EC. 27 | Coeficiente de sustentación..... | 28 |
| EC. 28 | Coeficiente de arrastre..... | 28 |
| EC. 29 | Coeficiente de Torque..... | 29 |
| EC. 30 | Coeficiente de Potencia..... | 29 |
| EC. 31 | Razón de velocidad..... | 29 |
| EC. 32 | Solidez del álabe..... | 29 |

| | |
|---|-----|
| EC. 33 Ángulo de ataque | 30 |
| EC. 34 Magnitud de la velocidad efectiva | 30 |
| EC. 35 Ángulo de inclinación o helicoidal | 30 |
| EC. 36 Relación aspecto de la turbina | 30 |
| EC. 37 Área en rotores de eje horizontal | 32 |
| EC. 38 Área en rotores de eje vertical helicoidal y palas rectas | 32 |
| EC. 39 Porcentaje error malla | 36 |
| EC. 40 Caudal de un canal abierto | 44 |
| EC. 41 Radio hidráulico | 45 |
| EC. 42 Número de Reynolds de un canal abierto | 45 |
| EC. 43 Número de Froude de un canal abierto | 45 |
| EC. 44 Profundidad hidráulica | 45 |
| EC. 45 Descarga de un canal abierto | 46 |
| EC. 46 Flujo de energía o Potencia mecánica de la turbina | 118 |
| EC. 47 Flujo másico | 118 |
| EC. 48 Deflexión en un eje | 135 |
| EC. 49 Momento de inercia | 135 |
| EC. 50 Torque medio | 136 |
| EC. 51 Límite de resistencia a fatiga | 136 |
| EC. 52 Criterio de falla por fatiga de Goodman | 137 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Anexo 1. Caudales medios diarios en el año 2007..... | 150 |
| Anexo 2. Caudales medios diarios en el año 2008..... | 151 |
| Anexo 3. Caudales medios diarios para el año 2009..... | 152 |
| Anexo 4. Caudales medios diarios para el año 2010..... | 153 |
| Anexo 5. Caudales medios diarios para el año 2011..... | 154 |
| Anexo 6. Caudales medios diarios en el año 2012..... | 155 |
| Anexo 7. Caudales medios diarios en el año 2013..... | 156 |
| Anexo 8. Caudales medios diarios en el año 2014..... | 157 |
| Anexo 9. Caudales medios diarios en el año 2015..... | 158 |
| Anexo 10. Caudales medios diarios en el año 2016..... | 159 |
| Anexo 11. Caudales medios diarios en el año 2017..... | 160 |
| Anexo 12. Tabla de Excel de los caudales promedios y velocidades. | 161 |
| Anexo 13. Matriz de contingencia de turbinas hidrocínéticas. | 162 |
| Anexo 14. Coeficientes de sustentación (lift) – NACA 0018. | 168 |
| Anexo 15. Coeficientes de arrastre (drag) – NACA 0018. | 171 |
| Anexo 16. Script de modelación turbina hidrocínética. | 174 |
| Anexo 17. Coeficientes de sustentación – NACA 0020. | 180 |
| Anexo 18. Coeficientes de arrastre – NACA 0020. | 183 |
| Anexo 19. Matriz de modelación de parámetros de la turbina hidrocínética..... | 186 |
| Anexo 20. Propiedades del acero SAE-1020. | 189 |
| Anexo 21. Gráfica de factores de sensibilidad a la muesca. | 190 |

GLOSARIO

| SÍMBOLO | DEFINICIÓN | UNIDADES |
|-----------------|---------------------------|----------------------|
| E | Energía cinética | [J] |
| m | Masa | [kg] |
| Q | Caudal | [m ³ /s] |
| \dot{Q} | Flujo másico | [kg/s] |
| ρ | Densidad | [kg/m ³] |
| A | Área | [m ²] |
| M | Momento o torque | [N.m] |
| C_p | Coefficiente de potencia | Adimensional |
| P | Presión | [N/m ²] |
| $Pot_{turbina}$ | Potencia turbina | [W] |
| Pot_{fluido} | Potencia del fluido | [W] |
| F | Fuerza | [N] |
| ΔP | Variación de presión | [N/m ²] |
| a | Factor de inducción axial | Adimensional |
| Pot | Potencia | [W] |
| Pot_{max} | Potencia máxima | [W] |
| g | Gravedad | [m/s ²] |
| h | Altura | [m] |
| F_L | Fuerza de sustentación | [N] |
| W | Velocidad del agua | [m/s] |
| F_D | Fuerza de arrastre | [N] |
| C | Cuerda del alerón | [m] |
| C_L | Coefficiente sustentación | Adimensional |
| C_D | Coefficiente de arrastre | Adimensional |
| C_M | Coefficiente de torque | Adimensional |
| R | Radio | [m] |
| W_T | Velocidad tangencial | [m/s] |

| | | |
|-----------------|---------------------------------|---------------------|
| $TSR (\lambda)$ | Razón de velocidad álabes | Adimensional |
| ω | Velocidad angular | [rad/s] |
| σ | Solidez del álabes | Adimensional |
| n | Número de álabes | Adimensional |
| α | Ángulo de ataque | [°] |
| W_{rel} | Velocidad relativa | [m/s] |
| A_{cap} | Área captada o de barrido | [m ²] |
| π | Número Pi (constante) | Adimensional |
| D | Diámetro | [m] |
| THG | Turbina hidrocínética Gorlov | Adimensional |
| t | Tiempo | [s] |
| δ | Paso ángulo helicoidal | [°] |
| ψ | Ángulo de torcedura | [°] |
| H | Altura de la turbina | [m] |
| RA | Relación de aspecto | Adimensional |
| RPM | Revoluciones por minuto | [rpm] |
| Q_{EVS} | Porcentaje de error | % |
| Vol. | Volumen | [m ³] |
| RH | Radio hidráulico | [m] |
| A_{NF} | Área normal al flujo | [m ²] |
| PM | Perímetro mojado | [m] |
| N_R | Número de Reynolds | Adimensional |
| ν | Viscosidad cinemática | [m ² /s] |
| n | Factor de fricción | Adimensional |
| S | Pendiente del canal | Adimensional |
| N_F | Número de Froude | Adimensional |
| y_h | Profundidad hidráulica | [m] |
| T | Ancho de la superficie | [m] |
| \dot{m} | Flujo másico | [kg/s] |

| | | |
|------------------|------------------------------|--------------|
| $\dot{\Delta E}$ | Flujo de energía o Potencia | [J/s o W] |
| S_y | Límite elástico | [Pa] |
| σ | Esfuerzo | [Pa] |
| $R_{AY}; R_{BY}$ | Fuerzas de reacción | [N] |
| $\sum F_Y = 0$ | Sumatoria de fuerzas | [N] |
| $\sum M_A = 0$ | Sumatoria de momentos | [N] |
| E | Módulo de elasticidad | [Pa] |
| y_{BC} | Deflexión para un eje | [m] |
| S_e | Límite de resistencia fatiga | [Pa] |
| K_a | Factor de superficie | Adimensional |
| K_b | Factor de tamaño | Adimensional |
| K_c | Factor de carga | Adimensional |
| K_d | Factor de temperatura | Adimensional |
| K_e | Factor de confiabilidad | Adimensional |
| K_f | Factor efectos varios | Adimensional |
| T_m | Torque medio | [N.m] |
| M_m | Momento medio | [N.m] |
| T_a | Torque alternante | [N.m] |
| M_a | Momento alternante | [N.m] |
| S_{ut} | Esfuerzo ultimo tensión | [Pa] |
| n | Factor de seguridad | Adimensional |

CÓDIGO DUBLÍN

| | | | | |
|-----------------------|---|------------|----------------|-------------------------|
| Título: | “DISEÑO DE UNA TURBINA HIDROKINÉTICA DE EJE VERTICAL PARA EL ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS GEOMÉTRICOS QUE INFLUYEN EN EL COEFICIENTE DE POTENCIA” | | | |
| Autores: | Jonathan Daniel Mendoza Acosta | | | |
| Palabras clave: | Turbinas hidrocinéticas | Parámetros | Simulación CFD | Coeficiente de potencia |
| Fecha de publicación: | | | | |
| Editorial: | Quevedo, UTEQ, 2018 | | | |
| Resumen: | <p>Resumen. - La ciencia busca mejoras tecnológicas que sorprendan, porque a través de estos se dan solución a varios problemas: sean estos de carácter científico, energéticos, biotecnológicos, técnicos, entre otros. De esta manera, brindando la oportunidad de introducir el uso de turbinas hidrocinéticas con rotores de eje vertical e integrar la implantación de proyectos para la generación de energía eléctrica de manera distribuida y autónoma con el aprovechamiento de los potenciales hídricos de los ríos. El proyecto se enfoca en el diseño y simulación de una turbina hidrocinética de eje vertical mediante el análisis de dinámica fluidos computacional, que es representado por métodos de volúmenes finitos para obtener el comportamiento fluido dinámico del agua que pasa a través de la turbina. El diseño se considera basándose en los parámetros geométricos que se han alcanzado de estudios y recopilación de información realizados por investigadores, tomando como referencia estos datos para lograr los objetivos del presente trabajo de investigación, para analizar cómo afectan implícitamente al coeficiente de potencia, variando los diferentes parámetros de la turbina hidrocinética de eje vertical, tales como: la altura, diámetros del rotor, longitud de cuerda, el espesor de las palas, entre otras características. Este proyecto permitirá la enseñanza en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y personas que tengan afinidad por el tema, de esta manera, generar un vínculo entre la teoría de los fluidos, las turbinas hidrocinéticas y el análisis dinámico del fluido por computador (CFD).</p> | | | |

| | |
|--------------|---|
| | <p>Abstract. - Science looks for technological improvements that surprise, because through these solutions are given to some problems: like scientific, energetic, biotechnological, technical, among others. In this way, providing the opportunity to introduce the use of hydrokinetic turbines with vertical axis rotors and integrate the implementation of projects for the generation of electrical energy in a distributed and autonomous manner with the use of the rivers' water potential. The project focuses on the design and simulation of a vertical axis hydrokinetic turbine through computational fluid dynamics analysis, which is represented by finite volume methods to obtain the dynamic fluid behaviour of the water passing through the turbine. The design is considered based on the geometric parameters that have been reached from studies and information gathering by researchers, using these data as a reference to achieve the objectives of this research, to analyse how they implicitly affect the power coefficient, varying the different parameters of the vertical shaft hydrokinetic turbine, such as: the height, rotor diameters, rope length, the thickness of the blades, among other characteristics. This project will allow teaching at the Faculty of Mechanical Engineering of the Universidad Técnica Estatal de Quevedo and people who have an affinity for the subject, in this way, to generate a link between the theory of fluids, hydrokinetic turbines and the computational fluid dynamics (CFD).</p> |
| Descripción: | 217 hojas: Dimensiones 290 x 210 mm: CD-ROM |
| URI: | |

INTRODUCCIÓN

La humanidad en su necesidad para sustentarse de fuentes de energía, ha irrumpido en el desarrollo tecnológico de alternativas para la generación de energía eléctrica, algunas de ellas sustentándose en los potenciales hidroeléctricos. Además de producir energía a partir de fuentes no convencionales como la energía solar y eólica ha mostrado una excelente alternativa para reducir los niveles de contaminación por combustibles fósiles. A pesar de que estas fuentes son amigables con el medio ambiente, su recurso primario es inestable y no siempre se puede disponer de él, porque el sol no está suministrando energía las veinticuatro horas del día, de igual manera, el viento no produce flujos de corriente constante.

En la actualidad, la mayoría de trabajos que se realizan sobre energías renovables o alternativas, buscan hacer de ellas un opción más factible, económica y estable. En el caso específico de la energía producida por turbinas hidrocínéticas se encuentra en un panorama nuevo, que tiene vital importancia debido a sus aplicaciones donde el recurso energético renovable es de baja potencia sobre todo en la zona de influencia de nuestra universidad.

El presente proyecto tiene como objetivo, diseñar un modelo paramétrico de una turbina hidrocínética de eje vertical, con la abstracción de diferentes ideas recabadas por investigadores, donde inciden estos parámetros como el diámetro del rotor, altura, espesor de palas, ángulo de ataque conjuntamente con la variación en magnitud y dirección de flujo hidrocínético. Además, simular el entorno de trabajo donde estará inmersa la misma, y analizar cómo afecta cambiar las variables geométricas del rotor que están implícitamente relacionadas con el coeficiente de potencia. El presente proyecto está constituido de la siguiente forma:

En el Capítulo I se demuestra la problemática, los objetivos y justificación que se presentan en el proyecto de investigación.

Los conceptos básicos de una turbina hidrocínética, cómo realizar un volumen de control, fundamentos teóricos de su clasificación y aplicaciones, el límite de Betz que establece el porcentaje de aprovechamiento de energía para una turbina, reseñas históricas, estudios

realizados por investigadores y modelamientos en Matlab para la capacidad de energía que puede suministrar la turbina, son analizados en el Capítulo II.

Luego de haber concluido con los fundamentos teóricos para el diseño y simulación de la turbina hidrocínética de eje vertical, se procede a realizar la metodología de la investigación, que se muestra en el Capítulo III.

Posteriormente, en el Capítulo IV se muestran el análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones, para los diversos parámetros planteados en el modelamiento funcional de la turbina hidrocínética de eje vertical, determinando las variables más significativas que influyen en el coeficiente de potencia.

En el Capítulo V, se presentan las conclusiones y recomendaciones que se pueden efectuar en un futuro al proyecto, indicando las mejores condiciones geométricas para la turbina hidrocínética con rotor de eje vertical helicoidal que permitan el mejor coeficiente de potencia. Finalmente, los Capítulos 6 y 7, se presentan las referencias bibliográficas y anexos (como son matriz de contingencia, coeficientes de sustentación y arrastre, script de modelación y entre otros).

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

La energía hidrocínética es una clase de recurso renovable y amigable con el medio ambiente al no producir emisiones, muy similar a la energía solar y eólica. Las fuentes convencionales de obtención de energía eléctrica necesitan una caída de agua, lo que hace necesario el uso de embalses o represas para asegurar esta caída. La energía hidrocínética utiliza las corrientes de agua producidas generalmente por ríos, canales o esteros, por esta razón no necesita de mayor infraestructura, disminuyendo los efectos negativos para el medio ambiente y la vida acuática.

En el país no existen proyectos que tenga la visión de crear mini-centrales de generación de energía eléctrica a partir de turbinas hidrocínéticas de eje vertical, se busca una forma de mejorar la eficiencia y confiabilidad de estas turbinas, que permitan aprovechar al máximo los recursos hídricos de las zonas con afluentes cercanos, para que exista mejora energética en menor escala al aportar con la producción de energía eléctrica, que es una necesidad diaria para el ser humano y el avance tecnológico.

El proyecto tiene como objetivo analizar la dependencia funcional del coeficiente de potencia para una turbina hidrocínética de eje vertical helicoidal con sus diferentes variables geométricas, que es motivo de estudio al momento de diseñar un modelo y este sea óptimo o se logre una buena eficiencia, para el aprovechamiento de la energía que producen las corrientes de los ríos. Se conoce que el flujo másico de los ríos no es constante en toda la temporada anual, considerando, que para la temporada invernal el flujo aumenta de nivel (caudal) donde se producen mayores velocidades, a diferencia del verano que disminuyen.

Diagnóstico

No contar con un diseño y simulaciones que garanticen el comportamiento de una turbina hidrocínética, dificulta la forma de hacer que el conocimiento sea practicado por unidades de aprendizaje, como dinámica de fluidos computacional, diseño de sistemas energéticos, e incluso realizar inversiones para efectuar micro-proyectos autosustentables.

Pronóstico

Al diseñar, simular el funcionamiento de la turbina hidrocínética y en un futuro construir o imprimir en forma 3D, hace que esta investigación incentive a realizar cambios en el diseño de la turbina para mejorar su rendimiento y que los estudiantes de Ingeniería Mecánica se motiven a desarrollar pruebas de funcionamiento que formen su criterio técnico, hasta optar por la idea de implementar estas turbinas para la generación de energía eléctrica en la ciudad de Quevedo y su entorno de influencia.

1.1.2. Formulación del problema

¿Cómo la Ingeniería Mecánica ayuda a comprender el comportamiento de una turbina hidrocínética mediante la dinámica de fluidos computacional y sus beneficios, para que el estudiante aplique su criterio técnico y de solución en la implementación de proyectos, para la generación de energía eléctrica de manera distribuida y autónoma?

1.2. Sistematización del problema

- ¿Cuál es el proceso de diseño de una turbina hidrocínética de eje vertical?
- ¿Qué diseño es el más adecuado para la turbina hidrocínética?
- ¿Cuáles son las características esenciales que tienen las turbinas según su disposición?
- ¿Qué pérdidas se consideran al momento de modelar o diseñar?
- ¿Cuál es el mejor ángulo de ataque para una turbina hidrocínética helicoidal de eje vertical?
- ¿Cuál es el parámetro o los parámetros más significativos que inciden en el rendimiento de una turbina de eje vertical?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar una turbina de eje vertical con los principales parámetros geométricos del rotor para el análisis de la dependencia funcional con el coeficiente de potencia.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Recabar información científica con respecto a los parámetros geométricos que influirían en el rotor en una turbina hidrocínética.
- Diseñar una turbina hidrocínética con rotor de eje vertical para el aprovechamiento de la energía que proporciona la corriente de los ríos o esteros en las zonas aledañas de la ciudad de Quevedo.
- Simular el entorno de trabajo que estará inmersa la turbina hidrocínética para su análisis considerando los principales parámetros geométricos.
- Obtener el mejor coeficiente de potencia a partir de la simulación.

1.4. Justificación

El deseo de realizar un análisis para una turbina hidrocínética de eje vertical surge con la expectativa que encuentra la situación actual, donde todavía prevalece el uso de materias primas, como fósiles para la producción energética, los cuales están causando un enorme desequilibrio ambiental en la Tierra. Por tanto, el objetivo es aportar con un diseño que permita aprovechar los afluentes que circulan por la provincia.

Con la tecnología de las turbinas hidrocínéticas se podrá aprovechar la energía de los ríos con la misma filosofía de las grandes centrales hidroeléctricas, pero a menor escala. Será útil para viviendas, granjas, fincas, hostales, campings, etc., en zonas rurales cercanas a ríos que les interese el autoabastecimiento total o parcial mediante equipos de energías renovables. Claro está, siempre que las condiciones del río sean acordes a las características de diseño de la turbina. También se deben tomar las precauciones ambientales, al momento de instalar dichas turbinas por el asunto de la fauna marina, haciéndolo en sitios estratégicos.

El uso de este tipo de turbinas con rotores de eje vertical en fluidos para aprovechar el recurso adecuado energético de los ríos, lagunas y esteros, dado que resulta mejor utilizable en potencia con respecto al aire porque se cuenta con mayor densidad y disponibilidad.

La tecnología de las turbinas hidrocínéticas permite la implementación de proyectos para la generación de energía eléctrica de manera distribuida y autónoma con el aprovechamiento de los potenciales hidráulicos, aportando solución para que comunidades sin el vital servicio eléctrico puedan beneficiarse con la aplicación de este tipo de tecnologías.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Energía hidrocínética

Existen dos formas de producir energía a partir de movimientos de agua: La primera se la conoce como energía hidrocínética basada en corrientes y se la puede encontrar en los cursos artificiales de agua, las corrientes de los ríos y canales de riego; la segunda forma se conoce como energía hidrocínética basada en olas y se encuentra en las mareas y corrientes oceánicas [1].

2.1.2. Turbina hidrocínética

La turbina hidrocínética, es una turbina diseñada para generar electricidad, utilizando solamente la energía cinética de la corriente de agua en los ríos. El uso de esta energía puede ser considerado una de las principales formas inventadas por el hombre para transformar las fuerzas naturales en trabajo mecánico. La mayoría de los principios de esta clase de turbinas son derivados de las turbinas de viento porque su operación es similar [2].

2.1.3. Volumen de control

El estudio de un fluido en movimiento pasa por la definición del sistema en estudio, para ello se define la región del espacio que está ocupada por el fluido. En este espacio se definen las características dinámicas y energéticas del fluido. El volumen de control está limitado por una superficie cerrada, superficie de control, a través de la cual se realizan los procesos de intercambio de energía y masa con el entorno [3].

El espacio delimitado por una superficie de control cerrada, real o virtualmente, donde una de sus características, en general, será la permanencia de la forma y el tamaño del volumen así delimitado. La permanencia del espacio ocupado por el volumen de control hace que las partículas que lo ocupan no sean siempre las mismas [3]. Para el volumen de control la razón de cambio de la masa dentro del volumen está dada por la diferencia entre el flujo másico de entrada y el flujo másico de salida [4].

Proceso de estado estable

Cuando cualquiera de las propiedades del sistema cambia, el estado también; entonces se dice que el sistema estuvo sujeto a un procedimiento. Un proceso es una transformación de un estado a otro; sin embargo, si un sistema muestra los mismos valores de sus propiedades en dos instantes diferentes, está en el mismo estado en esos instantes. Se dice que un sistema se encuentra en estado invariable si ninguna de sus propiedades cambia con el tiempo [4].

Proceso de estado uniforme

Durante un proceso en cualquier instante, el estado del volumen del control es uniforme (es el mismo en todas partes). El estado de volumen de control puede cambiar con el tiempo, pero lo hará de manera uniforme. En consecuencia, el estado de la masa que sale del volumen de control en cualquier instante es el mismo que el estado de la masa en el volumen de control en ese mismo instante. Esta suposición contrasta con la del flujo permanente que requiere que el estado de volumen de control cambie con la posición, pero no con el tiempo [4].

2.1.4. Impresión 3D

Una impresora 3D es un dispositivo que genera un sólido tridimensional mediante la adición de materiales, las impresoras 3D se basan en modelos 3D para definir qué se va imprimir, la mayor parte de las impresoras 3D creadas hasta la actualidad utilizan como material los polímeros ABS Y PLA [5].

2.1.5. SolidWorks

SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. Su primera versión fue insertada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible [6].

El programa permite modelar piezas y conjuntos; y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que

funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada [6].

2.1.6. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

SOLIDWORKS Flow Simulation utiliza el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) para permitir una simulación rápida y eficaz del flujo de fluidos y de la transferencia de calor. Puede calcular fácilmente las fuerzas de fluidos y comprender el impacto de un líquido o gas en el rendimiento de un producto [7].

Estrechamente integrado con el CAD de SOLIDWORKS, el análisis de CFD con SOLIDWORKS Simulation, elimina la complejidad del análisis de flujo y puede convertirse en un elemento habitual del proceso de diseño, lo que reduce la necesidad de crear prototipos, acaba con las repeticiones y demoras, y ahorra tiempo y costes de desarrollo [7].

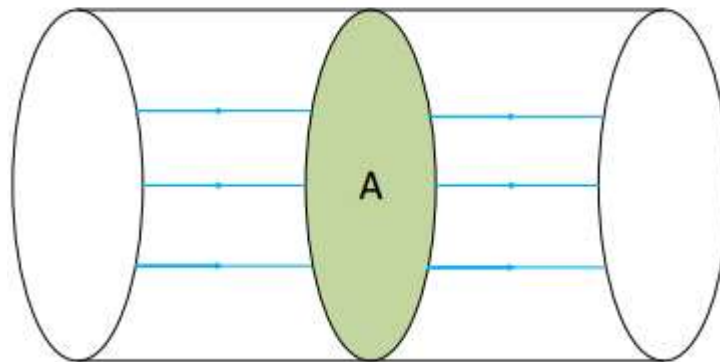
ANSYS CFD va más allá de los resultados cualitativos para ofrecer predicciones cuantitativas precisas de interacciones fluidas y compensaciones. Estas ideas revelan oportunidades inesperadas para su producto, oportunidades que hasta los analistas de ingeniería experimentados pueden pasar por alto. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta con una increíble flexibilidad, precisión y amplitud de aplicación [8]. ANSYS Fluent y ANSYS CFX brindan resultados rápidos para prácticamente cualquier aplicación de fluido o multifísica, con precisión y solidez líderes en la industria. Este software CFD, tiene las capacidades de amplio rango necesarias para resolver sus problemas de diseño hoy y en el futuro [8].

2.2. Marco referencial

2.2.1. Teoría hidrocínética

Una masa de agua tiene dos tipos diferentes de energía que pueden ser aprovechadas para generar electricidad: hidrostática e hidrocínética. La energía hidrostática, es la energía potencial de una masa de agua debido a su altura con respecto a un sitio de referencia. Las centrales hidroeléctricas convencionales utilizan presas y embalses para almacenar agua y energía con una gran cantidad de energía hidrostática, con el fin de aprovecharla de manera controlable para producir electricidad. La energía hidrocínética no es más que la energía de una masa de agua debido a su movimiento, si la velocidad del agua aumenta, mayor será la energía que contenga [9].

Ilustración 1. Túnel de agua.



FUENTE: (JIMÉNEZ. M; 2015)

2.2.1.1. Potencia asociada a un canal de agua

En la ilustración 1, se muestra una sección transversal (A) que representa el rotor de la turbina hidrocínética, y por la cual fluye una masa de agua (m) a una velocidad (W) [9].

En este caso se define la energía cinética como:

$$E = \frac{1}{2} * m * W^2 \quad \text{EC. 1}$$

Teniendo en cuenta que el flujo másico es igual al caudal por la densidad, se puede expresar el flujo de masa en función de la velocidad como se muestra a continuación [9].

$$Q = \frac{dVol}{dt} \quad , \quad \rho = \frac{dm}{dVol}$$

$$\dot{Q} = \frac{dm}{dt} = \frac{dm}{dVol} * \frac{dVol}{dt} = \rho * Q = \rho * A * W$$

Finalmente derivando la energía en función del tiempo se obtiene la potencia.

$$\frac{dE}{dt} = Pot = \frac{1}{2} * \rho * A * W^3 \quad \text{EC. 2}$$

Dónde:

A = área en metros cuadrados (m^2).

ρ = densidad del agua ($1000kg/m^3$).

W = velocidad del agua (m/s).

Como se observa en la (EC. 2), la potencia es proporcional al cubo de la velocidad con la que fluye el agua; esto quiere decir que entre mayor caudal se disponga, mayor será la potencia extraída del agua. También se puede sacar más provecho de la energía del agua en lugares donde hay baja temperatura, ya que la densidad del agua aumenta [9].

Ahora bien, de toda esta energía solamente una parte puede ser captada por una turbina. Si se define, el coeficiente de potencia como la relación entre la potencia captada por la turbina y la potencia total disponible en el fluido, entonces [10]:

$$Pot_{turbina} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * W^3 \quad \text{EC. 3}$$

En cuanto a la naturaleza y valores de C_p . existen diferentes teorías, algunas son más simples y otras son más complejas y elaboradas [10].

$$C_p = \frac{Pot_{turbina}}{Pot_{fluido}} \quad \text{EC. 4}$$

2.2.2. Ley de Betz aplicada a las turbinas hidrocínéticas

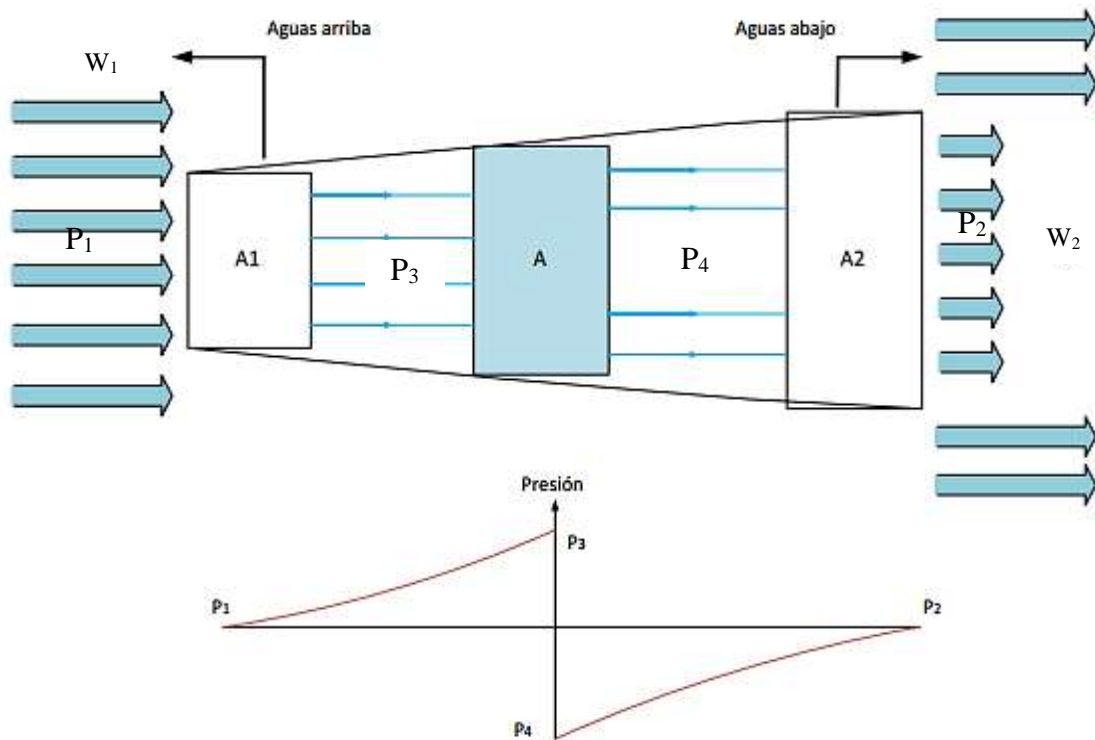
“Si se intenta extraer con un aerogenerador la energía del viento, se verá que su velocidad disminuye al traspasar la máquina, dado que el rotor de la turbina eólica debe frenar el viento para transformar su energía cinética en rotacional” [11], de igual manera se aplica a la energía que contiene una masa en movimiento como el agua en un río, en canales abiertos y corrientes de las mareas [12].

La potencia que trae consigo el agua no es del todo aprovechable debido a las limitaciones físicas que presentan. Para determinar la potencia extraída por una turbina hidrocínética ideal de una corriente de agua incidente, cuya potencia viene dada por la ecuación de potencia específica disponible, se usa generalmente un modelo simplificado atribuido a Albert Betz. Cuanto mayor sea la energía cinética que la turbina consiga extraer del agua, menor será la velocidad de este a la salida. Como consecuencia el agua se desacelera, de manera que la velocidad aguas abajo de la turbina estará comprendida entre cero y el valor que tiene aguas arriba (en ambos casos límite, la potencia extraída es nula) [9].

La teoría de Betz se basa en las siguientes hipótesis [9]:

- El conjunto de álabes de la turbina equivale a un rectángulo poroso de espesor nulo.
- La masa de agua que fluye a través del rectángulo permanece separada de la masa que rodea al túnel de flujo, ver ilustración 2.
- La masa de agua fluye sólo en dirección longitudinal.
- La desaceleración del agua en el rectángulo se distribuye uniformemente en toda la sección del disco.
- En las secciones suficientemente lejanas aguas arriba y aguas abajo la presión es igual.
- Aparte de la turbina, el flujo de agua no encuentra obstáculos ni antes ni después.
- El flujo de agua es estacionario y su intensidad permanece constante.
- No se producen efectos rotativos sobre la masa del agua.
- Se desprecia la compresibilidad del agua, es decir, la densidad se considera constante.

Ilustración 2. Túnel de agua para una turbina de eje vertical.



FUENTE: (JIMÉNEZ. M; 2015)

Teniendo en cuenta la ilustración 2.

- P_1 y W_1 son la presión y la velocidad del agua en la sección A_1 a la entrada del tubo de flujo, suficientemente alejada de la turbina.
- P_2 y W_2 a la presión y a la velocidad del agua en la sección A_2 a la salida del tubo de flujo, suficientemente alejada de la turbina.
- P_3 y P_4 son las presiones inmediatamente antes y después de la sección A.
- W es la velocidad del agua en el plano del rotor, suponiendo de que no haya variación de energía potencial ni intercambio de calor o extracción de trabajo entre A_1 y A, se puede expresar la ecuación de Bernoulli como sigue:

$$P_1 + \rho * \frac{W_1^2}{2} = P_3 + \rho * \frac{W^2}{2} \quad \text{EC. 5}$$

De la misma manera, entre A y A_2 se tiene:

$$P_4 + \rho * \frac{W^2}{2} = P_2 + \rho * \frac{W_2^2}{2} \quad \text{EC. 6}$$

La variación de presión en el disco, teniendo en cuenta las (EC. 5 y 6), puede expresarse de la siguiente forma [9]:

$$\Delta P = P_3 - P_4 = \rho * \frac{W_1^2 - W_2^2}{2} \quad \text{EC. 7}$$

La fuerza axial F en la dirección del agua sobre el disco actuador de sección A perpendicular al flujo viene dada por [9]:

$$F = \Delta P * A = \rho * A * \frac{W_1^2 - W_2^2}{2} \quad \text{EC. 8}$$

Según el teorema de la cantidad de movimiento, esta fuerza será igual a la variación de la cantidad de movimiento de la corriente de agua, es decir, como se observa en la ecuación siguiente [9].

$$F = F_3 - F_4 = \frac{dm}{dt} * (W_1 - W_2) \quad \text{EC. 9}$$

conociendo el valor de Q de la (EC. 3) se reemplaza en (EC. 9):

$$F = \rho * A * W * (W_1 - W_2) \quad \text{EC. 10}$$

Igualando las (EC. 8 y EC. 10) se obtiene la velocidad en la sección rectangular donde se ubica el rotor [9]:

$$W = \frac{1}{2} * (W_1 + W_2) \quad \text{EC. 11}$$

Como se observa, la deceleración del agua se reparte a medias entre el tramo aguas arriba y el tramo aguas abajo de la sección rectangular. Se define como factor de inducción axial **a**, la relación entre [9]:

$$a = \frac{W_1 - W}{W} = 1 - \frac{W}{W_1} \quad \text{EC. 12}$$

Esta ecuación representa la disminución de la velocidad frente a la sección rectangular. A partir de la (EC. 12), teniendo en cuenta la (EC. 11), se puede expresar la velocidad W en la sección y la velocidad W_2 en la salida del tubo de flujo en función del factor de inducción axial a y de la velocidad en la entrada W_1 [9].

$$W = W_1 - a * W_1 = (1 - a) * W_1 \quad \text{EC. 13}$$

$$W_2 = 2 * W - W_1 = 2 * ((1 - a) * W_1) - W_1 = (1 - 2a) * W_1 \quad \text{EC. 14}$$

La potencia captada por las palas puede expresarse como el producto de la fuerza ejercida por el agua F por su velocidad incidente (W) [9].

$$Pot = F * W = (\rho * A * W(W_1 - W_2)) * W \quad \text{EC. 15}$$

Si utilizamos la (EC. 11) se puede expresar en términos de la (EC. 15) como se observa en la ecuación [9].

$$Pot = \rho * A * \frac{W_1 + W_2}{2} * \left(\frac{W_1^2 - W_2^2}{2} \right) \quad \text{EC. 16}$$

La potencia que se extrae del agua es proporcional al flujo de masa que atraviesa el rotor y a la diferencia de energía cinética entre la sección de entrada y la de salida. Teniendo en cuenta las expresiones de las (EC. 13 y 14), la potencia captada también puede formularse como [9].

$$Pot = 2 * \rho * A * W_1^3 * a * (1 - a)^2 \quad \text{EC. 17}$$

Existe un valor de velocidad óptimo de la velocidad de salida W_2 , al cual corresponde la máxima extracción de potencia. Este valor se obtiene derivando potencia (Pot) con respecto a (a) e igualando a cero la derivada que se obtiene.

$$\frac{dPot}{da} = 2 * \rho * A * W_1^3 * (3 * a^2 - 4 * a + 1) = 0 \quad \text{EC. 18}$$

Para $a = 1/3$ la potencia máxima extraída por el fluido:

$$Pot_{max} = \frac{8}{27} * \rho * A * W_1^3 \quad \text{EC. 19}$$

El coeficiente de potencia C_p . (o coeficiente de eficiencia), también conocido como Límite de Betz, se define como la relación entre la potencia extraída y la potencia disponible del agua [9].

$$C_p = \frac{Pot_{extraida}}{Pot_{disponible}} = \frac{2 * \rho * A * W_1^3 * a * (1 - a)^2}{\frac{1}{2} * \rho * A * W_1^3} \quad \text{EC. 20}$$

Tomando $a = 1/3$ se obtiene el máximo teórico $C_{p,m\acute{a}x} = \frac{16}{27} = 0,593$. Este valor representa la máxima potencia extraíble de una corriente de agua con una turbina y este valor no puede superar el 59.3 % [9].

“Éste es el denominado número de Betz, que sirve como referencia ideal sobre el rendimiento de un aerogenerador real” [13]. Este concepto se aplica también a la energía que se puede extraer del agua a través de una turbina hidrocínética, por lo cual es importante considerar el factor C_p ., en las ecuaciones de potencia y energía [14].

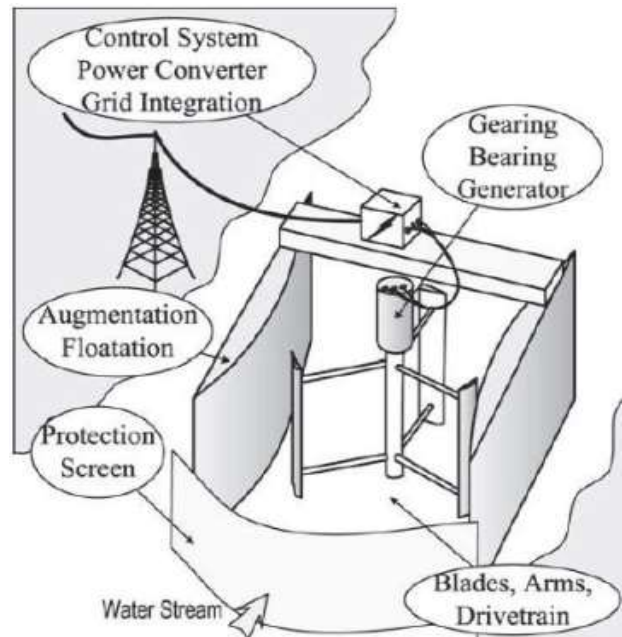
La energía que se puede obtener de un fluido, para una turbina hidrocínética depende de su densidad, su velocidad y el área o sección transversal de la turbina que está inmersa en él y produce la conversión de energía [14].

2.2.3. Revisión del estado del arte en sistemas hidrocínéticos de baja potencia

Los sistemas hidrocínéticos de baja potencia se refieren en términos generales a turbinas hidrocínéticas que se utilizan en ríos o en ciertas aplicaciones mareomotrices. Una de sus características no es utilizar represas o embalses y se definen como sistemas no convencionales [15].

Para el caso concreto de ríos o canales abiertos estos sistemas siguen una estructura similar a la mostrada en la siguiente ilustración [15]:

Ilustración 3. Esquema de un sistema hidrocínético de baja potencia.



FUENTE: (KHAN M.J., BHUYN G, QUAICOE J.E; 2015)

Para mejorar su eficiencia de acuerdo al estado del arte es necesario mejorar su diseño geométrico, aprovechando las fuerzas de sustentación y de arrastre, utilizando dispositivos que contribuyan a aumentar la potencia de la turbina extrayendo de una manera óptima el recurso energético del fluido [16].

La intención es buscar los parámetros y características geométricas de cada una de estas turbinas hidrocínéticas con rotor de eje vertical y si es posible con base a las de rotor horizontal, que hacen que mejore el coeficiente de potencia o rendimiento de la turbina (C_p).

2.2.4. Tipos de turbinas hidrocínéticas

Generalmente las turbinas hidrocínéticas están basadas en modelos de turbinas eólicas, las cuales se diferencian de acuerdo a la posición en la que se encuentre el eje del rotor [9].

Las turbinas de eje horizontal, son el tipo más común de turbina que se puede encontrar en la industria; se utilizan desde un álabe, aunque frecuentemente traen 3 álabes. Tienen una

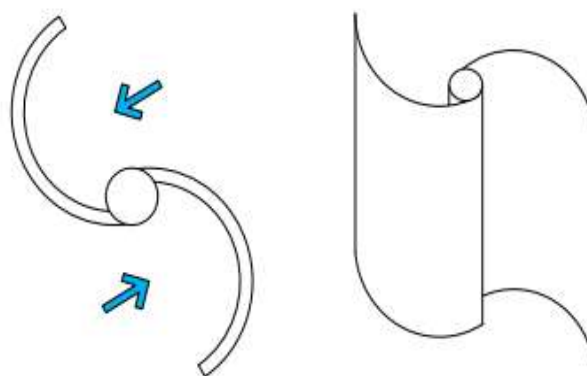
mayor eficiencia energética y alcanzan mayores velocidades de rotación por lo que necesitan una caja de engranajes con menor relación de multiplicación de giro [9].

Las turbinas de eje vertical, tienen la característica de que el eje de rotación se encuentra perpendicular al suelo y tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento o agua. Estas turbinas trabajan de dos formas diferentes: La primera se basa en la diferencia de coeficiente de arrastre que existe entre las dos mitades de la sección expuesta al agua, y la segunda trabaja por medio de la fuerza de sustentación que experimentan los perfiles aerodinámicos al interactuar con el agua. El rotor es el encargado de convertir la energía cinética del agua en energía mecánica rotacional y existen diversas adaptaciones, pero los diseños más conocidos son: Savonius, Darrieus y Gorlov [17].

2.2.4.1. Turbina Savonius

Esta turbina es de eje vertical fue diseñada por el ingeniero finlandés S.J Savonius en 1922. Consiste básicamente en diseñar dos semicilindros sobre un eje vertical de fácil construcción y con la capacidad de girar sin importar la dirección en la que llegue el agua; sin embargo es menos eficiente que su contra parte de eje horizontal. La razón de la poca eficiencia tiene que ver con la aerodinámica; las turbinas de eje horizontal tienen álabes que producen una fuerza de sustentación para hacer girar el rotor, mientras que este diseño de eje vertical se basa en la diferencia de la fuerza de arrastre de los dos semicilindros en contacto con el agua como aparece en la ilustración 4, [9] [18].

Ilustración 4. Rotor Savonius.

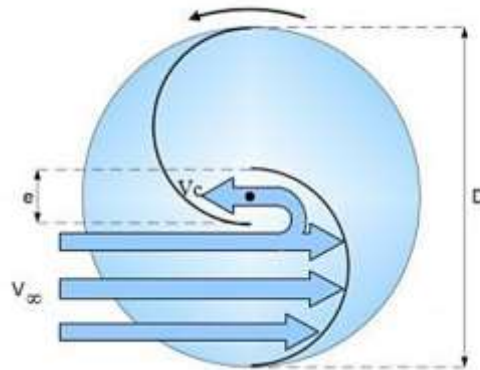


FUENTE: (JIMÉNEZ. M; 2015)

El rotor convencional Savonius tiene dos pares de hojas cilíndricas que se parecen a una letra S que no están conectadas a la mitad o con aberturas (superpuestas) en ambos fines de la

hoja, que sirve de la entrada del flujo que sale de la primera hoja (el empuje) para la segunda hoja (el retorno). Como se muestra en la ilustración 5, la primera hoja (hoja que avanza) causa una fuerza de arrastre del flujo principal (flujo libre) mientras la segunda hoja (hoja que regresa) desarrolla una fuerza de retorno desde la salida del flujo en la dirección opuesta a través de la abertura (superposición) resultando en un par de fuerza acoplada que es capaz de generar torque y potencia [18].

Ilustración 5. Esquema de una turbina Savonius.

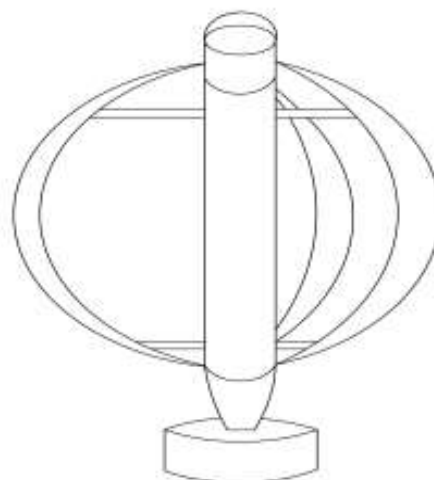


FUENTE: (WAHYUDI, BAGUS; 2015)

2.2.4.2. Turbinas Darrieus

Las turbinas tipo Darrieus se patentaron en 1931 por el ingeniero francés Georges Jean Marie Darrieus. Este tipo de turbinas funcionan por medio de la sustentación (lift) que genera el perfil aerodinámico de los álabes en contacto con el fluido como muestra la ilustración 6. Estos álabes se conectan a un eje vertical. Los álabes pueden ser rectos, o curvos [19] [20].

Ilustración 6. Rotor Darrieus.

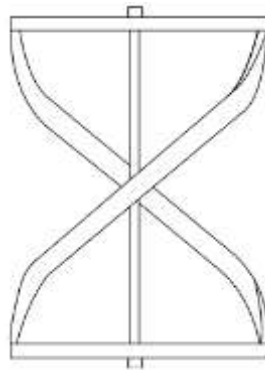


FUENTE: (JIMÉNEZ. M; 2015)

2.2.4.3. Turbina Gorlov

Las turbinas llamadas Gorlov, fueron desarrolladas en la época de los 90 por el profesor Alexander M. Gorlov en Northeastern University. Su característica más llamativa es su rotor helicoidal, que fue originalmente diseñado para usarse en riadas. Su ventaja con respecto a la tradicional turbina Darrieus, es que reduce la ondulación que se produce en los álabes y que su forma es más amigable con la vida marina que el resto de turbinas verticales [21].

Ilustración 7. Turbina Gorlov de eje vertical.



FUENTE: (JIMÉNEZ. M; 2015)

2.2.5. Aerodinámica básica de las turbinas hidrocinéticas

La aerodinámica es el estudio de la dinámica de los cuerpos que se mueven a través de un fluido. Toda región en el espacio limitada por líneas de corriente es llamada tubo de corriente. Según la ecuación de continuidad que establece que la masa que entra en el tubo es igual a la que sale, lo cual supone que la masa no se acumula siempre que el fluido sea incompresible y por lo tanto su densidad constante. Esta condición la satisface los líquidos, particularmente el agua [9].

$$\rho_1 * A_1 * W_1 = \rho_2 * A_2 * W_2 \quad \text{EC. 21}$$

Donde:

A: es el área trasversal del tubo.

W: la velocidad del fluido.

P: la densidad del fluido.

En este caso la densidad es igual aguas abajo y aguas arriba se anula de la ecuación [9].

$$A_1 * W_1 = A_2 * W_2$$

EC. 22

La ecuación de Bernoulli es otra relación fundamental de la dinámica de los fluidos, que se deriva del teorema de la conservación de la energía. Establece que a lo largo de un tubo de flujo se satisface [9].

$$h + \frac{W^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho * g} = cte$$

EC. 23

Donde:

h: es la altura.

W: la velocidad del fluido.

g: la aceleración de la gravedad

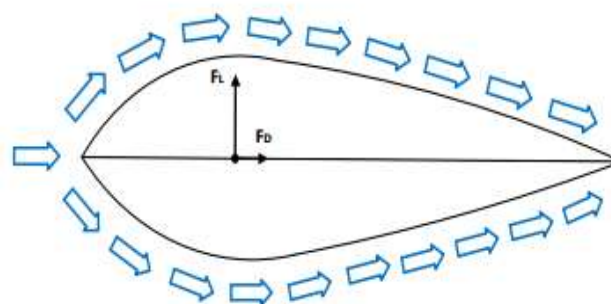
ρ : densidad del fluido.

P_1 : presión [9].

2.2.5.1. Fuerza de sustentación

El ángulo con el que el fluido incide sobre el álabe, se le conoce como ángulo de ataque α , el cual produce una desviación del flujo de aire o agua hacia abajo. Por encima del alerón, las líneas de corriente se concentran, mientras que por debajo se separan como muestra la ilustración 8. Por la ley de continuidad en la (EC. 21), la velocidad aumenta por encima del alerón y disminuye por debajo. Luego, por el principio de Bernoulli de la (EC. 23), se produce una diferencia de presión entre ambas caras del alerón, dando lugar a una fuerza ascendente llamada fuerza de sustentación F_L . Este análisis es consistente con la tercera ley de Newton [22].

Ilustración 8. Flujo laminar a través de un álabe.



FUENTE: (BATTISTA. H; 2013)

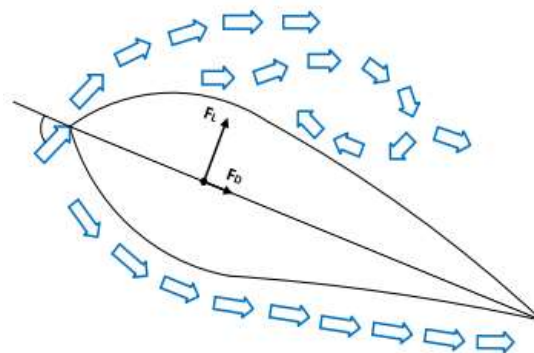
2.2.5.2. Fuerza de arrastre

Todo cuerpo que se mueve a través de un fluido viscoso es sometido a una fuerza en la dirección del flujo llamada fuerza de arrastre (F_D). Sin embargo, cuando el ángulo de ataque supera cierto valor, el flujo deja de ser laminar, es decir, las líneas de corriente se separan de la cara superior del alerón como se muestra la Ilustración 9. Cuando el alerón trabaja en estas condiciones, la fuerza de arrastre aumenta considerablemente [9] [22].

2.2.5.3. Fuerzas en turbina con rotor de eje vertical

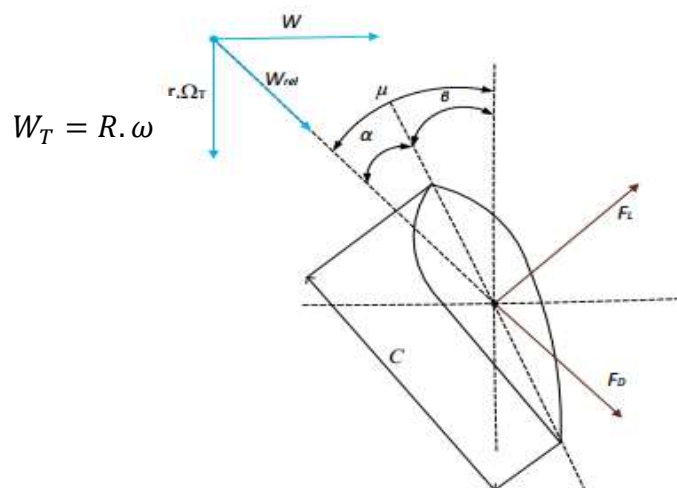
En la ilustración 10, se muestran las fuerzas que actúan sobre un álabe que gira en un plano transversal con una velocidad de rotación (ω). La velocidad tangencial del álabe es $W_T = R \cdot \omega$ y es perpendicular a la velocidad del agua (W), como resultado la velocidad relativa (W_{rel}) forma un ángulo α con respecto al plano de rotación [22].

Ilustración 9. Álabe en pérdida.



FUENTE: (BATTISTA. H; 2013)

Ilustración 10. Fuerzas que interactúan en un álabe.



FUENTE: (BATTISTA. H; 2013)

Las fuerzas de sustentación y de arrastre suelen expresarse en función de dos coeficientes C_L y C_D [22].

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho_{agua} * W^2 * C_L \quad \text{EC. 24}$$

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho_{agua} * W^2 * C_D \quad \text{EC. 25}$$

Donde:

C: es la cuerda del alerón.

ρ_{agua} : densidad del agua.

W: velocidad del agua.

C_L : coeficiente de sustentación.

C_D : coeficiente de arrastre.

Los coeficientes están en función del ángulo de ataque α . C_L crece aproximadamente de manera lineal con el ángulo de ataque, mientras que C_D se mantiene en un bajo valor. Para ángulos de ataque mayores a 13° , C_L disminuye mientras que C_D crece rápidamente, es decir, los álabes entran en pérdida [9] [22].

La fuerza de arrastre, la que produce un fluido a un objeto es una combinación de la fuerza de inercia y de la de rozamiento. En el caso de la turbina esta se produce en el perfil aerodinámico de los álabes, la cual se calcula con la siguiente ecuación [23].

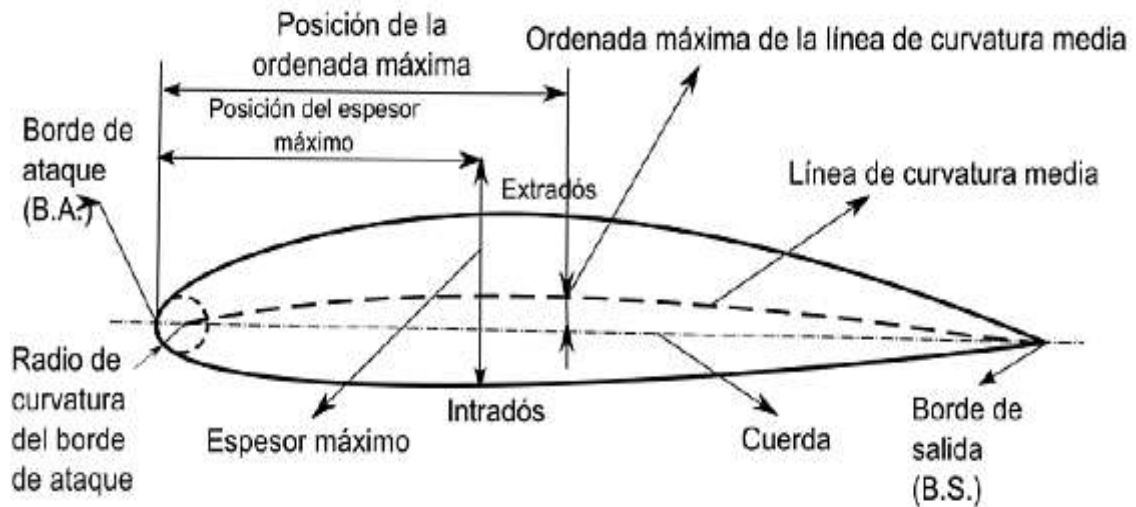
$$F_D = 0.5 * C_D * \sigma * \rho * W^2 * D * H \quad \text{EC. 26}$$

La fuerza de arrastre que se encuentra en la ecuación se basa en una turbina estacionaria en el flujo de fluido. Con el fin de dar cuenta del movimiento de la hoja, la fuerza de arrastre calculada se incrementa en un 30% sobre la base de los resultados experimentales llevados a cabo por el profesor Gorlov. Además, el efecto dinámico (turbulencia), debe tenerse en cuenta. Esto se logra mediante la adición de 25% de la fuerza de arrastre [23].

2.2.6. Aerodinámica de un perfil alar

Los álabes que se modelarán constarán con un cierto diseño, el cual le otorgará aerodinámica a la turbina, por lo que es esencial poder conocer las componentes del diseño de perfiles alares para su posible estudio. Los perfiles alares son también usados en la industria aeronáutica en el diseño de alas de aviones, por lo que su estudio tiene bastante antecedentes. En la ilustración 11, se presenta un diseño alar con sus principales componentes [24].

Ilustración 11. Características de un perfil alar.



FUENTE: (THOMAZ JUNIOR, CELSO RANGEL; 2012)

- Borde de ataque: es el borde del perfil por el cual el flujo entra en contacto.
- Borde de salida: o borde de fuga es el borde por el cual el flujo sale del perfil.
- Cuerda: línea recta que conecta el borde de ataque con el borde de fuga del perfil. Por lo general esta se denomina como la distancia “C”.
- Extradós: es la curva del perfil sobre la cuerda; Intradós es la curva bajo la cuerda.
- Línea de curvatura media: es la línea definida como el punto medio entre el extradós y el intradós.
- Comba: es la distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil.
- Espesor: es la distancia perpendicular a la cuerda entre el intradós y el extradós.
- Espesor máximo: máximo valor del espesor.

Dentro de los diseños de álabes se encuentran los diseños NACA los cuales presentan diferentes series de familias según los años de creación como a su vez los usos que se le den.

A continuación, se presenta una tabla resumen con sus principales ventajas y desventajas de cada familia [25].

Tabla 1. Ventajas y Desventajas de las diferentes series de NACA.

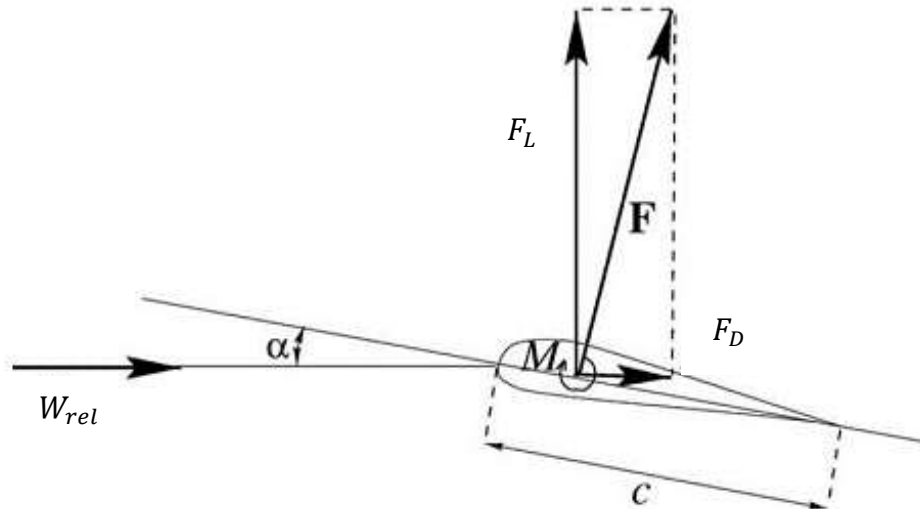
| Familia | Ventajas | Desventajas |
|-----------|---|---|
| 4-Digitos | <ol style="list-style-type: none"> 1. Buenas características de pérdidas. 2. Pequeño centro de movimiento de presión para un alto rango de velocidades. 3. Rugosidad genera pocos efectos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo coeficiente de sustentación máximo. 2. Relativo alto arrastre. 3. Alto momento de pitcheo. |
| 5-Digitos | <ol style="list-style-type: none"> 1. Superior coeficiente de sustentación 2. Bajo momento de pitcheo. 3. Rugosidad genera pocos efectos. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Mal comportamiento de pérdidas. 2. Relativo alto arrastre. |
| 16-Series | <ol style="list-style-type: none"> 1. Evade puntos de baja presión. 2. Poco arrastre para bajas presiones. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Relativa baja sustentación. |
| 6-Series | <ol style="list-style-type: none"> 1. Superior coeficiente de sustentación. 2. Bajo arrastre para un rango pequeño en condiciones operacionales. 3. Optimizado para altas velocidades. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Alto arrastre para un rango fuera del operacional. 2. Alto momento de pitcheo. 3. Mal comportamiento de pérdidas 4. Muy susceptible a la rugosidad. |
| 7-Series | <ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo arrastre para un rango pequeño en condiciones operacionales. 2. Bajo momento de pitcheo. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Reducido coeficiente de sustentación máxima. 2. Alto arrastre para un rango fuera del operacional. 3. Mal comportamiento de pérdidas. |

FUENTE: (NACA AIRFOIL SERIES; 2012)

2.2.6.1. Coeficientes aerodinámicos

Como bien se señaló en ecuaciones anteriores (EC. 24 y 25), las fuerzas que actúan principalmente en los distintos tipos de turbinas son las fuerzas de arrastre y sustentación, las cuales surgen luego de que un viento o fluido impacte sobre los álabes de la turbina. Dichas fuerzas se pueden apreciar en la siguiente ilustración [26].

Ilustración 12. Fuerzas presentes en un álabe de una turbina.



FUENTE: (MARTIN O. L. HANSEN; 2012)

De las fuerzas aerodinámicas previamente mencionadas se pueden obtener los coeficientes de arrastre (C_D) y sustentación (C_L), según las siguientes fórmulas [27].

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} * \rho_{fluido} * W^2 * C} \quad \text{EC. 27}$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} * \rho_{fluido} * W^2 * C} \quad \text{EC. 28}$$

Ambos coeficientes representan la efectividad del diseño de un perfil alar para producir sustentación o arrastre según sea el caso. Por último, están los coeficientes de Torque (C_M) y Potencia (C_P), ambos relacionados con el rendimiento de la turbina ya que se son el cociente entre potencia o torque útil respecto a la proveniente del fluido [27].

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} * \rho_{fluido} * W^2 * A * R} \quad \text{EC. 29}$$

$$C_P = \frac{Pot_{turbina}}{\frac{1}{2} * \rho_{fluido} * W^3 * A} \quad \text{EC. 30}$$

Siendo (A) el área de barrido (Diámetro por altura) y (R) el radio de la turbina. Finalmente, se poseen 2 parámetros adicionales que permite un buen análisis respecto al rendimiento de un perfil son: la razón de velocidad de punta de álabe (o conocido como tip-speed ratio en inglés) y la solidez [28]:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega * R}{W} \quad \text{EC. 31}$$

$$\sigma = \frac{n * C}{\pi * D} \quad \text{EC. 32}$$

La variable (ω) es la velocidad de giro y (n) el número de álabes. Ambos parámetros son muy utilizados en el diseño de turbinas dado que mediante estos se puede caracterizar el uso de una turbina en distintos puntos de operación [28].

2.2.6.2. Variación del ángulo de ataque

El valor del ángulo de ataque de un perfil alar incide directamente en la generación de la sustentación y el arrastre según las velocidades de giro que se impongan a la turbina [24].

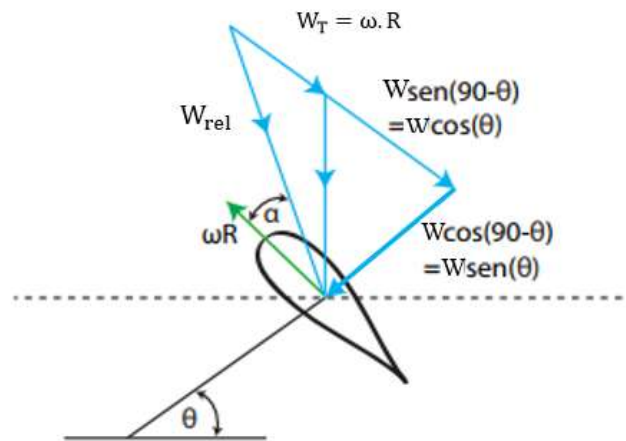
Resulta lógico pensar que, si el álabe efectúa una revolución completa, el perfil se verá enfrentado a todos los ángulos de ataque posibles, es decir, de 0° a 180°. Sin embargo, esto es sólo correcto para velocidades de rotación muy bajas con respecto a la velocidad del viento. Contrario a lo que se podría pensar, a velocidades de rotación más altas, el álabe percibe una velocidad de viento relativa en adición a la velocidad del flujo incidente. Lo más correcto entonces sería tomar en cuenta la velocidad de rotación de la turbina, y a partir de esto determinar la velocidad efectiva del viento sobre el álabe, y el ángulo de ataque resultante [24].

Para enseñar este efecto, sea la ilustración 13, donde el álabe está en una posición azimutal θ arbitraria. Tomando $\omega.R$ como velocidad de rotación y W como velocidad del flujo incidente, se puede calcular geoméricamente el ángulo de ataque de la velocidad relativa W_{rel} como se muestra en la (EC. 33), y la magnitud de dicha velocidad efectiva con la (EC. 34) [24].

$$\alpha = \text{artan} \left(\frac{W \cdot \text{sen}(\theta)}{W \cdot \text{cos}(\theta) + \omega \cdot R} \right) \quad \text{EC. 33}$$

$$W_{rel} \cdot \text{sen}(\alpha) = W \cdot \text{sen}(\theta) \quad \text{EC. 34}$$

Ilustración 13. Variación de ángulo de ataque α con respecto al ángulo azimutal θ .



FUENTE: (THOMAZ JUNIOR, CELSO RANGEL; 2012)

2.2.6.3. Ángulo helicoidal

Con los parámetros de: altura, diámetro y número de álabes, se tiene el ángulo de inclinación o ángulo helicoidal que se calcula con la ecuación.

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{n * H}{\pi * D} \right) \quad \text{EC. 35}$$

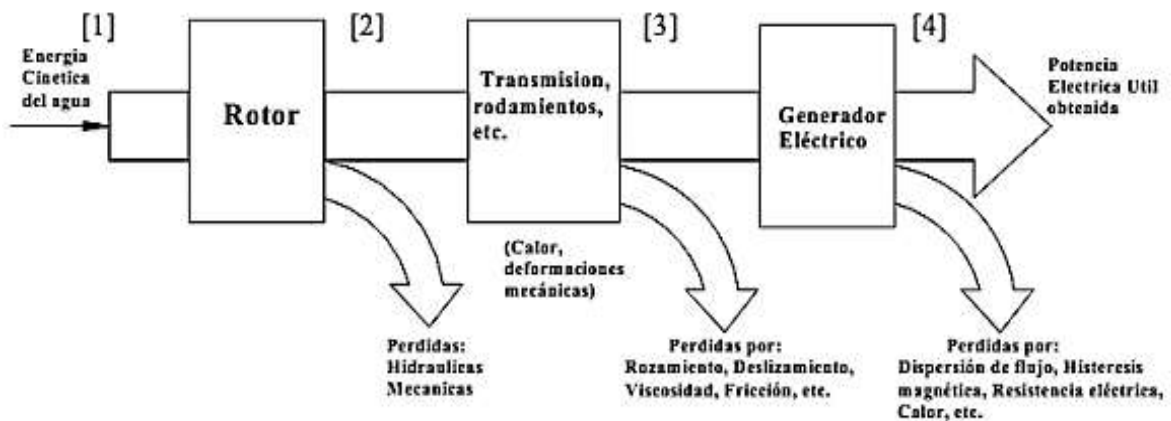
Además, se puede definir la relación de aspecto que obtiene la turbina hidrocínética de eje vertical al realizar la relación entre la altura con respecto al diámetro, como se muestra a continuación.

$$RA = \frac{H}{D} \quad \text{EC. 36}$$

2.2.7. Proceso de transformación de energía en turbinas hidrocinéticas

En la ilustración 14, se puede comprender claramente los distintos procesos de transformación que sufre la energía manipulada en una turbina hidrocinética y un esquema de sus componentes vitales. La energía es capturada en su forma primitiva como energía cinética del agua, punto 1 de la ilustración, hasta llegar a representarse por un determinado valor de tensión y corriente eléctrica, punto 4, pasando por diversas transformaciones mecánicas [10].

Ilustración 14. Esquema del proceso de transformación de energía.



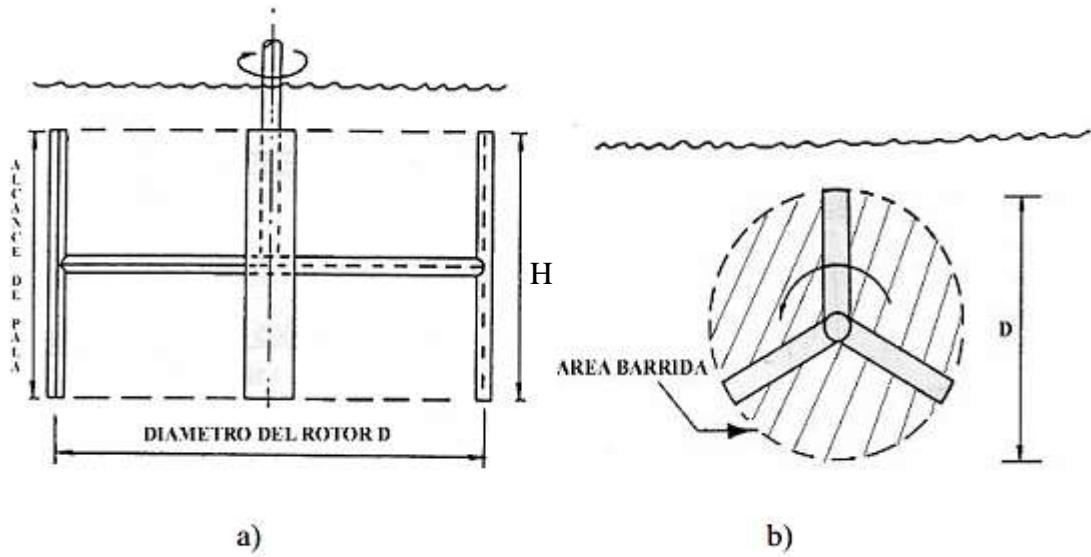
FUENTE: (ROCHE. L. L; 2015)

Para que una turbina pueda realizar la conversión de la energía cinética del río o canal en energía eléctrica para consumo humano, requiere de un conjunto de componentes tales como: El rotor, las palas del rotor, la transmisión, el generador, el tablero de control, el regulador de carga, el banco de baterías y el convertidor de corriente alterna en continua (diodos rectificadores) [10].

2.2.7.1. Producción de energía Vs producción de potencia

Las turbinas se clasifican por su potencia, pero el valor de una turbina en un sitio determinado se evalúa por su producción anual de energía. Uno de los indicadores de las capacidades de producción de una turbina hidrocinética es el diámetro de su rotor, que determina el área barrida, también llamada Área Capturada [10].

Ilustración 15. Áreas de barrido para a) Rotor vertical recto y helicoidal, b) Rotor horizontal.



FUENTE: (ROCHE. L. L; 2015)

$$A_{cap} = \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{EC. 37}$$

$$A_{cap} = H * D \quad \text{EC. 38}$$

2.2.8. Influencia de parámetros dimensionales de turbinas helicoidales

Se desconoce con fidelidad el comportamiento particular de las turbinas hidrocínicas frente a las condiciones variables de servicio que revelen sus actuaciones globales en función de los parámetros operativos y de diseño. En el presente trabajo, apoyado por técnicas del análisis numérico en CFD, se construyen curvas características de la turbina hidrocínica helicoidal para determinar la influencia de parámetros del diseño en las variables torque y coeficiente de potencia que la turbina es capaz de desarrollar. Tales parámetros a estudiar incluyen: diámetro de turbina, relación de solidez y ángulo de paso helicoidal de turbinas hidrocínicas como la Gorlov [16].

Los autores (Shiono, Mitsuhiro) [29] establecen un conjunto de curvas características de turbinas helicoidales. Sus experimentos determinan el torque y la eficiencia para diferentes configuraciones geométricas de turbinas helicoidales frente a flujos entre 0,6 y 1,4 m/s.

Las variables estudiadas incluyen modificaciones en la relación de solidez, longitud de cuerda del álabe, ángulo de paso helicoidal, diámetro y altura de las turbinas [30]. Mantienen constante el número de tres álabes en cada modificación geométrica. Sus resultados indican mayores eficiencias cuando la relación de solidez en la turbina es de 0,4 con ángulos de paso helicoidal de 60°. Aunque se logran mayores torques para ángulos de 43, 7° [30].

Se estudia tres configuraciones de turbinas helicoidales de álabes tipo NACA 0018. Su investigación indica mayores eficiencias en turbinas helicoidales con cuatro álabes en ángulos de 60° frente a turbinas de tres álabes con 43, 7° de ángulo de paso helicoidal cuando en ambos casos la relación de solidez es de 0,3. Mientras que [31] caracterizan en un estudio con CFD y de tipo experimental, una turbina helicoidal con relación de solidez 0,3 y ángulo de paso helicoidal de 60° para dos tamaños de longitudes de cuerda de los álabes [31].

Se presentan curvas características para la optimización de álabes de turbinas tipo Gorlov empleando técnicas CFD. También en Taiwán [32], elaboran un estudio para un diseño conceptual de una planta de potencia fundamentada en energía hidrocínética. Comparan dos turbinas, una de álabes rectos y otra del tipo helicoidal. La modelación indica mayores potenciales energéticas en la de tipo helicoidal. En [33] se confrontan capacidades de auto arranque entre turbinas de álabes helicoidales y rectos [33].

Se verifican mediciones de coeficientes de potencia, eficiencia y energía para dos tipos de turbinas helicoidales frente a flujos entre 0,5 y 1,4 m/s. Sus modificaciones sólo mantienen fijo el tipo de álabe, NACA 0020. Sus resultados indican mayores coeficientes de potencias en turbinas helicoidales con relación de solidez de 0,14 y tres álabes con un ángulo de paso de 68, 3° [33].

En [34] se desarrolla una investigación de tipo experimental para THG con diámetros de 0,5 y 0,6 m por 1,25 m alto con álabes de perfil tipo NACA 0020. En el estudio se miden valores de torque y velocidad angular en las turbinas y obtienen curvas características de coeficientes de potencia vs. relación de velocidades. Sus resultados muestran la incidencia del ángulo de paso helicoidal en la potencia de la turbina, mientras la relación de solidez afecta la eficiencia. Sus resultados arrojan una mejor eficiencia para una relación de velocidades de 0,134, mientras las turbinas muestran mayores potencias en ángulos de paso helicoidal de

135°. Sus experimentos aplican velocidades de flujo entre 0,6 y 1,6 m/s para velocidades angulares de turbina de hasta 170 RPM [34].

En las turbinas hidrocinéticas se identifican un conjunto de parámetros de diseño, energía y rendimiento o eficiencias que pueden ser adimensionales y caracterizan potencialidades y dimensiones propias. La relación de velocidad λ se indica en la (EC. 31), y representa la velocidad de rotación de la turbina en el álabe respecto a la velocidad del flujo en la corriente libre (W) [35]:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{W}$$

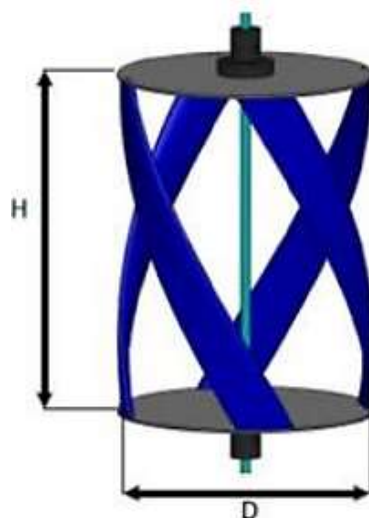
Así mismo, el coeficiente de potencia C_p o eficiencia se indica en la (EC. 30) [35]:

$$C_p = \frac{M * \omega}{\frac{1}{2} * \rho_{fluido} * A * W^3}$$

En donde la potencia mecánica de la turbina respecto al potencial cinético incidente sobre un área de sección transversal del mismo tamaño que la turbina según la ilustración 16. Por otra parte, el coeficiente de torque C_M se expresa en términos de la (EC. 29) [35]:

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} * \rho_{fluido} * W^2 * A * R}$$

Ilustración 16. Aspectos dimensionales de altura H y diámetro D.



FUENTE: (A. CARBALLO; 2017)

La relación de solidez σ expresa la proporción de los álabes de la turbina respecto a la circunferencia total de la misma, tal y como indica la (EC. 32) [35]:

$$\sigma = \frac{n * C}{\pi * D}$$

Donde:

n: es el número de álabes.

C: la longitud de la cuerda del álabes

D: el diámetro de la turbina.

El ángulo de paso helicoidal δ definido en la (EC. 35) se refiere a la inclinación del álabes respecto a un plano horizontal, tal y como indica la ilustración 17, [35].

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{n * H}{\pi * D} \right)$$

Ilustración 17. Ángulo de paso helicoidal δ de la turbina helicoidal.



FUENTE: (A. CARBALLO; 2017)

2.2.8.1. Procedimiento experimental en la modelación numérica

El dominio computacional para la turbina hidrocínética Gorlov se construye a partir un prototipo de diámetro D de 450 mm y altura H de 600 mm para un perfil de álabes tipo NACA 0020 de 75 mm de cuerda. Se modela una sección de fluido de 6D de ancho por 6H de alto y 19D de largo, con origen de coordenadas en el centro de la base de la turbina. Como fluido de trabajo simula el flujo de agua en condiciones de 998,2 kg/m³ y una viscosidad de

0,001003 kg/m-s. El material de construcción para los álabes es de aluminio de densidad 2719 kg/m³. Los resultados indican prestaciones mecánicas apropiadas para el aluminio en turbinas Gorlov [35].

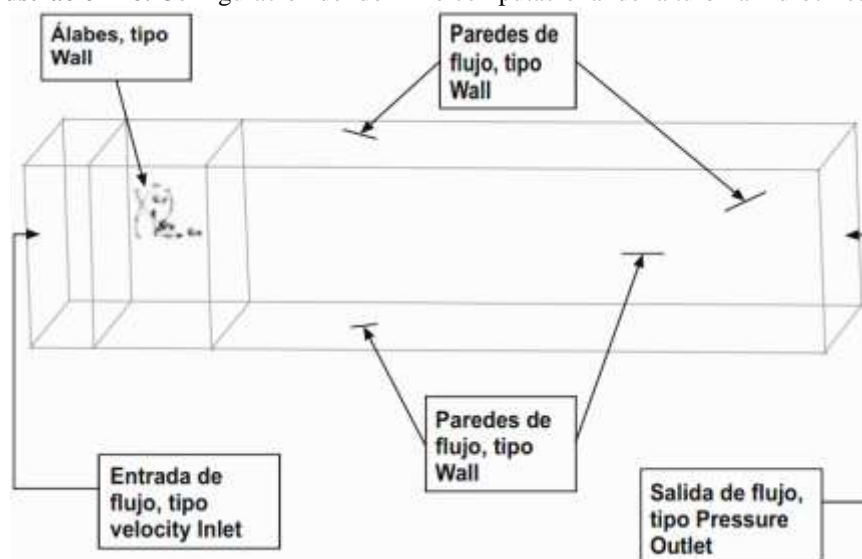
La turbina estará inscrita en una malla de volúmenes para un dominio tridimensional. En la modelación del flujo, sobre los álabes helicoidales de la Gorlov, se emplean mallas estructuradas para limitar la excesiva difusión numérica y reducir tiempos de cálculos computacionales. La zona de álabes se discretizará en celdas de elementos tetraédricos e híbridos para construir mallas híbridas de hasta $1,7 * 10^6$ nodos. Las mallas tienen calidades de hasta 0,862174. La cuantificación de la calidad de cada malla Q_{EVS} , se efectúa con base en la siguiente ecuación [35].

$$Q_{EVS} = \frac{(S_{eq} - S)}{S_{eq}} \quad \text{EC. 39}$$

De tal manera que $0 \leq Q_{EVS} \leq 1$, si $Q_{EVS} = 0$ se describe un elemento equilátero ideal y si $Q_{EVS} = 1$ se describe un elemento completamente deformado [35].

El estudio se realiza bajo el enfoque de economía del recurso computacional y la minimización del error en la solución del análisis numérico en esta investigación en CFD. Al mismo tiempo, las fronteras del dominio son configuradas a efectos del análisis numérico tal y como se indica en la ilustración 18 [35].

Ilustración 18. Configuración del dominio computacional de la turbina hidrocínética.

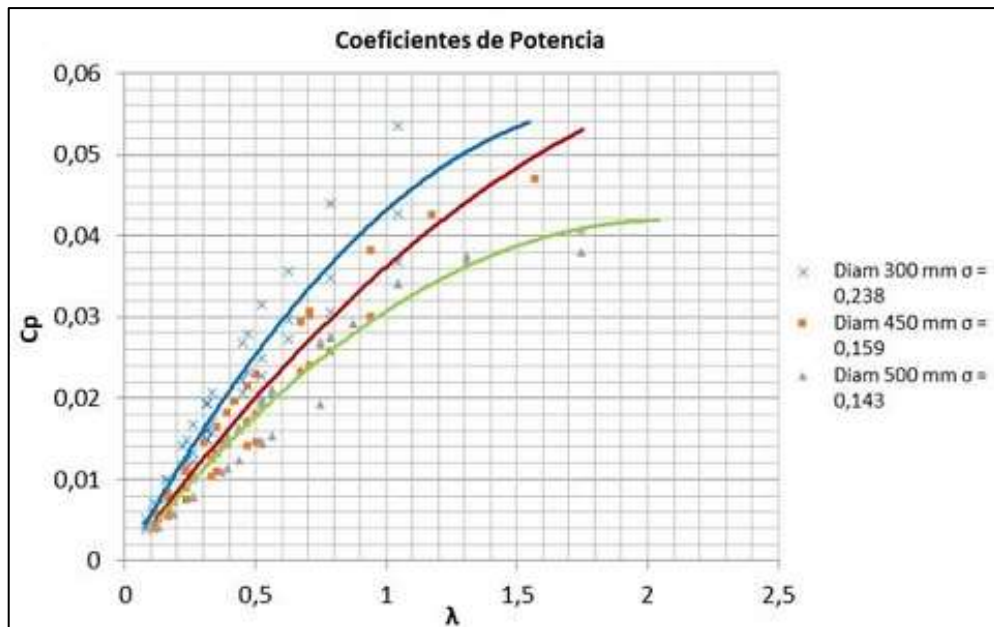


FUENTE: (EDGAR GUTIERREZ; 2015)

2.2.8.2. Análisis numérico para la turbina hidrocínética helicoidal

En razón del dominio construido durante la verificación del modelo computacional, se modelizarán tres turbinas hidrocínéticas helicoidales de diámetros D , para una altura constante de 600 mm y dos ángulos de paso helicoidal δ : 50° y 60° . En todos los casos estudiados se conserva el perfil del álabe tipo NACA 0020 de 75 mm de cuerda. Al mismo tiempo, se procura una consistencia en los casos de estudio para el número de nodos en la malla de volúmenes del dominio. La ilustración 19, muestra curvas características de la turbina en diámetros de 300 mm, 450 mm y 500 mm y valores de σ en 0,238, 0,159 y 0,143 [35].

Ilustración 19. Coeficientes de potencia en diámetros de $D = 300, 450$ y 500 mm de la turbina Gorlov.



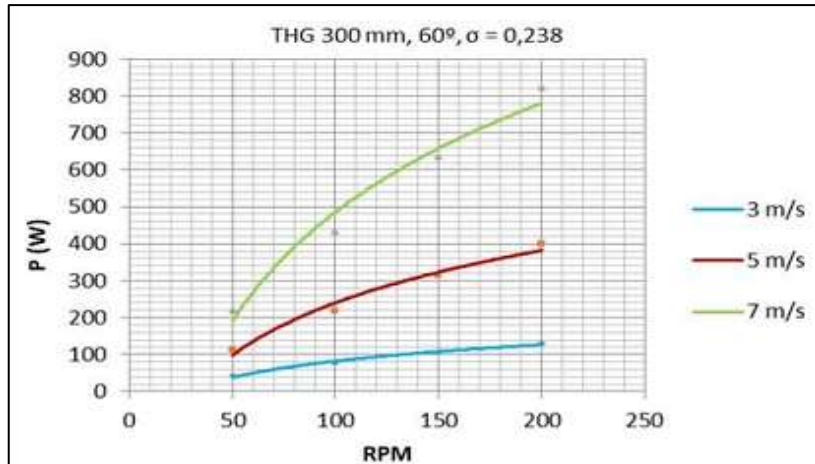
FUENTE: (SIMÓN A. CARBALLO; 2017)

Obsérvese la tendencia al incremento de coeficientes de potencia (C_p) según crece la relación (σ). A partir del valor de torque M proporcionado por el software de CFD y las ecuaciones (2.2.1.4) y (2.2.6.5) se obtiene C_p vs λ . Se presenta el punto de máxima eficiencia cuando C_p es 0,535, para un flujo de 3 m/s cuando la turbina gira a 200 RPM y posee 300 mm de diámetro [35]. Los autores Bachant y Wosnik indican similares resultados, desarrollando mayores coeficientes de potencia a menores relaciones de velocidad λ [36].

Para la valoración del potencial energético de la turbina Gorlov se toma como referente la potencia ($M * \omega$), con lo cual grafican las ilustraciones 20, 21 y 22 [35].

La ilustración 20, presenta la curva característica de la turbina hidrocínética Gorlov de Potencia vs. RPM. El gráfico muestra el mayor valor de potencia en 783 Watt para 300 mm de diámetro cuando el paso helicoidal (δ) es 60° y la solidez (σ) es 0,238 [35].

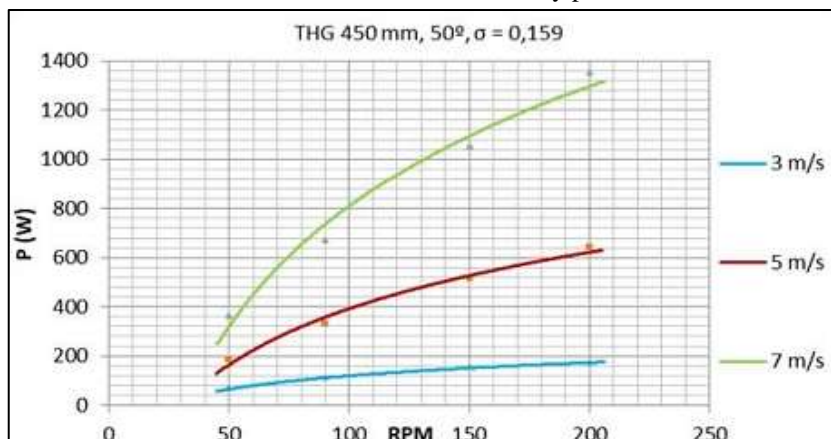
Ilustración 20. Potencia vs RPM en $D = 300$ mm y paso helicoidal $\delta = 60^\circ$.



FUENTE: (SIMÓN A. CARBALLO; 2017)

En la ilustración 21, presenta la caracterización de potencia de la THG si su diámetro es de 450 mm y σ es 0,159. Siendo δ de 50° el valor correspondiente al mayor valor de potencia de 1353 Watt obtenido en esta configuración [35].

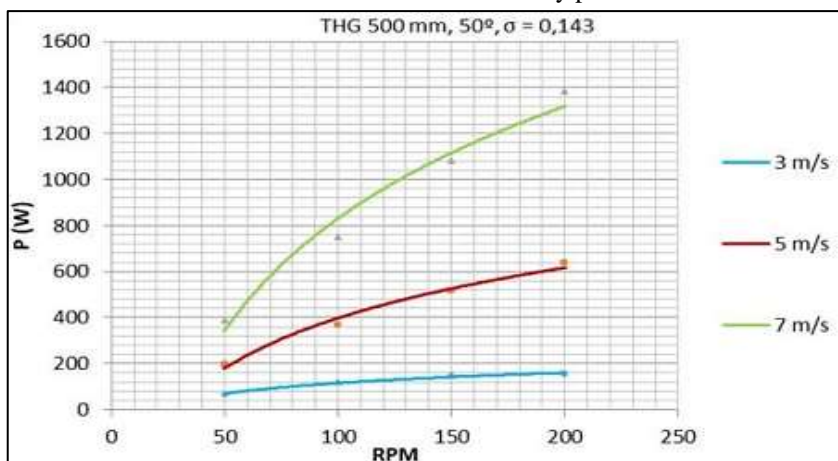
Ilustración 21. Potencia vs RPM en $D = 450$ mm y paso helicoidal $\delta = 50^\circ$.



FUENTE: (SIMÓN A. CARBALLO; 2017)

La ilustración 22, se muestra la caracterización de potencia de la turbina hidrocínética Gorlov para diámetros 500 mm y σ es 0,143. Para la cual δ es 50° en la que se obtiene mayor valor de potencia, 1382 Watt. En cualquiera de los casos de las ilustraciones 20, 21 y 22 la máxima potencia ocurre a mayores velocidades de flujo [35].

Ilustración 22. Potencia vs RPM en D = 500 mm y paso helicoidal $\delta = 50^\circ$.



FUENTE: (SIMÓN A. CARBALLO; 2017)

En sus investigaciones experimentales [34] y [29] determinan los mayores torques de turbina cuando el ángulo δ es de 60° , incluso tal y como acá se presenta alrededor del punto de máxima eficiencia. Al mismo tiempo, la tendencia al incrementar la relación de solidez incide en mayores eficiencias para conversión de la energía cinética en energía mecánica, tal y como se muestra en la ilustración 19 [35].

Los resultados mostraron que para un ángulo de paso de 60° , las turbinas Gorlov muestran mayores eficiencias de turbinas. Al mismo tiempo, aumento en el diámetro de la turbina de 300 mm a 500 mm revela mayores torques en el eje, sin embargo, disminuye su rendimiento o eficiencia en el proceso de conversión de la energía del fluido como lo indica el coeficiente de potencia de 0,269. También, se mostró una mayor eficiencia de la turbina cuando su diámetro es de 300 mm de diámetro con un ángulo de paso helicoidal de 60° con lo que se obtiene un coeficiente de potencia de 0,535. Estudios posteriores pueden efectuarse para bajas velocidades de flujo a fin de valorar la eficiencia de las turbinas [35].

2.2.9. Etapas en un análisis CFD

Un análisis completo de dinámica de fluidos computacional consta de las siguientes etapas [37]:

Cálculos previos.

- Formular el problema y plantear las ecuaciones que lo gobiernan.

- Establecer las condiciones de contorno.
- La generación de una malla de volúmenes finitos.

Todo esto depende del análisis que se quiere realizar (fuerzas, flujos, distribución de concentraciones, transferencia de calor) y de la capacidad computacional [37].

Solución de las ecuaciones.

Esta es la etapa principal del CFD. En ella tiene lugar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema [37].

Análisis de los resultados.

Los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones se corresponden con el valor de las variables de campo (ρ , u , v , w , p) en cada punto de la malla. Esta enorme cantidad de números deben reducirse a los fundamentales para poder manejarse con facilidad y obtener lo que pretendíamos con el cálculo [37].

Una parte importante de esta etapa es la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, para tener una visión rápida y amena de los resultados obtenidos [37].

También se incluye, la comparación de los resultados obtenidos con otros ya obtenidos con:

- Otros obtenidos anterioridad mediante el análisis de CFD.
- Con resultados tabulados existentes en normativas, publicaciones científicas.

2.2.9.1. Discretización espacial

El primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional, consiste en la discretización espacial del dominio para posteriormente calcular sobre la misma la aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos, así como las fuentes. Existen muchos métodos para la discretización del problema. A groso modo, se clasifica los distintos esquemas de discretización en tres categorías principales: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Todos estos métodos requieren una previa discretización

geométrica (espacial) para poder realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido [37].

- **Mallados estructurados:** cada punto está inequívocamente identificado por los índices i , j , k , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2-D y hexaedros en 3-D [37].
- **Mallados no estructurados:** las celdas y los nodos del mallado no tienen un orden particular, es decir, las celdas o nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos, en este caso, son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2-D y tetraedros y hexaedros en 3-D [37].

2.2.9.1.1. Mallas estructuradas

La principal ventaja de los mallados estructurados reside en la ordenación de los elementos en memoria, ya que, de esta forma, el acceso a las celdas vecinas a una dada resulta muy rápido y fácil, sin más que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente. La ventaja de esta metodología de mallado es que se pueden generar mallas para problemas particulares sin tener que generar mallas particulares, independientes unas de otras. Por otro lado, el problema de la técnica es que la conservación de las propiedades de las ecuaciones de gobierno del fluido no es satisfecha exactamente en la zona donde se produzca solape de mallas [37].

2.2.9.1.2. Mallas no estructuradas

Éstos ofrecen gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas. La principal ventaja de los mallados no estructurados reside en que los triángulos (2-D) o los tetraedros (3-D), se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. En la práctica, es necesario determinar unos parámetros adecuadamente para obtener una buena calidad de malla. El tiempo requerido por una computadora para generar un mallado no estructurado es mucho menor que el que requiere para uno estructurado [37].

Otra ventaja de este tipo de metodología es que la solución obtenida depende del refinamiento que se realice. Una desventaja de este tipo de mallado es el espacio que ocupa en una computadora, es decir, requieren más memoria que los mallados estructurados [37].

2.2.9.2. Métodos finitos

Método de las diferencias finitas. - Una ventaja importante del método de las diferencias finitas es su simplicidad teórica y la posibilidad de aumentar la precisión del método sin más que aumentar el orden de aproximación de las derivadas [37].

Por otro lado, este método requiere un mallado estructurado, con lo cual el campo de aplicación se ve reducido a algunos problemas, normalmente con geometrías sencillas. Además, este método no puede aplicarse directamente en coordenadas curvilíneas, teniéndose que transformar las ecuaciones de Navier-Stokes de curvilíneas a cartesianas para la resolución del problema. Por este motivo, el método de las diferencias finitas sólo es aplicable en algunas geometrías sencillas [37].

Método de los volúmenes finitos. - La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de las diferencias finitas [37].

La principal ventaja del método de los volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de las diferencias finitas. Comparado con el método de las diferencias finitas, este método es muchísimo más flexible (puede implementarse mallado estructurado y no estructurado); por este motivo, el método de los volúmenes finitos es el más empleado para la resolución de flujos con geometrías complejas [37].

Método de elementos finitos. - El método de los elementos finitos, como método general para la resolución de las ecuaciones de Euler/Navier-Stokes, comienza con una división del dominio en elementos triangulares (en 2-D) o tetraédricos (en 3-D), generando un mallado no estructurado. Dependiendo del tipo de elemento y de la precisión que se quiera, se tendrá que definir una malla más o menos fina de elementos [37].

Además, tienen que definirse las llamadas funciones de forma que representan la variación de la solución en el interior de los elementos. En la práctica, se emplean normalmente

funciones de forma lineales, que emplean únicamente los nodos pertenecientes a la malla. Este método resulta muy atractivo por el uso de mallas no estructuradas (ampliamente empleadas para la formulación de problemas con geometrías complejas) [37].

2.2.9.3. Condiciones de contorno e iniciales

Independientemente de la metodología empleada para resolver las ecuaciones de gobierno, se deben de especificar unas condiciones de contorno e iniciales. Las condiciones iniciales determinan el estado de las variables fluidas en el instante $t = 0$, o en el primer paso del esquema de integración. En toda simulación numérica, se considera una parte del dominio fluido para la resolución de las ecuaciones. Esto da lugar a un contorno artificial donde el valor de las variables fluidas tiene que ser especificados a través de lo que se conoce como condiciones de contorno [37].

- Condiciones de contorno de flujo libre: pueden ser de entrada, de salida o entrada/salida. Las condiciones de contorno de entrada de flujo se especifican mediante las condiciones en el infinito ($\rho_\infty, \mu_\infty, u_\infty, v_\infty, w_\infty, P_\infty, T_\infty$) [37].
- Condiciones de contorno de pared: modelan el comportamiento del flujo en las proximidades de la superficie. Se puede imponer una condición de contorno de no deslizamiento (velocidad nula en el punto de contacto, $W=0$), o de tangencia (velocidad normal a la superficie igual a cero) [37].

2.2.9.4. Aplicación de los métodos numéricos al CFD

Una simulación CFD comienza con la generación del modelo CAD que se quiere estudiar mediante un programa de diseño gráfico en 3D, como pueden ser Solidworks, Catia, Pro Engineer, etc. No sólo se debe definir la geometría del sólido a estudiar, sino que también se debe definir el dominio computacional, que será la región por donde circulará el fluido. Por ejemplo, si se quiere estudiar el comportamiento hidrodinámico de una turbina de eje vertical, aparte de diseñar la turbina en sí, habrá que definir el espacio por donde circulará el fluido, y cuáles serán la entradas y salidas del mismo [37].

Una vez se tiene la geometría y el dominio computacional definido, éste se discretiza o divide en celdas para formar una malla. Las mallas están formadas por elementos, que pueden ser 2D (elementos de superficie como por ejemplo triángulos, rectángulos) o 3D (elementos de

volumen, como por ejemplo tetraedros, hexaedro, prismas) [37]. Cada elemento está caracterizado por sus nodos, las caras, las aristas y su centro. En el análisis de la turbina hidrocíntrica helicoidal el dimensionamiento de la malla debe tener una resolución más fina alrededor del rotor y álabes de la turbina donde se quiere obtener una mejor discretización para obtener buenos resultados, y en su entorno de trabajo que sería el dominio computacional un mallado mayor que el del rotor, al no ser éste un área de estudio sino una condición de contorno que estará inmersa la turbina [37].

Las propiedades físicas del fluido que se quieren estudiar, como por ejemplo la velocidad o torque que proporcionará al rotor de la turbina, son calculadas en cada uno de los nodos que conforman toda la malla, y entre nodos se interpola el resultado. Aumentar el número de elementos y, por tanto, reducir el tamaño de estos, lo que implica reducir la distancia entre nodos y que la interpolación entre nodos sea más buena, conlleva un resultado más exacto, pero el coste computacional aumenta, a veces hasta puntos inadmisibles. Por lo tanto, hay que llegar a un equilibrio entre la precisión buscada en los resultados con el coste computacional que ello conlleva [37].

Una vez se ha mallado el dominio, hay que definir la configuración de la simulación. Se definen las condiciones de contorno, propiedades del fluido, velocidades, modelos de turbulencia, intervalos de tiempo para el cálculo, nº de procesadores a utilizar, entre otros. Situados en este punto, se entra ya en la etapa de procesamiento, donde se solucionan las ecuaciones algebraicas pertinentes [37]. El tiempo de cálculo requerido por los computadores dependerá de varios factores, como son el número de elementos del mallado, las especificaciones del equipo informático utilizado, la configuración de la simulación. Un aspecto muy importante es la convergencia de los resultados a fin de garantizar una solución con suficiente exactitud (que no implica que sea correcta) [37].

2.2.9.5. Flujo en canales abiertos

Caudal. - En dinámica de los fluidos, caudal es el volumen (Vol) de fluido que pasa por una sección de área (A) por unidad de tiempo o también la velocidad del fluido (W) por la sección transversal del área [38].

$$Q = W \cdot A$$

EC. 40

Radio hidráulico. - La dimensión característica de los canales abiertos es el radio hidráulico, definido como la relación del área transversal neta de una corriente al perímetro mojado de la sección. Donde A_{NF} (área normal de flujo) y PM (perímetro mojado) [38].

$$RH = \frac{A_{NF}}{PM} \quad \text{EC. 41}$$

En el cálculo del radio hidráulico, el área de la sección transversal debe ser evidente a partir de la geometría de la sección. Al perímetro mojado se le define como la suma de la longitud de las fronteras sólidas de la sección que entran en contacto con el fluido (es decir, éste las moja) [38].

Numero de Reynolds para el flujo en un canal abierto. - En canales abiertos a través de hechos experimentales demuestran que, el número de Reynolds de flujo laminar ocurre cuando es menor de 500 y el flujo turbulento ocurre cuando es mayor de 2000 y se puede determinar a partir de la ecuación 2.42, donde W (velocidad del fluido), RH (radio hidráulico) y ν (viscosidad cinemática) [38].

$$N_R = \frac{W \cdot RH}{\nu} \quad \text{EC. 42}$$

Número de Froude para el flujo en un canal abierto. - El número de Froude se basa en los efectos de las fuerzas inerciales sobre el agua en este caso para un flujo en los canales abiertos. Donde influye la velocidad (W) versus los efectos inerciales, también es importante la relación de las fuerzas inerciales a las gravitacionales, dada por N_F , definido como [38]:

$$N_F = \frac{W}{\sqrt{g \cdot y_h}} \quad \text{EC. 43}$$

Donde y_h , se denomina profundidad hidráulica, está dada por:

$$y_h = A_{NF}/T \quad \text{EC. 44}$$

y (T) es el ancho de la superficie libre del fluido en la parte superior del canal. Cuando el número de Froude es igual a 1.0, es decir cuando $N_F = \sqrt{g \cdot y_h}$, el flujo se llama flujo crítico.

Cuando es menor a 1.0, el flujo es subcrítico y cuando es mayor a 1.0, el flujo es supercrítico, existe la posibilidad que haya flujos de clase subcrítico-laminar, subcrítico-turbulento, supercrítico-laminar, supercrítico turbulento [38].

Descarga. - En el análisis del flujo en canales abiertos, es común que el caudal (Q) reciba el nombre de descarga. Se obtiene una ecuación que relaciona en forma directa la descarga con los parámetros físicos del canal. Otra forma útil de la ecuación (2.2.9.6), es despejar el área (A) por el radio hidráulico (RH) para conocer la geometría de la sección. Donde (n) es un factor de resistencia y (S) para indicar la pendiente del canal en muchos casos (0.001) cuando no hay pendiente alguna [38].

$$Q = \left(\frac{1.00}{n}\right) A \cdot RH^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad \text{EC. 45}$$

Para efectos de comprobar el dimensionamiento de un canal hidráulico que sería una similitud para el dominio computacional de la simulación para la turbina y condiciones que se requieren. En donde se tiene que cumplir estas condiciones que la altura (3.5H), y el ancho (6D). Se establece un área (2.4 m * 2 m), obteniendo esto se procede a reemplazar en la (EC. 41).

$$RH = \frac{4.8 \text{ m}^2}{2.4 \text{ m} + 2(2 \text{ m})} = 0.75$$

Se calcula el número de Reynolds para el flujo en un canal abierto con la (EC. 42).

$$N_R = \frac{(2.5) * (0.6)}{(1.003 \times 10^{-6})} = 1.87 \times 10^6$$

Número de Froude para flujo en canal abierto con la (EC. 43), antes calculando la profundidad hidráulica en la (EC. 44).

$$y_h = 4.8 \text{ m}^2 / 2.4 \text{ m} = 2 \text{ m}$$

$$N_F = \frac{2.5 \text{ m/s}}{\sqrt{\left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * (2 \text{ m})}} = 0.564$$

Siendo el fluido turbulento ($N_R = 1.87 \times 10^6 > 2000$) y de flujo subcrítico ($N_F = 0.564 < 1$). A continuación, se cuantifica el caudal con la (EC. 40).

$$Q = \left(2.5 \frac{m}{s}\right) * (4.8 m^2) = 12 m^3/s$$

Dimensionamiento del canal hidráulico rectangular despejando la (EC. 45). Y asimilando las variables $A = (L^2)$ y $R = (L/3)$ en términos de L. Y el factor de rugosidad (n) con valor de 0.010 y $S = 0.001$.

$$AR^{2/3} = \left(\frac{n * Q}{S^{1/2}}\right) = 3.7947$$

$$L^{8/3} = (3.7947) * (2.08) \rightarrow L = (7.8930)^{3/8} = 2.17 m$$

2.2.10. Investigación experimental de características de turbina helicoidal

Se estudió la turbina de corriente de marea helicoidal e informó su rendimiento y características para el desarrollo de turbina eléctrica de flujo de agua libre. La maqueta de la turbina hidrocínética se construyó en dimensiones como: 0,5 m y 0,6 m de diámetros y 1,25 m de longitud; la pala de la sección transversal de la turbina era la NACA 0020 simétrica con una longitud de cuerda de 0,07 m, y había 3 cuchillas con un ángulo helicoidal de 120°, 135 ° y 150 °.

El modelo fue probado en un tanque de remolque (1.46 m de ancho, 3 m de profundidad y 45 m de longitud). La rotación y el par de la turbina se midió bajo varios ajustes de velocidad de remolque, mientras que se presentaron las eficiencias de potencia y potencia bajo diversas relaciones de velocidad de punta y velocidades de ángulo helicoidales. Las características obtenidas de este experimento proporcionan información útil para el diseño y desarrollo de la turbina eléctrica de corriente de marea helicoidal [39].

2.2.10.1. Configuración del experimento

Las pruebas de modelo se llevaron a cabo en el tanque de remolque en el departamento de investigación y desarrollo del departamento de irrigación de Tailandia que tenía la siguiente especificación de la sección de trabajo [39]:

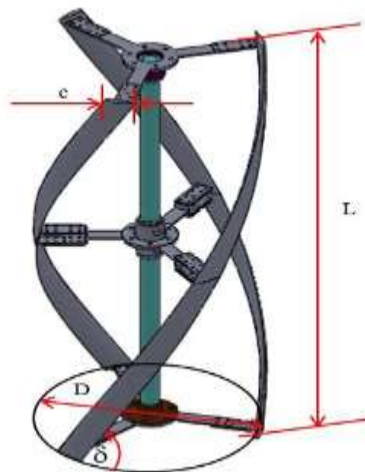
Tabla 2. Datos del tanque de remolque.

| Parámetro | Cantidad | Unidad |
|------------------|-----------------|---------------|
| Longitud | 43 | m |
| Ancho | 1.5 | m |
| Profundidad | 3 | m |
| Velocidad máxima | 2 | m/s |

FUENTE: (CHAIWAT; 2015)

Los tres sistemas de palas se usaron en la presente investigación. El modelo estaba compuesto de simetría lámina NACA0020, longitud de cuerda 0.07m (c), 0.5m y 0.6m de diámetro (D) y 1.25m de longitud. Hubo 3 diferentes diseños de ángulo helicoidal (δ) de la cuchilla que eran 120° , 135° y 150° como se muestra en la ilustración 23 [39].

Ilustración 23. Esquema de la turbina de corriente helicoidal.

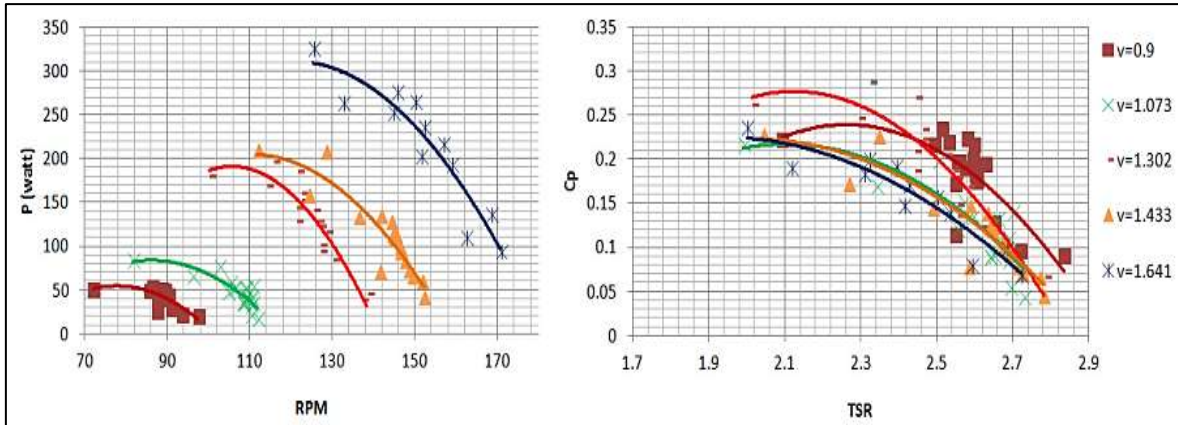


FUENTE: (CHAIWAT; 2015)

2.2.10.2. Resultados del análisis de la turbina helicoidal

La velocidad de remolque se estableció de 0.9 a 1.655 m/s para cada diámetro y conjunto de ángulos de las cuchillas. La solidez (σ) del modelo fue de 0.134 y 0.111 para 0.5 m y 0.6 m de diámetro, respectivamente. En primer lugar, el diámetro del modelo de 0,5 m y el ángulo helicoidal de 120° se unieron a la turbina y se probaron. La potencia de la turbina que fue producto del par (M) y (λ) fue en proporción a un cubo de la velocidad actual como se muestra en la ilustración 24 (a). El coeficiente de potencia derivado de la ecuación (8) se trazó frente a la ración de velocidad de punta (TSR) como se muestra en la ilustración 24 (b) [39].

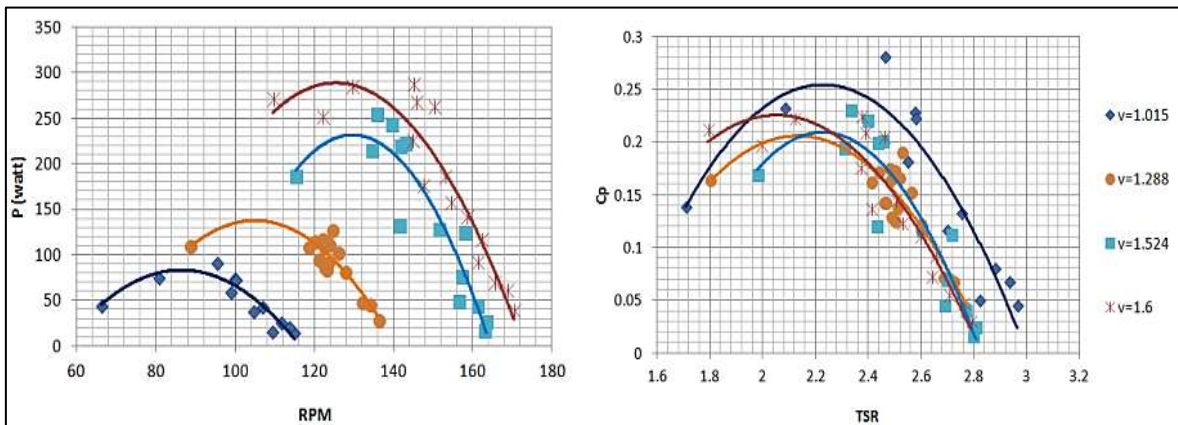
Ilustración 24. $D=0.5$ m y $\delta=120^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia.



FUENTE: (SATHIT; 2015)

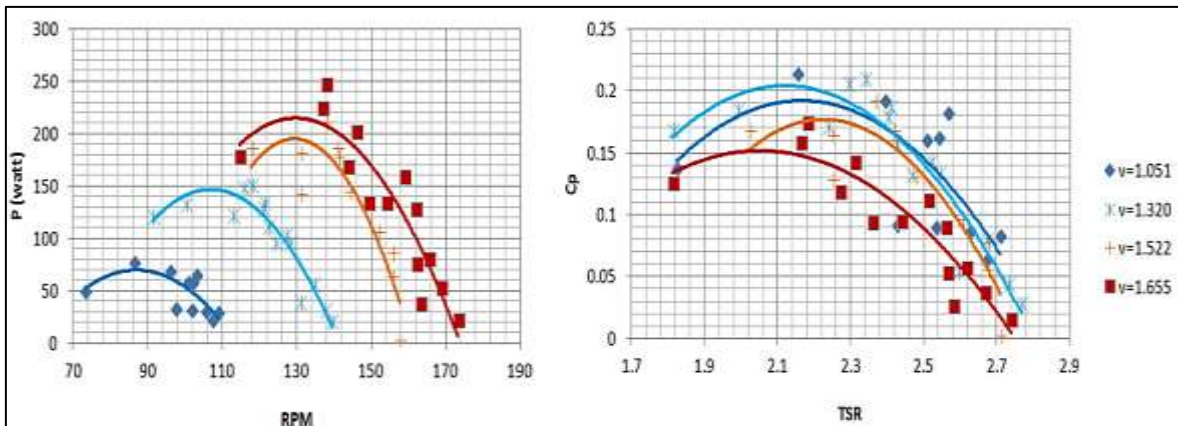
La eficiencia máxima de varias velocidades, 20 ~ 25%, se produjo alrededor de $TSR = 2.2$. El mismo procedimiento también se llevó a cabo para el ángulo 135° y la cuchilla angular helicoidal de 150° como se muestra en la ilustración 25 y 26 respectivamente [39].

Ilustración 25. $D=0.5$ m y $\delta=135^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia.



FUENTE: (SATHIT; 2015)

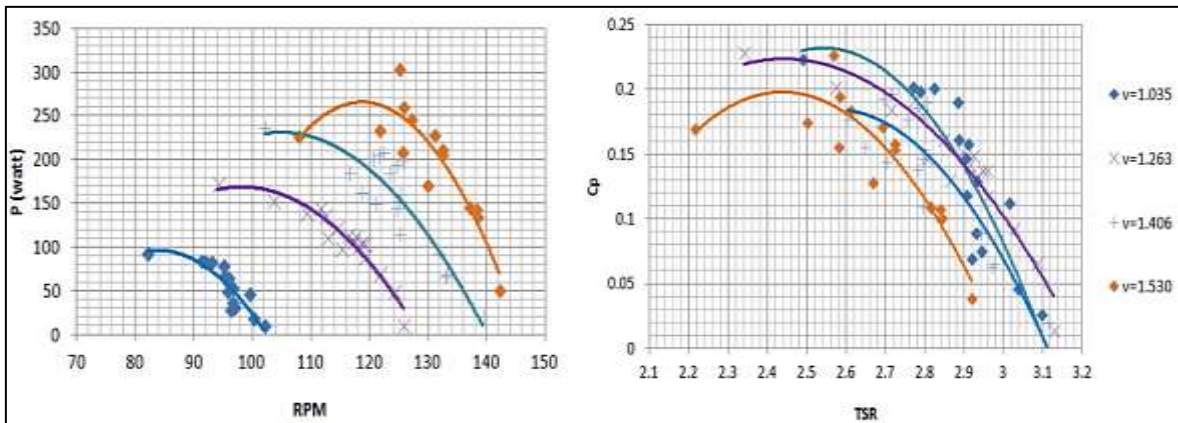
Ilustración 26. $D=0.5$ m y $\delta=150^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia.



FUENTE: (SATHIT; 2015)

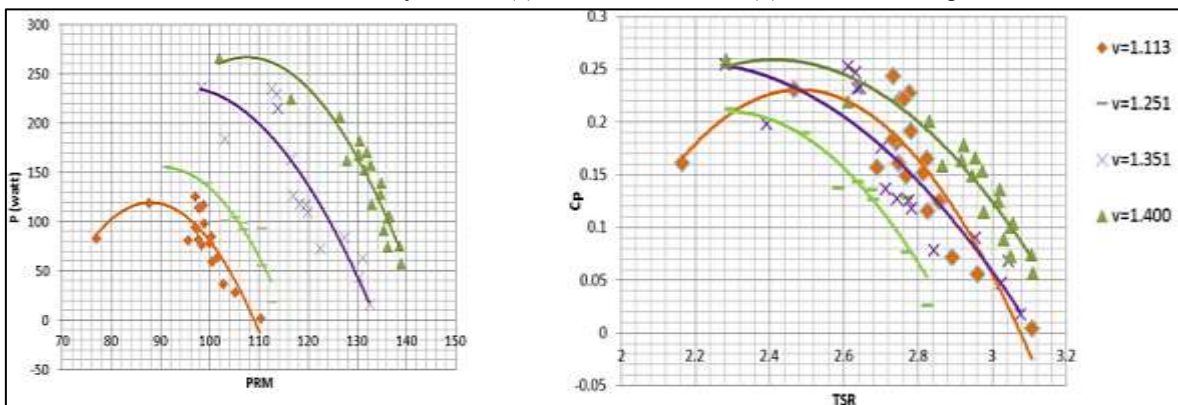
Finalmente, se probó el diámetro del modelo de 0.6 m y el ángulo helicoidal de 120° , 135° y 150° . La potencia de la turbina y el coeficiente de potencia se representaron como se muestra en las ilustraciones 27, 28 y 29, respectivamente. La eficacia máxima de varias velocidades, 19 ~ 26 %, se encontró alrededor de $TSR = 2.5$. Los datos experimentales confirmaron que el ángulo helicoidal de 135° para 2 casos tenía buenas características [39].

Ilustración 27. $D=0.6$ m y $\delta=120^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia.



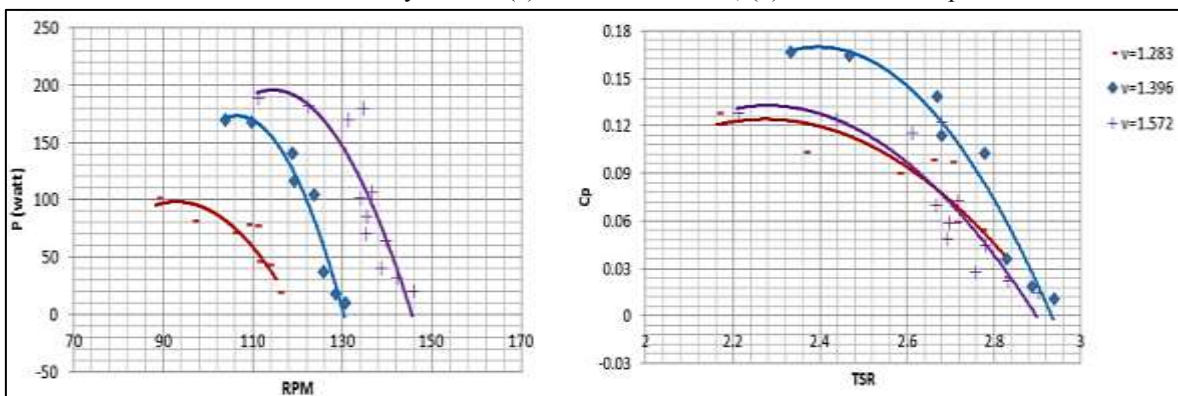
FUENTE: (SATHIT; 2015)

Ilustración 28. $D=0.6$ m y $\delta=135^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia.



FUENTE: (SATHIT; 2015)

Ilustración 29. $D=0.5$ m y $\delta=150^\circ$ (a) Potencia de salida; (b) Coeficiente de potencia.



FUENTE: (SATHIT; 2015)

Se investigaron las características de la turbina hidrocínética con rotor de eje vertical. El experimento se realizó usando varios modelos de turbina. Los resultados indicaron que el ángulo helicoidal tiene influencia en la eficiencia de la turbina, mientras que la solidez de la turbina tuvo efecto solo en TSR. En el ángulo helicoidal $\delta = 135^\circ$, el sistema mostró una mejor eficiencia para $(\sigma) = 0.134$ en $TSR = 2.2$ y para $(\sigma) = 0.111$ en $TSR = 2.5$. Los resultados experimentales sugeridos dan información de diseño útil para el desarrollo de turbinas eléctricas de corrientes de mareas [39].

2.2.11. Pruebas de un modelo a escala

2.2.11.1. Selección de material

Hay un argumento considerable sobre el material óptimo para usar en los álabes en un modelo de turbina hidrocínética de eje vertical. La aspiración es que los álabes fueran lo más uniformes posible (sin defectos) y también lo más consistentes posible entre los diferentes álabes (cuchillas o palas). Se tuvieron en cuenta varios tipos diferentes de materiales, incluyendo madera maciza, madera laminada, aluminio fundido, aluminio maquinado, bronce fundido, PVC sólido, PVC laminado, corte de PVC de una sección de tubería y polietileno sólido de ultra alto peso. La tabla 3 a continuación resume estas opciones [17].

La tabla 3 también indica algunas de las diversas razones por las cuales se abandonaron diferentes materiales durante la selección:

Tabla 3. Resumen de las opciones de materiales para un modelo de turbina.

| Material | Descripción | Disposición |
|------------------|---|---|
| Madera maciza | Dificultad para mantener la estructura isotrópica debido a la estructura de grano de la madera. | No utilizado. |
| Madera laminada | Mano de obra intensiva pero barata. Difícil de mantener la uniformidad. | No utilizado; aunque se puede realizar pruebas. |
| Aluminio moldado | Difícil de realizar; Equipo no Disponible. | No utilizado. |

| | | |
|---------------------|---|---|
| Aluminio mecanizado | Es un proceso costoso. | Se usa para hacer diez cuchillas. |
| Bronce fundido | Difícil de realizar; Equipo no disponible; Muy costoso. | No utilizado. |
| PVC sólido | Barato, pero dificultad para encontrar el material. | No utilizado. |
| PVC laminado | Barato, pero laborioso en su manufactura. | No utilizado; algunos materiales fueron contruidos pero fallaron durante el mecanizado. |
| PVC de tubería | Barato, preocupante por oscilación durante la fabricación | No utilizado. |
| UHMW sólido | Difícil de localizar material; preocupado por la fuerza del material. | No utilizado. |

FUENTE: (NIBLICK; 2012)

Entre los aspectos más importantes o ventajas se describen con respecto a la tabla 3, las siguientes [17]:

- El deseo era mantener el costo del modelado lo más bajo posible para permanecer dentro de nuestro presupuesto para el proyecto, lo que eliminó el moldeo de metales como una opción [17].
- Se consideró la madera, pero la preocupación por la estructura del grano no isótropo, y por lo tanto la resistencia del material, superaron la mayor disponibilidad y el menor costo [17].
- Se intentó la fabricación de una hoja de laminado de madera, pero consumió demasiado tiempo y no fue lo suficientemente replicable para los propósitos [17].
- Se intentó PVC laminado: se pegaron varias hojas de PVC de 1/4 pulgada juntas para formar una pila de 4 pulgadas de ancho y 3 pulgadas de alto; sin embargo, el adhesivo no resistió el proceso de maquinado y la pila falló. También se decidió que el proceso era demasiado laborioso para la cantidad de cuchillas necesarias [17].

Eventualmente se consiguió ubicar aluminio flexible en las dimensiones requeridas por un precio razonable, y seleccionamos este material para los álabes del prototipo. El aluminio proporcionó una cuchilla de alta resistencia que no se descompondría bajo carga. Las cuchillas fueron cortadas de palanquillas sólidas de aluminio 6061-T6 en un centro de mecanizado CNC de 3 ejes. La ilustración 30 muestra las cuchillas en diferentes etapas del proceso de mecanizado. Se sostuvo la discusión sobre el esquema de fijación del álabe, específicamente si se iba a usar un disco circular sólido o si un sistema de radio discontinuo funcionaría mejor [30].

Ilustración 30. Imágenes de los álabes durante la fabricación.



FUENTE: (NIBLIK; 2012)

Se tuvo dificultades para cuantificar el efecto de la fricción de la piel que sería inherente a un disco sólido, y había alguna duda sobre las fuerzas fuera del plano en los discos que aumentarían el empuje, y por lo tanto la fricción, en los cojinetes del eje. Por lo tanto, se decidió que los álabes (cuchillas) se mantendrían con radios discontinuos hechos también de aluminio [17].

2.2.11.2. Descripción del flujo

El departamento de ingeniería aeronáutica de la Universidad de Washington posee un canal de prueba de tamaño moderado, que se utilizó para las pruebas de prototipo. El canal consistía en una sección rectangular de vidrio de aproximadamente 8 pies de largo y 29 pulgadas cuadradas. El agua era bombeada a través del canal por una bomba centrífuga para inducir el flujo, que alcanzaría un valor máximo de 0.8 metros por segundo. La bomba fue controlada por un variador de frecuencia, lo que permite un control sustancial de la velocidad de descarga a través del canal y, por lo tanto, de la velocidad del agua. No se tomaron

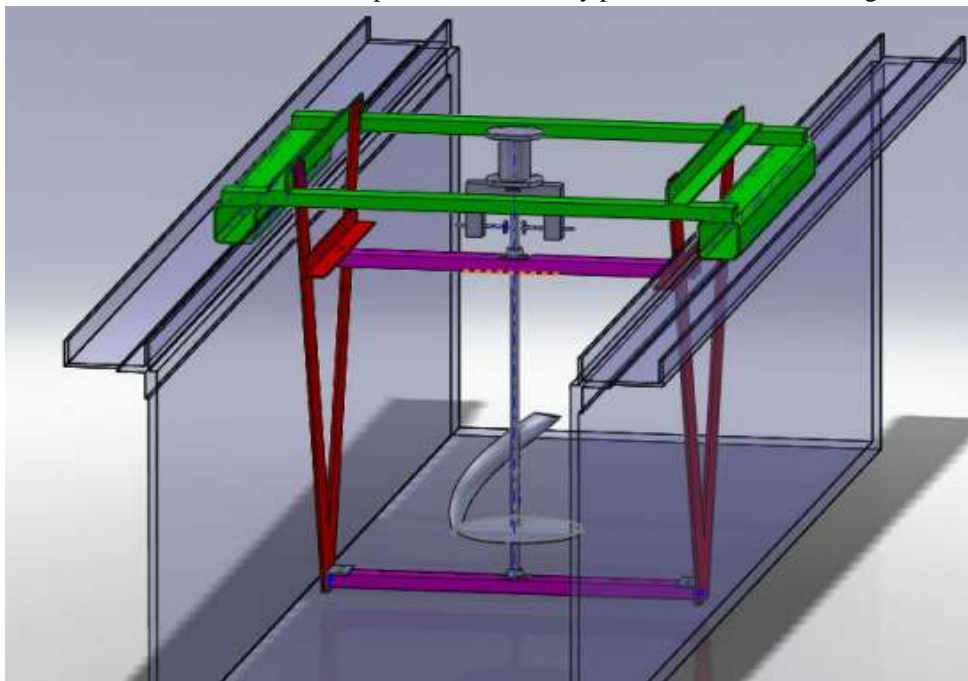
medidas directas de las tasas de flujo volumétrico; sin embargo, la velocidad del agua fue la principal variable de interés. Esto se midió directamente con un dispositivo de Velocimetría Acústico Doppler (ADV) inmerso, que proporcionaba la velocidad en tiempo real [17].

Con el fin de montar las turbinas de prueba en el flujo, se construyó un pórtico sobre la parte superior del canal para proporcionar restricción mecánica durante la prueba. El pórtico fue construido para evitar el contacto con las paredes de vidrio del canal [17].

2.2.11.3. Descripción del pórtico de pruebas

Los soportes del pórtico y la turbina se construyeron con acero dulce. La parte superior del pórtico estaba hecha de tubos de caja cuadrada de 3", un poco más grandes que el ancho del canal. Los travesaños de hierro angular de 1 1/4" x 1/4" proporcionan resistencia lateral al armazón. Un armazón vertical desde 3" x 1/4" en acero. El canal de hierro de 2" de ancho por 1" de alto proporcionó los soportes para la turbina, superior e inferior. El armazón superior se soldó para proporcionar rigidez, al igual que los marcos en forma de "A", que luego se atornillaron para permitir el desmontaje del marco [17]. La turbina se montó dentro del marco como se muestra en la ilustración 31, y una celda de torque y un codificador de rotación se unieron a la parte superior del eje de la turbina [30].

Ilustración 31. El canal de prueba con turbina y pórtico montado en su lugar.



FUENTE: (NIBLIK; 2012)

2.2.11.4. Parámetros del prototipo de turbina

Los siguientes parámetros se probaron en las turbinas diferentes para su análisis [17]:

- Par de arranque de la turbina.
- Velocidad máxima de rotación sin carga.
- Orientación del par más alto.
- Coeficiente de potencia (eficiencia de la turbina).

El par de torsión medido directamente de la celda de par transmitido a través del eje de la turbina; el codificador de rotación proporcionó datos de velocidad angular. El máximo par de arranque se pudo medir aumentando la fuerza de frenado aplicada al eje hasta que se evitó la rotación de la turbina, mientras que la rotación máxima sin carga se midió reduciendo la fuerza de frenado aplicada al eje de la turbina a cero y registrando la velocidad de la turbina. Al multiplicar la velocidad angular por el par desarrollado se obtendrá la potencia desarrollada por la turbina [30].

2.2.11.5. Trabajo futuro

Las turbinas helicoidales de flujo cruzado son una tecnología relativamente nueva, y aún se necesita una cantidad considerable de investigación para comprender su funcionamiento y propiedades. Se puede hacer una caracterización sustancial con las turbinas que se han fabricado. La prioridad principal es adquirir instrumentación que sea de resolución apropiada. Una célula de par con un rango de 0-5 N.m sería mucho más útil.

Además, se necesita un sistema de freno actualizado para aplicar de forma más apropiada la restricción de torque a la turbina. Se recomienda un freno tipo Foucault, que proporcionará una cantidad estable de par en la turbina. El desarrollo de dicho freno se consideró este trimestre, pero la complejidad de dicho dispositivo y el tiempo requerido para la construcción no permitieron continuar [17].

El canal de la Universidad de Washington tiene una velocidad máxima del agua de 0,8 m/s, que es demasiado lenta para caracterizar por completo las capacidades de los modelos de la turbina. Probarlos en una ubicación con velocidades de agua de al menos 1,5 m/s permitirá

una serie completa de pruebas en el rango de operación propuesto, y debería incluirse para trabajos futuros [17].

Las turbinas fueron diseñadas con un eje de transmisión que se extiende completamente a través de los álabes. Es posible que la extracción de este eje aumente el rendimiento de la turbina al eliminar la estela turbulenta generada por el eje. Esta puede interferir con el flujo alrededor de los álabes y reducir la elevación, lo que reduce la eficiencia. La construcción de un nuevo sistema de cojinetes de eje y una conexión eje de la turbina está en curso para investigar esta posibilidad [17].

2.2.11.6. Mecanizado de un bloque sólido para manufactura de un álabe

La investigación preliminar de los métodos de fabricación para las palas de turbina de tamaño completo nos llevó a considerar el mecanizado de un bloque sólido de material. El material requerido para hacer una hoja de 1 m de longitud para una turbina con un diámetro de 0.7 m es de 30 cm x 17 cm x 106 cm. Esta cantidad de aluminio cuesta muchos miles de dólares prohibitivos para este proyecto. La cantidad de material requerido para este método podría reducirse sustancialmente si el material más delgado se soldara entre sí en un "blanco" de la forma apropiada. Estas soldaduras tendrían que ser muy fuertes, y pueden o no ser posibles [17].

2.2.11.7. Fundición

El aluminio fundido o el bronce se consideraban brevemente como una opción de fabricación para las palas de las turbinas. Las hélices de buques grandes con una geometría similar (largas y delgadas, con bordes cónicos) están fundidas en bronce, por lo que hay alguna experiencia en la industria para aprender. La fundición puede ser una opción atractiva para proyectos futuros de este tipo, especialmente si se fabricaran múltiples turbinas [17].

2.2.12. Fabricación de hojas compuestas

La construcción de las palas de turbina de tamaño completo a partir de materiales compuestos se eligió por tres razones [30]:

- Mecánico (resistencia, dureza, etc.).
- Resistencia a la corrosión en agua salada.
- Costo y viabilidad.

Se realizaron investigaciones sobre diversos procesos de fabricación y opciones materiales, cuyos deducciones se presentan a continuación [30].

2.2.12.1. Proceso por enchufe o molde macho

Para aplicar este método a la fabricación de las palas helicoidales de turbina con molde macho sería mecanizado por CNC. El laminado de fibra de carbono se uniría al tapón / núcleo para agregar resistencia estructural y conformar la dimensión definida. Las dimensiones y la forma de nuestras cuchillas hacen que este enfoque sea muy desafiante. De acuerdo con Russell Builder, si el tapón está hecho de un material que no contribuye a la resistencia de la cuchilla, como la espuma, debe ser lo suficientemente pequeño como para dejar suficiente volumen para el laminado de fibra compuesta. (Si el laminado es demasiado delgado, simplemente se agrietará y no dejará integridad a la cuchilla o pala) [17].

2.2.12.2. Molde hembra de dos caras

Por lo general, se usa un molde hembra de dos caras varias veces para que el mecanizado CNC de la herramienta se realice una vez. La forma de la cuchilla se dividiría a lo largo del cordón de la lámina para obtener ángulos de tiro óptimos, la mayor eficacia para la orientación de la resina y maximizar las superficies de adhesión es un curado de molde dividido. El molde se puede usar de dos maneras: los laminados se pueden colocar en los moldes de tal manera que los dos lados se sujeten juntos antes del curado, o los laminados se dividen entre las dos mitades para curar por separado y adherir más tarde [17].

El primer método requiere moldes rígidos, el aluminio es mejor, para soportar presiones de sujeción repetidas. Este fue el enfoque utilizado para las palas de turbina anteriores en otros proyectos [30]. La disposición del laminado en el borde anterior de las cuchillas se puede integrar suavemente mediante una orientación de "envoltura" de las fibras con un exceso de tela en el borde posterior, lo que produce una disposición estructural y estética deseable. Los moldes a los lados son para aplicar laminaciones que están ligeramente empapadas a cada

mitad de la herramienta, aspirar bolsas, curar, en rutar cada lado hasta los moldes y luego unir los lados. El material del molde para este método puede ser ligeramente inferior al primer enfoque, pero todavía debe proporcionar una plataforma rígida para el embolsado al vacío. Adjuntar las dos mitades introduce la posibilidad de líneas de costura en el borde delantero. Esto puede abordarse mediante la construcción de una tira de reembolso en el borde delantero de los moldes, de modo que se puede aplicar cinta compuesta sobre la costura y se usa con acabado [17].

2.2.12.3. Molde de una sola cara

El molde de un lado se usaría repetidamente para construir cuchillas que se formaron en el molde en un lado y sobre el otro "construido". Los laminados podrían diseñarse para acercarse mucho a la forma final con una técnica de "envoltura" utilizada para el borde de ataque y un pseudo-núcleo de fibras cortas alrededor de un paño ancho. La laminación se envasaría al vacío, se curaría y luego se mecanizaría el segundo lado en CNC. La orientación y el uso de la fibra unidireccional facilitarían el compromiso estructural con el proceso de mecanizado [30]. Las fibras compuestas expuestas serán recubiertas con resina epoxi [17].

2.2.12.4. Materiales de molde

Para fabricar los moldes en la casa, se usa espuma que se mecaniza con la forma de la herramienta y luego se sella con epoxi. La espuma es más frágil que algunos otros materiales de moldes, pero con cuidado sería adecuada para el bajo número de iteraciones que necesitamos. El epoxi proporciona una superficie sobre la que aplicar cera antiadherente y mantener una aspiradora para el envasado al vacío. La espuma sería libre o de un costo relativamente bajo. Los costos de recubrimiento y encerado del molde podrían estar en el rango de \$30 a \$60 [17].

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

El presente trabajo se llevó a cabo en la ciudad de Quevedo, provincia de Los Ríos ubicada en la Región Costa de la República del Ecuador, en el laboratorio de Mecánica de la Facultad Ciencias de la Ingeniería perteneciente a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Ilustración 32. Ubicación geográfica.



FUENTE: (GOOGLE MAPS; 2018)

3.2. Tipo de Investigación

3.2.1. Investigación Aplicada

La aplicación del conocimiento de la dinámica de fluidos computacional, partiendo del fundamento teórico de los parámetros en las turbinas hidrocínéticas, seleccionando de estos los más convenientes y aplicativos para la elaboración del presente trabajo, donde se realiza el seguimiento del conocimiento generado por la investigación básica, para hacer, actuar, construir y modificar.

Iniciando con el diseño de la turbina hidrocínética con rotor de eje vertical helicoidal y prosiguiendo con la simulación del funcionamiento de trabajo como si lo estuviese haciendo en ríos, canales o esteros.

3.2.2. Investigación Bibliográfica

La búsqueda de información relevante permite respaldar y apoyar el proyecto de investigación. Investigar información sugerente acerca de las turbinas hidrocínéticas de eje vertical helicoidal, tipos, diseños, como funcionan, características, manufactura y eficiencia.

3.2.3. Investigación diagnóstica

Se busca nuevas formas de rendimiento de una turbina hidrocínética, tomando como referencia una recopilación de información para obtener un mejor manejo específico de datos o parámetros de la turbina, de esta manera alcanzando un diseño óptimo y realizar la simulación que tenga un enfoque real de lo que pasaría si esta estuviera inmersa en un río o canal.

Proporcionando como resultado un análisis que podría servir como base para la investigación y manufactura de este tipo de turbina. Considerando la capacidad de las turbinas hidrocínéticas con rotor de eje vertical helicoidal para funcionar con las condiciones de trabajo establecidas en ríos y canales.

3.3. Métodos de la Investigación

3.3.1. Metodología del arte

Se realiza una compilación de resultados, información de otros investigadores, para establecer los avances que han ocurrido sobre las turbinas hidrocínéticas. A través de la revisión se detecta lo que se ha investigado, de esta manera marcar la diferencia entre lo ya investigado y los resultados que se pueden obtener en nuevas propuestas de investigación.

En esta etapa se debe recurrir a investigadores (docentes y asesores), acudir a documentos científicos, tesis y trabajos de pregrado y posgrado, artículos científicos, libros y publicaciones.

3.3.2. Método analítico

Este método permite hacer un análisis de los diferentes tipos de turbinas hidrocínéticas y optar por la aplicación de turbinas de eje vertical helicoidales, por las características de su estructura que hacen que su diseño sea funcional a baja altura del nivel de agua demandando una disponibilidad de recurso energético de baja potencia. Además, se realizarán varios diseños en Solidworks, bajo la condición de cambios en sus parámetros geométricos, de esta forma se analiza que efectos causan en su funcionamiento.

3.3.3. Método científico

Se sigue una secuencia de pasos, primero mediante la experimentación de cambiar los parámetros geométricos que están implícitos en el funcionamiento de la turbina para verificar si estos afectan de alguna manera en el coeficiente de potencia, segundo paso, relacionar la dinámica de fluidos computacional con el modelo elaborado y obtener un análisis acertado; y como último punto, basado en la ley de Betz se comprueba que podemos mejorar y acercarnos lo más que podamos al rendimiento de este límite teórico para las turbinas de eje vertical, demostrándose que no es posible obtener toda la energía del fluido.

3.4. Fuentes de recopilación de información

- **Fuentes primarias:** Tesis de pregrado y posgrado, revistas, artículos científicos, libro y tutoriales web de actualidad.
- **Fuentes secundarias:** Preguntas a docentes.

3.5. Diseño de la investigación

Es una planificación que atribuye una sucesión de pasos de lo que se debe hacer para lograr los objetivos del presente proyecto. El desarrollo de la investigación comienza con la concepción de la investigación que comprende el: estudio de conceptos, variables a manipular en la turbina, diseños y simulaciones que conllevan al análisis e interpretación de datos determinados en los resultados.

3.5.1. Diseño no experimental

Se elaboró un diseño paramétrico y este método se utilizó al momento de analizar el objeto de estudio y al manejar tentativamente las variables o parámetros relacionados que enfocan el tema de la investigación, no se consideraron maniobras que influirían en los efectos de la simulación y resultados.

3.6. Instrumentos de investigación

Se establecen parámetros mediante el análisis de información, para obtener un diseño óptimo que cumpla las principales funcionalidades de una turbina hidrocíntrica de eje vertical helicoidal, para esto se manejaron los siguientes instrumentos: software de diseño 3D y Flow Simulation o Ansys CFD con sus auxiliares, que permitirá recopilar, tabular y manipular datos en las diferentes condiciones de diseño y simulación.

3.7. Tratamiento de datos

En la elaboración de este proyecto se utiliza el tratamiento de datos con los valores proporcionados en el software Flow Simulation o CFD de la simulación, para luego ser tabulados y graficados en Excel, SPSS o Matlab.

3.8. Recursos humanos y materiales de investigación

3.8.1. Recursos humanos

- Tutor de tesis
- Docentes
- Estudiante

3.8.2. Recursos materiales

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Computadora
- Libros
- Artículos científicos
- Tesis de pregrado y posgrado
- Páginas web
- Impresora
- Pendrives

- Cuadernos
- Calculadora
- CD-ROM
- Software de diseño, simulación y modelamiento matemático.
- Otros

CAPÍTULO IV
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

A continuación, se describen los resultados obtenidos durante el periodo de ejecución del proyecto de investigación, que incluyen los parámetros considerados para el diseño de la turbina hidrocínética con rotor de eje vertical helicoidal, así como resultados por las ecuaciones empleadas para el modelamiento, lo que propicia la selección de datos a emplear para el esbozo y simulación. De esta manera, se consolida la realización de los objetivos específicos planteados, discriminando las variables y valores más representativos que intervienen como base fundamental para el dimensionamiento de este tipo de turbinas.

4.1.1. Recopilación de datos

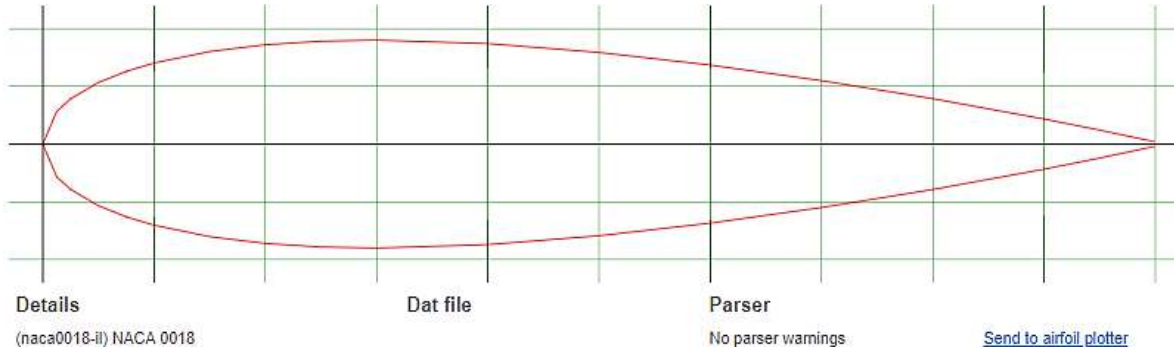
Como objetivo del presente proyecto se describe la síntesis de los aspectos principales para el modelamiento del rotor de la turbina y a continuación de estos, la elaboración de una tabla donde se recopilarán todos los datos necesarios para el diseño de la turbina hidrocínética con rotor de eje vertical helicoidal.

Donde la compilación de la información y resolución de las ecuaciones de este ítem (4.1.1) no forman parte de los resultados definitivos para esta memoria, sino una guía de cómo efectuar el modelamiento de la turbina y parametrizar el mismo en base a la metodología del arte; porque esto es un procedimiento iterativo para poder elegir la mejor configuración geométrica en base a los parámetros que tienen mayor influencia en el rendimiento (C_p) de la turbina.

4.1.1.1. Perfil NACA

Para seleccionar el tipo de perfil aerodinámico, que constituye la sección transversal de cada uno de los tres álabes de la turbina helicoidal, se hizo una revisión de la literatura disponible y considerando proyectos similares: análisis experimental de la implantación de una turbina hidrocínética [14] y otra, del departamento de ingeniería mecánica por el profesor Mandan Jagtap [38], se escogió un perfil NACA 0018, ver ilustración 33; dato asignado en la tabla 5 en la fila del ítem 5.

Ilustración 33. Perfil NACA 0018.



FUENTE: (<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=NACA0018-il>; 2018)

4.1.1.2. Solidez de un álabe

La relación de solidez (σ) se expresa en la (EC. 32). Para evitar que el álabe sea muy frágil y presente problemas de stress, se considera un valor cercano a 0.4 que según Shiono [29], determina la máxima eficiencia, valor asignado en la fila del ítem 6 de la tabla 5.

$$\sigma = \frac{3 * 0.16 \text{ m}}{\pi * 0.45 \text{ m}}$$

$$\sigma = 0.34$$

4.1.1.3. Ángulo de paso helicoidal

El ángulo de paso helicoidal (δ) definido en la (EC. 35), representa a la inclinación del álabe respecto a un plano horizontal, ver tabla 5 en la fila del ítem 17.

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{3 * 0.6 \text{ m}}{\pi * 0.45 \text{ m}} \right)$$

$$\delta = 51.85^\circ$$

Para un mejor criterio de la selección de número de álabes parte de la revisión bibliográfica efectuada por investigadores, Johnson, Taylor, Hughes, entre otros [17]. Al aumentar el número de palas o álabes se produce una reducción en el rendimiento de la turbina, ver tabla 2. Por ello se escogió una turbina de 3 palas, ver tabla 5 en la fila del ítem 4.

Tabla 4. Rendimiento (C_p) entre turbinas con diferentes números de álabes y velocidades.

| Velocidad (m/s) Tipo | 1.5 | 1.7 | 1.9 | 2.1 | Promedio |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|-----------------|
| Turbina 3 palas | 29.90 % | 29.10 % | 29.80 % | 25.70 % | 28.62 % |
| Turbina 6 palas | 24.90 % | 22.70 % | 23.50 % | 22.40 % | 23.37 % |

FUENTE: (BRONWYN HUGHES;2011)

4.1.1.3.1. Velocidad de punta del álabe (TSR)

Para analizar el torque de la turbina, depende directamente de la velocidad del fluido, esto influye en el parámetro conocido como velocidad de punta de álabe o Tip Speed Ratio (TSR) en sus siglas en inglés. La forma de cuantificar esta velocidad viene dada por la (EC. 31). Considerando que la velocidad del fluido es constante (1.8 m/s), pero esta velocidad varía para las condiciones de estudio; las dimensiones de la turbina deben estar acorde a las dimensiones reales para simular, se escogió un valor de 0.45 metros de diámetro ($R=0.225$ m), en base al prototipo analizado del artículo citado por Simón A. Caraballo [35]. Con esto se obtiene un valor del TSR (λ) dado por la expresión:

$$\lambda = \frac{\omega * 0.225 \text{ m}}{1.8 \text{ m/s}}$$

$$\lambda = \omega * 0.125.$$

De acuerdo al diámetro del rotor y velocidad del fluido podemos obtener un supuesto de la velocidad angular, expresada en la tabla 5 en la fila del ítem 14. Dando como resultado:

$$\omega = \frac{1.8 \text{ m/s}}{0.225 \text{ m}}$$

$$\omega = 8 \text{ rad/s}$$

Pasando la velocidad angular a rpm, ver tabla 5 de la fila del ítem 15. Se expresa:

$$rpm = 8 \text{ rad/s} * \frac{60}{2\pi}$$

$$\omega = 76,79 \text{ rpm.}$$

Obteniendo como velocidad de punta del álabe que es un valor más cercano a la realidad, ver tabla 5 fila del ítem 13.

$$\lambda = 8 \frac{rad}{s} * 0.125 s$$

$$\lambda = 1$$

4.1.1.4. Ángulo de ataque

Para el ángulo de ataque (α), que se forma entre la cuerda del álabe y la velocidad relativa en la punta del perfil. Se consideró un ángulo azimutal de 16° y velocidad del fluido 1.8 m/s para reemplazar en la (EC. 33), ver tabla 5 en la fila del ítem 16. Este ángulo de ataque dependerá de las condiciones de velocidad del fluido y en que ángulo azimutal esté situado el álabe con respecto al giro del rotor de la turbina.

$$\alpha = \text{artan} \left(\frac{1.8 \text{ m/s} * \text{sen}(16)}{1.8 \text{ m/s} * \text{cos}(16) + 8 \text{ rad/s} * 0.225 \text{ m}} \right)$$

$$\alpha = 8^\circ$$

Las especificaciones previas de la turbina de eje vertical helicoidal que va a ser diseñada se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Parámetros para el diseño de la turbina y simulación.

| Componentes | Ítem | Datos | | | Fórmula |
|------------------------|------|---------------------------|-----------------------|-------------------|---|
| | | Parámetro | Cantidad | Unidad | empleada |
| Propiedades del fluido | 1 | Densidad del fluido | 1000 | Kg/m ³ | - |
| | 2 | Viscosidad cinemática | 1.1 x 10 ⁶ | m ² /s | - |
| | 3 | Velocidad del fluido | 1 - 5 | m/s | - |
| Turbina | 4 | Número de álabes | 3 | - | - |
| | 5 | Tipo de álabe | NACA 0018 | - | - |
| | 6 | Relación de solidez | 0.34 | - | $\sigma = \frac{n * C}{\pi * D}$ |
| | 7 | Relación de aspecto | 1.33 | - | $RA = \frac{H}{D}$ |
| | 8 | Diámetro | 0.45 | m | - |
| | 9 | Radio | 0.225 | m | $R = \frac{D}{2}$ |
| | 10 | Altura | 0.60 | m | - |
| | 11 | Área de barrido | 0.27 | m ² | $A_{cap} = D * H$ |
| | 12 | Longitud cuerda del álabe | 0.16 | m | $C = \frac{\sigma * \pi * D}{n}$ |
| | 13 | TSR (λ) | 1 | - | $TSR = \frac{\omega * R}{V_{fluido}}$ |
| | 14 | Velocidad angular | 8 | Rad/s | $\omega = \frac{V}{R}$ |
| | 15 | RPM | 77 | rpm | $rpm = \omega * \frac{60}{2\pi}$ |
| | 16 | Ángulo de ataque | 8 | ° | - |
| | 17 | Ángulo de paso helicoidal | 51.85 | ° | $\delta = \tan^{-1} \left(\frac{n * H}{\pi * D} \right)$ |
| | 18 | Ángulo de torcedura | 120 | ° | - |

FUENTE: DANIEL MENDOZA A.

A continuación, se muestran datos tabulados de los Coeficientes de Potencia Vs TSR (λ) en condiciones de los parámetros geométricos de la turbina hidrocínética de eje vertical helicoidal. Los datos expuestos para el dominio computacional con una altura constante de 0.6 m y variación de los diámetros, paso helicoidal, manteniendo constante el perfil NACA 0020 y tomando la velocidad más alta de 7 m/s, ver tabla 6.

Tabla 6. Coeficientes de potencia Vs TSR con diferentes parámetros geométricos.

| Diámetros | Datos | | | Unidades |
|------------------------------|-------|-------|-------|----------|
| | 0.3 | 0.45 | 0.5 | m |
| Paso helicoidal (δ) | 60 | 50 | 50 | ° |
| Cp | 0.054 | 0.052 | 0.042 | - |
| λ | 1.56 | 1.78 | 2.07 | - |
| Solidez (σ) | 0.238 | 0.159 | 0.143 | - |
| Potencia | 783 | 1353 | 1382 | Watts |
| RPM | 200 | 200 | 200 | rpm |

FUENTE: (GUSTAVO J; 2017)

Los datos expuestos en la tabla 6, muestran una equivocación por parte del autor (Gustavo J.) en el coeficiente de potencia al aumentar un cero lo que daría por resultado coeficientes de 4% hasta 5.4%, que son rendimientos muy bajos a pesar de las condiciones descritas. Realizando una retroalimentación de la información analizada se estima que los coeficientes de potencia suprimiendo la equivocación por el escritor redondean de (0.42 = 42%) hasta (0.54 = 54%) aproximadamente. Por otro lado, al tener una turbina con alta solidez (> 0.3) esta auto-arrancará fácilmente, pero funcionará con una velocidad de punta más baja; o inversamente, mientras se obtenga una solidez más baja (< 0.20) funcionará con velocidad de punta más alta.

Para una segunda tabulación de datos y describir cómo afecta modificar los parámetros y obtener una variación en el coeficiente de potencia se aplicó la metodología del arte de un estudio realizado por la Universidad de Taiwán [39]. En el estudio realizado escogieron velocidades del fluido de 0.9 hasta 1.65 m/s en cada simulación; dimensiones de 0.5 m, 0.6

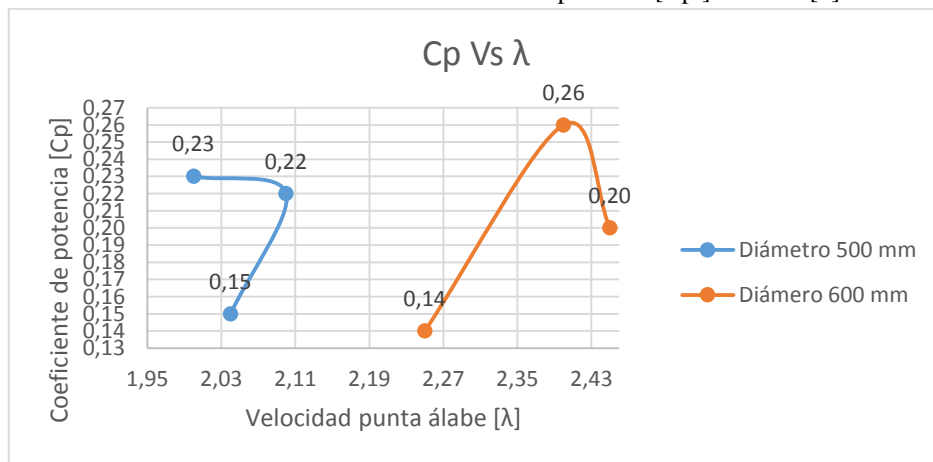
m de diámetros y 1.25 m de altura; con ángulo helicoidal de 120°, 135° y 150°, ver tabla 7 e ilustración 34.

Tabla 7. Coeficiente de potencia Vs TSR.

| Datos | | | | | | |
|---------------|-----------------------|-------------------|------|-----------|--------------|-----|
| Diámetros [m] | Ángulo helicoidal [°] | Velocidades [m/s] | Cp. | λ | Potencia [W] | RPM |
| 0.5 | 120 | 1.65 | 0.23 | 2 | 310 | 130 |
| | 135 | 1.65 | 0.22 | 2.1 | 290 | 125 |
| | 150 | 1.65 | 0.15 | 2.04 | 210 | 130 |
| 0.6 | 120 | 1.53 | 0.20 | 2.45 | 265 | 118 |
| | 135 | 1.40 | 0.26 | 2.4 | 270 | 110 |
| | 150 | 1.57 | 0.14 | 2.25 | 195 | 114 |

FUENTE: (PONGDUANGA; 2015)

Ilustración 34. Gráfica de Coeficiente de potencia [Cp.] Vs TSR [λ].



FUENTE: (PONGDUANGA; 2015)

En este artículo se adoptaron diferentes situaciones para investigar las características más adecuadas de la turbina hidrocínética. Los datos expuestos en la tabla 7, indican que el ángulo helicoidal de 120° tiene mayor influencia en la eficiencia de la turbina con un $C_p = 0.23$ a diferencia de los otros ángulos y con velocidad del fluido de 1.65 m/s; mientras que la solidez interviene en la velocidad de punta de la pala (λ) que crece al disminuir la solidez.

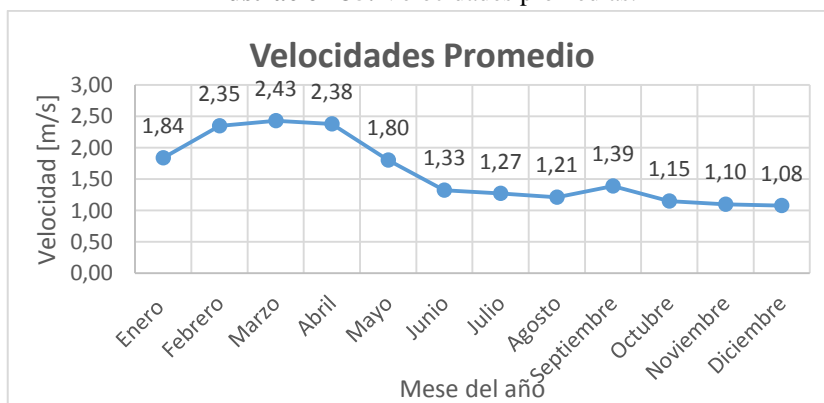
Otro aspecto importante a considerar, son las velocidades que se tomará en consideración para la simulación donde se establecerá un rango de pruebas para los diferentes análisis que se llevarán a cabo en varios parámetros de la turbina y obtener un mejor entorno de estudio de cómo esta responderá a dichas velocidades, a partir de los caudales medios diarios expuestos en los anuarios hidrológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), datos de referencia en un periodo de 10 años (2007 – 2017), para el río que pertenece al cantón Quevedo, ver anexos el 1 hasta el 11. A continuación, se muestra una tabla 8, de las velocidades promedios explicadas de manera anual. Obteniendo como resultado una velocidad mínima de 1.05 m/s y una velocidad máxima de 2.43 m/s.

Tabla 8. Velocidades promedio de manera anual en el río Quevedo (2007 - 2017).

| | Mes | Valor | Unidad |
|-----------------------------|------------|-------|--------|
| Velocidades promedio | Enero | 1.84 | m/s |
| | Febrero | 2.35 | m/s |
| | Marzo | 2.43 | m/s |
| | Abril | 2.38 | m/s |
| | Mayo | 1.80 | m/s |
| | Junio | 1.33 | m/s |
| | Julio | 1.27 | m/s |
| | Agosto | 1.21 | m/s |
| | Septiembre | 1.39 | m/s |
| | Octubre | 1.15 | m/s |
| | Noviembre | 1.10 | m/s |
| | Diciembre | 1.08 | m/s |

FUENTE: (INAMHI; 2007-2017)

Ilustración 35. Velocidades promedias.



FUENTE: (INAMHI; 2007-2017)

Para la elaboración de la tabla 8 y poder obtener las velocidades promedio, se tomó los datos de los anuarios del (INAMHI) como el caudal promedio de manera anual durante un periodo de diez años, donde se encontraron celdas en blanco para ciertos meses y se procedió a llenar utilizando el método de interpolación; de forma similar se obtuvieron los valores promedios de la profundidad o altura registrados, ver Anexo 12. Una vez obtenido el caudal promedio se hizo la relación con el área transversal (longitud por la altura aproximada del afluente) y de esta manera obteniendo las velocidades, ver Ilustración 35.

Además, es importante conocer que las mayores velocidades del flujo se desarrollan a un 20% de la altura debajo de la superficie del afluente. Para efectos de reforzar la información descrita anteriormente sobre los parámetros principales de una turbina hidrocínética y como inciden en el coeficiente de potencia se elaboró una matriz de contingencia, ver anexo 13.

4.1.2. Diseño de la turbina hidrocínética

4.1.2.1. Guía de elaboración del diseño paramétrico de la turbina

A continuación, se elabora una serie de pasos de manera descriptiva e ilustrativa para poder realizar la modelación paramétrica de la turbina.

4.1.2.1.1. Selección de datos del perfil

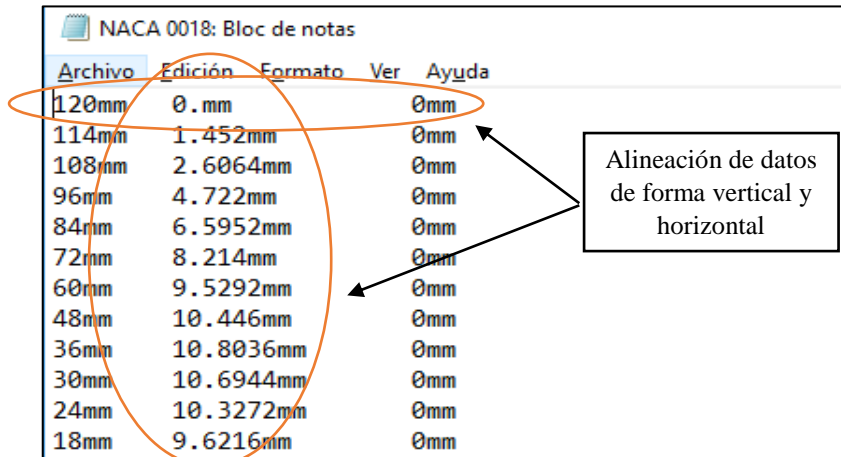
Seleccionado un perfil NACA y los datos de su geometría proporcionados en el programa “JavaFoil” (ejemplo: NACA 0018 – 0020, entre otros), ver ilustración 36. Luego se exporta en la plantilla de Excel de forma que estén los datos separados entre las celdas de filas y columnas, además añadiendo una columna de ceros. A continuación, se guarda el archivo en formato de texto “txt”; y se verifica que el archivo de texto este alineado de manera horizontal y vertical, ver ilustración 37.

Ilustración 36. Selección de datos del perfil.

The screenshot displays the JavaFoil software interface. The top section, titled "Geometría del perfil", contains a table of coordinates for the NACA 0020 profile. The table has two columns of x and y coordinates. A red circle highlights the table, and an arrow labeled "Datos" points to it. To the right of the table are input fields for "Nombre:" (NACA 0020), "Familia:" (NACA 4 digitos), "Numero de Puntos:" (61), "Espesor max t/c:" (20%), "Situación del espesor max xt/c:" (30%), "Curvatura max f/c:" (0%), "Situación de la curvatura max xf/c:" (1%), and "A-modificación:" (0). There is also a checkbox for "Modificar el perfil NACA cerrando el borde de salida" and a button "Crear un perfil". The bottom section, titled "Forma del Perfil", shows a 2D plot of the airfoil shape with a "Datos" label pointing to the coordinate table.

FUENTE: (AIRFOILTOOLS; 2018)

Ilustración 37. Alineación de datos del perfil.



The image shows a text editor window titled "NACA 0018: Bloc de notas". The menu bar includes "Archivo", "Edición", "Formato", "Ver", and "Ayuda". A table of data is displayed with three columns: the first column contains radii from 120mm down to 18mm, the second column contains thickness values, and the third column contains zero values. An orange oval highlights the first three columns. A callout box with arrows pointing to the first and second columns contains the text "Alineación de datos de forma vertical y horizontal".

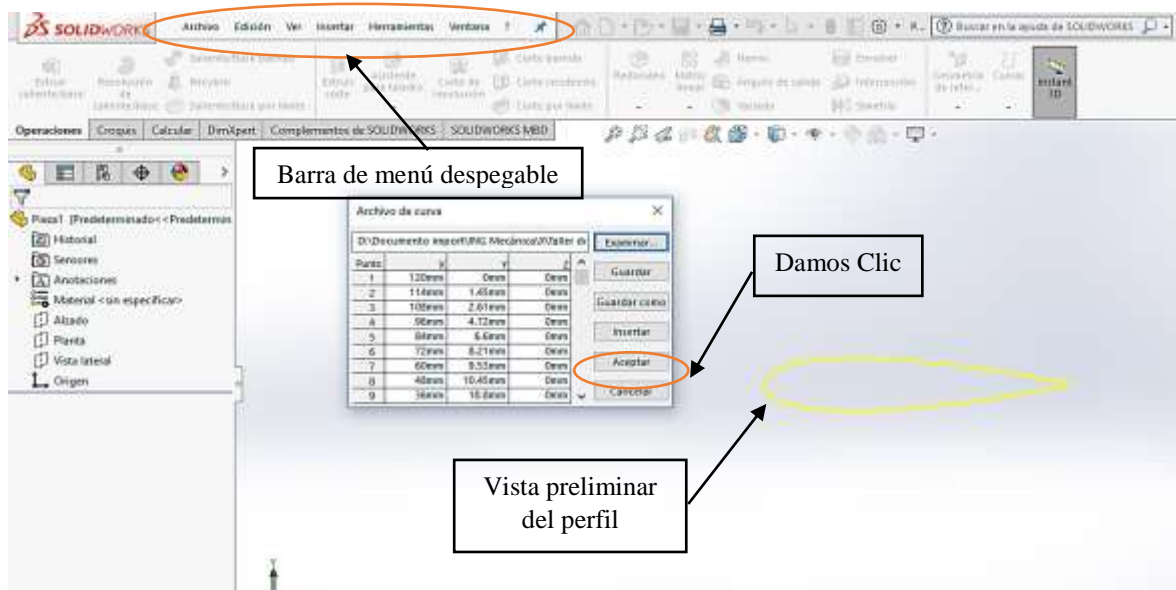
| | Edición | Formato | Ver | Ayuda |
|-------|-----------|---------|-----|-------|
| 120mm | 0. mm | | 0mm | |
| 114mm | 1.452mm | | 0mm | |
| 108mm | 2.6064mm | | 0mm | |
| 96mm | 4.722mm | | 0mm | |
| 84mm | 6.5952mm | | 0mm | |
| 72mm | 8.214mm | | 0mm | |
| 60mm | 9.5292mm | | 0mm | |
| 48mm | 10.446mm | | 0mm | |
| 36mm | 10.8036mm | | 0mm | |
| 30mm | 10.6944mm | | 0mm | |
| 24mm | 10.3272mm | | 0mm | |
| 18mm | 9.6216mm | | 0mm | |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.2. Importación del archivo de texto y creación del plano

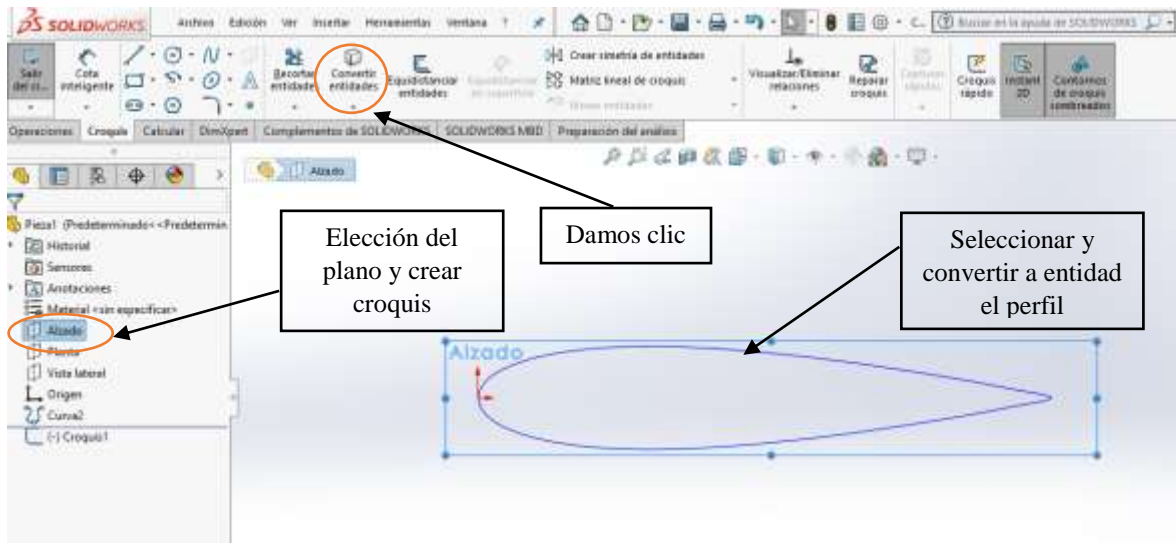
Se importa el archivo de texto al programa Solidworks, buscando en la barra de menú despegable la opción insertar/curva/curva por puntos XYZ, se despliega un cuadro y se da clic en la opción examinar e insertamos el archivo, luego damos en aceptar donde aparece el perfil como se observa en la ilustración 38. Al instante se crea un plano alzado (frontal) y vamos a la pestaña de comandos en la opción croquis/convertir entidades/seleccionamos el perfil/aceptar; ver ilustración 39.

Ilustración 38. Importación de los datos del perfil.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 39. Croquis del perfil.

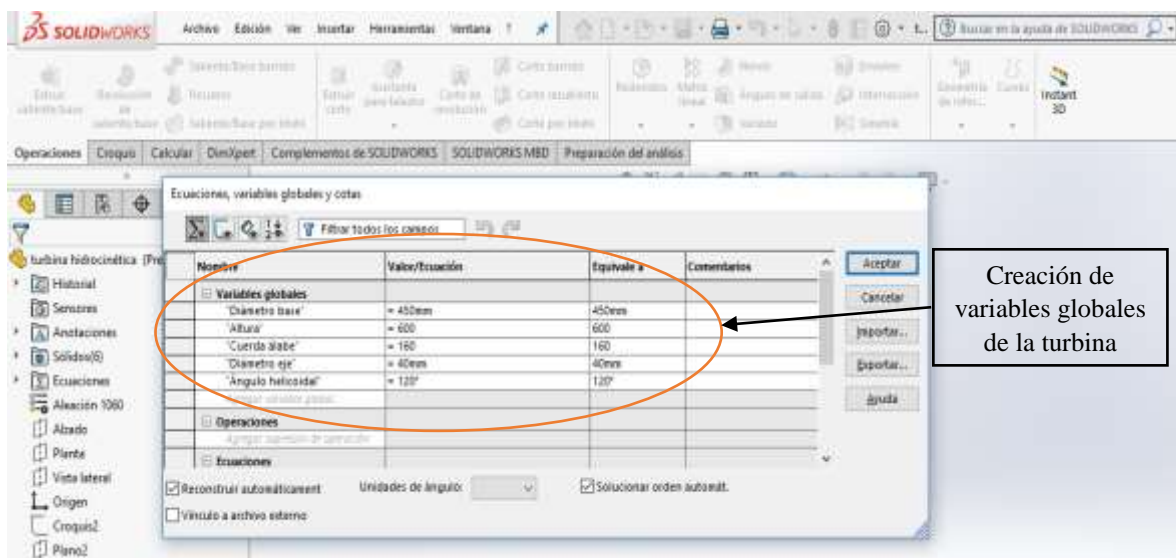


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.3. Selección de plano de trabajo y elaboración de tabla dinámica

Para obtener posteriormente la turbina en vista Isométrica se cambia el plano del “croquis1” a planta, dando clic derecho croquis 1/editar plano/seleccionar plano/aceptar. Después se crea los parámetros principales con variables globales de la turbina buscando en la barra de menú desplegable opción herramientas/ecuaciones/variables globales/aceptar; ver ilustración 40.

Ilustración 40. Creación de la tabla dinámica con las variables de la turbina.

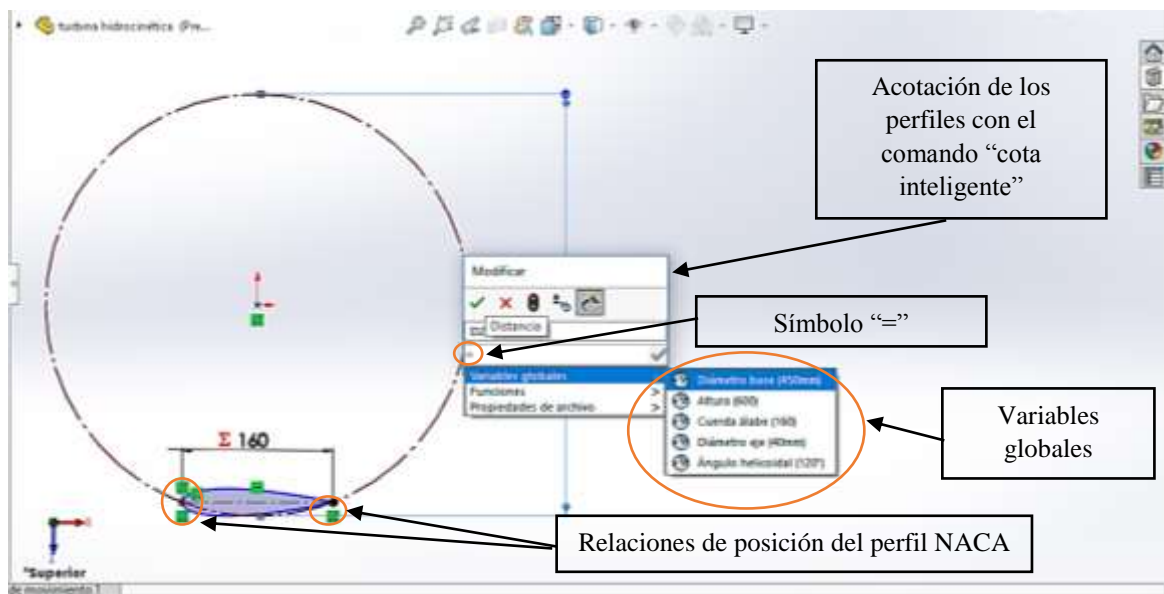


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.4. Croquis1 del perfil NACA y circunferencia

Se dirige a la pestaña de comandos opción croquis1 y se crea un círculo de perfil constructivo centrado en el eje de coordenadas y el perfil NACA con la relación de posición coincidente a su circunferencia, dando las dimensiones del círculo y el perfil situándose en la pestaña cota inteligente/seleccionando el perfil para acotar/escribiendo el signo =/variables globales/elegimos la variable correspondiente/aceptar, ver ilustración 41.

Ilustración 41. Acotación de croquis con variables globales.

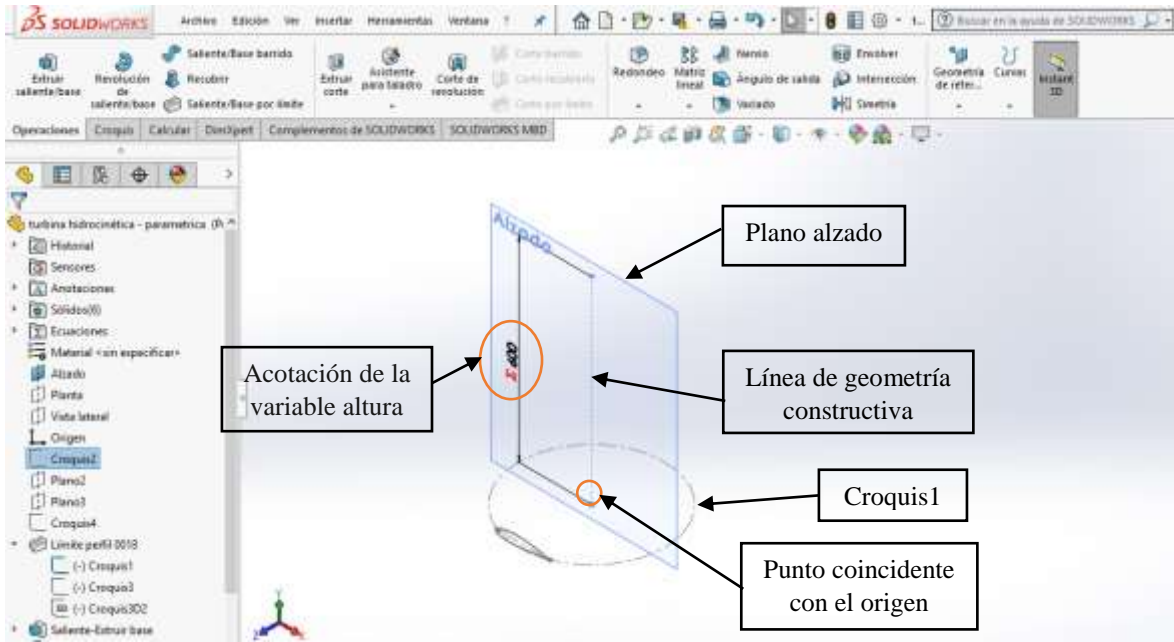


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.5. Elaboración del croquis2, plano1 y croquis3

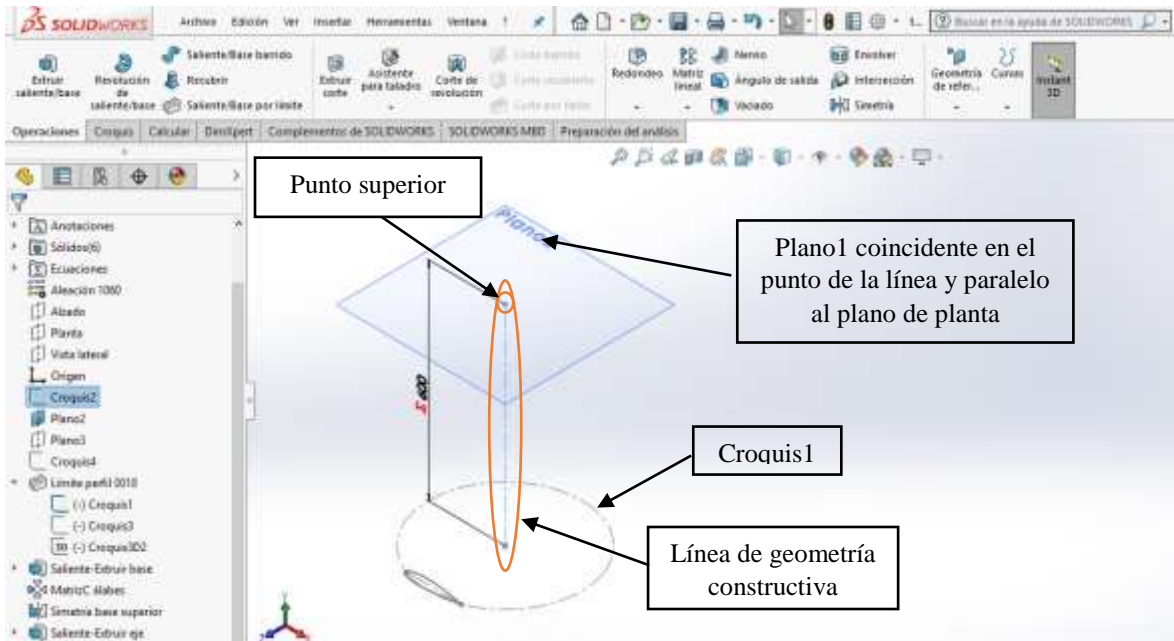
Se crea el croquis2 en el plano alzado insertando una línea de geometría constructiva coincidente en el origen del croquis1, luego se acota la línea con la variable global (altura), ver ilustración 42. Luego se crea un plano1 perpendicular al plano de planta, se dirige a la pestaña de comando operaciones/opción geometría de referencia/plano/primer referencia- eligiendo el punto superior de la línea del croquis2/segunda referencia- eligiendo el plano planta/aceptar; ver ilustración 43. Después se bosqueja un croquis3 en el plano1 creado, en este croquis3 se convierte la entidad del perfil NACA y círculo de geometría constructiva del croquis1, se establece sus respectivas relaciones de posición y se desplaza 120° el perfil NACA con la ayuda de la cota inteligente, ver ilustración 44.

Ilustración 42. Croquis2 con línea de geometría constructiva para la altura.



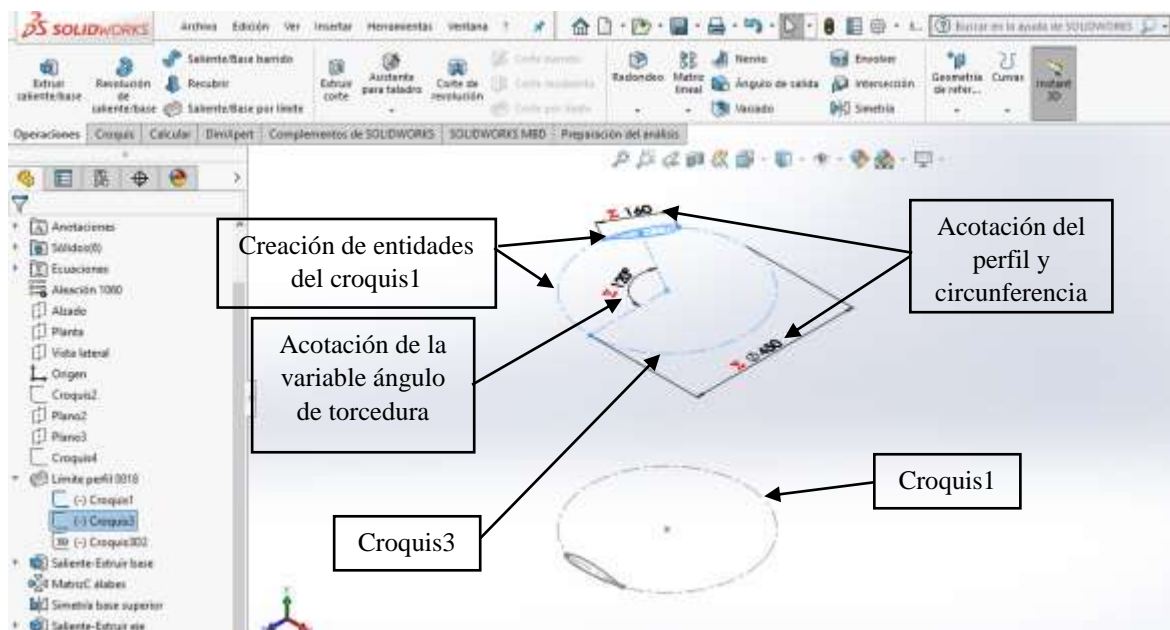
FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 43. Elaboración del plano1 perpendicular al croquis2.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 44. Bosquejo del croquis3.



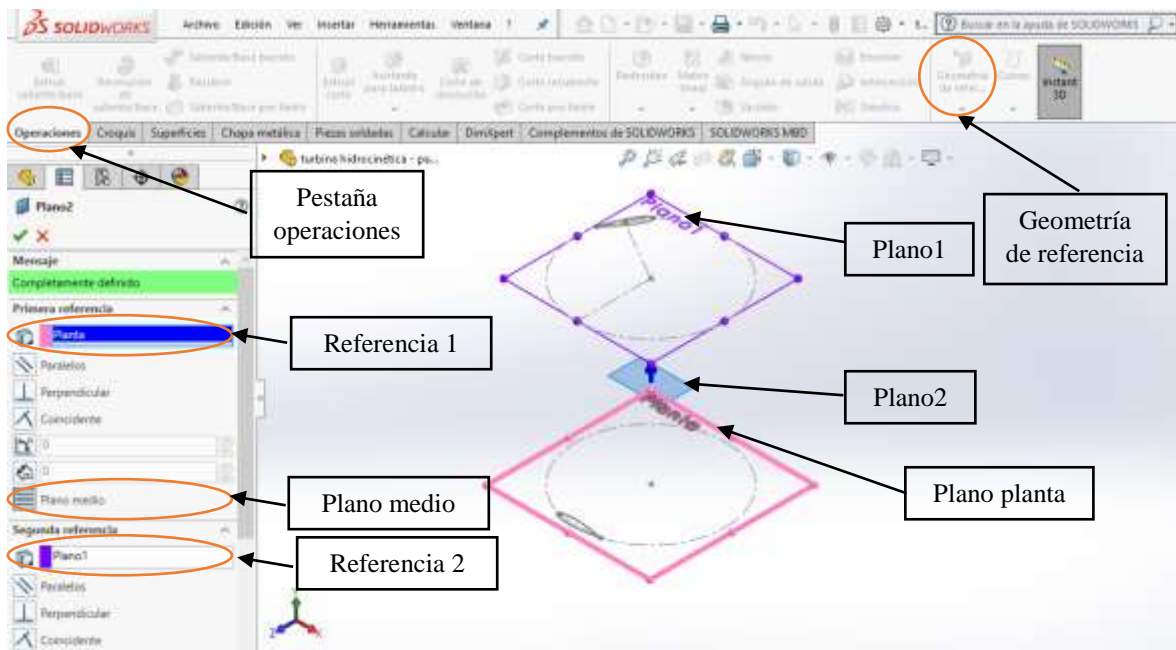
FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.6. Elaboración del plano 2 – 3 - 4, croquis4 - 5 - 6 y croquis 3D

Se crea un plano2 y en el mismo un croquis4 como punto de referencia para establecer la simetría de la altura del perfil NACA y no distorsionar su forma al cambiar esta variable, esto se lo ejecuta dirigiéndose a la pestaña de comandos/operaciones/geometría de referencia/plano; donde se desplegará una ventana, como primera referencia se ubica el plano planta y segunda referencia el plano1 anteriormente descrito, definiendo en la opción plano medio y se da clic en aceptar. De igual manera se define el plano3 como plano medio de referencia1 (Planta) y referencia2 (Plano2), plano4 también como medio con referencia1 (Plano2) y referencia2 (Plano1); creando en el plano3 - 4 los croquis5 y 6 respectivamente, ver ilustración 45.

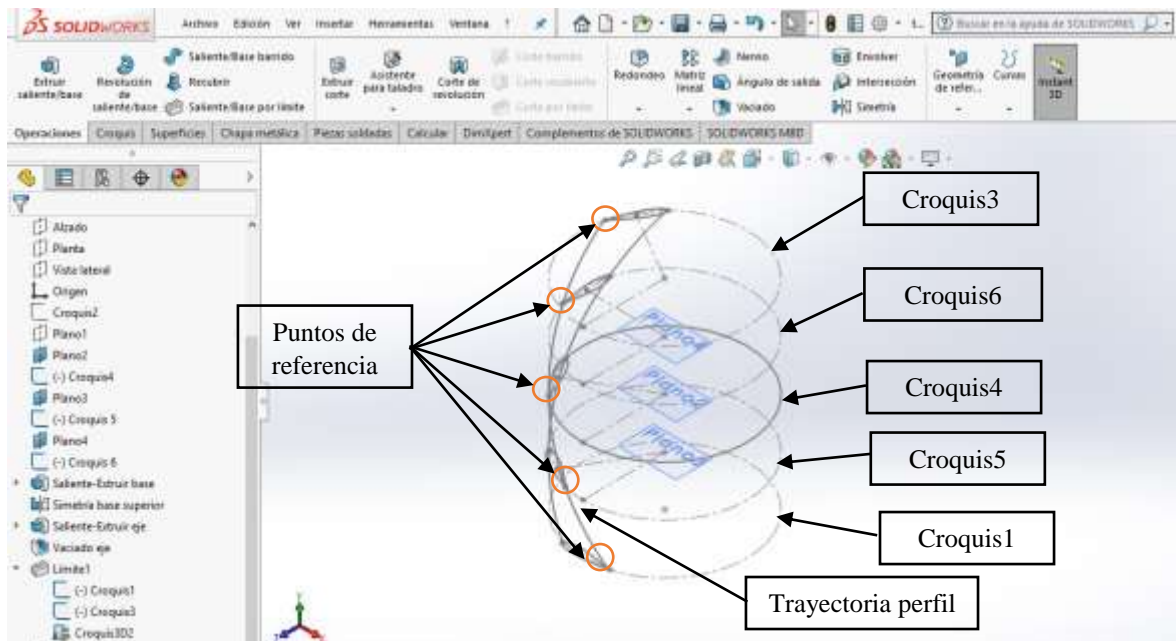
En la construcción del croquis 3D se dirige a la pestaña comando croquis/clic en el icono croquis/seleccionando croquis 3D, aparece un cursor con tres ejes para dibujar en las tres direcciones y se selecciona los puntos de referencia en ambos extremos de los perfiles NACA (croquis1, croquis4, croquis5, croquis6 y croquis3), realizando esto se crea una trayectoria para posteriormente convertir la solidez del perfil, ver ilustración 46.

Ilustración 45. Elaboración del plano2 y croquis4.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 46. Croquis 3D para la trayectoria del perfil.

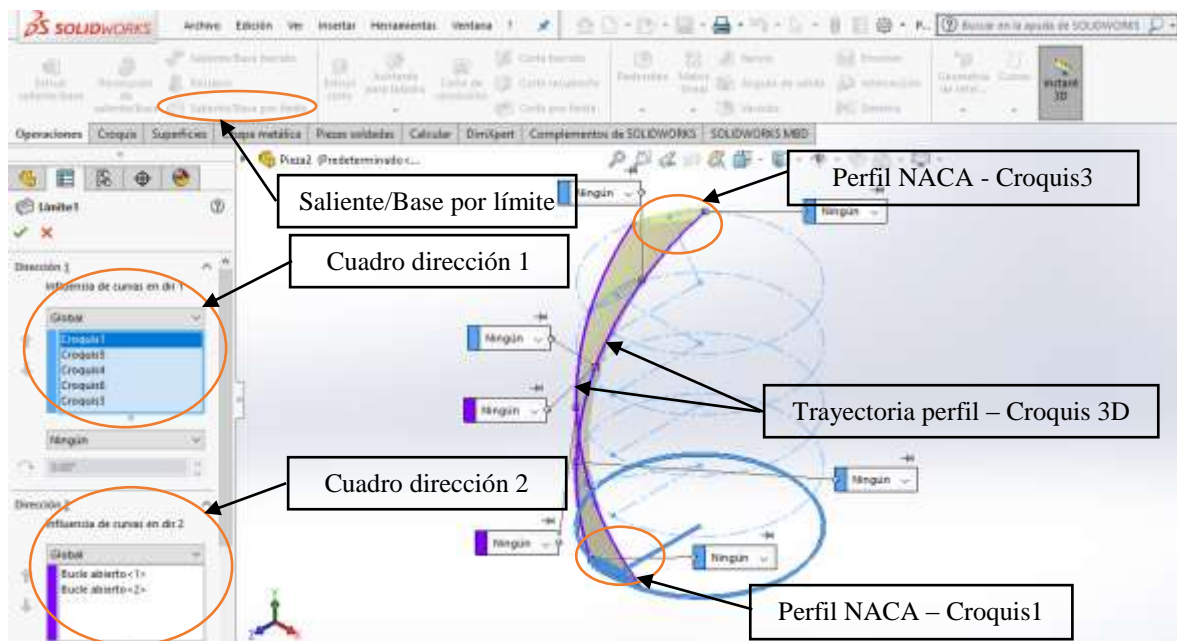


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.7. Construcción del perfil

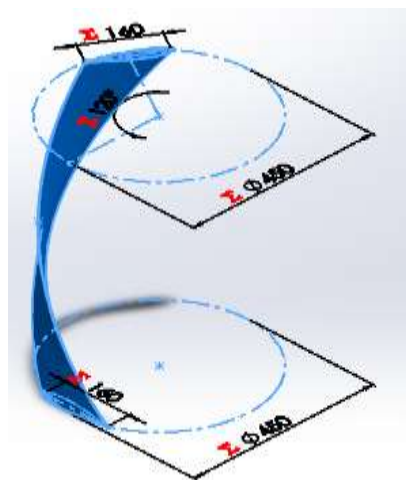
Para la construcción del perfil de forma tridimensional situándose en la pestaña de comandos/operaciones/Saliente-Base por límite, aparece un cuadro en donde se elige el perfil NACA (croquis1) hasta el último perfil (croquis3) para una dirección 1; ubicándose en el segundo recuadro dirección 2 seleccionando ambos extremos del perfil de la trayectoria (croquis 3D), ver ilustración 47. En la ilustración 48 se muestra la solidez del perfil.

Ilustración 47. Selección de los croquis para la solidez del perfil.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 48. Solidez del perfil con sus variables.

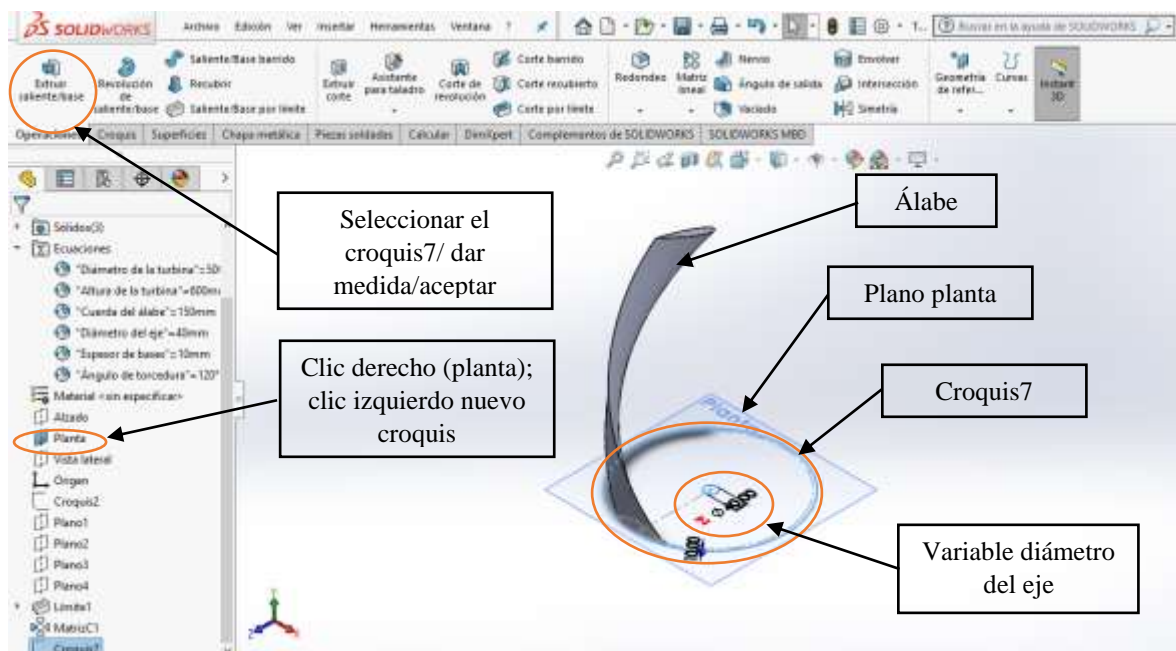


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.8. Extracción de la base, matriz circular del álabe y simetría de la base

Se crea un croquis7 dando clic derecho en el plano planta y damos clic izquierdo nuevo croquis; luego ubicándose en la pestaña comando croquis/círculo y dibujando desde el origen, con acotación de 10 mm de distancia de forma circular con respecto a la circunferencia del croquis1 para evitar que la punta inferior del álabe este fuera de la base, además agregando otro círculo en el centro del croquis7 acotándolo con la variable diámetro del eje; ver ilustración 49. Después ubicarse en la pestaña operaciones/extruir saliente-base/se da la medida que se requiere extruir/aceptar.

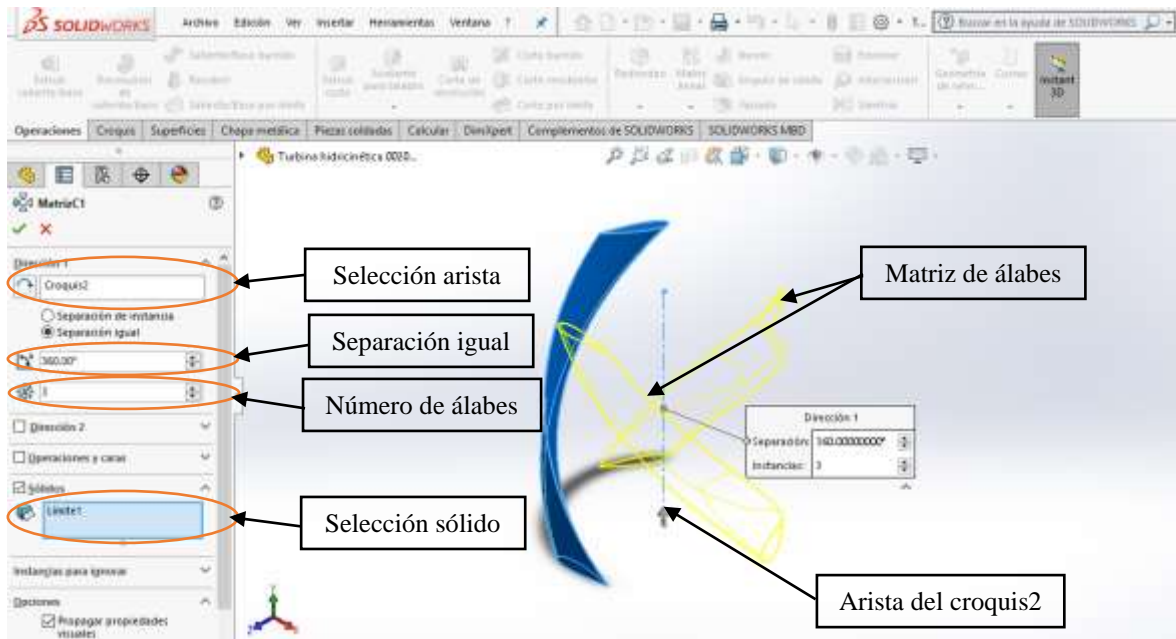
Ilustración 49. Croquis7 de la base.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

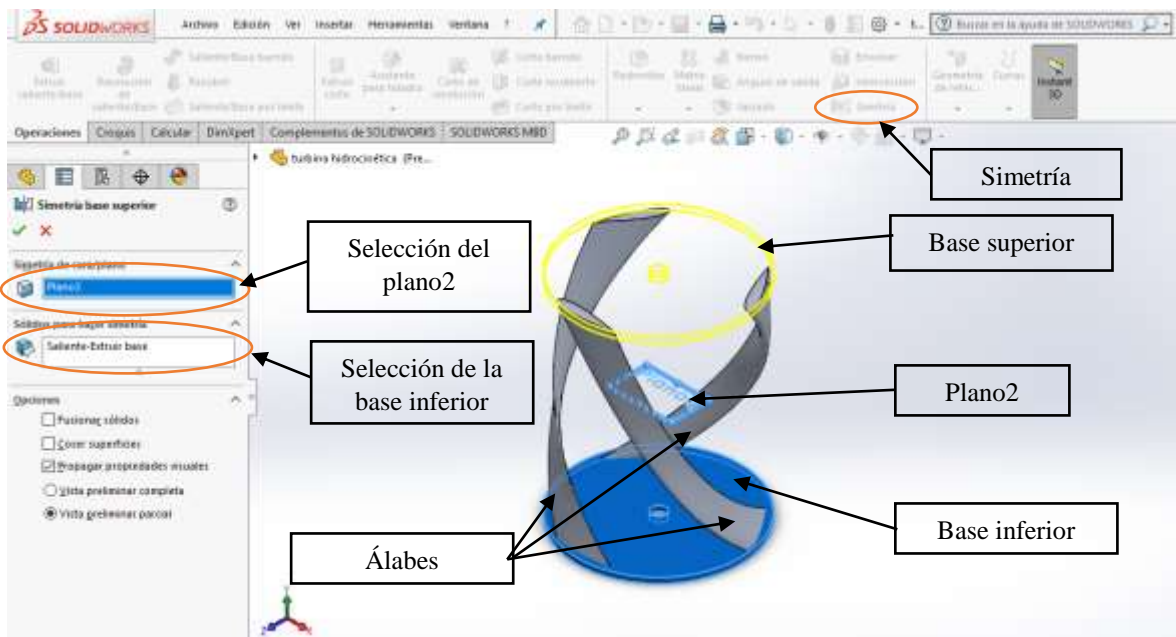
Ubicándose en la pestaña de comando operaciones/matriz lineal/matriz circular, se despliega un cuadro de opciones; seleccionando la arista del croquis2 para la dirección 1, separación igual de 360°, número de instancias 3 (número de álabes), marcando la opción sólidos y seleccionando el álabe (perfil NACA); ver ilustración 50. A continuación, se establece simetría de la base ubicándose en la pestaña de comandos/operaciones/simetría; aparece un cuadro, en la opción simetría de cara/plano/se elige el plano2 y en sólidos para hacer simetría se selecciona/la base inferior y aceptar; ver ilustración 51.

Ilustración 50. Matriz circular del álabe.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 51. Simetría de base.

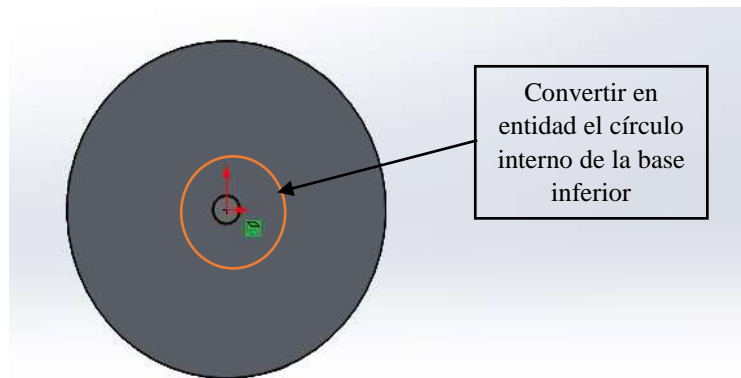


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.9. Extrusión de eje

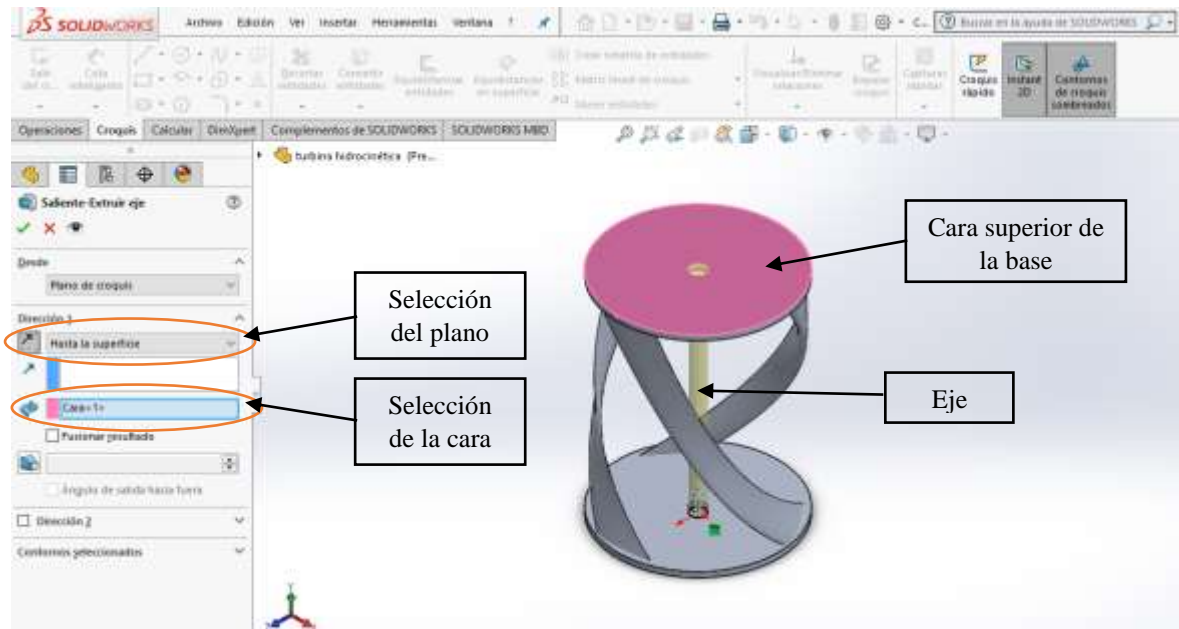
Se crea un croquis8 dando clic derecho en la parte posterior de la base inferior y clic izquierdo en nuevo croquis; al instante ubicándose en la pestaña comando /croquis/convertir entidades/seleccionando el contorno del orificio central de la base/aceptar; ver ilustración 52. Después se dirige a la pestaña de comando/operaciones/extruir saliente-base/aparece un cuadro donde se selecciona “hasta la superficie” y la cara de la base superior para la opción de dirección; ver ilustración 53.

Ilustración 52. Convertir entidad.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 53. Extrusión del eje.

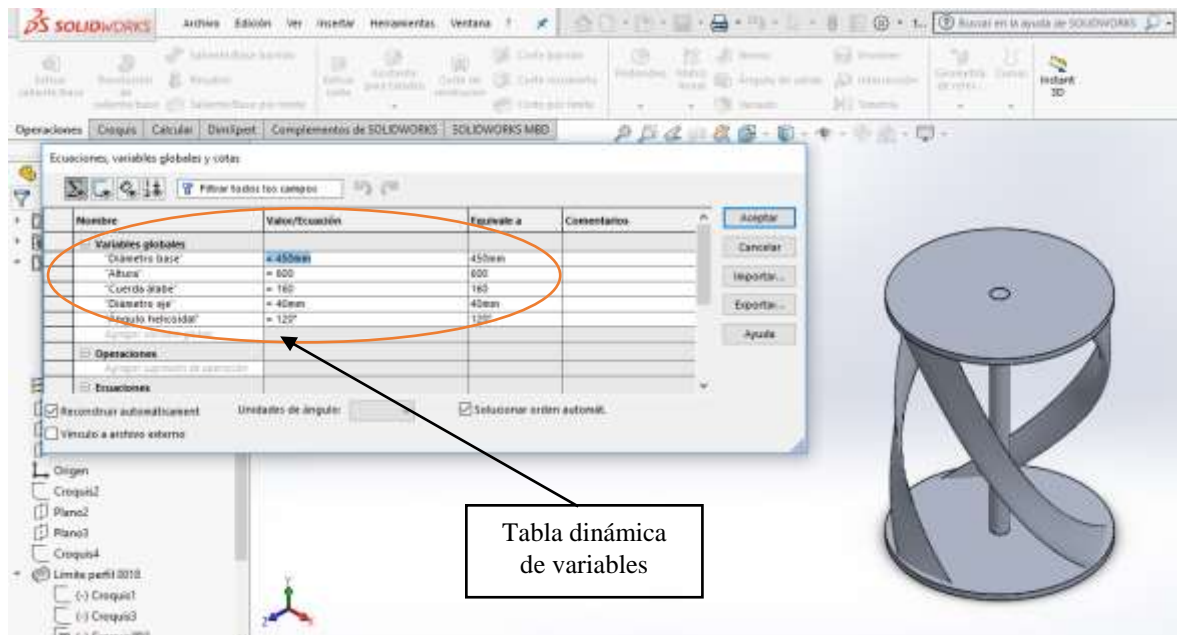


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.2.1.10. Modelo de la turbina finalizado

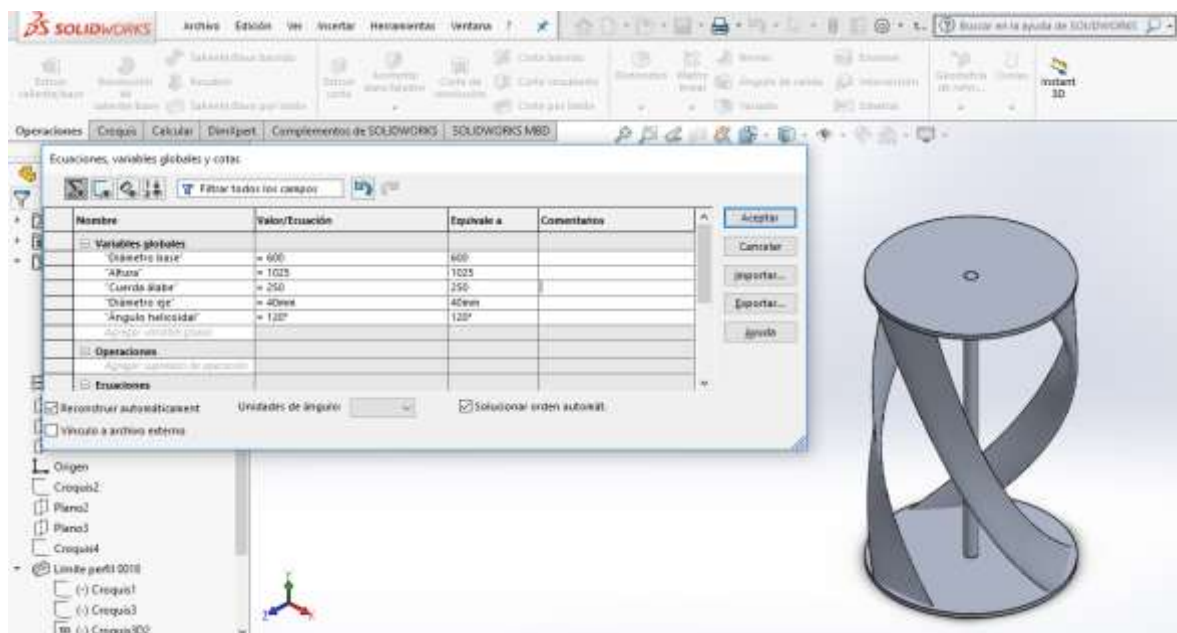
En la ilustración 54, se muestra el modelo paramétrico de la turbina finalizado con la elaboración de la tabla dinámica para el cambio de sus variables implícitas. En la ilustración 55, se observa el cambio cuantitativo de las variables.

Ilustración 54. Modelo paramétrico de la turbina.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 55. Demostración del cambio de variables.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

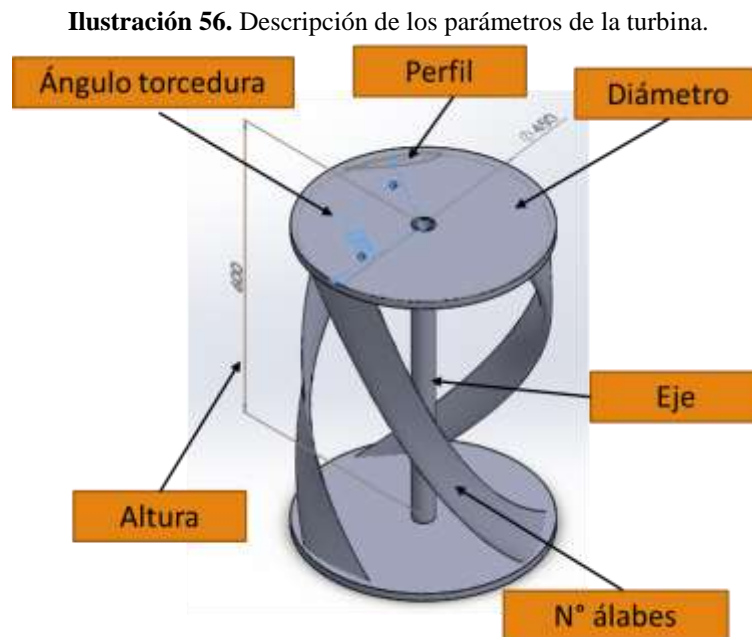
4.1.2.2. Diseño de la turbina hidrocínética con los parámetros preliminares

Con las especificaciones examinadas en la tabla (5) sobre los parámetros preliminares de la turbina hidrocínética, se escogieron los datos principales para mostrar cómo queda el diseño previo, en donde estos valores pueden ser modificados para el cambio de variables, ver tabla 9 e ilustración 56 donde se observan los parámetros descritos.

Tabla 9. Datos para el diseño base de la turbina.

| Datos | | Unidad |
|------------------------|-----------|--------|
| Perfil | NACA 0018 | - |
| Altura | 0.6 | m |
| Diámetro | 0.45 | m |
| Longitud cuerda álabes | 0.16 | m |
| N° de álabes | 3 | - |
| Ángulo de torcedura | 120 | ° |

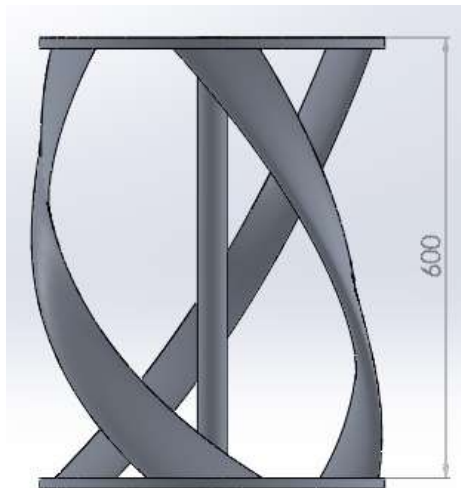
FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

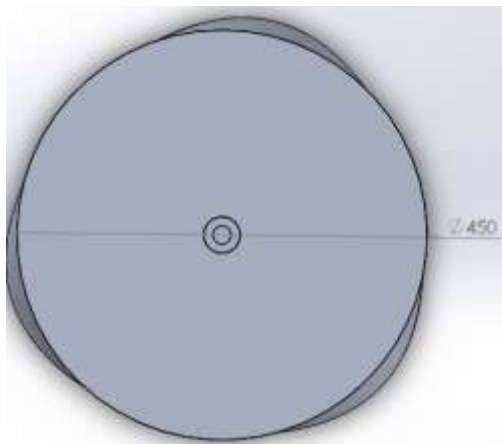
A continuación, se muestran dos diseños preliminares de la turbina hidrocínética de eje vertical con los datos expuestos en la tabla 8, la diferencia de un modelo con otro está en el diseño de la base, en una primera instancia se muestra una base circular, ver ilustración 57 y 58. En el segundo diseño se observa una base en forma de (Y), ver ilustración 60 y 61.

Ilustración 57. Vista frontal de la turbina (600 mm).



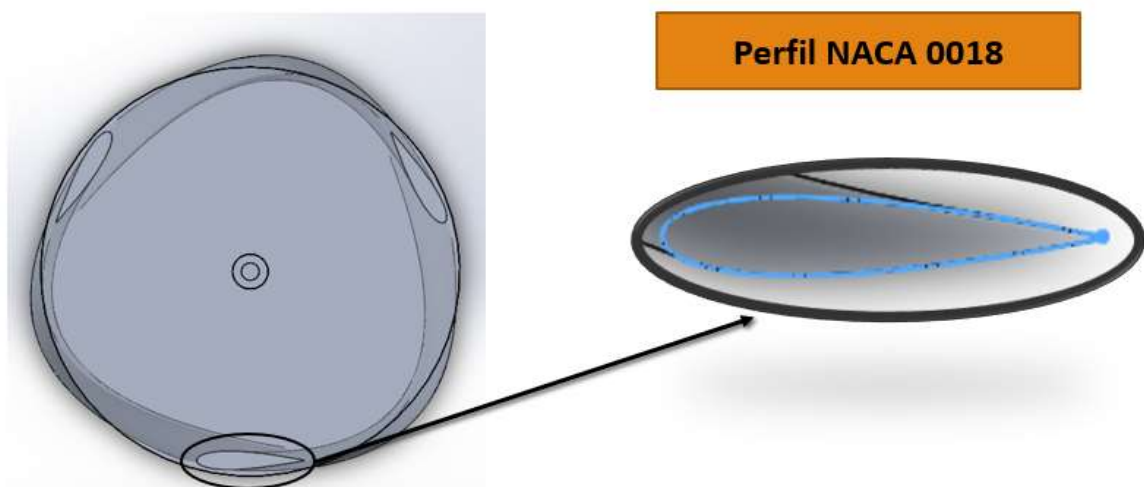
FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 58. Vista superior de la turbina (450 mm).



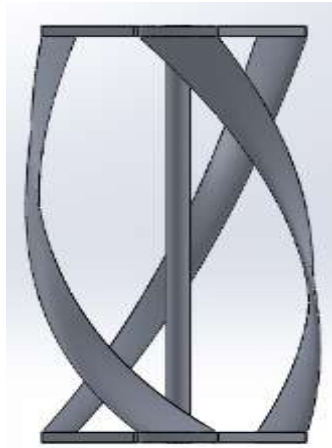
FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 59. Transparencia de la base para la visualización del perfil.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 60. Vista frontal de la turbina (Y).



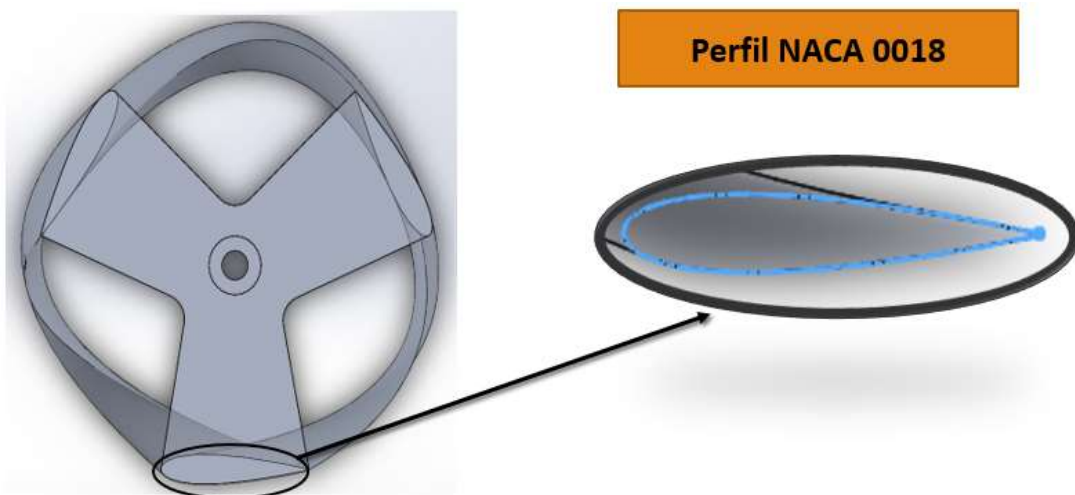
FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 61. Vista superior de la turbina (Y).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 62. Transparencia de la base Y para la visualización del perfil.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Donde los parámetros principales que conforman la turbina podrán ir variando en el diseño y realizar su respectivo análisis de cómo interfieren estas características en el aprovechamiento del recurso hídrico.

A continuación, se muestra la tabla 10, donde se describen las características de las diferentes turbinas de eje vertical. Y después se describen las ventajas y desventajas del porque se seleccionó el modelo de la turbina hidrocínética de eje vertical helicoidal.

Tabla 10. Rango típico de parámetros de las turbinas hidrocínéticas eje vertical.

| Parámetros | Turbina Darrieus | Turbina Savonius | Turbina helicoidal |
|--|--|---|---|
| Velocidad de flujo (m/s) | 2 - 5 | 2 - 5 | 0.5 – 5 |
| Profundidad de agua (m) | 0.5 – 2.5 | 0.5 – 0.86 | 0.35 – 2.75 |
| Ángulo de torcedura (°) | - | 10 - 15 | 60 - 120 |
| Ángulo de ataque (°) | 5 - 15 | 0.5 - 8 | 15 - 60 |
| Tip Speed Ratio (TSR) | 4 - 7 | 0.5 – 0.85 | 2 – 2.5 |
| Coeficiente de sustentación y arrastre | $C_d(0.01 – 0.2)$ $C_l (0.5 – 1.5)$ | $C_d (0.1 – 0.3)$ $C_l (0.05 – 0.2)$ | $C_d (0.1 – 0.3)$ $C_l (0.05 – 0.2)$ |
| Solidez (σ) | 0.45 – 0.5 | 2 - 3 | 0.15 – 0.35 |
| Número de Reynolds (Re) | 1.5×10^5 | $8 \times 10^5 - 2.5 \times 10^6$ | $8 \times 10^3 - 5 \times 10^6$ |
| Coeficiente de potencia (C_p) | 0.3 – 0.45 | 0.25 | 0.25 – 0.40 |
| Máx. Eficiencia (η) | 0.4 | 0.25 | 0.3 |
| Relación de aspecto (H/D) | 0.5 – 1.5 | 1.2 – 1.8 | 0.5 – 1.5 |

FUENTE: (KUMAR; 2017)

Ventajas

- Simplicidad en el diseño, menor coste en la instalación y mantenimiento de la turbina.
- El uso de equipos de flotación y ductos, que pueden ser ductos curvos o rectos en las turbinas de eje vertical por su forma cilíndrica, que además pueden ser usados para el arranque y flotación de la misma.
- Acoplamiento del generador, la caja de velocidades y todo el equipo eléctrico en un extremo del eje, accediendo a ser ubicados por encima de la superficie del agua, facilitando su mantenimiento y reparación.

- Manejo del perfil a bajas velocidades del fluido en un rango de 0.5 – 5 m/s como es el caso de la zona de influencia donde el recurso energético es de baja potencia.
- Su implantación en bajos caudales en un rango de profundidad de 0.35 – 2,75 m a diferencia de las otras turbinas que reflejan un nivel más alto.
- Se mantienen niveles de solidez baja lo que permite el crecimiento en la velocidad de punta de la pala o álabe.
- Su ángulo de torcedura o de giro le permite funcionar a velocidades de flujo más bajas en comparación con una turbina Darrieus y Savonius.

Desventajas

- Menor eficiencia de los niveles del coeficiente de potencia, en asimilación con una turbina Darrieus y de eje horizontal.
- Tener bajos niveles de solidez no permite obtener un mejor autoarranque de la turbina.
- No cuentan con coeficientes de sustentación y arrastre elevados.
- Pueden requerir de mecanismos externos para auto-arrancar.

4.1.3. Simulación de la turbina hidrocínética

La modelación de la turbina hidrocínética de eje vertical se la representa mediante una estructura de códigos y ecuaciones que permite interactuar con los diferentes valores o condiciones principales de la turbina, mostrando los resultados mediante gráficas para su análisis; esto se llevó a cabo en el programa de Matlab R2017a. En la simulación se recrea el comportamiento de la turbina hidrocínética en base a las mejores condiciones establecidas en la modelación; mediante el programa de Ansys 18.2 se consigue simular.

El uso del primer programa se basa en un Script desarrollado por Nick Stelzenmuller [30], para el proyecto de diseño y construcción de una turbina en la Universidad de Washington y fue reestructurado a los requerimientos de la presente memoria. Este modelo permite determinar el torque generado por la turbina a varios valores de la velocidad de punta del álabe (TSR o λ); además la incidencia de los vectores de empuje y arrastre para los diversos ángulos de los álabes (360°) alrededor del radio de giro de la turbina hidrocínética.

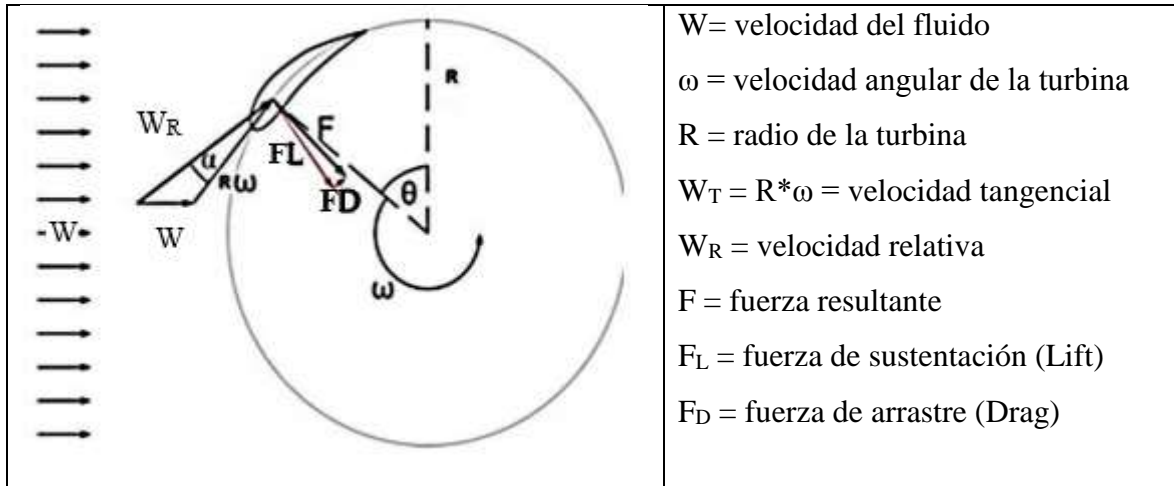
Para instrumento de simulación se utilizó el segundo programa para determinar el comportamiento de la turbina hidrocínética en las condiciones del fluido con las velocidades promedio obtenidas en los datos estipulados por el INAMHI para bajo potenciales como es la zona del río Quevedo.

4.1.3.1. Programa en Matlab

Se parte de condiciones dinámicas para la turbina estableciendo un rango de estudio en velocidad de punta del álabe ($\lambda=1$ hasta 2), en donde se define un criterio de selección de la lambda para no exceder valores en las revoluciones del rotor. Además de los datos del fluido (Río Quevedo), como son velocidad, densidad el agua, viscosidad dinámica, que son propios del fluido y constituyen restricciones; donde se puede variar el valor de la velocidad del fluido que no es constante de forma anual. Los valores como el ancho de la cuerda para un álabe, el radio y altura de la turbina se puede ir interactuando acorde a las necesidades para su respectivo análisis. Con esto se calcula dos vectores fila R (radio del rotor) y Θ (ángulo azimutal), de 360 elementos, que son evaluados para todas las posiciones alrededor de la circunferencia de la turbina hidrocínética.

La suma de los vectores en cada posición del álabe, se almacena en arreglos matriciales que luego se los transforma de coordenadas polares (sistema de referencia original R, Θ) a cartesianas. Se obtienen los vectores: Velocidad relativa (W_R) y el vector ángulo asociado (V_{r_angle}).

Ilustración 63. Triangulo de velocidades de la turbina.



FUENTE: (J. ANDERSON; 2012)

Se implementó una tabla de datos con los valores de los ángulos de variación del álabe (1° hasta 60° ; en intervalos de 1°) y con los números de Reynolds más cercanos acorde a las velocidades del fluido (100000 hasta 800000; en intervalos de 50000). Antes de crear una matriz con estas dos variables (ángulo de variación del álabe y Reynolds) se crea una matriz en Excel por separado de los coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D), ver anexos 14 y 15; estos coeficientes se los determina con el programa Javafoil, para un margen de Reynolds adaptado a la necesidad del proyecto.

Luego se creó la matriz con las dos variables antes mencionada y se interpolan los coeficientes de empuje con los vectores resultantes (W_R) y el (V_{r_angle}), utilizando la instrucción del Matlab “interp2”. De esta forma se obtiene los coeficientes de sustentación (C_L) para cualquier valor dentro de los límites definidos en la tabla de ángulos de variación del álabe y el rango en la tabla número de Reynolds, se realiza de manera similar para el coeficiente de arrastre (C_D).

Con los nuevos (C_L) y (C_D), se calcula las fuerzas de sustentación (F_L) y arrastre (F_D). Esto se ejecuta para todas las posiciones de los álaves alrededor de la circunferencia de la turbina

hidrocinética y se guardan los resultados en arreglos que luego se grafican. Este procedimiento y valores permiten calcular el torque total.

Con la obtención del torque total y velocidad angular se procede a realizar la relación de la potencia que puede extraer la turbina del fluido con la potencia que entrega el fluido; de esta manera graficar el coeficiente de potencia (C_p) vs λ , potencia de la turbina vs λ , entre otras graficas que son de gran interés para su respectivo análisis y apoyo para el cumplimiento de los objetivos de esta memoria. El Script del programa adaptado a los requerimientos se encuentra en el anexo 16.

4.1.3.1.1. Resultados del modelamiento para la turbina hidrocinética por medio del script de Matlab

Se interpretan los resultados del modelamiento en condiciones dinámicas de la turbina hidrocinética en el Script reestructurado de Matlab, se elabora una tabla donde están las configuraciones de la turbina y condiciones del fluido para optar por el mejor coeficiente de potencia (C_p) alcanzado de entre todos los modelamientos realizados, de esta forma obteniendo en las ilustraciones posteriores los valores e interpretación de las gráficas paralelamente a la mejor configuración de la turbina.

Con este modelamiento se discretiza los parámetros más influyentes en el rendimiento para facilitar resultados y a su vez reduciendo tantas simulaciones, para sólo simular las de mayor impacto notando su comportamiento en el dominio computacional, de esta forma economizando tiempo y recursos.

En este apartado de resultados solo se describen e ilustran las gráficas pertinentes al mejor rendimiento estipulado en la modelación de la turbina, definiendo como criterio que un mejor rendimiento es aprovechar los bajos recursos hídricos para extraer una mayor potencia del fluido en menores revoluciones del rotor.

Donde el procedimiento de modelación se ejecuta para el estudio de un álabe que gira 360° alrededor del rotor entre un rango de velocidades del fluido, comprendido entre 1 hasta 2.5 m/s, variando las dimensiones (diámetro, altura y longitud de la cuerda del álabe) en las diferentes velocidades y probando los perfiles NACA 0018 - 0020; destacando que la

longitud de la cuerda tiene gran incidencia en el rendimiento (C_p) para altas y bajas velocidades del fluido.

Además, el perfil NACA 0020 da mejores prestaciones al tener mejores coeficientes de sustentación (C_L). Para este perfil se amplió el rango de la matriz de coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) para Reynolds de 10000 hasta 800000 en una igual amplitud de ángulo de ataque (1° hasta 60°); razón por el que se pueden dar situaciones reales de velocidades del fluido menor a 1 m/s que es un factor implícito en el estudio de Reynolds, ver anexos 17 y 18.

Las demás configuraciones realizadas se observan en el anexo 19 por medio de una matriz de parámetros. A continuación, en la tabla 11 se muestra la diferencia de eficiencia entre los perfiles NACA 0018 y 0020 variando la longitud de su cuerda a varias velocidades.

Tabla 11. Descripción de configuraciones usadas en el Script de modelamiento.

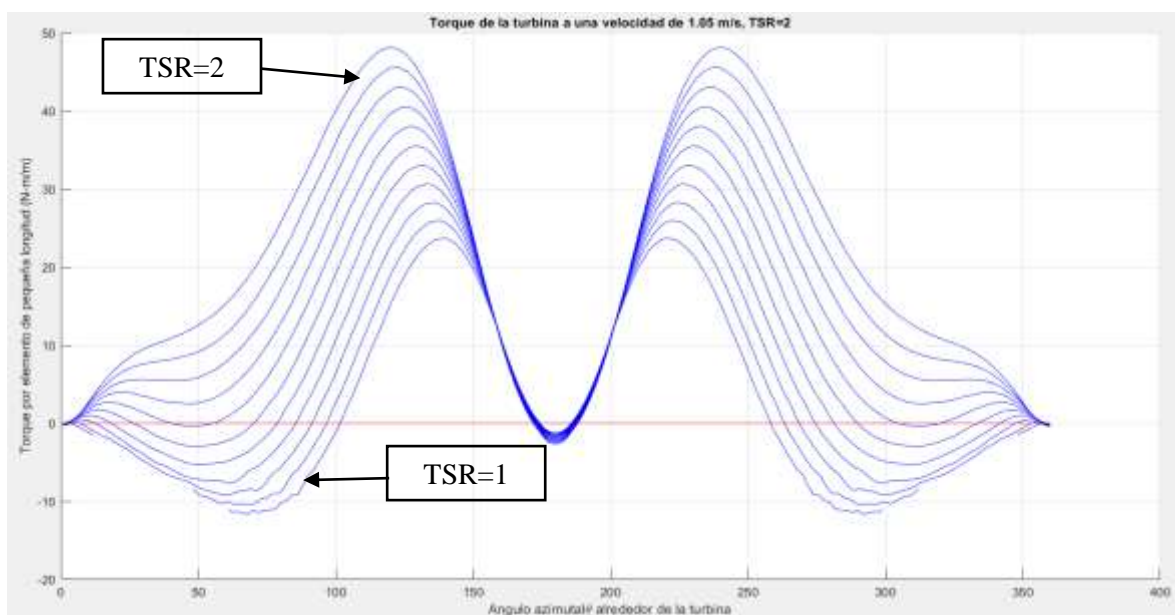
| Descripción – NACA 0018 | | | | | Resultados | | |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------|---------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------|
| Velocidades [m/s] | Longitud de cuerda [m] | Diámetro [m] | Altura [m] | Torque [N.m] | Potencia fluido [Watt] | Potencia turbina [Watt] | C_p |
| 1.05 | 0.10 | 0.5 | 0.6 | - | - | - | - |
| 1.4 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 19 | 411.6 | 170 | 0.41 |
| 1.9 | 0.15 | 0.5 | 0.6 | 36.7 | 1028 | 446.3 | 0.43 |
| 2.5 | 0.18 | 0.5 | 0.6 | - | - | - | - |
| 1.05 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 10.15 | 173.64 | 72.44 | 0.41 |
| 2.5 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 38.78 | 2343 | 659.2 | 0.28 |
| Descripción – NACA 0020 | | | | | Resultados | | |
| 1.05 | 0.10 | 0.5 | 0.6 | 10.47 | 173.64 | 74.75 | 0.43 |
| 1.4 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 23.98 | 411.6 | 214.8 | 0.52 |
| 1.9 | 0.15 | 0.5 | 0.6 | 47 | 1028 | 615.8 | 0.58 |
| 2.5 | 0.18 | 0.5 | 0.6 | - | - | - | - |
| 1.05 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 12.95 | 173.64 | 92.47 | 0.53 |
| 2.5 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 51.34 | 2343 | 872.8 | 0.37 |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Con los resultados de la tabla 11 se discriminaron algunas configuraciones para el dimensionamiento de la turbina, el perfil NACA 0018 refleja bajas prestaciones en el coeficiente de sustentación que produce un menor rendimiento, además un perfil de 6-dígitos es descartado al generar alto arrastre. También una longitud de cuerda mayor a 0.15 metros no se definen completamente los coeficientes de sustentación y arrastre alrededor del rotor a velocidades superiores de 1.6 m/s; donde se establece una longitud de cuerda del álabe de 0.12 metros con la finalidad de aprovechar mejores rendimientos para velocidades altas y bajas del fluido.

Las siguientes gráficas muestran los resultados de modelación de la tabla 11, con los parámetros de la turbina con perfil NACA 0020 y longitud de la cuerda (0.12 m). La ilustración 64, describe cómo se desarrolla el torque sin manifestar alteraciones o discontinuidades a lo largo del giro de la turbina para velocidades de punta de 1.2 hasta 2. La velocidad de punta (TSR=1-1.1) muestran discontinuidades en el torque, que provocaría pérdidas del rendimiento en estos puntos.

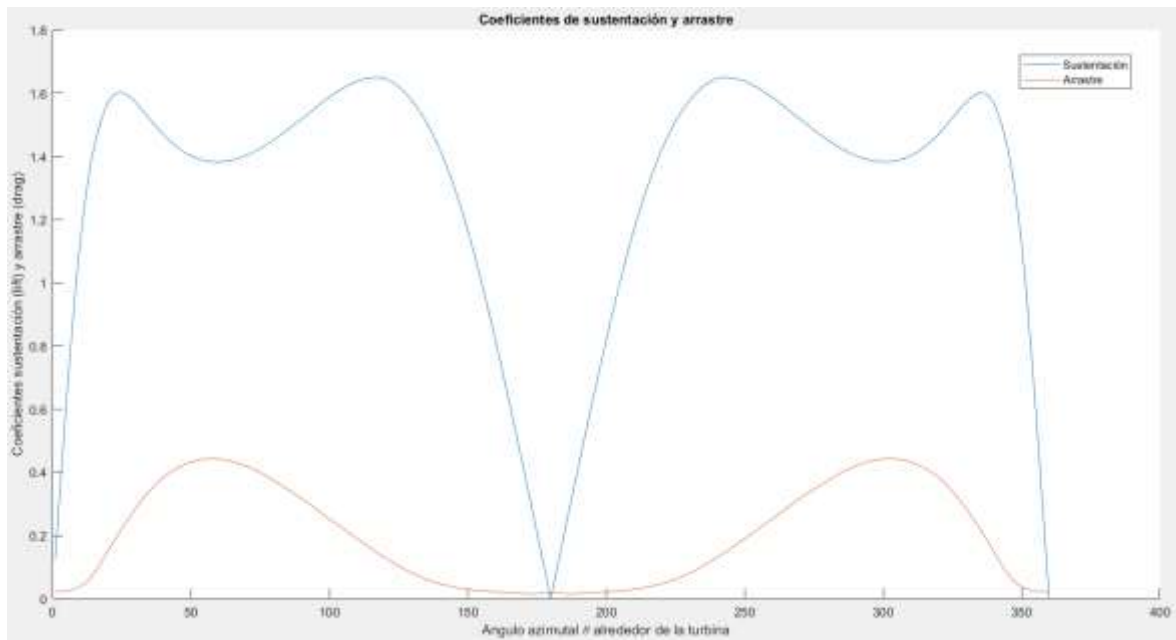
Ilustración 64. Torque por elemento desarrollado alrededor de la turbina (1.05 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

En la ilustración 65, muestra el comportamiento de los coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D), que se encuentran completamente desarrollados alrededor del giro de la turbina. Este resultado se lleva a cabo para velocidad del fluido de 1.05 m/s.

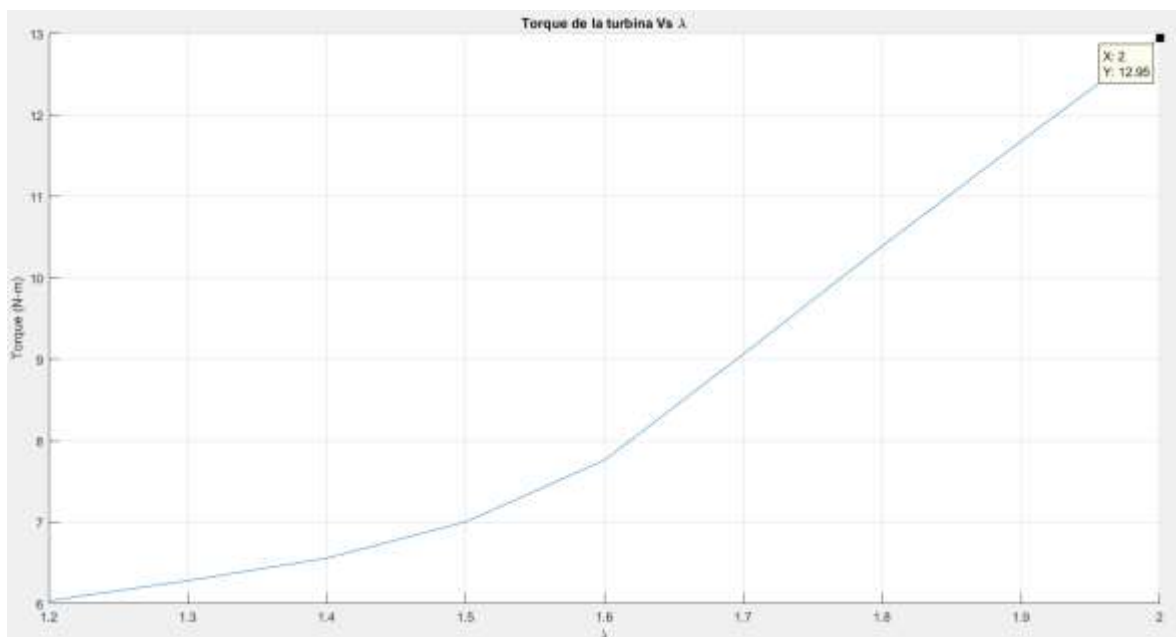
Ilustración 65. Coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) a (1.05 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

La ilustración 66, describe el torque total que se genera en la turbina para las diferentes velocidades de punta del álabe (TSR o λ). Para una lambda igual a dos ($\lambda=2$) se obtiene un torque de 12.95 N-m. De igual manera se observan los demás valores de torque para el resto de lambdas.

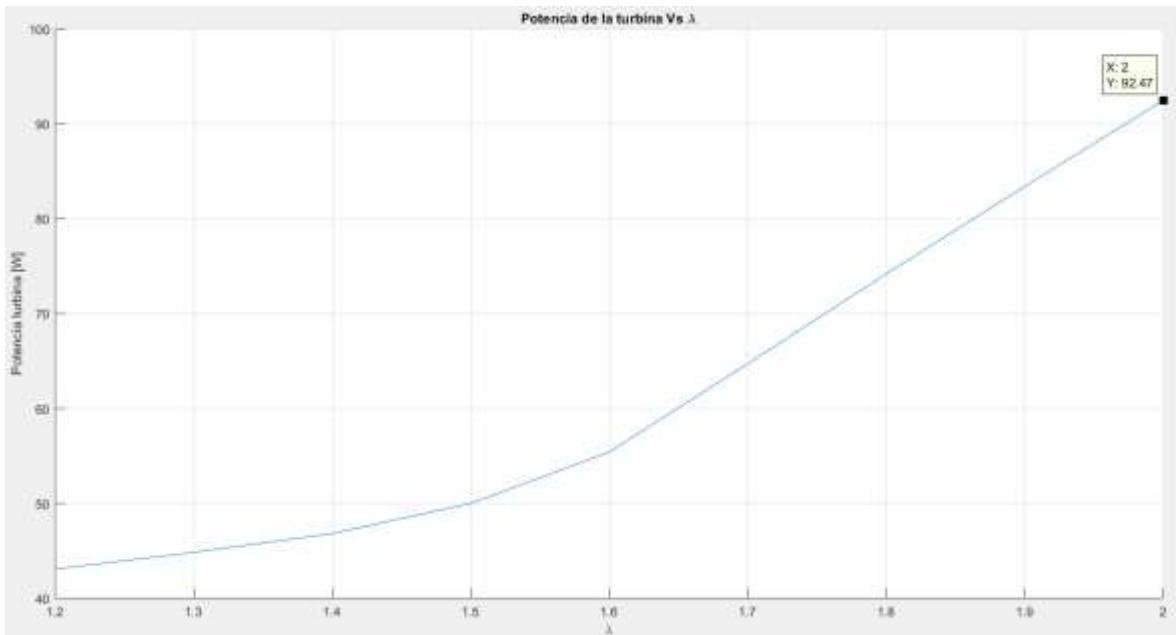
Ilustración 66. Torque total de la turbina (1.05 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

En la ilustración 67, se representa la potencia extraída por la turbina de 92.47 Watts para velocidad de punta (TSR=2).

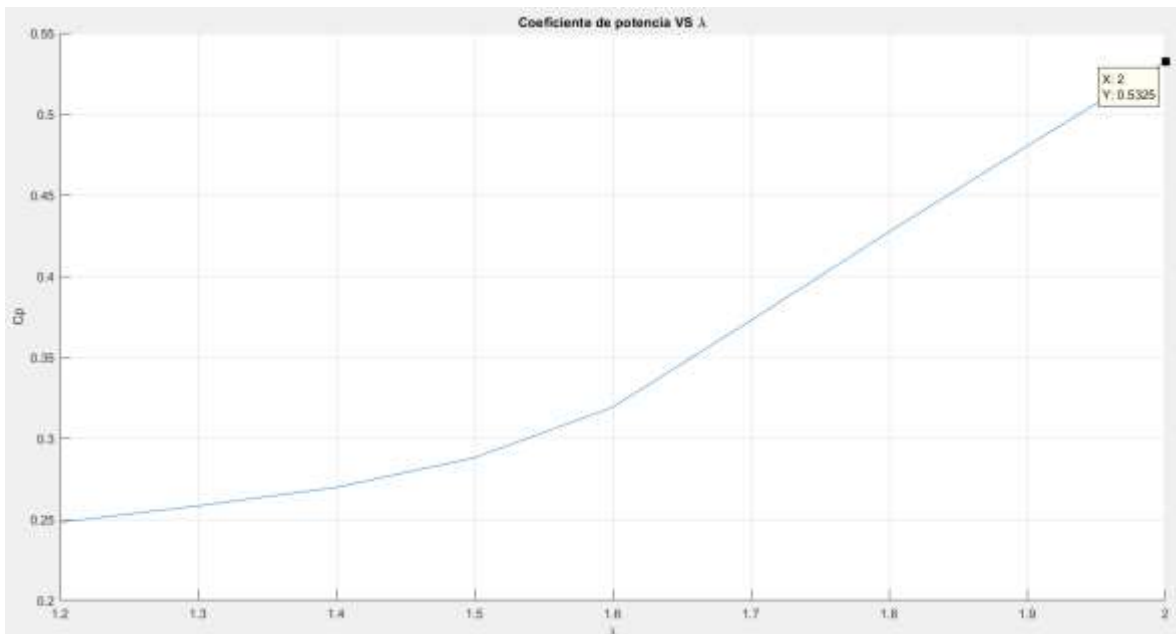
Ilustración 67. Potencia extraída de la turbina (1.05 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Presentando en la ilustración 68, el coeficiente de potencia ($C_p=0.53 =53\%$) para velocidad de punta (TSR=2).

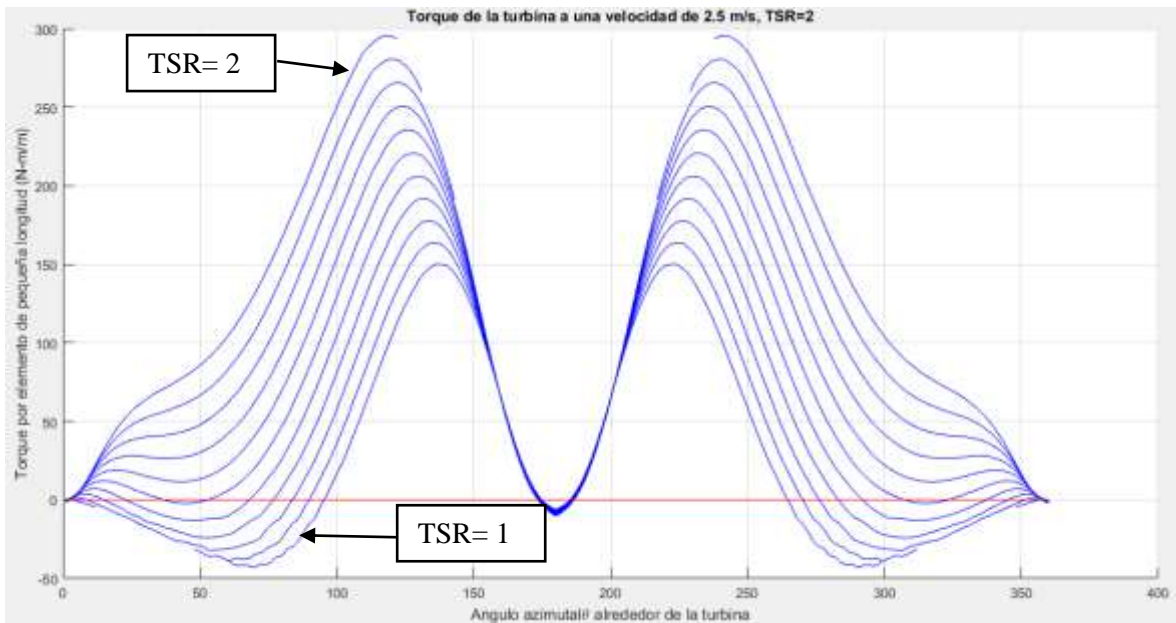
Ilustración 68. Coeficiente de potencia (1.05 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

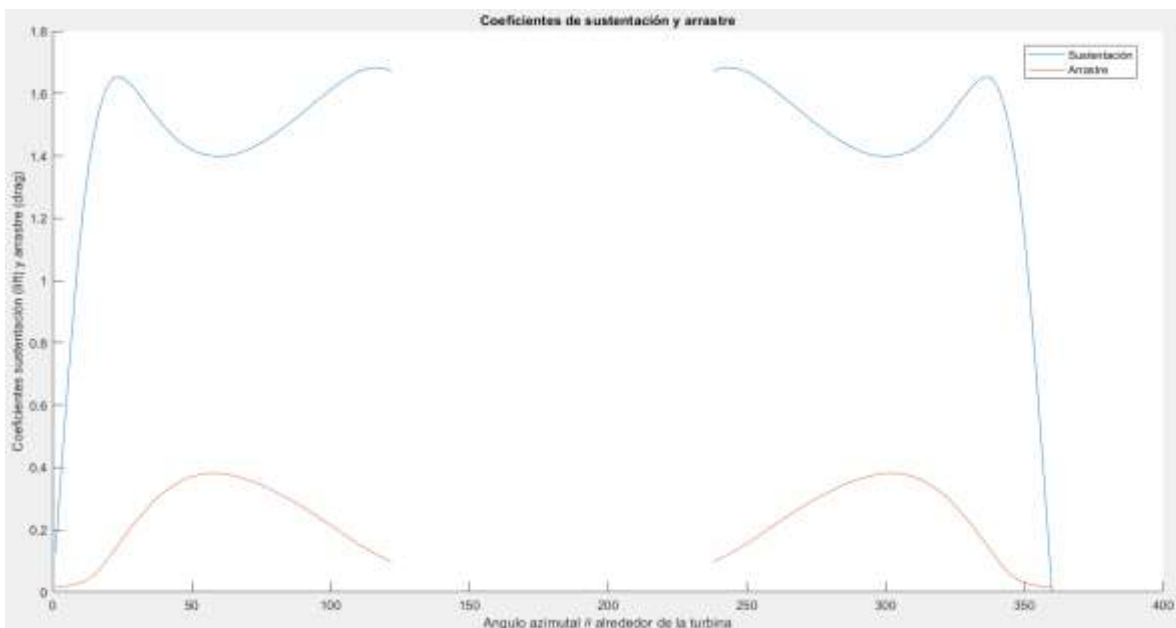
En condiciones de velocidad de flujo 2.5 m/s se muestran las siguientes gráficas, con la finalidad establecer un perfil que aproveche el recurso hídrico a bajas y altas velocidades. La ilustración 69, describe el torque que muestra discontinuidades para velocidades de punta ($\lambda=1$ hasta 1.1 y $\lambda=1.7$ hasta 2). En la ilustración 70, también se observa la discontinuidad en los coeficientes de sustentación y arrastre.

Ilustración 69. Torque por elemento (2.5 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

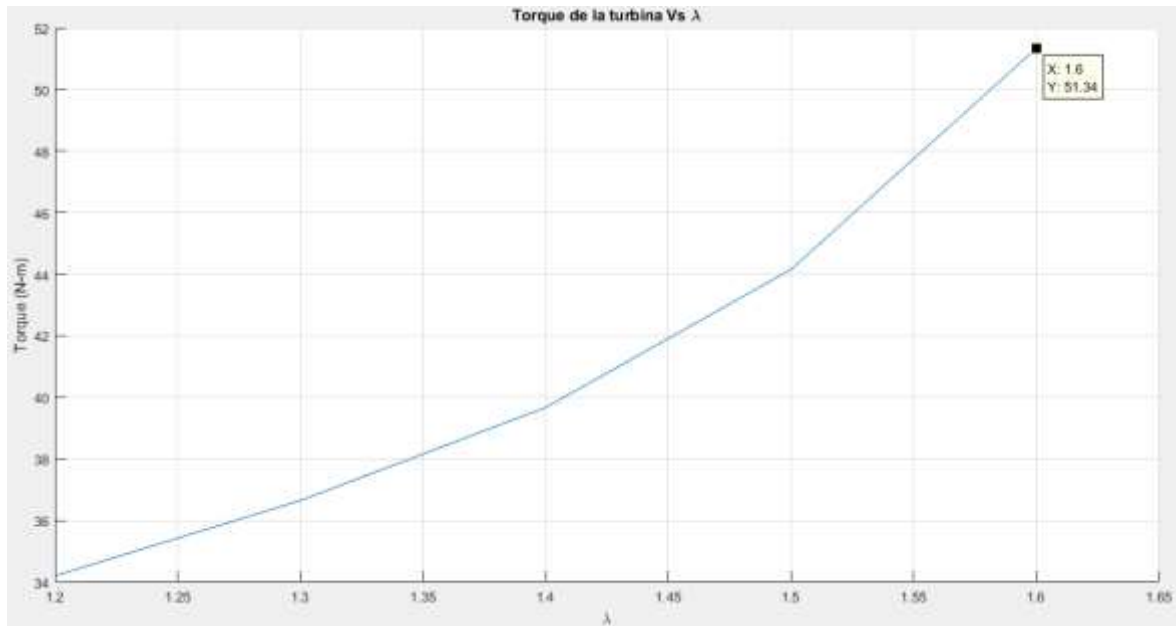
Ilustración 70. Coeficiente de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) a (2.5 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Se presenta en la ilustración 71, el torque de la turbina para un rango de velocidad de punta en el álabe. Para un TSR = 1.6 se genera un torque igual a 51.34 N-m.

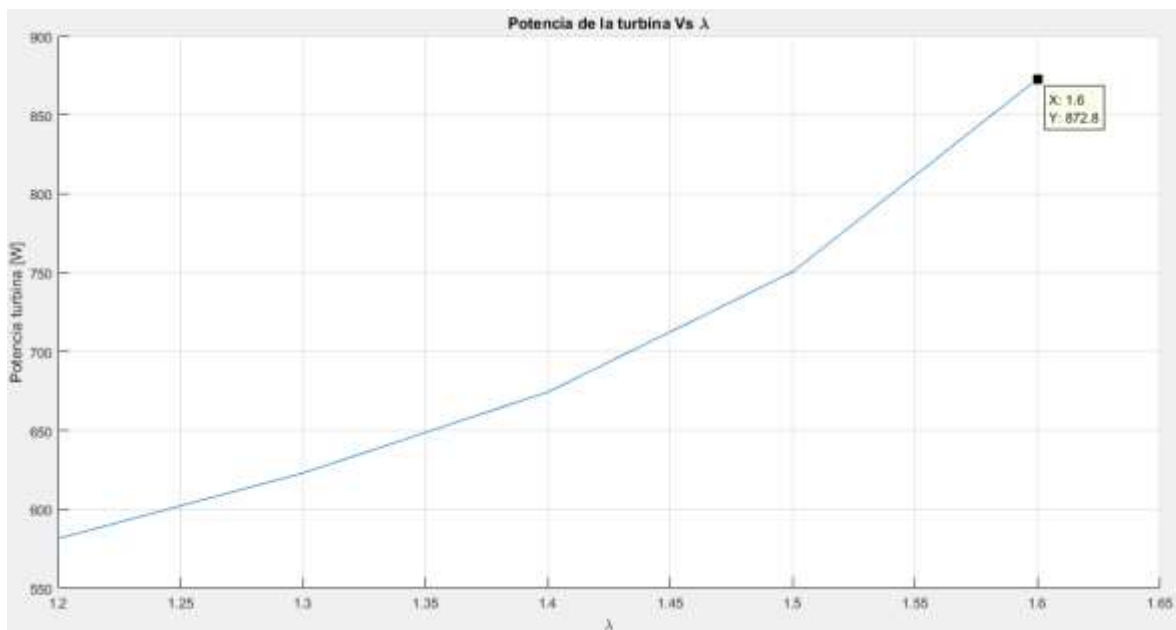
Ilustración 71. Torque total de la turbina (2.5 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

La ilustración 72, describe la potencia que se extrae del fluido por medio de la turbina igual a 872.8 Watts para $\lambda=1.6$ máxima generada con las condiciones estipuladas.

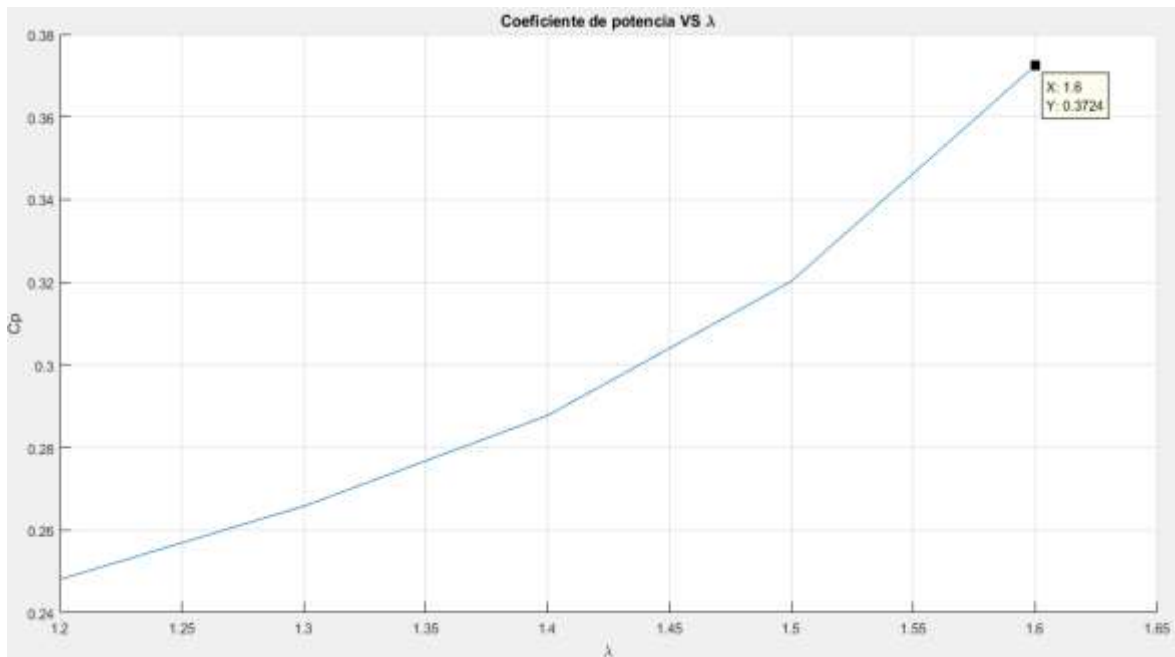
Ilustración 72. Potencia extraída de la turbina (2.5 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Con los parámetros establecidos en la turbina y la condición máxima del fluido se obtiene un coeficiente de potencia igual a (0.37=37%) para un valor lambda de 1.6, descrito en la ilustración 73. A pesar de no desarrollarse completamente los coeficientes por la longitud de la cuerda del álabe, se logra aprovechar un rendimiento entre un rango de velocidades de punta del álabe (λ).

Ilustración 73. Coeficiente de potencia (C_p) (2.5 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.3.2. Simulación de la turbina hidrocínética de eje vertical helicoidal

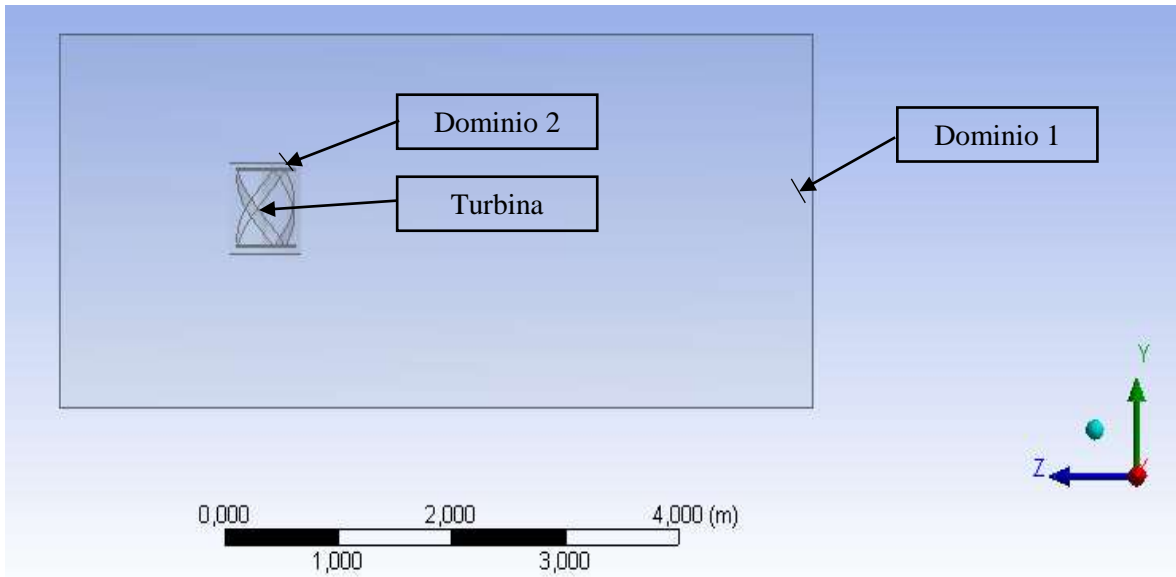
4.1.3.2.1. Geometría e importación del modelo – Geometry

En el dominio computacional la geometría del modelo es una parte clave, para ello se implementó dos volúmenes de fluidos, uno que está en rotación que contiene a la turbina con su propio volumen de control y uno fijo para analizar el comportamiento de la turbina con las condiciones del fluido, ver ilustración 74. La turbina hidrocínética helicoidal a simular consta de tres y cuatro álabes tipo NACA 0020 con 0.12 m de longitud de cuerda, con ángulo de torcedura a 120° y espaciados al mismo ángulo para un rotor de 0.5 m de diámetro por 0.6 m de alto, ver ilustración 75.

El dominio computacional se diseña tomando como referencia el diámetro (D) de la turbina de 0.5 m y su altura (H) de 0.6 m; para el volumen de control se recomienda que sea por lo

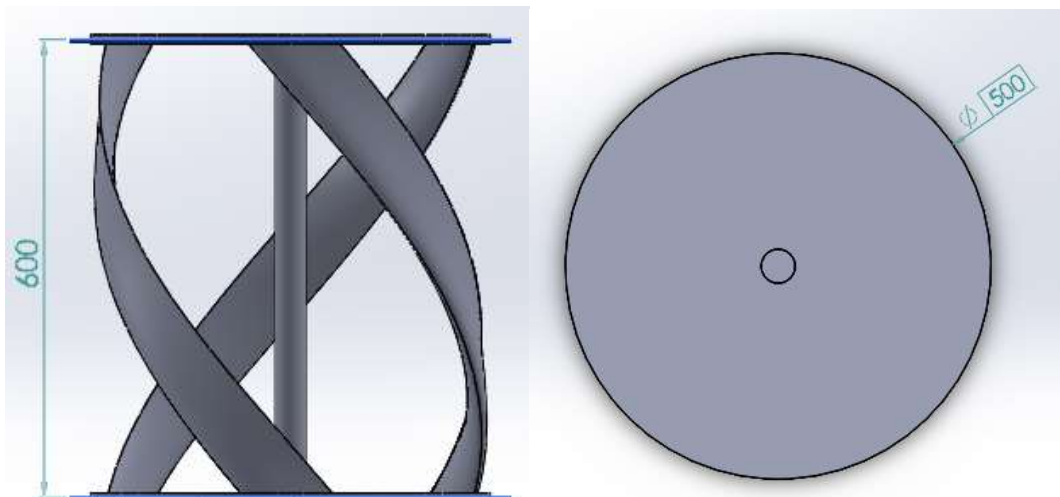
mínimo dos veces el diámetro de la turbina aguas arriba y cuatro veces su diámetro aguas abajo, para evitar particularidades en los resultados, además estas dimensiones se justifican por medio del dimensionamiento de un canal hidráulico. Se modela una sección de fluido de $6D$ de ancho por $3.5H$ de alto y $12D$ de longitud, realizando esto con origen de coordenadas en el centro de la base de la turbina hidrocínética helicoidal.

Ilustración 74. Dominio computacional de la turbina hidrocínética.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

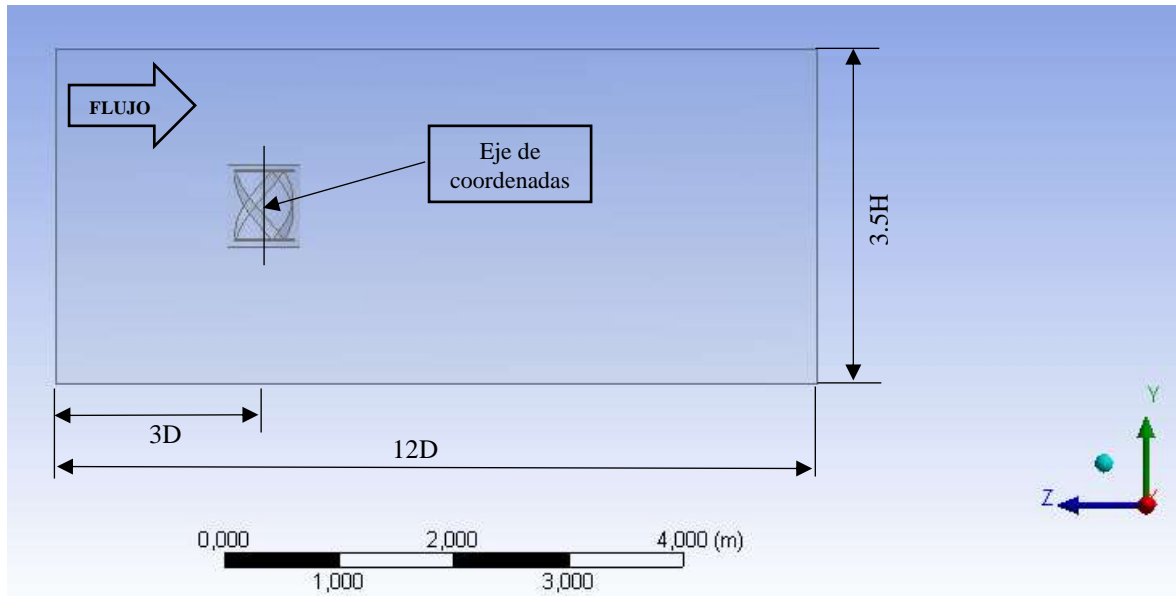
Ilustración 75. Modelo de la turbina hidrocínética helicoidal (mm).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

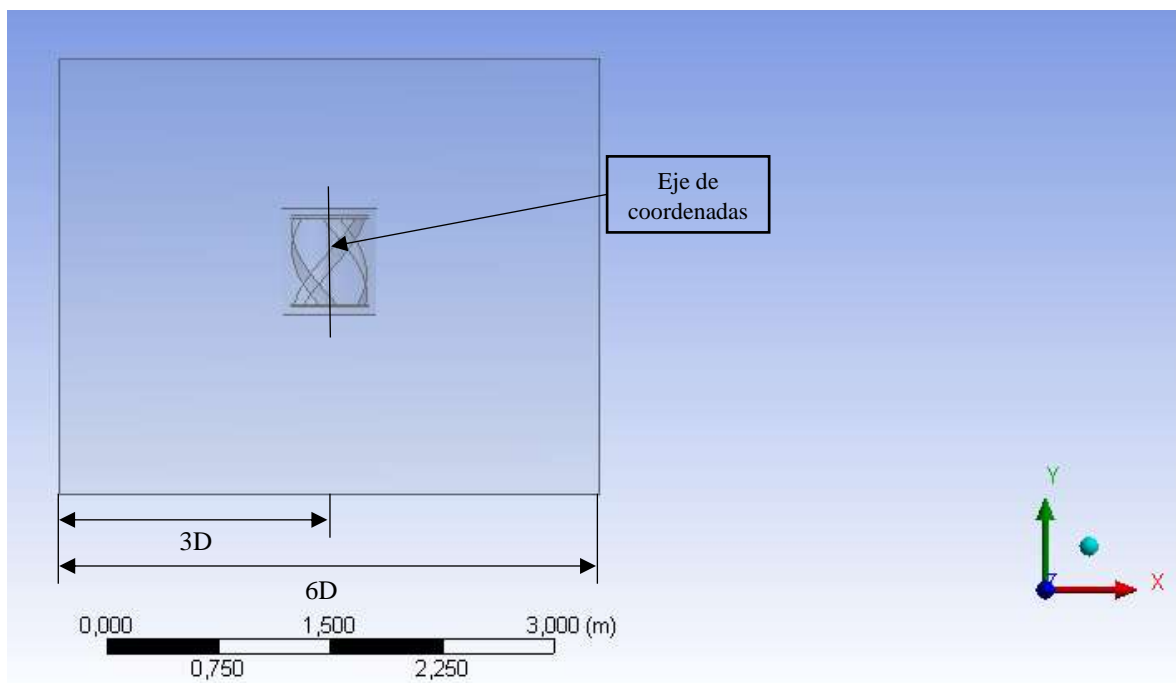
En las ilustraciones 76 y 77, se presentan las dimensiones del dominio computacional para la turbina hidrocínética. La turbina estará circunscrita en una malla de volúmenes finitos para un dominio tridimensional.

Ilustración 76. Vista lateral de la dimensión del dominio.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 77. Vista frontal de la dimensión del dominio.

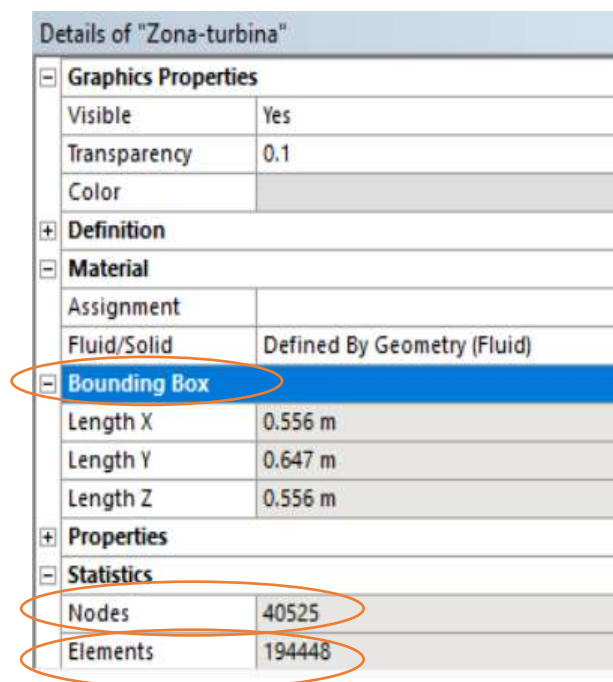


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.3.2.2. Mallado – Mesh

En la realización de la malla se utilizó un mallado no estructurado de gran versatilidad para un análisis de sólidos para fluidos, que permite establecer mejor las curvaturas a detalle para el caso de dominio 2 dónde se encuentra la turbina, cambiando las consideraciones del tamaño de los elementos para el dominio computacional con volúmenes finitos de $4,05 \times 10^4$ nodos y $1,94 \times 10^5$ elementos, con tamaño de elementos máximos 5×10^{-2} m (Max Face Size) y tamaño mínimo 5×10^{-4} m (Min Size) para las caras del dominio 1. Las características del dominio creado se muestran en la ilustración 78.

Ilustración 78. Características del mallado.

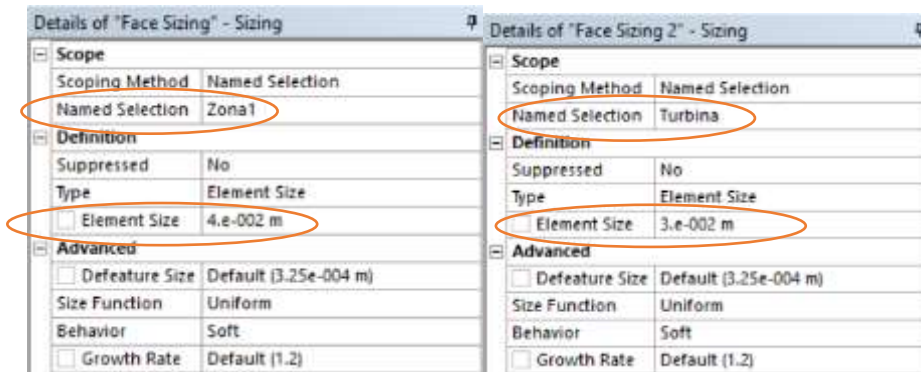


| Details of "Zona-turbina" | |
|----------------------------|-----------------------------|
| Graphics Properties | |
| Visible | Yes |
| Transparency | 0.1 |
| Color | |
| Definition | |
| Material | |
| Assignment | |
| Fluid/Solid | Defined By Geometry (Fluid) |
| Bounding Box | |
| Length X | 0.556 m |
| Length Y | 0.647 m |
| Length Z | 0.556 m |
| Properties | |
| Statistics | |
| Nodes | 40525 |
| Elements | 194448 |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

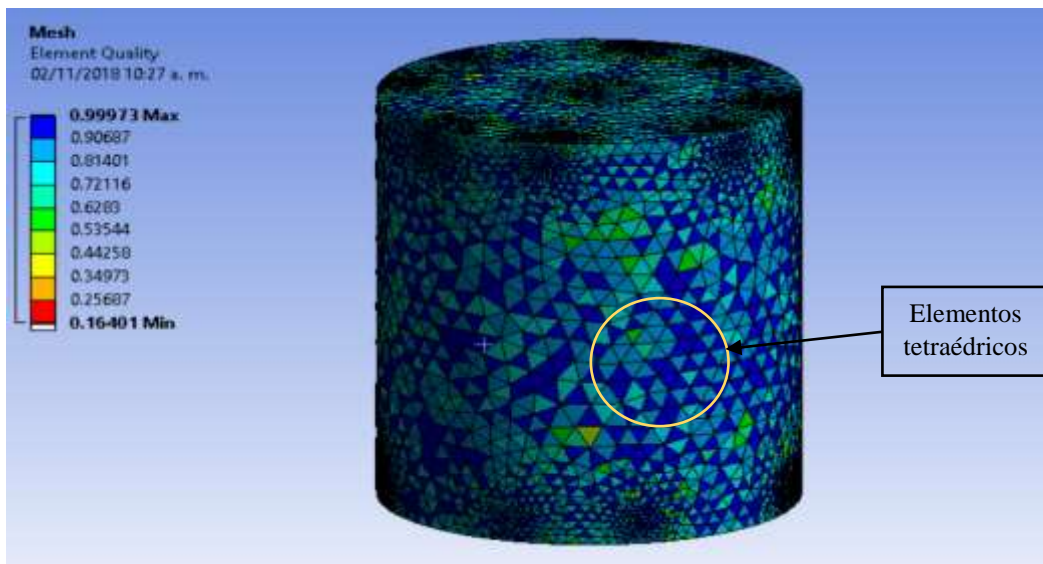
Para la simulación del flujo sobre las palas de la turbina de eje vertical helicoidal, se emplean mallas de sección (Face sizing) con tamaño de elementos de 4×10^{-2} para delimitar el rango numérico en la zona de la turbina. Además de emplear el mismo método para la turbina con tamaño de elementos de 3×10^{-2} ; dirigirse a la ilustración 79. La calidad de elementos en la zona de la turbina se discretizará en celdas de elementos tetraédricos con calidad comprendida en un rango de 0.53 hasta 0.99, comprendiendo que los elementos que se acerquen a la unidad tendrán una mejor calidad en la malla, como se observa en la ilustración 80.

Ilustración 79. Características segunda malla a) Lado izquierdo zona-turbina b) Derecho turbina



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 80. Densificación del mallado en la zona de la turbina.

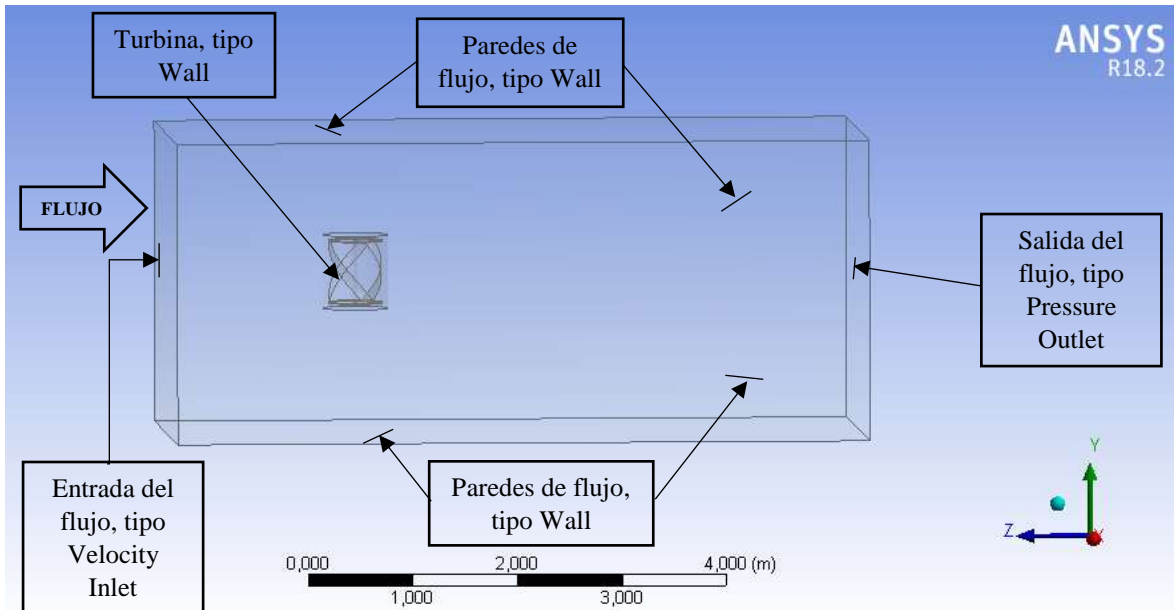


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.3.2.3. Condiciones de contorno – Setup

Se muestra en la ilustración 81, las fronteras del dominio computacional, en sus condiciones de contorno para la turbina hidrocínética de eje vertical, se configuran tal y como se indican en la ilustración. Se establece la configuración tipo Wall (pared) para las caras laterales, superior e inferior del dominio de geometría rectangular que limita el área de contacto por donde transitará el fluido, y de igual manera para la turbina porque es donde el fluido estará circulando en contacto con el rotor, además la cara frontal se asigna de tipo Velocity Inlet (velocidad de entrada) del flujo de agua en un rango máximo – mínimo; y por último la cara posterior de tipo Pressure Outlet (presión de salida). Además, en los álabes la condición de contorno se considera estacionaria (Stationary Wall) y de tipo Wall.

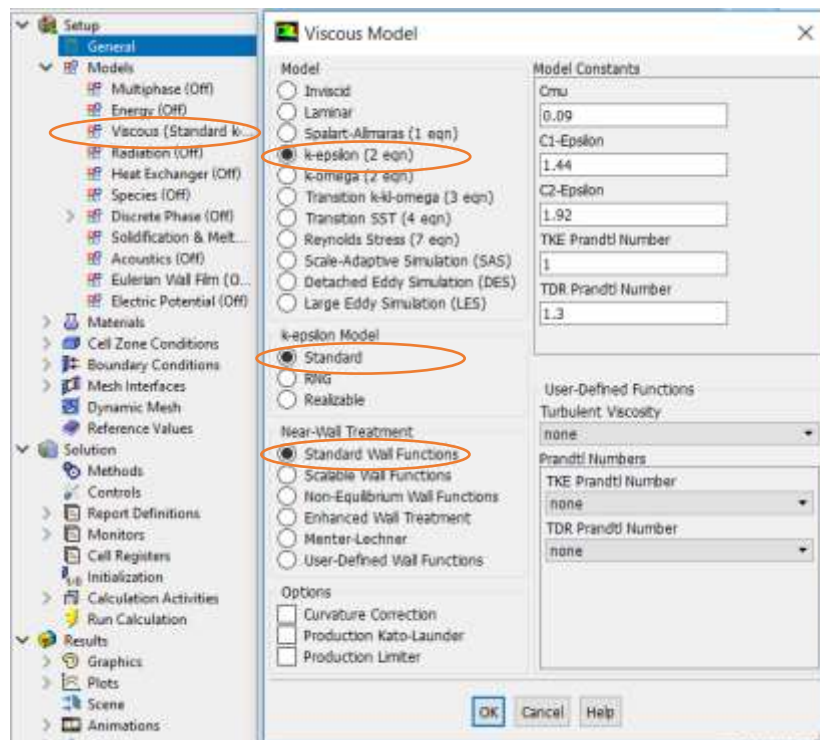
Ilustración 81. Configuración del dominio computacional.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

El estudio se realiza en un estado transitorio en el tiempo, por el modelo de turbulencia Standard K- ϵ , apropiado para el análisis numérico al presentar este modelo mejor resultados en el análisis, ver ilustración 82. Después estableciendo las condiciones del fluido en los contornos (Entorno y zona-turbina) y fronteras del dominio.

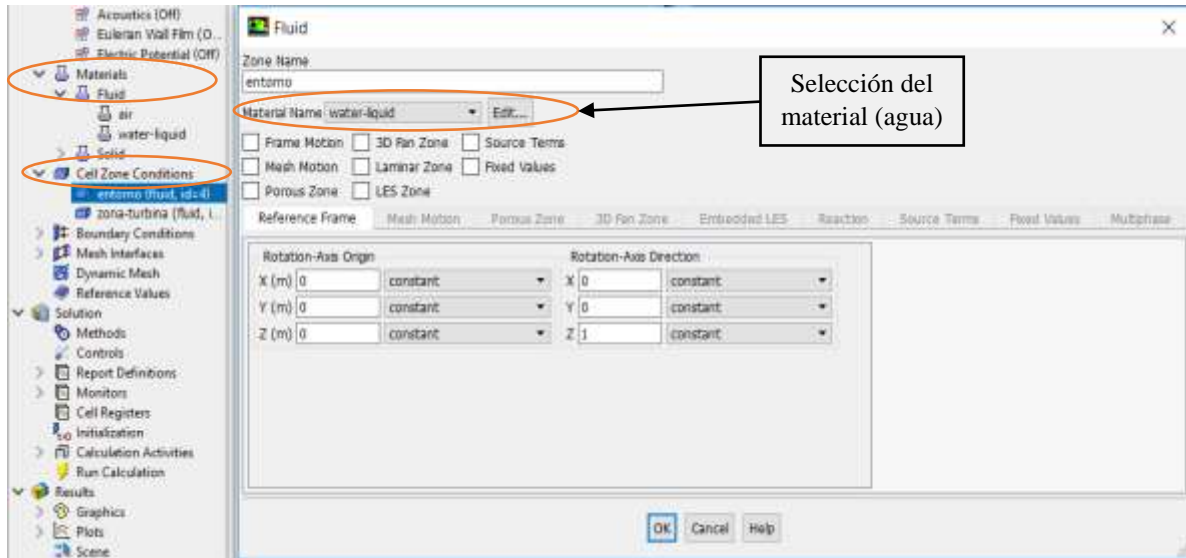
Ilustración 82. Modelo de turbulencia Standard K- ϵ .



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

En la condición de materiales se crea un fluido (agua) con sus propiedades, luego este material se lo elige en las condiciones de zona (Cell Zone Conditions), primero para la condición de (Entorno), ver ilustración 83.

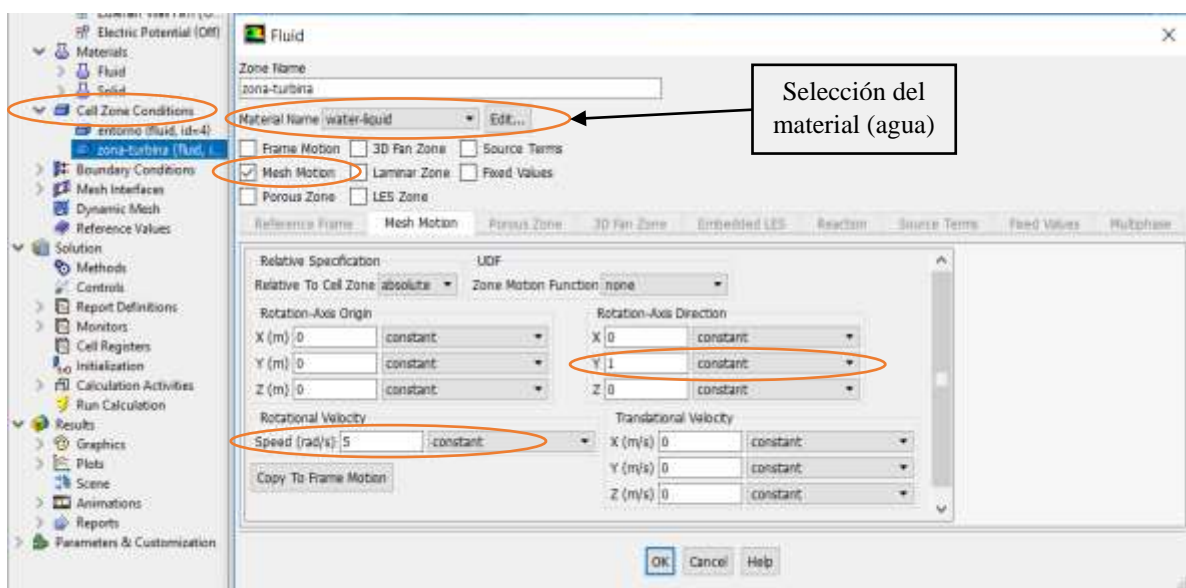
Ilustración 83. Condición de Zona para el (entorno).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Luego en la condición (zona-turbina) se elige el mismo material (agua), se selecciona la opción (Mesh Motion) para darle movimiento al mallado en el giro de la turbina, con la restricción de rotación en el eje de la (Y) a velocidad angular de 5 rad/s, como se muestra en la ilustración 84.

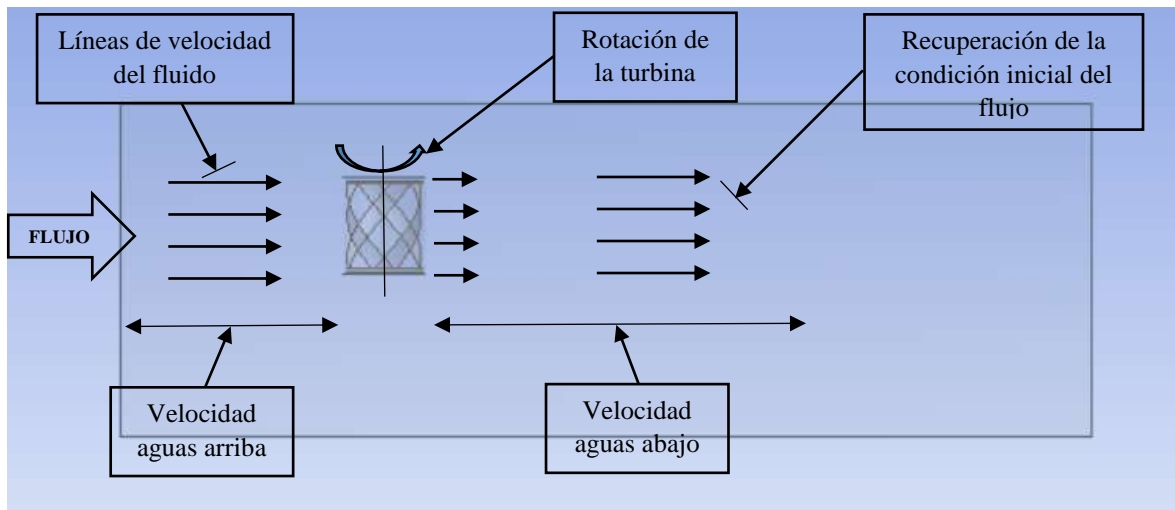
Ilustración 84. Condición en la (Zona-turbina.)



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Sintetizando las condiciones de zona (Cell Zone Conditions) en la ilustración 85, partiendo de una velocidad del fluido (agua) que se encuentra en el entorno aguas arriba hasta llegar a la zona-turbina y provocar rotación en esta zona debido a las fuerzas que se producen en los álabes de la turbina por la energía cinética que conlleva el flujo, disminuyendo esta velocidad a la salida del rotor hasta recuperar su condición inicial aguas abajo.

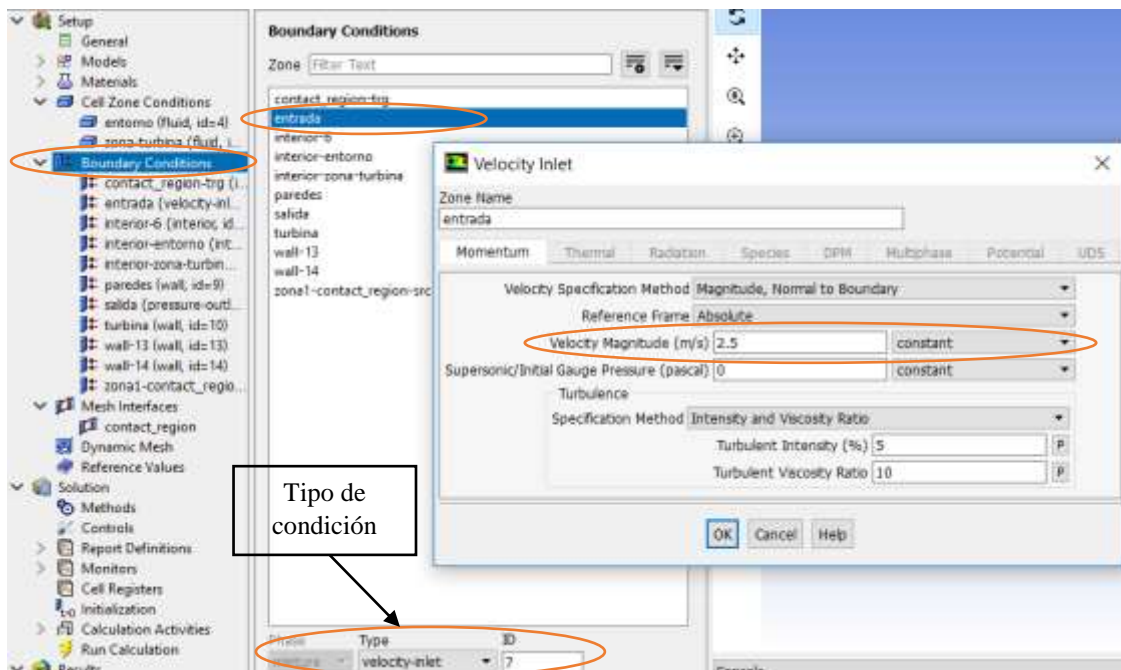
Ilustración 85. Esquematzación de las condiciones de zona.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

En las condiciones de borde (Boundary Conditions), se selecciona la condición de entrada del fluido tipo (velocity-inlet) para establecer la magnitud de velocidad, ver ilustración 86.

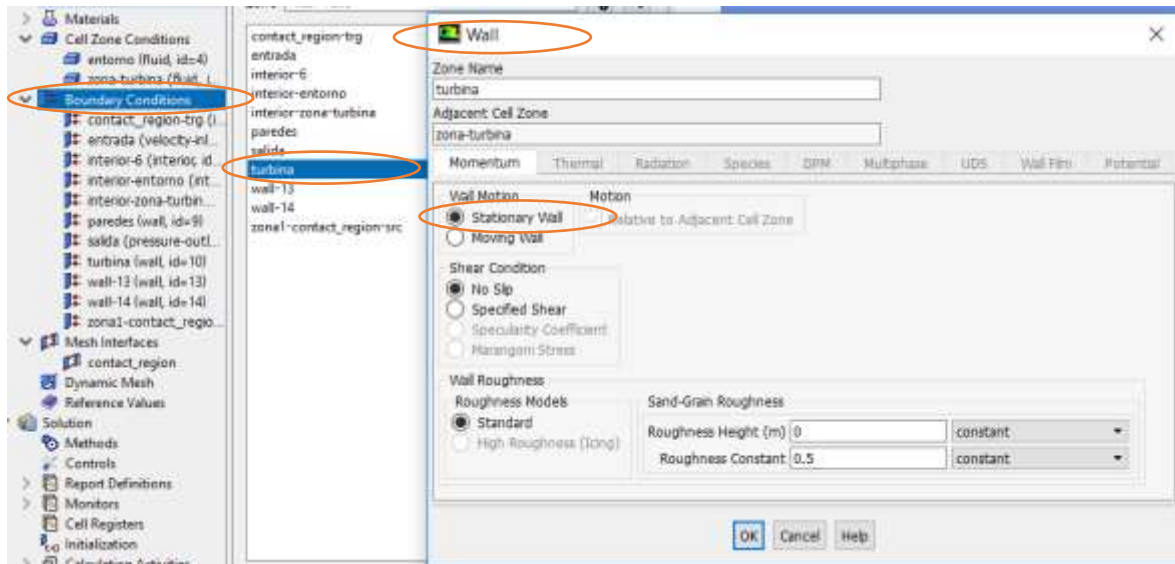
Ilustración 86. Entrada del fluido tipo (velocity-inlet).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Para la condición de borde a la (salida) de tipo (Pressure-outlet), con presión de 0 [Pa] y método de turbulencia (Intensity and Viscosity Ratio). La condición de borde (paredes) tipo (Wall). En la ilustración 87, se muestra la condición de borde para la turbina de tipo (Wall). Las demás condiciones de borde quedan configuradas por defecto.

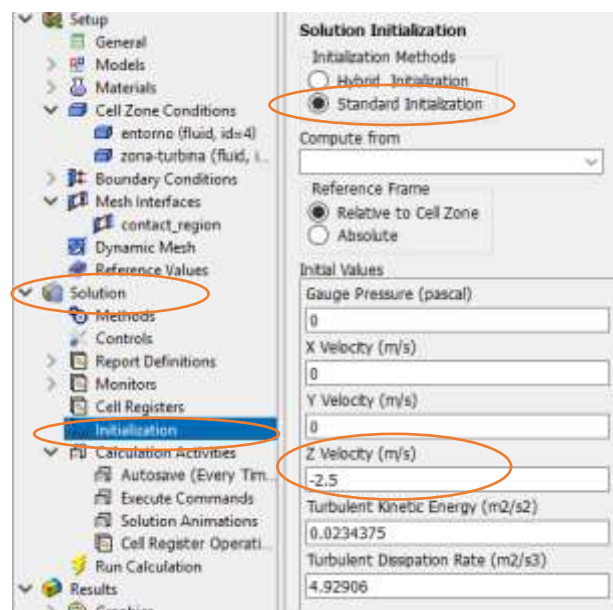
Ilustración 87. Turbina tipo Wall.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

La solución de inicialización se define que inicia en la condición (entrada) con referencia a la zona-turbina, ver ilustración 88. La configuración de inicialización esta previamente acondicionada a los valores de velocidad y propiedades del flujo.

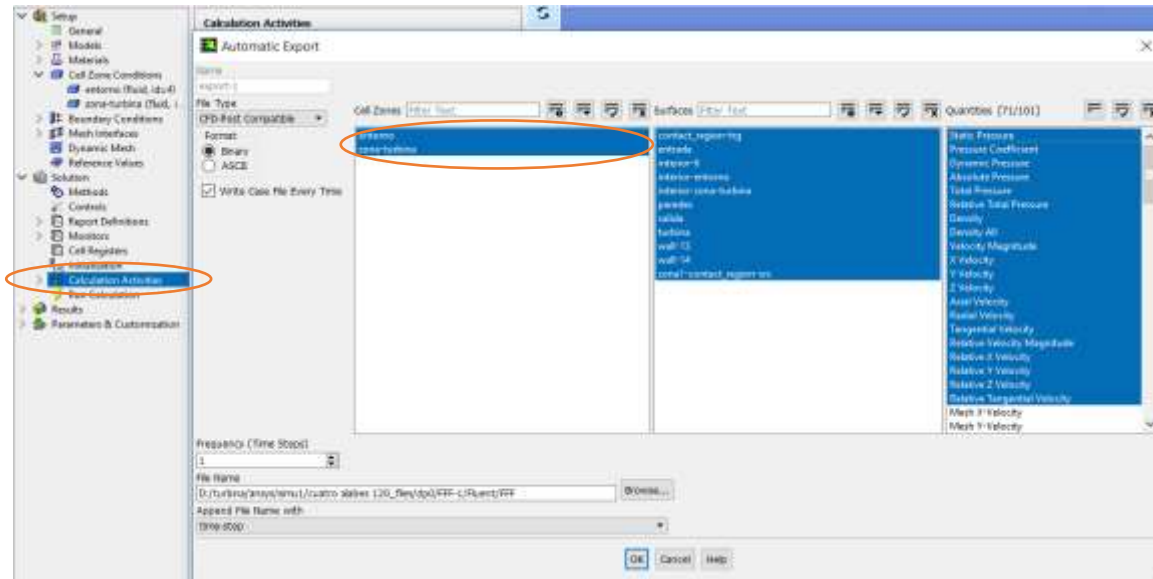
Ilustración 88. Referencias de evaluación.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Se procede a establecer los parámetros a calcular para el (entorno y zona-turbina) y superficies, ver ilustración 89.

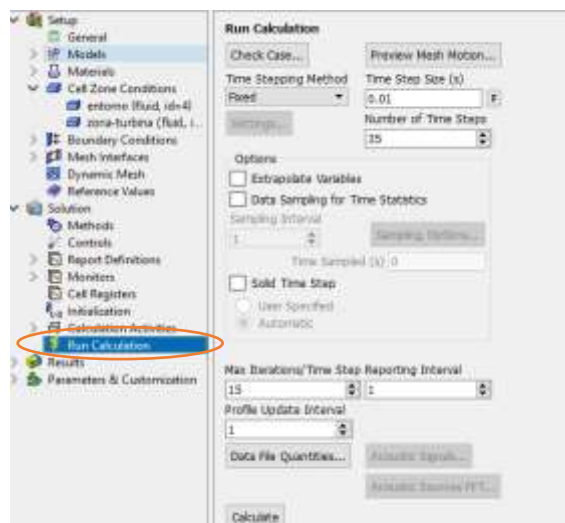
Ilustración 89. Actividades a calcular.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

A efectos del análisis numérico, se construirá con un mallado de volúmenes finitos empleando un computador con procesador Intel Core i7 (2,2 GHz y 16 GB de RAM). Realizando números de pasos con un total de 35 y 15 iteraciones para cada paso, en un tiempo establecido que inicia de 0.01 segundos hasta terminar el número de pasos que finalizaría en 0.35 segundos, ver ilustración 90. Consiguiendo de esta forma la respuesta en un rango de tiempo transitorio del comportamiento de la turbina ante las condiciones expuestas en su volumen de control para una velocidad máxima y mínima.

Ilustración 90. Configuración Run Calculation.

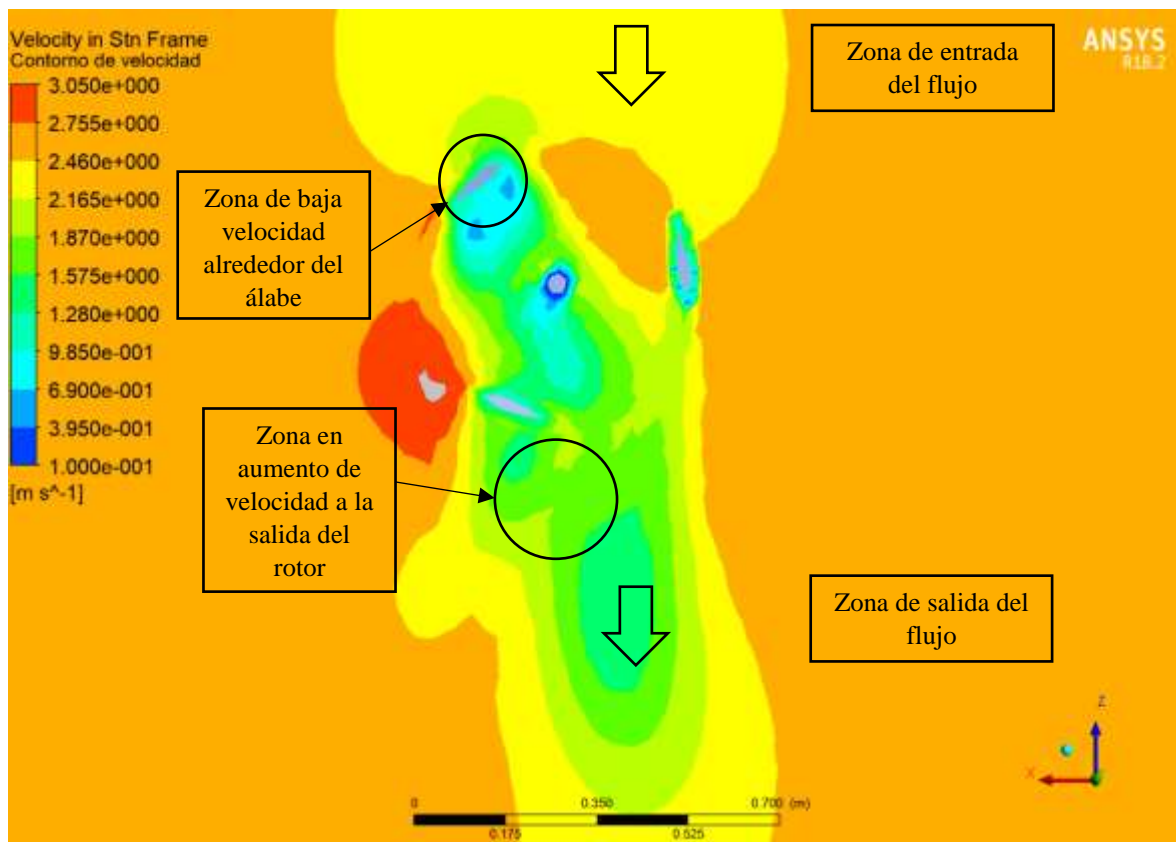


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.3.2.4. Resultados del análisis computacional – Results

A continuación, en la ilustración 91 se observa el resultado del comportamiento del fluido como va interactuando desde su partida con velocidad de 2.5 m/s hasta llegar a la zona de la turbina y estar en contacto con el rotor, álabes, para un plano ZX; en el contorno de los tres álabes se encuentra una disminución de la velocidad ocasionada por el choque entre el flujo másico del agua y la masa de las palas, aprovechando esta la energía cinética que proporciona el fluido para generar el empuje en los álabes.

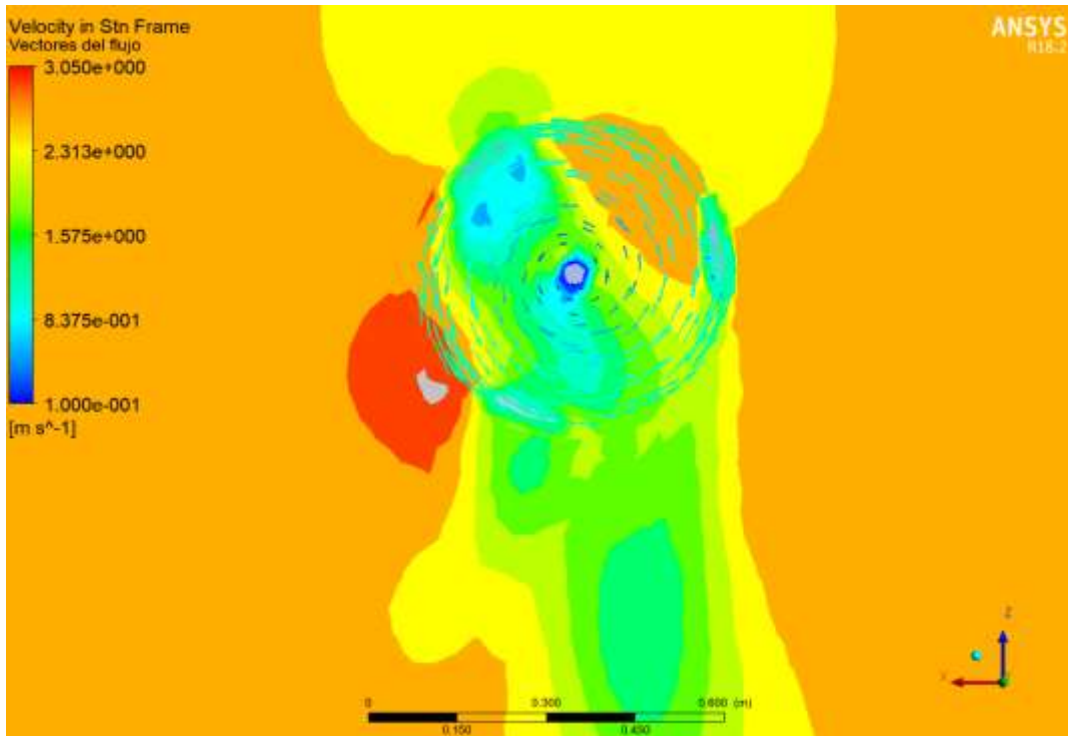
Ilustración 91. Contorno de velocidades en la turbina.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

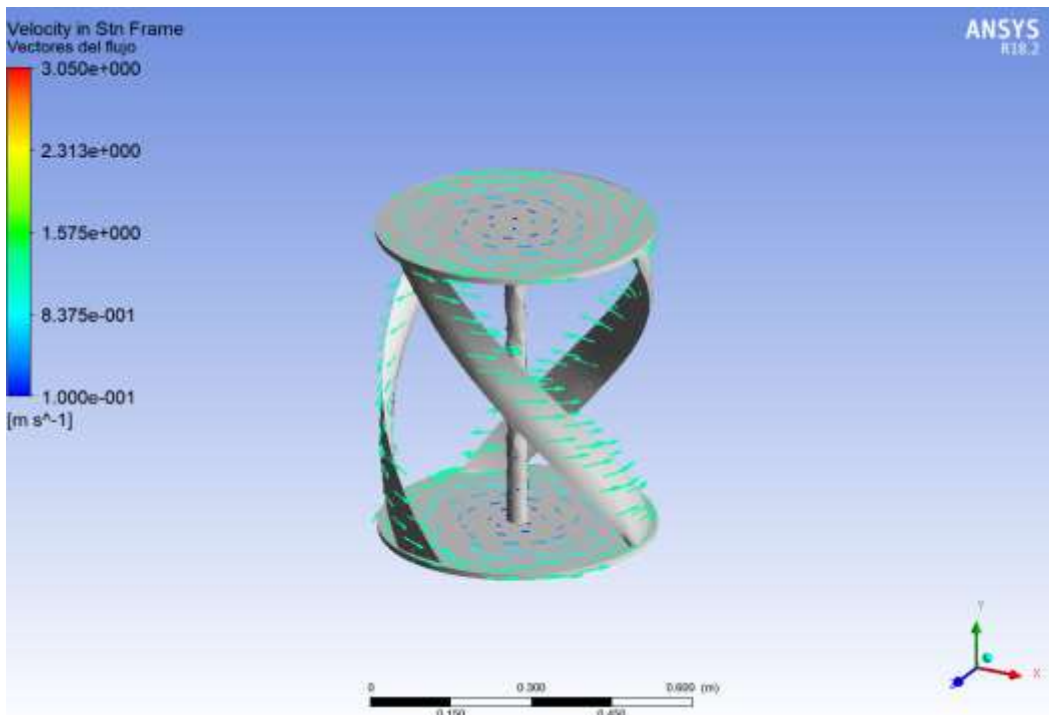
En la siguiente ilustración 92, se observa los vectores del flujo cómo interactúan en el rotor de la turbina, para una primera instancia se describen en el plano de contorno de velocidad ZX y en una segunda pretensión de forma tridimensional en los álabes, ver ilustración 93, denotando estos vectores la condición de giro del rotor en sentido anti-horario.

Ilustración 92. Vectores generadores por la corriente en la turbina – Plano ZX.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

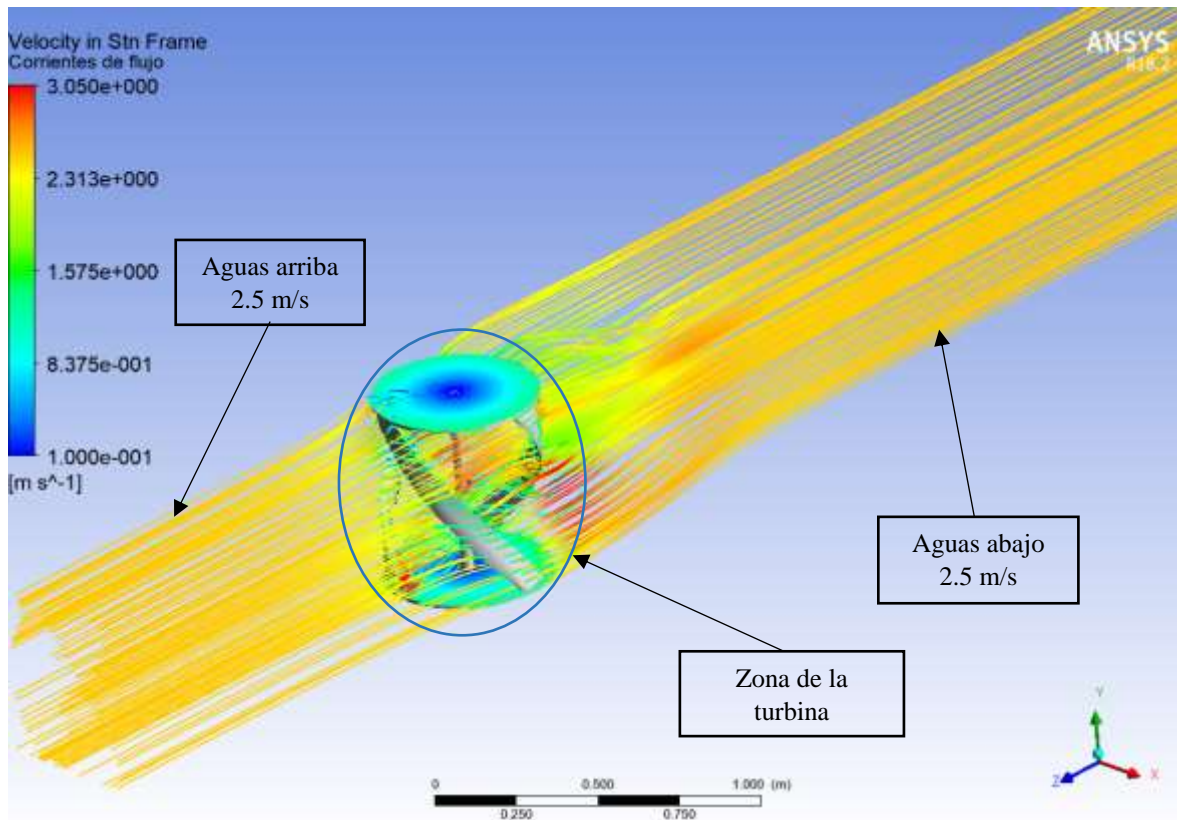
Ilustración 93. Vectores del flujo de corriente de manera tridimensional.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

La ilustración 94, demuestra las corrientes de flujo que se desarrollan comenzando desde aguas arriba con velocidad de 2.5 m/s hasta llegar a la zona del rotor y este disminuye la rapidez del fluido en rangos de 0.6 m/s a 1.57 m/s por el impacto entre la oleada y la turbina, siendo el flujo de baja velocidad circunscrito en los álabes y bases de la turbina hasta salir aguas arriba del dominio y retomar nuevamente su velocidad inicial.

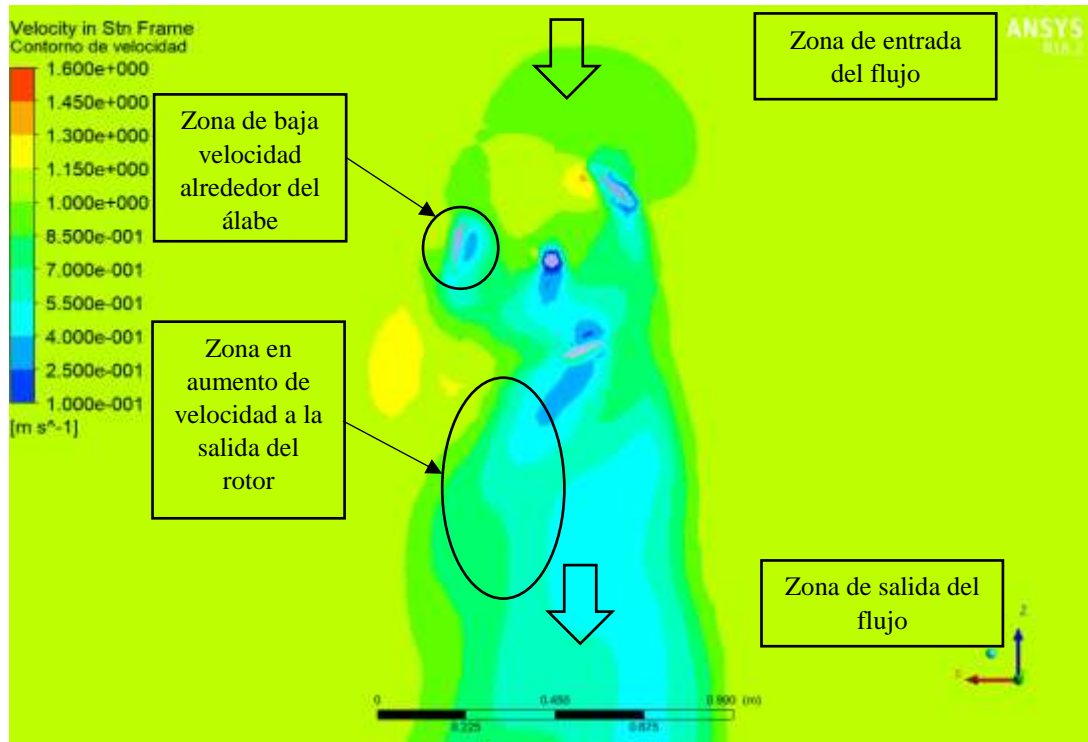
Ilustración 94. Corrientes de flujo en la turbina.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

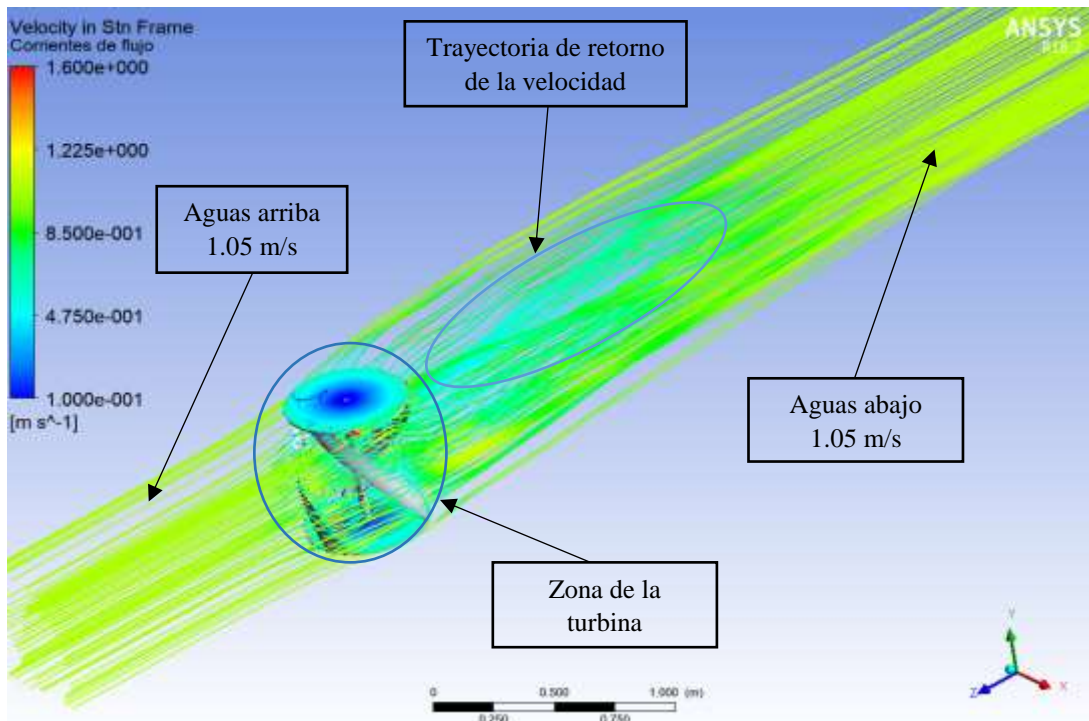
Los resultados de la simulación considerando velocidades de 1.05 m/s en el fluido de la corriente que estará en contacto con la turbina, se presentan en la ilustración 95. Mostrando un comportamiento similar de disminución en la velocidad, pero una mayor prolongación de la trayectoria para retomar nuevamente la velocidad del flujo inicial después de la salida del fluido en el rotor; esto se debe a la baja rapidez que lleva el afluente y proporcionando su energía cinética hasta rondar velocidades de 0.2 m/s a 0.5 m/s sobre los álabes. En la ilustración 96 se observa las corrientes del flujo que parten de 1.05 m/s aguas arriba hasta llegar aguas abajo.

Ilustración 95. Contorno de velocidad a 1.05 m/s.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 96. Corrientes de flujo aguas arriba hasta aguas abajo.

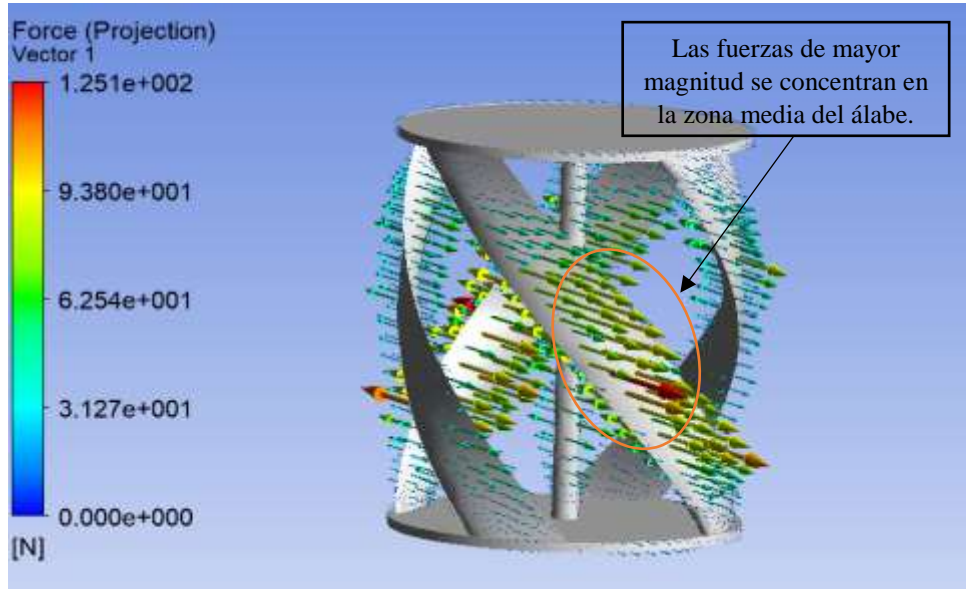


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Fuerzas actuantes en los álabes

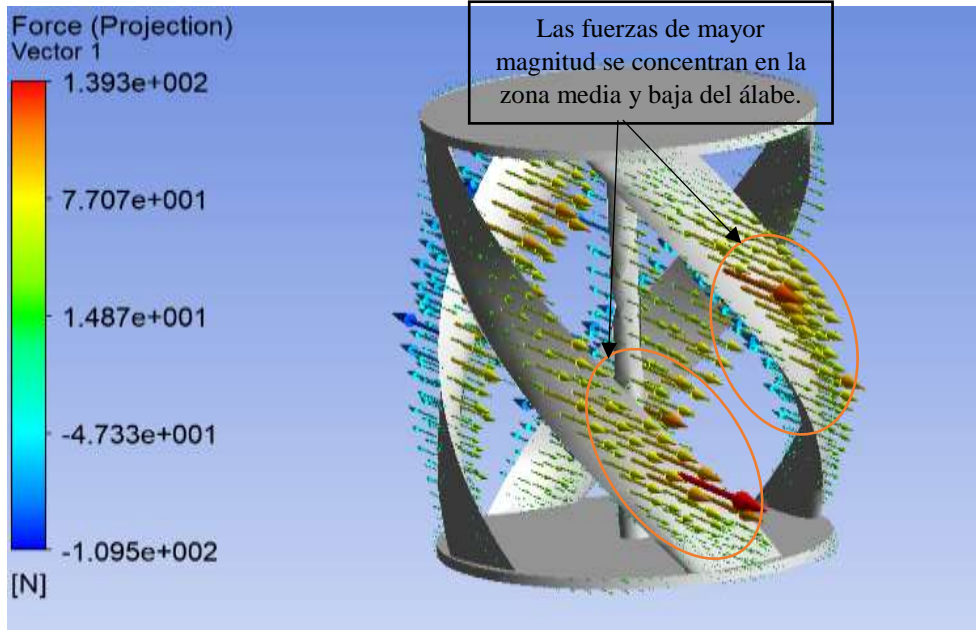
En la ilustración 97, se visualiza las fuerzas axiales ejercidas en los álabes de la turbina para una simulación de cuatro álabes con ángulo de torcedura de 120° , a velocidad del fluido 1.05 m/s y en la ilustración 98 para una velocidad a 2.5 m/s.

Ilustración 97. Fuerzas en los álabes – velocidad 1.05 m/s.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 98. Fuerzas en los álabes - velocidad 2.5 m/s.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.3.3. Determinación del coeficiente de potencia

Para la determinación del coeficiente de potencia se efectuaron algunas simulaciones en donde se experimentaron algunas configuraciones diferentes en los álabes para definir que variable tiene mayor impacto, sea este su número de palas, ángulo de torcedura o ambos, manteniendo los demás parámetros iguales como: diámetro (0.5m), altura (0.6 m), longitud de cuerda (0.12 m), perfil NACA 0020. Con la ayuda del complemento (Function Calculator - Ansys) se obtuvieron las diferentes fuerzas para cada eje de coordenadas (X, Y, Z) como se muestran en la tabla 12; al sacar su magnitud y multiplicarlo por el radio del rotor se obtiene el torque estipulado en la tabla 13.

Tabla 12. Fuerzas presentes en la turbina para diferentes simulaciones.

| N° Simulación | Fuerza X [N] | Fuerza Y [N] | Fuerza Z [N] | Magnitud fuerza [N] | Radio turbina [m] |
|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|-------------------|
| 1 | -28.22 | 21.79 | 138.9 | 137.74 | 0.25 |
| 2 | -333.38 | 156.42 | 904.50 | 976.59 | 0.25 |
| 3 | -40.98 | 27.91 | 93.76 | 88.83 | 0.25 |
| 4 | -142.19 | 77.54 | 565.58 | 552.88 | 0.25 |
| 5 | -59.82 | 23.06 | 120.60 | 107.23 | 0.25 |
| 6 | -260.29 | 49.06 | 826.12 | 785.58 | 0.25 |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Tabla 13. Configuración de los álabes.

| N° Simulación | Descripción | | | Resultados | | | |
|---------------|-------------------|---------------|----------------------|--------------|------------------------|-------------------------|------|
| | Velocidades [m/s] | N° Álabes [-] | Ángulo torcedura [°] | Torque [N.m] | Potencia fluido [Watt] | Potencia turbina [Watt] | Cp. |
| 1 | 1.05 | 4 | 120 | 34.44 | 174 | 86.1 | 0.49 |
| 2 | 2.5 | 4 | 120 | 244.14 | 2343.75 | 1220.73 | 0.52 |
| 3 | 1.05 | 3 | 120 | 22.21 | 174 | 55.52 | 0.32 |
| 4 | 2.5 | 3 | 120 | 138.22 | 2343.75 | 691.1 | 0.29 |
| 5 | 1.05 | 3 | 150 | 26.81 | 174 | 67.03 | 0.38 |
| 6 | 2.5 | 3 | 150 | 196.40 | 2343.75 | 981.97 | 0.42 |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

En la tabla 13 se puede destacar que el rotor conformado por cuatro álabes tiene un mayor rendimiento en la extracción de potencia del fluido en comparación con uno de tres palas para un mismo ángulo de torcedura, denotando coeficientes de potencia ($0.49 = 49\%$ y $0.52 = 52\%$) para una velocidad mínima y máxima, respectivamente. Mientras que en la turbina de tres palas a 120° de torcedura se presentan coeficientes de potencia ($0.32 = 32\%$ y $0.29 = 29\%$), respectivamente en velocidades de flujo de 1.05 m/s y 2.5 m/s .

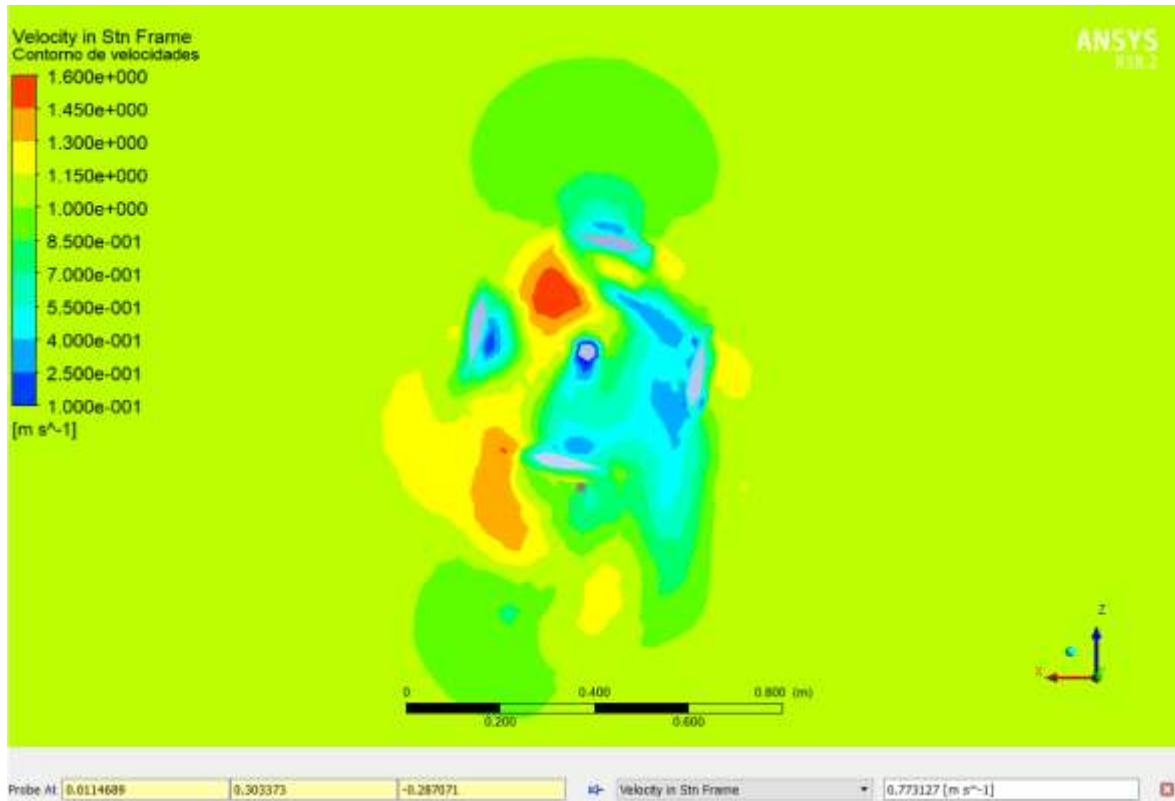
Otra forma para obtener un mejor rendimiento es un ángulo de torcedura de 150° que ostenta coeficientes de potencia ($0.38=38\%$, $0.42=42\%$) para velocidades bajas y altas, respectivamente. Teniendo en consideración que la operación para cada simulación de la turbina es analizada en vacío sin tomar en cuenta los accesorios que ocasionan pérdidas, definiendo de esta manera el alcance del tema principal. Al mismo tiempo, optando por la turbina de tres palas a 150° de torcedura que manifiesta mejor rendimiento, que con el rotor de palas a 120° y asemejándose a una turbina de cuatro palas; de tal forma también se reduce los costos de manufactura al no optar por una turbina de cuatro álabes.

4.1.3.3.1. Volumen de control

Además, realizando un volumen de control del flujo másico que circula en el área transversal del rotor de la turbina, y con las condiciones de velocidad que parte el fluido aguas arriba y la velocidad del flujo que sale del rotor se obtiene la variación de energía que apresa la turbina y haciendo una relación en el tiempo se obtiene la potencia mecánica de la turbina. A continuación, se desarrolla el procedimiento de cálculo del rendimiento por medio de los análisis ejecutados, tomando en consideración cada ilustración para referenciar los valores extraídos de las velocidades en cada simulación.

La ilustración 99 representa en el lado izquierdo un rango de colores que simbolizan las diferentes velocidades que se forman en el contorno e interior del rotor, pero considerando para el volumen de control la velocidad del flujo antes de entrar en contacto con la turbina que es de 1.05 m/s y la velocidad a la salida del rotor manifiesta 0.77 m/s como se muestra en la figura. De esta forma mostrando las velocidades para la simulación 1 con rotor de cuatro álabes a un ángulo de torcedura de 120° .

Ilustración 99. Contorno de velocidades - simulación 1 (1.05 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Con la ecuación descrita (EC. 46), se determina la variación de la energía cinética que atrapa el rotor, siendo la diferencia entre la energía cinética antes del ingreso (E_{c1}) y a la salida del rotor (E_{c2}), descrita la misma en la (EC. 1) anteriormente citada. Este procedimiento de cálculo se lleva a cabo para el volumen de control en el área transversal de la turbina.

$$\Delta E = \frac{1}{2} \dot{m} [W_1^2 - W_2^2] \quad \text{EC. 46}$$

Antes de empezar con la principal (EC. 46), se comprueba la cantidad de flujo másico que transitara por la turbina con la (EC. 47).

$$\dot{m} = \rho * A * W \quad \text{EC. 47}$$

Conociendo los valores de la densidad del fluido (ρ), la sección transversal del área de la turbina ($0.5 \text{ m} * 0.6 \text{ m}$) y la velocidad del flujo (W). Y estipulando que será el mismo flujo másico a la entrada y salida del rotor de la turbina, se empieza a reemplazar.

$$\dot{m} = (1000 \text{ kg/m}^3) * (0.30 \text{ m}^2) * (1.05 \text{ m/s})$$

$$\dot{m} = 315 \text{ kg/s}$$

Ahora establecida la cuantificación del flujo másico se reemplaza en la (EC. 46) y sus velocidades del fluido.

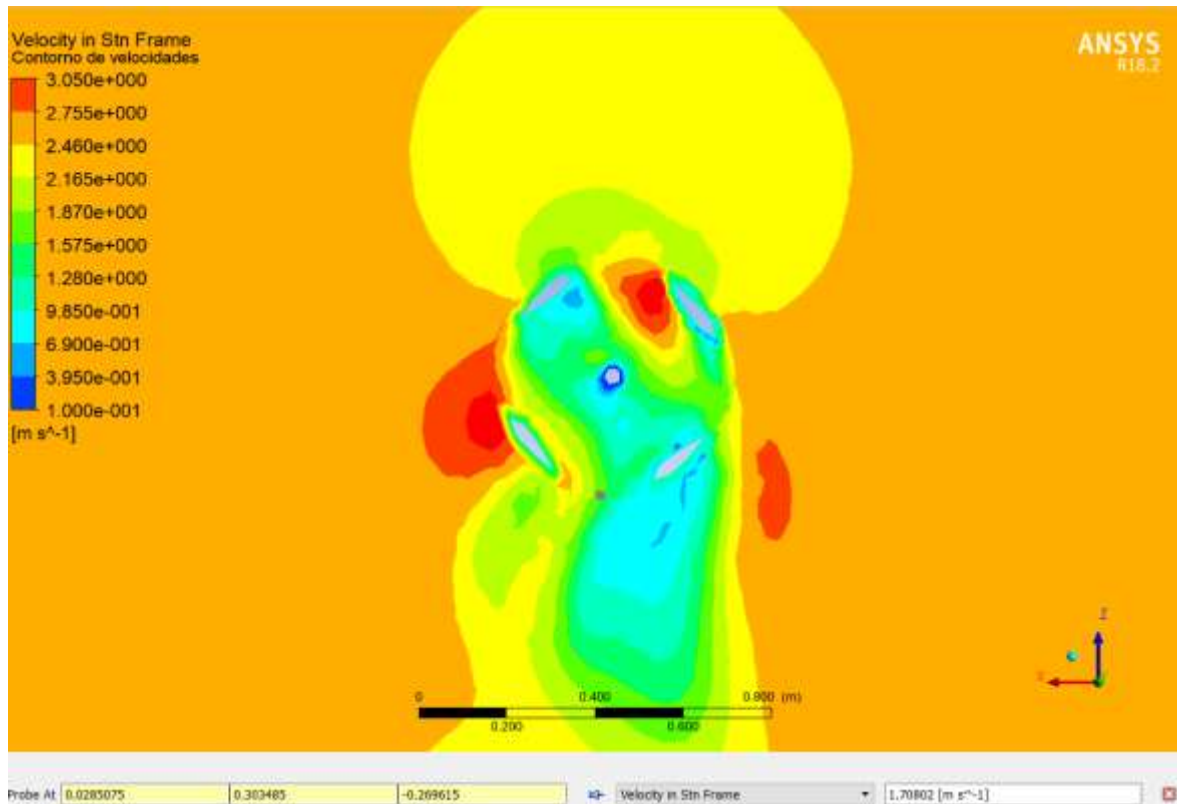
$$\Delta \dot{E} = \frac{1}{2} * (315 \text{ kg/s}) * [(1.05 \text{ m/s})^2 - (0.77 \text{ m/s})^2]$$

$$\Delta \dot{E} = 80.26 \text{ J/s}$$

Siendo este valor de 80.26 J/s el flujo de energía que atrapa la turbina o lo que es lo mismo la potencia mecánica en (Watts) aprisionada por el rotor.

En la ilustración 100, se presenta la velocidad aguas arriba de 2.5 m/s y la rapidez del flujo en la salida del rotor es 1.71 m/s como se describe en la imagen, referente a la simulación 2.

Ilustración 100. Contorno de velocidades - simulación 2 (2.5 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Realizando el mismo procedimiento que el anterior, pero con otra condición de velocidad del fluido se obtiene el flujo másico como se estructura a continuación.

$$\dot{m} = (1000 \text{ kg/m}^3) * (0.30\text{m}^2) * (2.5 \text{ m/s})$$

$$\dot{m} = 750 \text{ kg/s}$$

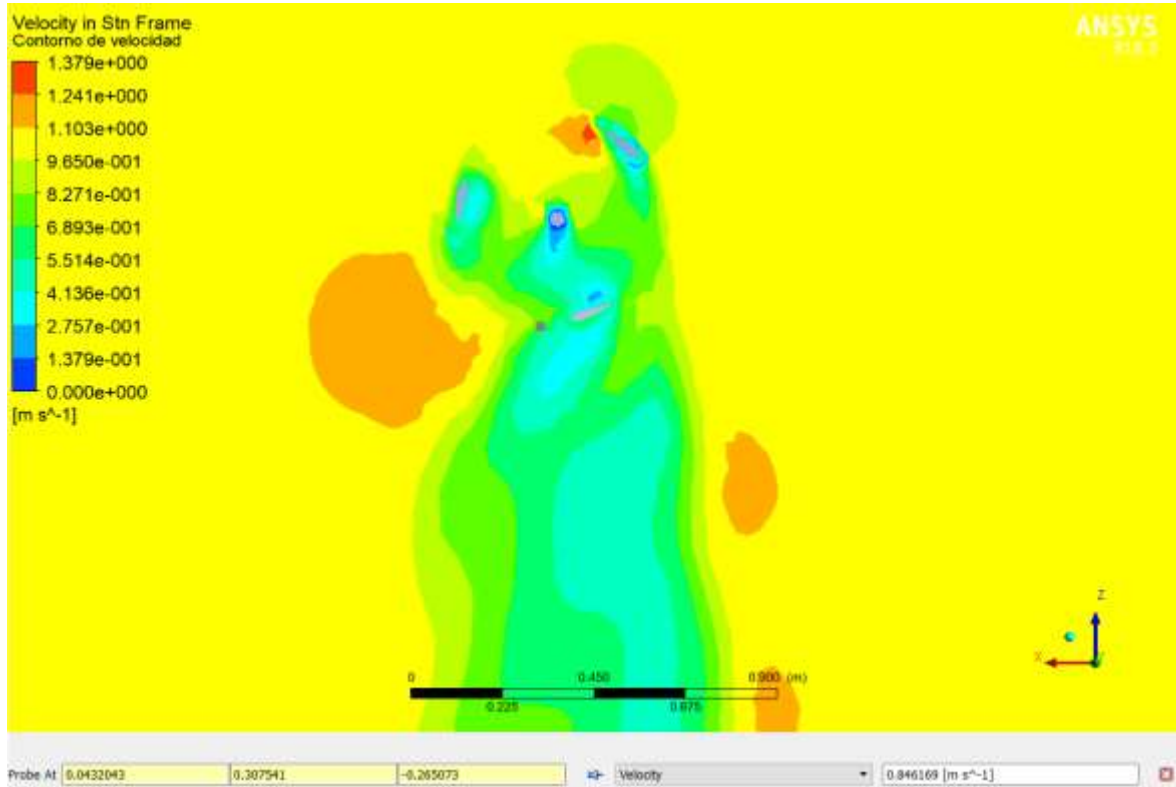
Determinado el valor del flujo másico se sustituye en la (EC. 46) y sus velocidades del fluido.

$$\Delta \dot{E} = \frac{1}{2} * (750 \text{ kg/s}) * [(2.5 \text{ m/s})^2 - (1.71 \text{ m/s})^2]$$

$$\Delta \dot{E} = 1247.21 \text{ J/s}$$

La ilustración 101 refleja la velocidad de 1.05 m/s aguas arriba y velocidad de 0.846 m/s a la salida del rotor de la turbina. Para una turbina de tres álabes con ángulo de torcedura a 120° referente a la simulación 3.

Ilustración 101. Contorno de velocidades - simulación 3 (1.05 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

A continuación, se muestra el flujo másico que transita en el área de sección transversal.

$$\dot{m} = (1000 \text{ kg/m}^3) * (0.30 \text{ m}^2) * (1.05 \text{ m/s})$$

$$\dot{m} = 315 \text{ kg/s}$$

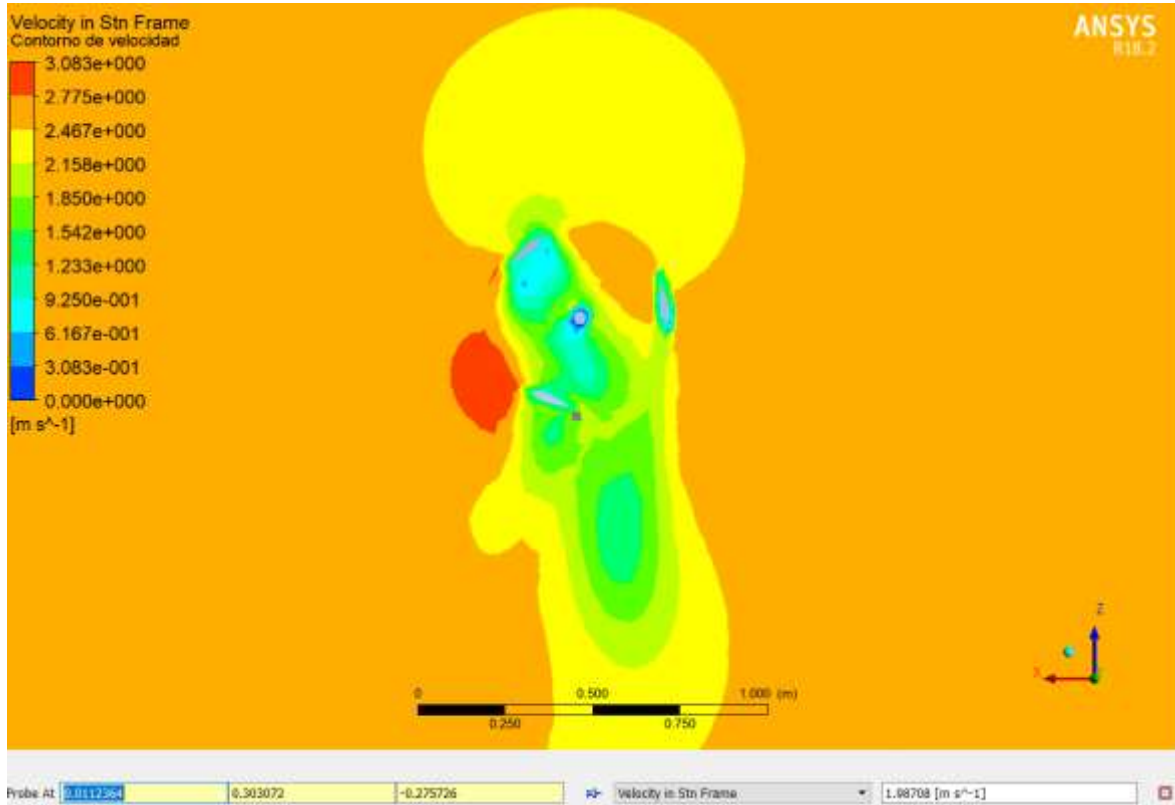
Ahora establecida la cuantificación del flujo másico se reemplaza en la (EC. 46) y sus velocidades del fluido.

$$\Delta \dot{E} = \frac{1}{2} * (315 \text{ kg/s}) * [(1.05 \text{ m/s})^2 - (0.846 \text{ m/s})^2]$$

$$\Delta \dot{E} = 60.91 \text{ J/s}$$

En la imagen 102 se demuestra la rapidez que parte el fluido de 2.5m/s y la velocidad de 1.98 m/s a la salida del rotor, para la turbina de tres palas con un ángulo de torcedura a 120° con referencia en la simulación 4.

Ilustración 102. Contorno de velocidades - simulación 4 (2.5 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Flujo másico estipulado para otra condición del fluido en la simulación 4.

$$\dot{m} = (1000 \text{ kg/m}^3) * (0.30\text{m}^2) * (2.5 \text{ m/s})$$

$$\dot{m} = 750 \text{ kg/s}$$

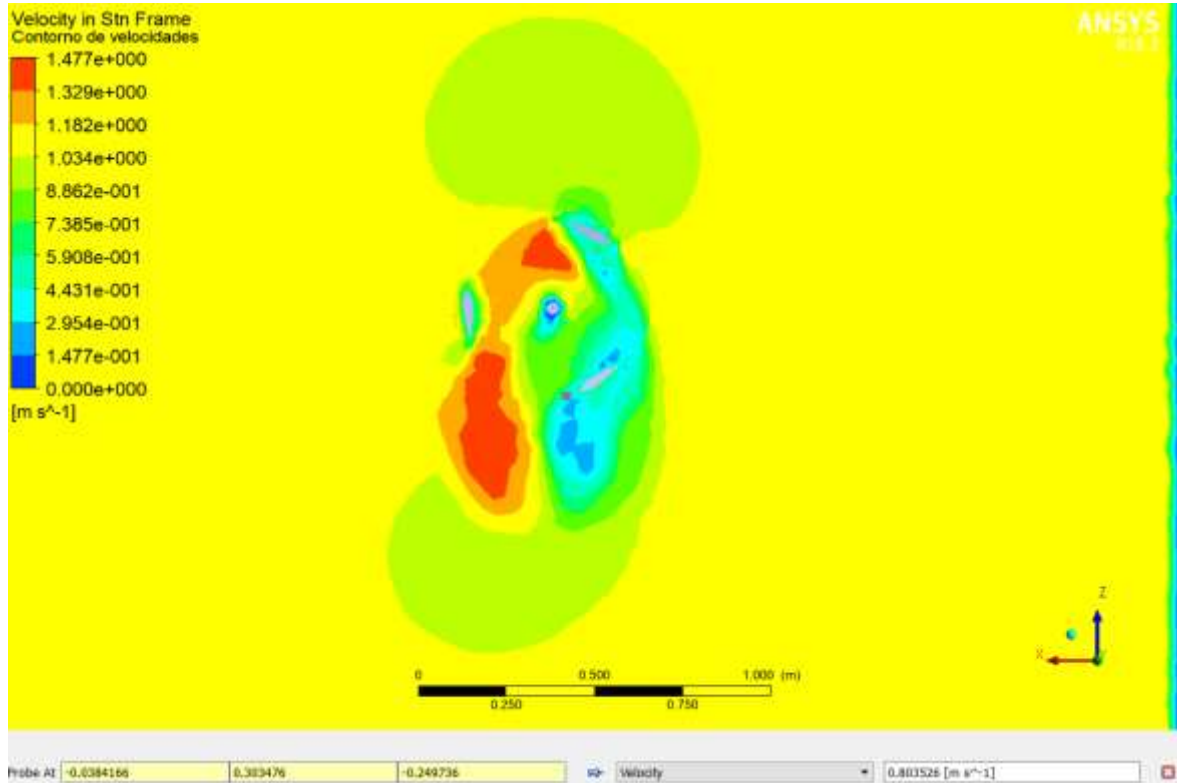
Expresado el valor del flujo másico se suplanta en la (EC. 46) y sus velocidades del fluido.

$$\Delta \dot{E} = \frac{1}{2} * (750 \text{ kg/s}) * [(2.5 \text{ m/s})^2 - (1.987 \text{ m/s})^2]$$

$$\Delta \dot{E} = 863.18 \text{ J/s}$$

En la ilustración 103, se muestra la velocidad del fluido de 1.05 m/s aguas arriba y la rapidez del fluido a 0.8 m/s en la salida del rotor. Con tres álabes en la turbina con ángulo de torcedura a 150°, referente a los resultados de la simulación 5.

Ilustración 103. Contorno de velocidades - simulación 5 (1.05 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Se muestra la cuantificación del flujo másico que transita en el área de sección transversal.

$$\dot{m} = (1000 \text{ kg/m}^3) * (0.30 \text{ m}^2) * (1.05 \text{ m/s})$$

$$\dot{m} = 315 \text{ kg/s}$$

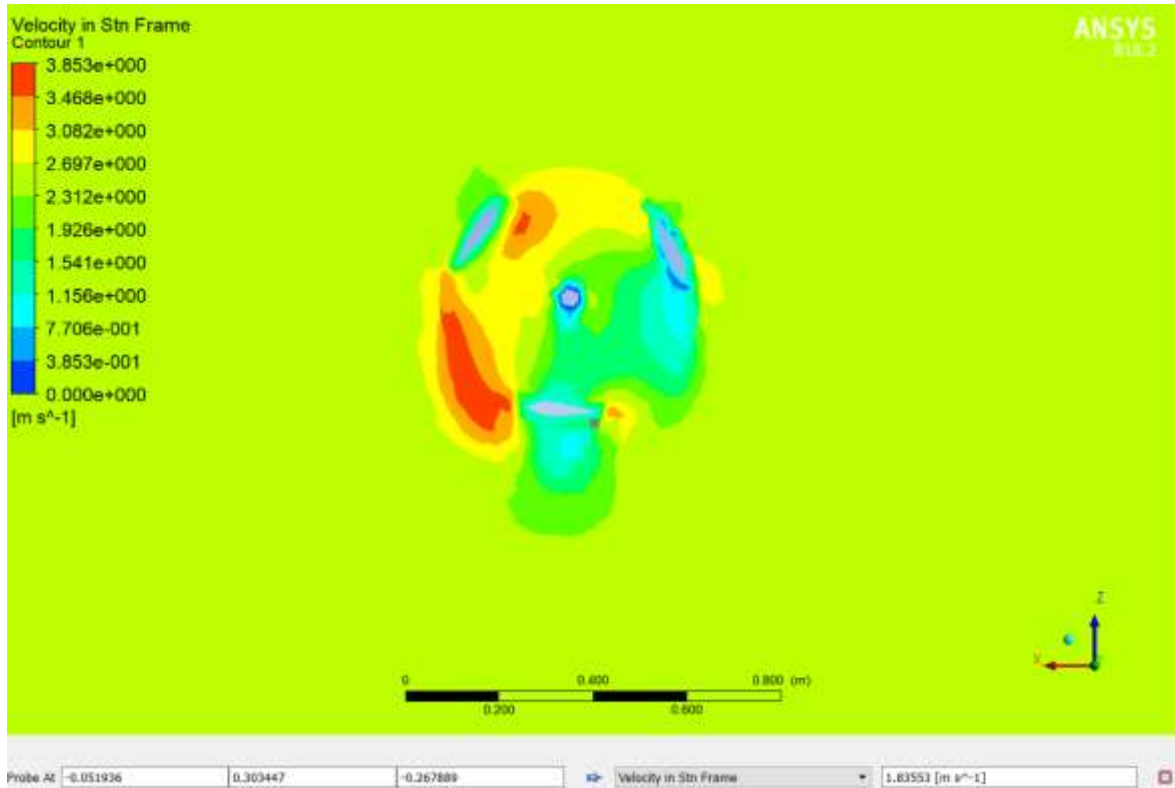
Ahora establecida la cuantificación del flujo másico se reemplaza en la (EC. 46) y sus velocidades del fluido.

$$\Delta E = \frac{1}{2} * (315 \text{ kg/s}) * [(1.05 \text{ m/s})^2 - (0.80 \text{ m/s})^2]$$

$$\Delta E = 72.84 \text{ J/s}$$

La ilustración 104 enseña la velocidad de entrada a 2.5 m/s y la rapidez 1.83 m/s a la salida del rotor, para la simulación 6 con turbina de tres álabes con ángulo de torcedura de 150°.

Ilustración 104. Contorno de velocidades - simulación 6 (2.5 m/s).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Flujo másico estipulado para otra condición del fluido en la simulación 6.

$$\dot{m} = (1000 \text{ kg/m}^3) * (0.30 \text{ m}^2) * (2.5 \text{ m/s})$$

$$\dot{m} = 750 \text{ kg/s}$$

Expresado el valor del flujo másico se suplanta en la (EC. 46) y sus velocidades del fluido.

$$\Delta \dot{E} = \frac{1}{2} * (750 \text{ kg/s}) * [(2.5 \text{ m/s})^2 - (1.83 \text{ m/s})^2]$$

$$\Delta \dot{E} = 1087.45 \text{ J/s}$$

A continuación, se realiza una síntesis de los coeficientes de potencia a partir de las condiciones del flujo de agua y los resultados del volumen de control antes ejecutado, ver tabla 14.

Tabla 14. Determinación de los Cp. por volumen de control.

| Simulación | Velocidad de entrada [m/s] | Velocidad de salida [m/s] | Flujo másico [kg/s] | Potencia mecánica [Watts] | Potencia del fluido [Watts] | Coefficiente de potencia [Cp.] |
|-------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | 1.05 | 0.77 | 315 | 80.26 | 174 | 0.46 |
| 2 | 2.5 | 1.71 | 750 | 1247.21 | 2343.75 | 0.53 |
| 3 | 1.05 | 0.85 | 315 | 60.91 | 174 | 0.35 |
| 4 | 2.5 | 1.98 | 750 | 863.18 | 2343.75 | 0.36 |
| 5 | 1.05 | 0.80 | 315 | 72.84 | 174 | 0.42 |
| 6 | 2.5 | 1.83 | 750 | 1087.91 | 2343.75 | 0.46 |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Las simulaciones expuestas en la tabla 14, donde se mantiene el rotor de la turbina igual en su diámetro (0.5 m), altura (0.6), perfil NACA 0020; cambiando solo el número de palas y su ángulo de torcedura. Las simulaciones 1, 2 con características de cuatro palas y ángulo de torcedura a 120°, demuestra coeficientes de potencia de (0.46 = 46% y 0.53 = 53%) para velocidades bajas y altas, respectivamente. En las simulaciones 3, 4 con rotor de tres palas y ángulo de torcedura a 120°, denota Cp. de (0.35 = 35% y 0.39 = 39%) a velocidad baja y alta, respectivamente. Para las simulaciones 5, 6 con rotor de cuatro palas y ángulo de torcedura a 150°, manifiesta coeficientes de (0.42 = 42%, 0.46 = 46%) en condiciones de mínima y máxima velocidad, respectivamente.

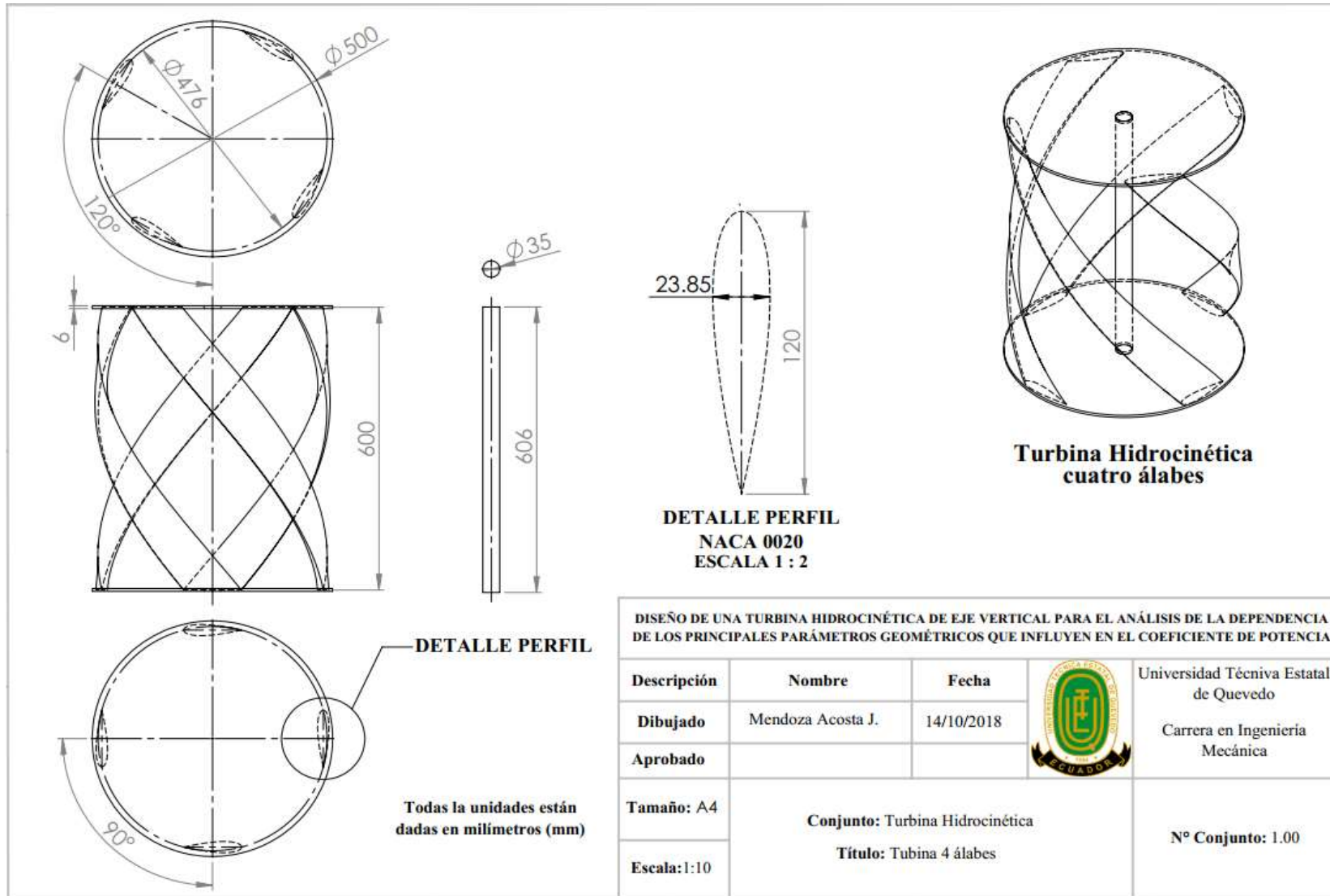
Con el procedimiento ejecutado en la presente memoria se estipulan los parámetros geométricos que denotan un mejor aporte para el rendimiento de la turbina hidrocínética de eje vertical helicoidal, en condiciones del rotor para cuatro palas con ángulo de torcedura a 120°. En la tabla 15 se cuantifican las medidas y condiciones que se obtienen de acuerdo a ecuaciones planteadas al inicio de este capítulo. Además, en la ilustración 105 se bosquejan las dimensiones del diseño final para la turbina hidrocínética de eje vertical helicoidal.

Tabla 15. Configuración de la turbina hidrocínética.

| Componentes | Ítem | Datos | | | Fórmula |
|------------------------|------|---------------------------|-------------------------|---------------------|---|
| | | Parámetro | Cantidad | Unidad | empleada |
| Propiedades del fluido | 1 | Densidad del fluido | 1000 | Kg/m ³ | - |
| | 2 | Viscosidad dinámica | 1.03 x 10 ⁻³ | N.m ² /s | - |
| | 3 | Velocidad del fluido | 1.05 – 2.5 | m/s | - |
| Turbina | 4 | Número de álabes | 4 | - | - |
| | 5 | Tipo de álabe | NACA 0020 | - | - |
| | 6 | Relación de solidez | 0.305 | - | $\sigma = \frac{n * C}{\pi * D}$ |
| | 7 | Relación de aspecto | 1.20 | - | $RA = \frac{H}{D}$ |
| | 8 | Diámetro | 0.50 | m | - |
| | 9 | Radio | 0.25 | m | $R = \frac{D}{2}$ |
| | 10 | Altura | 0.60 | m | - |
| | 11 | Área de barrido | 0.30 | m ² | $A_{cap} = D * H$ |
| | 12 | Longitud cuerda del álabe | 0.12 | m | $C = \frac{\sigma * \pi * D}{n}$ |
| | 13 | Ángulo de paso helicoidal | 56.80 | ° | $\delta = \tan^{-1} \left(\frac{n * H}{\pi * D} \right)$ |
| | 14 | Ángulo de torcedura | 120 | ° | - |
| | 15 | Cp. – 1.05 m/s | 0.46 | - | $Cp = \frac{Pot_{mecánica}}{Pot_{fluido}}$ |
| | 16 | Cp. – 2.5 m/s | 0.53 | - | $Cp = \frac{Pot_{mecánica}}{Pot_{fluido}}$ |

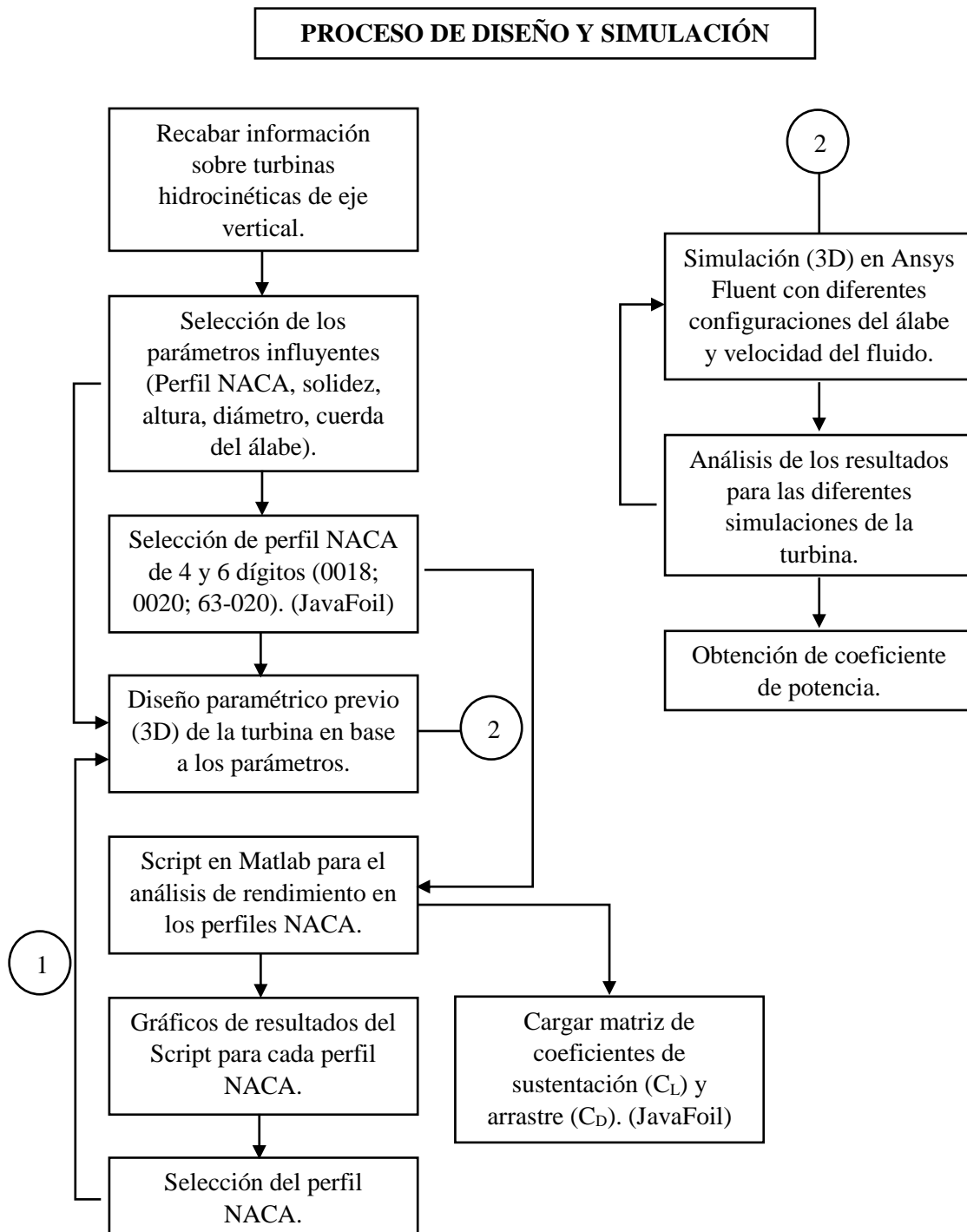
FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ilustración 105. Dimensiones de configuración en la turbina hidrocinética.



4.1.3.3.2. Flujograma del proceso de diseño y simulación

A continuación, se realiza una síntesis mediante un flujograma del proceso que se llevó a cabo para el diseño (CAD) tridimensional en el software de Solidworks, simulación bidimensional (Script) en Matlab R2017a y tridimensional (CFD) en el programa de Ansys v. 18.2.

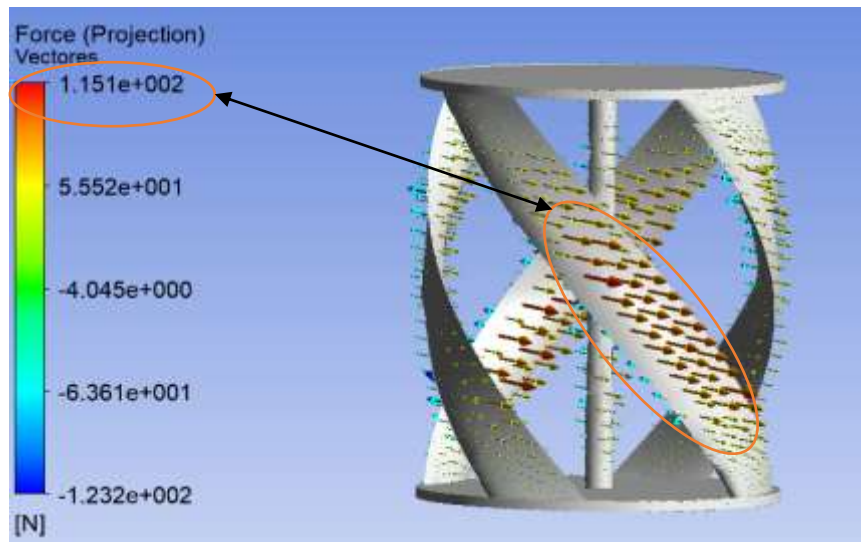


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.3.3.3. Análisis de cargas en los álabes

La ilustración 106 describe las fuerzas en la componente (X) que actúan en los álabes, pero enfocando la fuerza de mayor magnitud de 115.1 [N]. Fuerzas ejercidas en las palas a velocidad del fluido a 2.5 m/s.

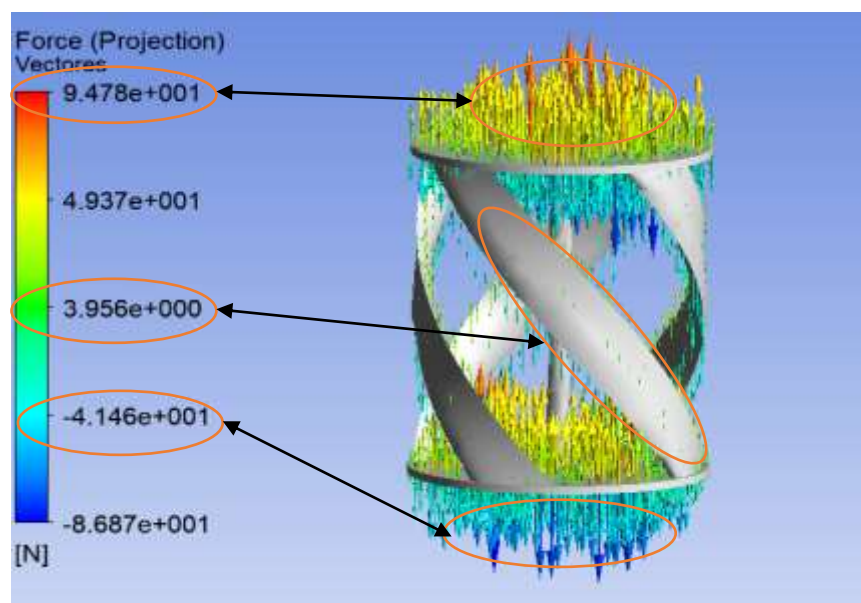
Ilustración 106. Fuerza en los álabes en la componente (X).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

La ilustración 107 muestra los vectores de fuerza en la componente (Y) que están en los álabes, con magnitud promedio de 3.95 [N] para la zona del álabe y mayor fuerza en las bases a 94.7 [N] para la superior y 86.87 [N] para la inferior.

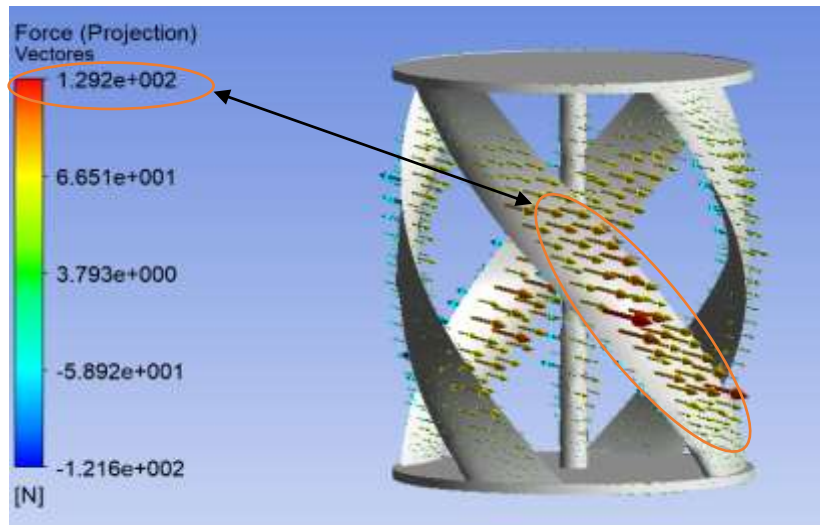
Ilustración 107. Fuerza en los álabes componente (Y).



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

La ilustración 108 describe las fuerzas en la componente (Z) para los álabes, produciéndose fuerzas con magnitud de 129.2 [N].

Ilustración 108. Fuerza en los álabes componente (Z).

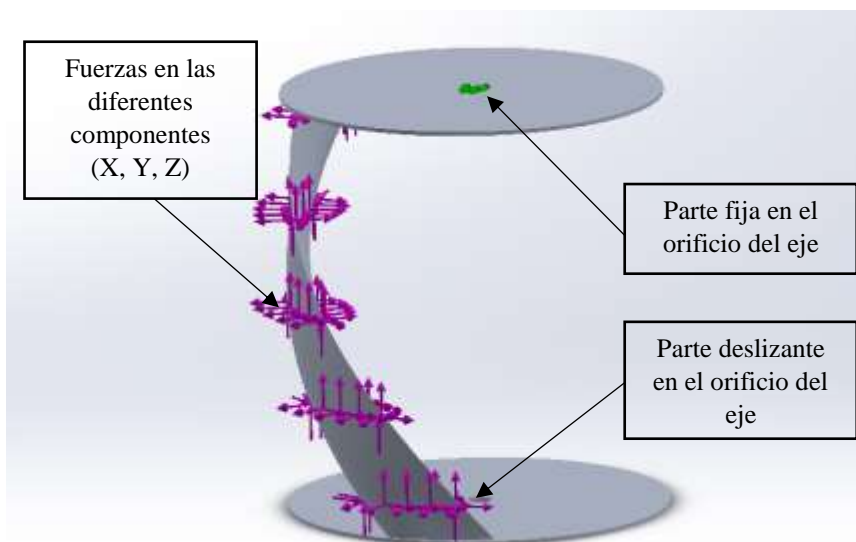


FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Con las fuerzas descritas en las ilustraciones anteriores, se escoge la de mayor impacto producida en las diferentes componentes (X, Y, Z) de la turbina de cuatro álabes para la máxima velocidad del fluido (2.5 m/s).

En la ilustración 109, se describe las cargas respectivas en las componentes X, Y, Z en la pala y la parte fija que será el orificio ubicado en la base superior para el eje del rotor de la turbina. Realizando un análisis de esfuerzos en los álabes mediante (FEM) en Solidworks.

Ilustración 109. Distribución de fuerzas y parte fija para el análisis.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Para la ilustración 110, se observa que las fuerzas generadas por el fluido en los álabes conducen a tolerar un máximo esfuerzo igual a 5.64×10^7 [Pa] en la zona del orificio de la base inferior, en donde está unido el eje que soporta la torsión que causa el movimiento circular del rotor de la turbina hidrocínética. El material seleccionado en este análisis es el aluminio 6061, descrita sus propiedades en la tabla 16.

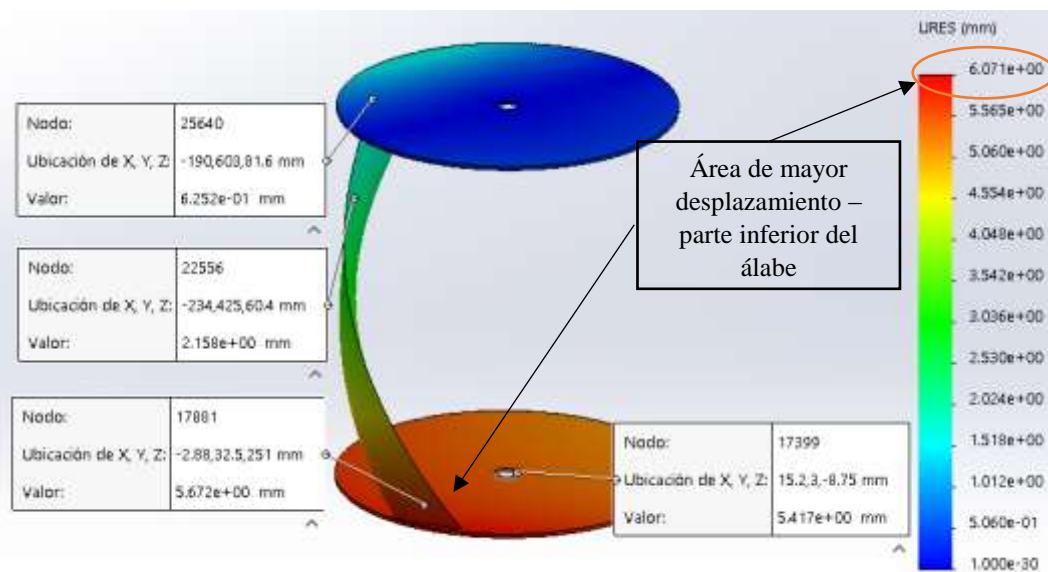
Ilustración 110. Esfuerzos producidos en el álabe – material de aluminio.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

La ilustración 111 muestra los desplazamientos que se ocasionan en la base inferior junto con el álabe. Esto se debe a que la turbina se encuentra en voladizo con fijación en el orificio de la base superior.

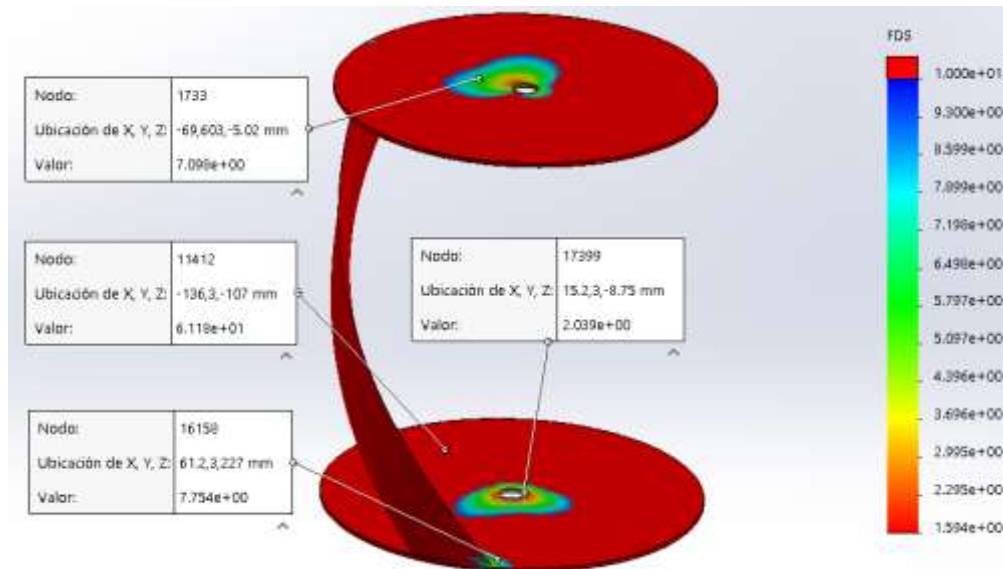
Ilustración 111. Desplazamientos en el álabe (mm) - material de aluminio.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

En la ilustración 112, se deduce que los álabes del rotor con material de aluminio 1061 toleran las condiciones impuestas por el agua con rapidez de 2.5 m/s e inclusive soportar un poco más debido a un factor de seguridad superior ($FS > 1.6$) a los orificios que es donde se transmiten los mayores esfuerzos al eje por las fuerzas ejercidas en los álabes.

Ilustración 112. Distinción de factor de seguridad – material aluminio.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Analizando por medio de las simulaciones los diferentes materiales descritos en la tabla 16, donde se da un mayor esfuerzo en la zona de los orificios como describen los valores en la tabla. Se observa que el aluminio denota buenas características de resistencia a los esfuerzos que se ocasionan en los álabes, a pesar que otros materiales son superiores en resistencia, lo que se busca es un material apropiado evitando de esta forma el sobredimensionamiento, manteniendo un factor de seguridad considerable y reducir de costos de manufactura. Además, destacar que el aluminio es ligero y resistente a la corrosión.

Tabla 16. Resistencia estructural de los álabes.

| Material | Módulo de elasticidad [GPa] | Esfuerzo σ Von Mises [MPa] | Límite elástico S_y [MPa] | Factor de seguridad mínimo [S_y/σ] |
|-----------------|------------------------------------|---|---|---|
| Aluminio 1061 | 69 | 56.45 | 90 | 1.6 |
| Nylon 6/10 | 8.3 | 53.12 | 139 | 2.61 |
| ABS | 2 | 51.62 | 29 | 0.56 |
| Acero aleado | 190 | 46.80 | 241.27 | 5.15 |

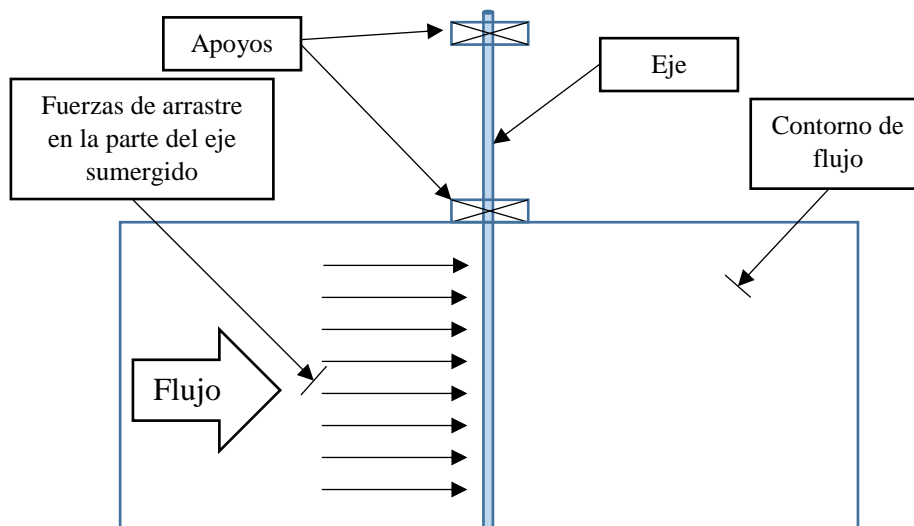
FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

4.1.3.3.4. Dimensionamiento del eje para la turbina

El tratamiento de datos para dimensionar el eje se parte de la carga que proporcionara la velocidad del fluido, para condiciones de arrastre en un flujo turbulento. El análisis se lo realiza en similitud como una viga apoyada en un extremo. A continuación, se desarrolla el procedimiento de cálculo.

Para mejor comprensión de como estará la fuerza en el eje, ver la ilustración 113, donde las fuerzas de arrastre actuaran solo para la parte del eje sumergida y la parte sobre el nivel de agua estará apoyado.

Ilustración 113. Fuerzas de arrastre en el eje.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

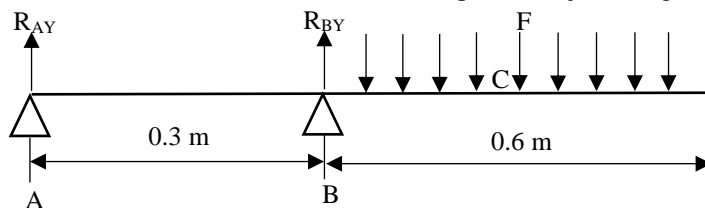
El área de sección transversal del eje sumergido es su altura de (0.6 m) por (0.035 m) de diámetro dando como resultado 0.021 m^2 ; con coeficiente de arrastre (0.5) a velocidad de 2.5 m/s. Se procede a reemplazar los valores en la siguiente ecuación:

$$F = \frac{C_D * \rho * A * W^2}{2} = \frac{(0.5) * (1000 \text{ kg/m}^3) * 0.021 \text{ m}^2 * 2.5 \text{ m/s}^2}{2}$$

$$F = 32.81 \text{ N}$$

La fuerza de arrastre de 32.81[N] que se produce en el eje sumergido, para convertirlo en fuerza distribuida se divide el valor para la longitud de (0.6 m) del eje bajo el agua. $F = 32.81 \text{ N}/0.6 \text{ m} = 54.68 \text{ N/m}$. En la ilustración 114 se muestra el ejemplo.

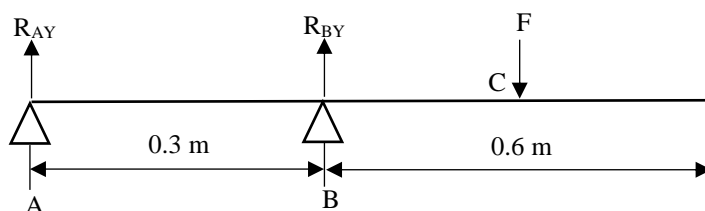
Ilustración 114. Fuerza distribuida en la parte del eje sumergido.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ahora se esquematiza el diagrama de fuerzas del eje y cómo va estar apoyado en la ilustración 115, la fuerza distribuida se la convierte a puntual ($F = 32.81$).

Ilustración 115. Esquema de las fuerzas en el eje de manera puntual.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

$$\sum F_Y = 0$$

$$R_{AY} + R_{BY} = 32.81 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

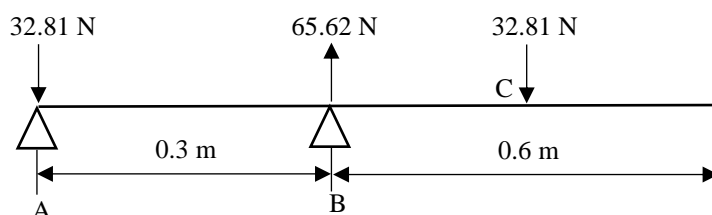
$$(R_{BY} * 0.3 \text{ m}) - (32.81 \text{ N} * 0.6 \text{ m}) = 0$$

$$R_{BY} = \frac{19.686 \text{ N} \cdot \text{m}}{0.3 \text{ m}}$$

$$R_{BY} = 65.62 \text{ N}$$

$$R_{AY} = -32.81 \text{ N}$$

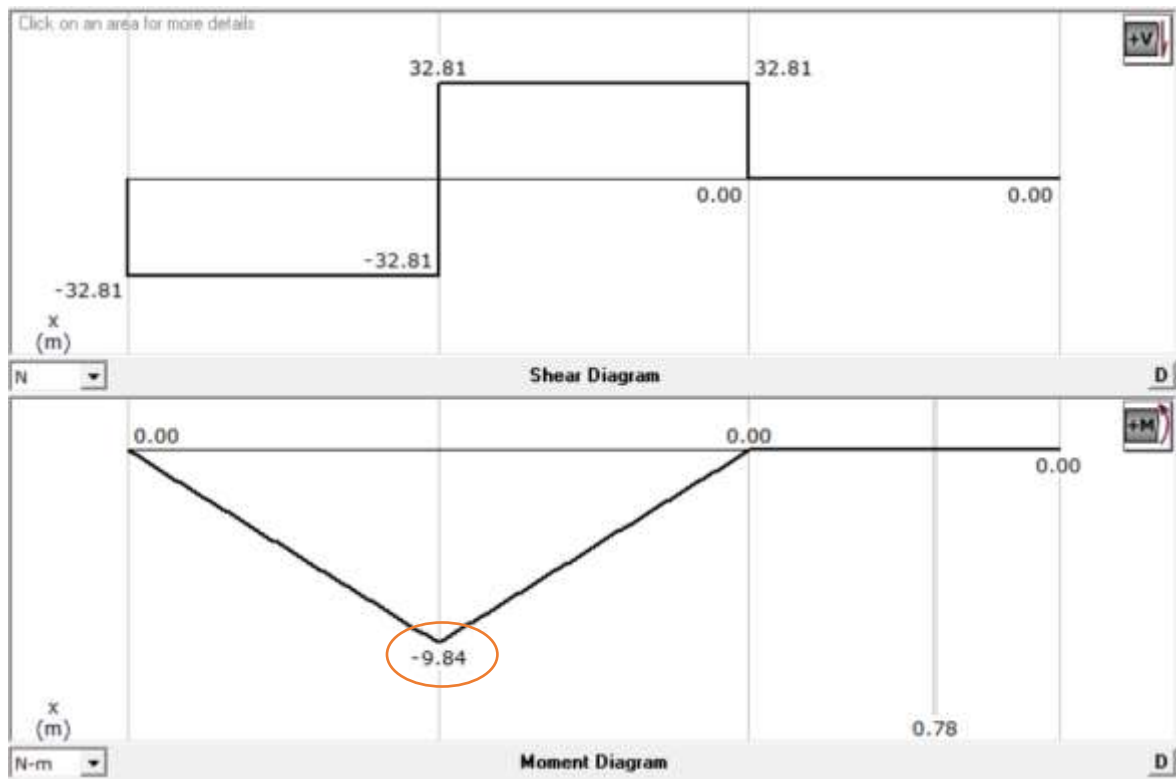
El nuevo diagrama de fuerzas quedaría de la siguiente forma:



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Ahora se muestran los diagramas de cortante y momento flector con el uso del programa MDSolids, ver ilustración 116.

Ilustración 116. Diagrama de cortante y momento flector.



FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Con la ejecución de la siguiente fórmula se puede calcular la deflexión para un eje de acero SAE-1020 [41].

$$y_{BC} = \frac{F * (x - l)}{6 * E * I} * [(x - l)^2 - a * (3x - l)] \quad \text{EC. 48}$$

$$I = \frac{\pi * d^4}{64} \quad \text{EC. 49}$$

$$I = \frac{\pi * (0.04 \text{ m})^4}{64}$$

$$I = 1.25663 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$y_{BC} = \frac{(32.81 \text{ N}) * (0.9 \text{ m} - 0.3 \text{ m})}{6 * 200 \text{ GPa} * 1.26 \times 10^{-7} \text{ m}^4} [(0.9 \text{ m} - 0.3 \text{ m})^2 - 0.3 \text{ m} * (3(0.9 \text{ m}) - 0.3 \text{ m})]$$

$$y_{BC} = 4.6871 \times 10^{-5} \text{ m} = 0.0468 \text{ mm}$$

Conociendo que el momento flexionante alternante es 9.84 N.m, se procede a calcular el torque medio para una velocidad angular de 5 rad/s. Para luego con el momento y torque medio obtener el factor de seguridad de diseño.

$$Pot = \frac{Cp * \rho * A * W^3}{2} = \frac{(0.48) * (1000 \text{ kg/m}^3) * (0.30 \text{ m}^2) * (2.5 \text{ m/s}^3)}{2}$$

$$Pot = 1125 \text{ Watt}$$

$$T_m = \frac{Pot}{\omega} \quad \text{EC. 50}$$

$$T_m = 225 \text{ N.m}$$

Tomando en consideración las propiedades del acero SAE-1020 CD que son: $S_{ut} = 470 \text{ MPa}$ y $S_y = 390 \text{ MPa}$; ver anexo 20. Aplicando la ecuación del límite de resistencia a fatiga [41].

$$S_e = S'_e * K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f \quad \text{EC. 51}$$

Donde los factores de diseño se detallan:

- Factor de modificación de superficie - $K_a = a(S_{ut})^b$; $a = 4.51 \text{ MPa}$; $b = -0.265$
- Factor de modificación del tamaño - $K_b = 1.24(d)^{-0.107}$
- Factor de modificación de la carga - $K_c = 1$
- Factor de modificación de la temperatura - $K_d = 1$
- Factor de confiabilidad - $K_e = 1$
- Factor efectos varios - $K_f = 0.8$
- Límite de resistencia a la fatiga - $S'_e = 0.5(S_{ut})$

$$S_e = 235 \text{ MPa} * 0.883 * 0.835 * 1 * 1 * 1 * 0.8$$

$$S_e = 138.61 \text{ MPa}$$

Aplicando el criterio de falla por fatiga de Goodman, en donde los factores $K_f = K_{fs} = 1$ porque no hay radios de muescas en el eje, ver anexo 21. Y los $M_m = T_a = 0$.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f \cdot M_a)^2 + 3(K_{fs} \cdot T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f \cdot M_m)^2 + 3(K_{fs} \cdot T_m)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

Simplificado los factores en la ecuación de Goodman se reduce a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(M_a)^2]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} [3(T_m)^2]^{1/2} \right\} \quad \text{EC. 52}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0.035 \text{ m})^3} \left\{ \frac{1}{138.61 \text{ MPa}} [4(9.84 \text{ N.m})^2]^{1/2} + \frac{1}{470 \text{ MPa}} [3(225 \text{ N.m})^2]^{1/2} \right\}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0.035 \text{ m})^3} \{1.41981 \times 10^{-7} + 8.291732 \times 10^{-7}\}$$

$$\frac{1}{n} = 0.1153 \rightarrow \mathbf{n = 8.65}$$

Se puede reducir el factor de seguridad ($n = 4.39$), al disminuir el diámetro del eje en la ecuación (4.1.3.7) como se presenta a continuación.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0.025 \text{ m})^3} \{1.41981 \times 10^{-7} + 8.291732 \times 10^{-7}\}$$

$$\frac{1}{n} = 0.31686 \rightarrow \mathbf{n = 3.15}$$

Para un diámetro de veinte y cinco milímetros (0.025 m) se obtiene un factor de seguridad aún conservador de ($n = 3.15$), de esta forma estipulando que el material no pasa a la zona de fluencia.

4.2. Discusión

Con los datos procesados por medio de la recopilación de información se logró delimitar los parámetros más influyentes para una turbina hidrocínética de eje vertical. De esta forma diseñar el modelo de los álabes en el rotor, diámetro, altura entre otros con las medidas preliminares estipuladas en la tabla 17. Pero con la perspectiva de elaborar un diseño paramétrico que permita cambiar todas estas configuraciones e interactuar con ellas para su análisis.

Tabla 17. Medidas preliminares del diseño de la turbina.

| Diámetro | Altura | Perfil NACA | N° de palas | Torcedura | L. cuerda |
|-----------------|---------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 0.5 m | 0.6 m | 0018 | 3 | 120° | 0.15 m |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Antes de establecer una configuración para el diseño final y simular el comportamiento de la turbina, se efectuó un análisis en un script de Matlab llevando un procedimiento diferente de los datos, no solo por medio de la lectura sino también con apoyo de este software computacional que permitió comprobar, comparar y constituir las variables inherentes en el coeficiente de potencia de una forma bidimensional. Para el análisis y dimensionamiento de la turbina por defecto se consideró un álabe que gira 360° alrededor del rotor obteniendo como resultado la potencia de la turbina, considerando diferentes perfiles.

Tabla 18. Resultados de cada perfil con análisis bidimensional.

| Resultados | NACA 0018 | NACA 0020 | NACA 63-020 |
|---------------------|------------------|------------------|--------------------|
| Velocidad del flujo | 1.05 m/s | 1.05 m/s | 1.05 m/s |
| Cuerda del álabe | 0.12 m | 0.12 m | 0.12 m |
| Torque | 10.15 N.m | 12.95 N.m | 7.75 N.m |
| Potencia turbina | 72.44 W | 92.47 W | 55.34 W |
| Cp. | 0.41 | 0.53 | 0.31 |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Comprobando un mejor desempeño para el perfil NACA 0020 de cuatro dígitos y acertado lo expuesto por ciertos autores (Marturet P.; Martin Wosnik; Sathit Pongduang) que este perfil muestra mejores prestaciones. Todo este proceso conlleva a una diferencia entre los

datos analizados y resultados arrojados por la simulación tridimensional para diagnosticar la configuración y optar con los valores detallados en la tabla 19.

Tabla 19. Comparación de las variables para la turbina hidrocínética.

| Información recabada | | Simulación por software | |
|-----------------------------|-------------|--------------------------------|----------------|
| N° de palas | 3 | N° de palas | 4 |
| Perfil NACA | 0018 | Perfil NACA | 0020 |
| Ángulo de torcedura | 120° | Ángulo de torcedura | 120° |
| Ángulo de paso | 60° | Ángulo de paso | 56.86° |
| Cuerda del álabe | 0.16 m | Cuerda del álabe | 0.12 m |
| Diámetro | 0.45 m | Diámetro | 0.5 m |
| Altura | 0.6 m | Altura | 0.6 m |
| Velocidades | 2.5 – 5 m/s | Velocidades | 1.05 – 2.5 m/s |

FUENTE: (DANIEL MENDOZA A; 2018)

Con la geometría de la turbina estipulada se presentan ventajas para la ejecución de proyectos y futuras investigaciones. Con el objetivo de optimizar prototipos para realizar pruebas experimentales en un banco hidráulico. En la actualidad el recurso computacional es de gran versatilidad para la ejecución de proyectos antes de su implantación.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- 1) El presente trabajo tiene como fin analizar la dependencia del coeficiente de potencia en una turbina hidrocínética de eje vertical. Existen varios diseños comunes para la turbina, el diseño seleccionado es de flujo cruzado helicoidal. Entre los parámetros para el bosquejo de una turbina helicoidal están: el número de palas, el perfil de la pala, ángulo de paso helicoidal, relación de aspecto, diámetro, ángulo de torcedura, altura, solidez.

Con la obtención de los datos recogidos, los perfiles aerodinámicos más recomendados son el NACA 0018 y 0020 para el modelamiento de la turbina hidrocínética; la solidez del perfil en un rango de 0.11 hasta 0.40 como valor máximo, donde el mayor valor denota una velocidad de punta más baja pero un mejor autoarranque y ángulo de paso helicoidal para mejores desempeños de 50° a 60° como máximo. Los parámetros primordiales dimensionales de una turbina de eje vertical: diámetro, relación de solidez, ángulo de paso helicoidal y ángulo de torcedura, inciden en gran medida en el potencial energético de la turbina y un aumento en la solidez denota mejoras en la eficiencia de la turbina.

- 2) En el desarrollo del modelamiento de la turbina se utilizó el software Solidworks para el modelo CAD, útil para el tratamiento antes de su obtención real, porque muestra la idea del proyecto formando una visualización virtual de manera tridimensional (3D), además permite variar las dimensiones y propiedades de la turbina que es el objeto a ser analizado en esta memoria.

Con el diseño preliminar de la turbina se realizará variaciones en las dimensiones para las pruebas experimentales y en el análisis computacional se utilizan para determinar la mejor configuración posible de diseño, teniendo en cuenta las restricciones de velocidades en el estudio.

- 3) Por medio del análisis en condiciones dinámicas en Matlab se estipularon superiores desempeños en los coeficientes de sustentación ($C_L = 0.15$ hasta 1.7), arrastre ($C_D = 0$ hasta 0.45) y por ende aumento en la fuerza de sustentación que atribuyen a un perfil

NACA 0020, de esta forma descartando posibles simulaciones tridimensionales del perfil NACA 0018.

En la simulación tridimensional, para una configuración de cuatro palas se obtuvieron potencias de 86.1 Watts a velocidades de 1.05 m/s y 1220.73 Watts a rapidez 2.5 m/s del fluido; además con la cuantificación del torque para la velocidad mínima y máxima de 34.44 N.m y 244.14 N.m, respectivamente. Denotando un mejor arreglo de cuatro palas para sobresalientes rendimientos en la extracción de potencia del flujo de agua, en comparación con las demás simulaciones planteadas.

- 4) Una vez realizadas las simulaciones respectivas variando los parámetros principales, queda en constancia para un mejor rendimiento a velocidades bajas, altas de 1.05 m/s y 2.5 m/s, respectivamente; una turbina de cuatro álabes con perfil NACA 0020 de diámetro 0.5 m, altura de 0.6 m, ángulo de torcedura a 120° y ángulo de paso 56.80° abordará coeficientes de potencia de $0.49=49\%$ hasta $0.52=52\%$ determinados con el procedimiento de las condiciones de trabajo establecidas.

5.2. Recomendaciones

Para recabar información es importante que sean fuentes actualizadas: artículos, estudios de posgrado y pregrado de al menos cinco años atrás como máximo desde la elaboración de la memoria. De esta manera se asegura la base científica del estado del arte para estas turbinas hidrocínicas con rotor de eje vertical helicoidal.

Se recomienda elegir un mallado local (por medio de métodos, tamaño proporcionado en las entidades), sobre todo en el dominio del volumen de control para la turbina que es la parte de mayor interés a ser analizada para evitar difusión de resultados en la simulación (CFD) y el ahorro del recurso computacional.

Considerar los esfuerzos que se producen para la elección del material más apropiado, considerando que la evolución tecnológica avanza contribuyendo con recursos más resistentes, livianos y competitivos en el mercado.

Se recomienda continuar con el estudio para mejorar la eficiencia de la turbina hidrocínica con rotor de eje vertical a partir del script de Matlab, realizando una interfaz (programa) que permita analizar las variables del diseño paramétrico elaborado u otras formas de configuración independientes del código en Matlab.

Se recomienda comprar equipos de medición (Sensor de torque, tacómetro, velocímetro) para la elaboración de pruebas experimentales en proyectos futuros sobre la optimización para prototipos de turbinas hidrocínicas de eje vertical.

CAPÍTULO VI
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1. Referencias

- [1] J. K. a. G. S. Bhuyan, «OCEAN ENERGY: GLOBAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT STATUS,» IEA-OES Document No.: T0104 , Columbia Británica, 2009.
- [2] Anmastache, «Turbina Hidrocinética,» 24 11 2015. [En línea]. Available: <https://anmastache.wordpress.com/2015/11/24/energia-hidrocinetica-expo-4/>. [Último acceso: 23 12 2017].
- [3] F. Ramos, «Fluídos reales: Leyes de conservación,» 2013. [En línea]. Available: http://www3.uah.es/gifadocumentos/FA/Transparencias_FA/tema5_fa.pdf. [Último acceso: 23 12 2017].
- [4] Y. Piñero, Volumen de control, Venezuela: Instituto Universitario de Tecnología Antonio José de Sucre, 2010.
- [5] K. 3D, «ABS y PLA:Diferencias, ventajas y desventajas,» Kareca 3D, pp. 1-2, 2016.
- [6] SolidWorks, «SolidWorks,» 2017. [En línea]. Available: https://www.solidworks.es/sw/656_ESN_HTML.htm. [Último acceso: 26 11 2017].
- [7] SolidWorks, «Dinámica de fluidos computacional (CFD),» 2017. [En línea]. Available: <https://www.solidworks.es/sw/products/simulation/computational-fluid-dynamics.htm>. [Último acceso: 26 11 2017].
- [8] Ansys, «Dinámica de fluidos computacional,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/Products/Fluids>. [Último acceso: 03 02 2018].
- [9] M. J. Castaño, «Análisis de un sistema de conversión para generación hidrocinética,» Universidad de pereira - trabajo de grado , Colombia , 2015.
- [10] L. R. León, Instalaciones de aprovechamiento hidrocinético, Santa Clara, 2015.
- [11] M. d. E. y. E. Renovables, Atlas Eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica, Quito, 2013.
- [12] M. F. Voneschen, Introducción a la teoría de las turbinas eólicas, Cataluña: LA VERITAT , 2009.
- [13] F. White, Mecánica de Fluidos, Ciudad de México: McGraw-Hill, 2013.
- [14] R. A. C. MIRANDA, «Diseño y evaluación experimental de la implementación de una turbina hidrocinética para generación eléctrica,» Quito, 2017.

- [15] B. G. Q. J. Khan M.J., «Conversión de sistemas hidrocineéticos en tubina de eje vertical para la aplicacion de ríos y mareas.,» ELSEVIER, 2015.
- [16] E. G. S. C. Gustavo J. Marturet P, « MODELACIÓN DE POTENCIALES ENERGÉTICOS EN TURBINAS HELICOIDALES,» --, vol. 19, nº 76, p. 10, 2015.
- [17] J. A. B. H. C. Johnson, «Design and Manufacture of a Cross-Flow Helical Tidal Turbine,» Capstone Project Report, 2011.
- [18] B. Wahyudi, «Diseño de optimización de la hoja difusora del Savonius con deflector en movimiento para el rotor de turbina hidrocineética de flujo transversal,» Conferencia internacional sobre ingeniería y aplicación de energía sostenible, 2015.
- [19] M.H. Mohamed, «Performance investigation of H-rotor darrieus turbine with new airfoil shapes.,» de Ciencia de la Ingeniería y Tecnología, 2012.
- [20] I. Paraschivoiu., «Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept.,» Polytechnic International Press, 2012.
- [21] A. Gorlov, «Helical Turbine and Fish Safety,» Tidewalker Associates, Boston, 2010.
- [22] H. d. Battista, «Turbinas eólicas - Tesis Doctoral,» Universidad de la Plata, 2013.
- [23] G. J. M. Pérez, A. García y D. Rojas, «DISEÑO DE UN BANCO DE ENSAYOS DE TURBINA HIDROCINÉTICA TIPO GORLOV,» vol. 1, p. 88, Octubre 2014.
- [24] C. R. Thomaz Junior, «Desempeño aerodinámico de turbinas eólicas de eje vertical en función de temperatura de superficie de álabe,» Repositorio Académico, Chile, 2012.
- [25] N. A. Series, «NACA Airfoil Series,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0041.shtml>. [Último acceso: 24 12 2017].
- [26] M. O. L. Hansen, Aerodynamics of Wind Turbines, London: Earthscan, 2012, p. 192.
- [27] A. E. A. FrancescoBalduzzi, «Feasibility analysis of a Darrieus vertical-axis wind turbine installation in the rooftop of a building,» Sciencedirect, vol. 97, pp. 921-929, Septiembre, 2012.
- [28] M. M. Bhutta y U. F. Z. A. R. J. Nasir Hayat Ahmed, «Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques,» Sciencedirect, vol. 16, nº 4, p. 1926 –1939, Mayo, 2012.

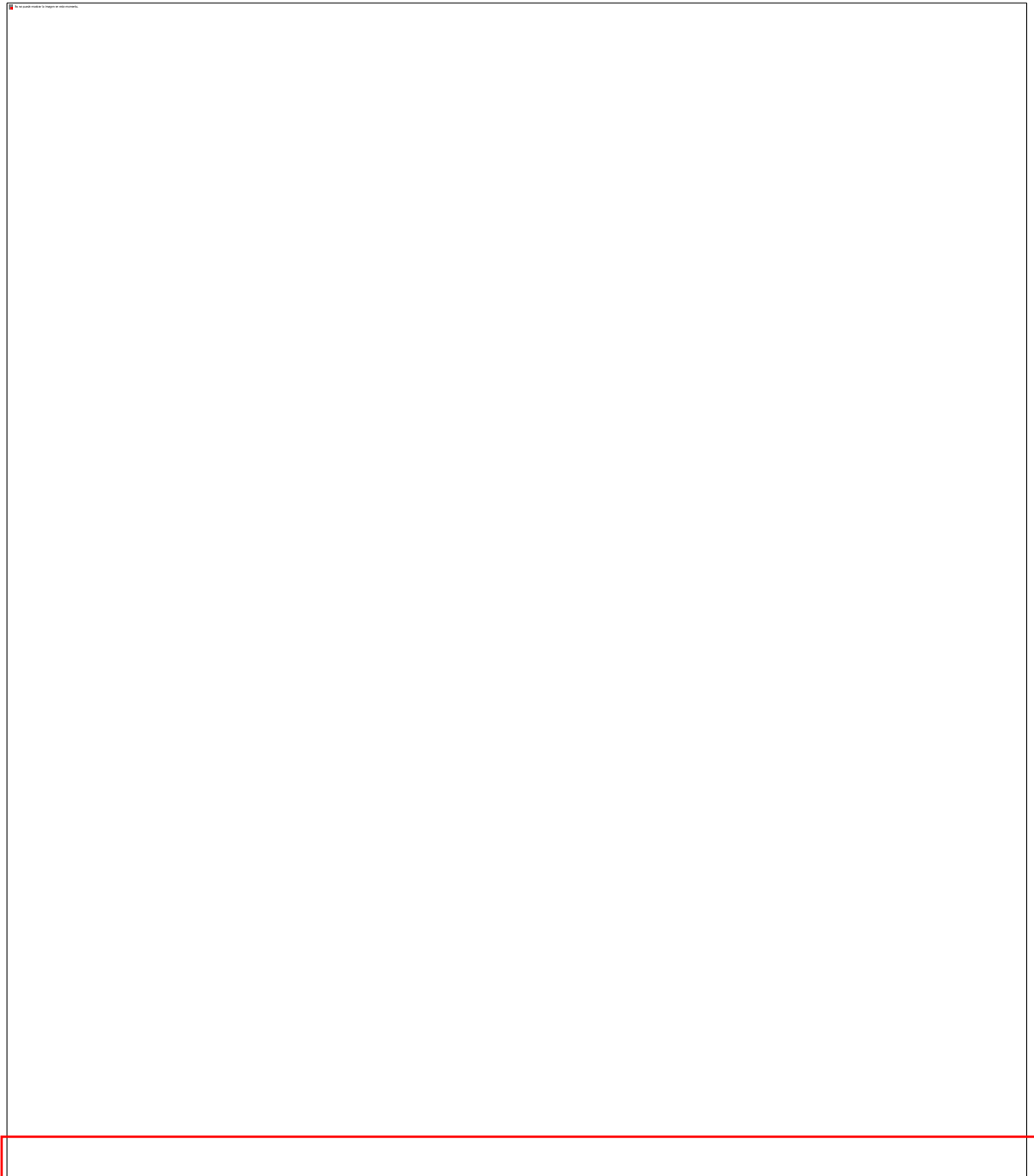
- [29] M. Shiono, «Output Characteristics of Darrieus Water Turbine With Helical Blades For Tidal Current Generations,» Proceedings of the 12th international off shore and polar engineering conference, vol. 12, n° 12, 2002.
- [30] A. L. Niblick, «Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System,» University of Washington, Washington, 2012.
- [31] A. Niblick, R. Cavagnaro, T. Hall y J. Thomson, «CROSS- FLOW TURBINE PERFORMANCE AND WAKE CHARACTERIZATION,» 11 04 2013. [En línea]. Available:
[http://depts.washington.edu/nnmrec/docs/Polagye_\(2013\)_GMREC_Cross-flow.pdf](http://depts.washington.edu/nnmrec/docs/Polagye_(2013)_GMREC_Cross-flow.pdf).
 [Último acceso: 27 01 2018].
- [32] J. S. y. C. F. Tsai, «The Conceptual Design of a Tidal Power Plant in Taiwan,» 06 2014. [En línea]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/271198078_The_Conceptual_Design_of_a_Tidal_Power_Plant_in_Taiwan. [Último acceso: 27 01 2018].
- [33] K.-S. L. J.-S. P. a. J. H. K. Tuyen Quang Le, «Flow-driven rotor simulation of vertical axis tidal turbines: A comparison of helical and straight blades,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/ijnaoe.2014.6.issue-2/ijnaoe-2013-0177/ijnaoe-2013-0177.pdf>. [Último acceso: 27 01 2018].
- [34] S. K. C. y. T. Y. Pongduang, «Experimental Investigation of Helical Tidal Turbine Characteristics with Different Twists,» 11 2015. [En línea]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/285782003_Experimental_Investigation_of_Helical_Tidal_Turbine_Characteristics_with_Different_Twists. [Último acceso: 2017 01 2018].
- [35] G. J. Marturet, E. d. J. Gutiérrez y S. A. Caraballo, «Influencia de parámetros dimensionales en potenciales energéticos de turbinas hidrocínicas Gorlov,» Novo Tékhne, vol. 3, n° 2, p. 13, 2017.
- [36] P. y. W. M. Bachant, «“Experimental investigation of helical cross-flow axis hydrokinetic turbines, including effects of waves and turbulence”,» In ASME-JSMEKSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, American Society of Mechanical, pp. 1895 - 1906, 2011.
- [37] G. G. Samuel, «Dinámica de fluidos computacional (CFD),» Barcelona, 2017.

- [38] R. L. Mott, Mecánica de fluidos, México: Pearson Educación, 2006.
- [39] C. K. Y. T. Sathit Pongduanga, «Experimental Investigation of Helical Tidal Turbine Characteristics with Different Twists,» ScienceDirect, vol. 2, p. 13, 2015.
- [40] S. S. A. D. S. S. M. J. Rohit Shriyan, «Microturbine :Fabrication Forefficient Power,» INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH, vol. 6, p. 5, Junio 2014.
- [41] Shigley, Diseño en ingeniería mecánica, México: McGraw-Hill, 2008.

CAPÍTULO VII
ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1. Caudales medios diarios en el año 2007.



Anexo 2. Caudales medios diarios en el año 2008.

2008

| H347 | | QUEVEDO EN QUEVEDO | | | | | | | | | | Area Drenaje:3507 km2 | |
|--------------|-----------|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|--|
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | |
| 1 | 61.72 * | 1283.28 * | 740.18 * | 979.13 * | 966.76 * | 158.69 * | 88.84 * | 76.24 * | 64.64 * | 52.02 * | 48.13 * | 56.07 * | |
| 2 | 66.13 * | 1220.87 * | 1453.57 * | 1411.84 * | 901.08 * | 154.01 * | 88.84 * | 75.44 * | 63.90 * | 52.02 * | 47.50 * | 56.07 * | |
| 3 | 125.37 * | 1057.53 * | 1947.87 * | 1317.86 * | 866.48 * | 145.99 * | 88.84 * | 75.44 * | 63.16 * | 50.71 * | 46.87 * | 56.07 * | |
| 4 | 162.31 * | 801.12 * | 1452.27 * | 872.27 * | 775.28 * | 135.98 * | 88.84 * | 75.44 * | 61.71 * | 50.71 * | 46.87 * | 56.07 * | |
| 5 | 280.20 * | 665.79 * | 1234.86 * | 676.33 * | 703.74 * | 131.65 * | 87.98 * | 75.44 * | 61.71 * | 50.06 * | 48.13 * | 56.07 * | |
| 6 | 339.74 * | 643.55 * | 1134.10 * | 660.86 * | 646.28 * | 128.47 * | 87.11 * | 75.44 * | 60.99 * | 49.41 * | 48.13 * | 57.45 * | |
| 7 | 236.61 * | 612.18 * | 803.74 * | 827.79 * | 558.88 * | 129.51 * | 87.11 * | 75.44 * | 59.56 * | 49.41 * | 49.41 * | 57.45 * | |
| 8 | 191.00 * | 574.59 * | 666.18 * | 719.53 * | 440.76 * | 131.64 * | 87.11 * | 73.84 * | 58.85 * | 48.77 * | 49.41 * | 58.85 * | |
| 9 | 196.21 * | 536.06 * | 874.67 * | 558.88 * | 375.11 * | 131.64 * | 85.39 * | 73.84 * | 58.85 * | 48.13 * | 49.41 * | 58.85 * | |
| 10 | 212.41 * | 509.65 * | 892.59 * | 680.81 * | 302.29 * | 131.64 * | 85.39 * | 73.84 * | 58.15 * | 48.13 * | 49.41 * | 58.85 * | |
| 11 | 282.54 * | 520.56 * | 798.25 * | 562.01 * | 254.23 * | 130.58 * | 85.39 * | 73.84 * | 57.45 * | 48.13 * | 50.71 * | 60.27 * | |
| 12 | 368.78 * | 554.03 * | 933.40 * | 439.30 * | 239.34 * | 129.51 * | 85.39 * | 72.26 * | 57.45 * | 47.50 * | 50.71 * | 60.27 * | |
| 13 | 377.28 * | 593.21 * | 780.69 * | 448.84 * | 236.42 * | 127.40 * | 84.53 * | 72.26 * | 57.45 * | 46.87 * | 50.71 * | 60.27 * | |
| 14 | 320.14 * | 696.32 * | 624.14 * | 465.17 * | 232.08 * | 124.25 * | 83.68 * | 71.48 * | 57.45 * | 46.87 * | 52.02 * | 60.27 * | |
| 15 | 416.98 * | 815.74 * | 626.54 * | 620.26 * | 233.52 * | 123.21 * | 87.11 * | 70.70 * | 57.45 * | 45.62 * | 52.02 * | 61.71 * | |
| 16 | 421.02 * | 1075.70 * | 380.70 * | 518.45 * | 296.69 * | 123.21 * | 83.68 * | 70.70 * | 56.76 * | 45.62 * | 52.02 * | 61.71 * | |
| 17 | 397.64 * | 1439.04 * | 454.93 * | 471.41 * | 282.14 * | 125.29 * | 82.84 * | 70.70 * | 56.07 * | 45.62 * | 52.02 * | 61.71 * | |
| 18 | 430.74 * | 1943.33 * | 509.74 * | 386.26 * | 252.73 * | 122.18 * | 82.00 * | 69.16 * | 56.07 * | 45.62 * | 52.02 * | 63.16 * | |
| 19 | 469.43 * | 1844.37 * | 536.06 * | 325.20 * | 232.12 * | 121.15 * | 82.00 * | 68.39 * | 54.70 * | 45.62 * | 52.02 * | 65.38 * | |
| 20 | 469.85 * | 1651.02 * | 1051.70 * | 376.95 * | 215.14 * | 119.10 * | 82.00 * | 67.63 * | 54.70 * | 45.62 * | 52.69 * | 66.12 * | |
| 21 | 415.05 * | 1413.53 * | 1056.34 * | 391.96 * | 204.21 * | 115.07 * | 82.00 * | 67.63 * | 54.70 * | 46.87 * | 53.35 * | 66.12 * | |
| 22 | 434.70 * | 1241.50 * | 603.04 * | 371.41 * | 184.53 * | 111.11 * | 82.00 * | 67.63 * | 54.70 * | 46.87 * | 53.35 * | 67.63 * | |
| 23 | 454.93 * | 1066.00 * | 429.12 * | 391.93 * | 168.30 * | 108.18 * | 80.33 * | 66.12 * | 53.35 * | 46.87 * | 53.35 * | 69.16 * | |
| 24 | 599.97 * | 960.38 * | 483.19 * | 407.25 * | 161.07 * | 103.40 * | 78.68 * | 66.12 * | 53.35 * | 46.87 * | 53.35 * | 69.16 * | |
| 25 | 761.35 * | 1098.19 * | 505.48 * | 585.12 * | 159.87 * | 98.73 * | 78.68 * | 66.12 * | 52.02 * | 46.87 * | 53.35 * | 69.16 * | |
| 26 | 912.49 * | 1091.42 * | 492.70 * | 505.41 * | 187.19 * | 95.07 * | 77.66 * | 66.12 * | 52.02 * | 46.87 * | 54.70 * | 69.16 * | |
| 27 | 954.39 * | 907.24 * | 384.74 * | 450.82 * | 180.70 * | 92.38 * | 77.05 * | 66.12 * | 52.02 * | 46.87 * | 54.70 * | 69.16 * | |
| 28 | 909.88 * | 821.32 * | 559.54 * | 471.41 * | 169.51 * | 89.72 * | 77.05 * | 66.12 * | 52.02 * | 48.13 * | 54.70 * | 69.16 * | |
| 29 | 951.40 * | 745.52 * | 663.32 * | 509.81 * | 161.07 * | 90.60 * | 77.05 * | 66.12 * | 52.02 * | 48.13 * | 56.07 * | 69.16 * | |
| 30 | 1186.79 * | | 766.98 * | 638.74 * | 158.69 * | 89.72 * | 77.05 * | 64.64 * | 52.02 * | 48.13 * | 56.07 * | 69.16 * | |
| 31 | 1361.53 * | | 1029.79 * | | 158.69 * | | 77.05 * | 64.64 * | | 48.13 * | | 70.70 * | |
| Caudal Max. | 1372.38 * | 1991.19 * | 2008.86 * | 1646.82 * | 1003.07 * | 158.69 * | 88.84 * | 77.05 * | 64.64 * | 52.02 * | 56.07 * | 70.70 * | |
| Día | 31 | 18 | 3 | 2 | 1 | 1 | vv | 1 | 1 | vv | vv | 31 | |
| Hora | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | | 6 | 6 | | | 6 | |
| Caudal Min. | 60.27 * | 509.65 * | 362.27 * | 320.05 * | 158.69 * | 88.84 * | 77.05 * | 64.64 * | 52.02 * | 45.62 * | 46.87 * | 56.07 * | |
| Día | 1 | 10 | 27 | 19 | vv | 28 | vv | w | vv | vv | vv | w | |
| Hora | 6 | 18 | 18 | 18 | | 18 | | | | | | | |
| Caudal Medio | 476.41 | 978.73 | 801.63 | 801.43 | 351.77 | 120.64 | 83.19 | 70.48 | 56.84 | 47.84 | 51.44 | 62.92 | |

NOTA: *CALCULADO CON DATOS LIMNIMETRICOS

vv = Evento registrado en varios días

Anexo 3. Caudales medios diarios para el año 2009.

2009

| H347 | | QUEVEDO EN QUEVEDO | | | | | | | | | | | Area Drenaje:3507 km2 | |
|--------------|-----------|--------------------|-----------|-----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------------------|--|
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | | |
| 1 | 70.70 * | 778.61 * | 822.08 * | 853.10 * | 217.91 * | 106.26 * | 55.38 * | | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 49.41 * | | |
| 2 | 70.70 * | 593.89 * | 701.20 * | 685.93 * | 217.91 * | 101.53 * | 54.70 * | | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 49.41 * | | |
| 3 | 70.70 * | 496.77 * | 685.93 * | 665.79 * | 216.52 * | 97.81 * | 52.69 * | | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 52.02 * | | |
| 4 | 70.70 * | 531.67 * | 916.33 * | 536.50 * | 215.13 * | 92.38 * | 49.41 * | | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 52.02 * | | |
| 5 | 69.93 * | 600.72 * | 961.56 * | 447.91 * | 215.13 * | 89.74 * | 49.41 * | | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 52.02 * | | |
| 6 | 71.48 * | 607.90 * | 732.62 * | 395.72 * | 217.91 * | 87.11 * | 46.88 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 52.02 * | | |
| 7 | 73.84 * | 631.77 * | 523.53 * | 375.11 * | 216.52 * | 86.25 * | 45.62 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 52.02 * | | |
| 8 | 73.84 * | 724.73 * | 434.73 * | 360.47 * | 213.75 * | 83.68 * | 44.41 * | 35.21 * | 49.41 * | 31.03 * | 31.03 * | 77.77 * | | |
| 9 | 75.44 * | 764.53 * | 454.89 * | 326.98 * | 212.37 * | 78.69 * | 42.00 * | 35.21 * | 49.41 * | 31.03 * | 31.03 * | 66.44 * | | |
| 10 | 77.05 * | 939.95 * | 479.77 * | 301.67 * | 211.00 * | 75.44 * | 42.00 * | 35.21 * | 49.41 * | 31.03 * | 31.03 * | 33.08 * | | |
| 11 | 77.05 * | 783.13 * | 556.32 * | 272.68 * | 209.63 * | 69.17 * | 40.24 * | 35.21 * | 49.41 * | 31.03 * | 31.03 * | 32.06 * | | |
| 12 | 80.33 * | 663.37 * | 660.86 * | 251.25 * | 206.92 * | 66.88 * | 39.67 * | 35.21 * | 49.41 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | | |
| 13 | 147.25 * | 701.55 * | 924.57 * | 227.84 * | 202.86 * | 66.12 * | 39.67 * | 35.21 * | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 29.04 * | | |
| 14 | 188.37 * | 714.04 * | 812.12 * | 201.53 * | 201.52 * | 66.12 * | 39.67 * | 35.21 * | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 29.04 * | | |
| 15 | 219.31 * | 919.57 * | 677.06 * | 181.99 * | 194.89 * | 65.38 * | 39.67 * | 35.21 * | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 29.04 * | | |
| 16 | 222.11 * | 1445.00 * | 567.75 * | 158.77 * | 193.57 * | 63.16 * | 38.53 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 17.79 * | | |
| 17 | 779.68 * | 995.14 * | 545.01 * | 138.17 * | 184.53 * | 63.16 * | 39.10 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 15.62 * | | |
| 18 | 688.87 * | 1727.72 * | 529.37 * | 132.72 * | 171.97 * | 60.99 * | 39.67 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 0.02 * | | |
| 19 | 716.59 * | 1626.98 * | 598.96 * | 131.64 * | 162.26 * | 60.27 * | 39.67 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 92.38 * | | |
| 20 | 696.03 * | 1322.19 * | 582.13 * | 127.39 * | 152.84 * | 60.27 * | 39.67 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 40.18 * | | |
| 21 | 711.42 * | 1234.62 * | 486.11 * | 127.40 * | 149.39 * | 58.85 * | 39.67 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 0.15 * | | |
| 22 | 726.99 * | 1183.66 * | 542.84 * | 134.94 * | 145.97 * | 58.85 * | 38.53 * | 35.21 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 103.40 * | | |
| 23 | 745.37 * | 1160.22 * | 1128.44 * | 152.86 * | 140.38 * | 58.85 * | 37.40 * | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 103.40 * | | |
| 24 | 764.01 * | 1078.56 * | 1318.54 * | 171.98 * | 135.97 * | 58.85 * | 37.40 * | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 111.11 * | | |
| 25 | 807.57 * | 1031.05 * | 1667.05 * | 258.79 * | 135.97 * | 58.85 * | 36.85 * | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 92.38 * | | |
| 26 | 804.69 * | 1025.08 * | 1584.80 * | 246.71 * | 128.47 * | 57.46 * | | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 0.15 * | | |
| 27 | 835.30 * | 936.44 * | 1283.88 * | 236.42 * | 124.25 * | 56.76 * | | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 4.19 * | | |
| 28 | 826.86 * | 898.19 * | 895.67 * | 229.21 * | 118.11 * | 56.76 * | | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 2.20 * | | |
| 29 | 1053.25 * | | 694.27 * | 222.13 * | 115.07 * | 56.07 * | | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 0.58 * | | |
| 30 | 997.54 * | | 1167.13 * | 217.91 * | 115.07 * | 56.07 * | | 33.08 * | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 0.41 * | | |
| 31 | 936.41 * | | 1369.05 * | | 109.16 * | | | 33.08 * | | 31.03 * | | 0.15 * | | |
| Caudal Max. | 1279.66 * | 1744.09 * | 1703.21 * | 1027.90 * | 217.91 * | 107.22 * | | | 49.41 * | 31.03 * | 31.03 * | 111.11 * | | |
| Día | 29 | 18 | 25 | 1 | w | 1 | | | w | w | w | 24 | | |
| Hora | 18 | 6 | 18 | 6 | | 6 | | | | | | 7 | | |
| Caudal Min. | 69.16 * | 488.21 * | 426.74 * | 125.29 * | 107.22 * | 56.07 * | | | 31.03 * | 31.03 * | 31.03 * | 0.02 * | | |
| Día | 5 | 3 | 8 | 21 | 31 | w | | | w | w | w | 18 | | |
| Hora | 18 | 18 | 6 | 6 | 18 | | | | | | | 7 | | |
| Caudal Medio | 443.53 | 932.75 | 816.28 | 292.38 | 175.90 | 70.59 | 42.71 | 34.47 | 34.50 | 31.03 | 31.03 | 40.99 | | |

NOTA: *CALCULADO CON DATOS LIMNIMETRICOS

w = Evento registrado en varios días

Anexo 4. Caudales medios diarios para el año 2010.

2010

| H0347 QUEVEDO EN QUEVEDO | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|----------|-----------|----------|---------|---------|----------|----------|
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 95,974 * | 237,873 * | 576,874 * | 576,874 * | 612,091 * | 49,411 * | 12,896 * | 18,545 * | 3,352 * | 0,645 * | 2,746 * | 18,545 * |
| 2 | 95,974 * | 209,627 * | 511,813 * | 677,152 * | 496,180 * | 43,408 * | 12,896 * | 17,790 * | 3,352 * | 0,645 * | 2,746 * | 18,545 * |
| 3 | 78,680 * | 209,627 * | 600,490 * | 948,346 * | 924,777 * | 37,405 * | 12,896 * | 11,645 * | 2,777 * | 0,645 * | 3,352 * | 18,545 * |
| 4 | 49,411 * | 209,627 * | 580,741 * | 677,152 * | 447,709 * | 37,405 * | 12,896 * | 11,645 * | 2,203 * | 0,645 * | 3,352 * | 18,545 * |
| 5 | 63,164 * | 209,627 * | 467,481 * | 1344,488 * | 556,157 * | 37,405 * | 12,896 * | 11,645 * | 1,723 * | 0,645 * | 4,048 * | 18,545 * |
| 6 | 63,164 * | 285,848 * | 625,073 * | 1042,667 * | 407,208 * | 37,405 * | 78,680 * | 11,645 * | 1,723 * | 0,645 * | 4,744 * | 18,545 * |
| 7 | 78,680 * | 333,824 * | 673,273 * | 1009,244 * | 370,516 * | 24,871 * | 29,041 * | 11,645 * | 0,944 * | 0,645 * | 5,539 * | 18,545 * |
| 8 | 78,680 * | 333,824 * | 369,568 * | 920,843 * | 337,596 * | 22,621 * | 18,545 * | 11,645 * | 0,944 * | 0,645 * | 5,539 * | 21,908 * |
| 9 | 115,070 * | 408,160 * | 333,824 * | 728,274 * | 299,960 * | 25,272 * | 27,121 * | 11,645 * | 0,944 * | 0,645 * | 5,539 * | 25,272 * |
| 10 | 115,070 * | 408,160 * | 299,960 * | 728,274 * | 267,984 * | 25,272 * | 18,545 * | 9,347 * | 0,944 * | 0,645 * | 5,539 * | 25,272 * |
| 11 | 201,976 * | 624,106 * | 300,904 * | 674,240 * | 237,873 * | 27,121 * | 18,545 * | 9,347 * | 0,944 * | 0,645 * | 5,539 * | 37,405 * |
| 12 | 428,889 * | 576,874 * | 648,689 * | 650,625 * | 267,984 * | 27,121 * | 40,855 * | 8,301 * | 0,795 * | 0,645 * | 6,389 * | 37,405 * |
| 13 | 333,824 * | 554,226 * | 733,140 * | 677,152 * | 252,929 * | 27,121 * | 70,922 * | 7,309 * | 0,645 * | 0,645 * | 6,389 * | 0,000 * |
| 14 | 357,369 * | 509,894 * | 489,165 * | 467,481 * | 223,750 * | 27,121 * | 87,327 * | 6,389 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,000 * |
| 15 | 209,627 * | 924,777 * | 407,208 * | 388,388 * | 196,433 * | 18,545 * | 70,922 * | 6,389 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,000 * |
| 16 | 159,602 * | 1420,320 * | 446,753 * | 333,824 * | 183,238 * | 18,545 * | 43,408 * | 6,389 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,055 * |
| 17 | 135,967 * | 1172,395 * | 388,388 * | 299,960 * | 196,433 * | 18,545 * | 37,405 * | 5,539 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,055 * |
| 18 | 135,967 * | 804,936 * | 351,696 * | 299,960 * | 183,238 * | 18,545 * | 76,237 * | 5,539 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,055 * |
| 19 | 133,803 * | 577,842 * | 333,824 * | 810,809 * | 158,690 * | 18,545 * | 115,070 * | 5,539 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,055 * |
| 20 | 158,690 * | 509,894 * | 299,960 * | 1272,665 * | 135,967 * | 18,545 * | 78,680 * | 4,744 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,220 * |
| 21 | 158,690 * | 488,209 * | 252,929 * | 832,442 * | 135,967 * | 18,545 * | 64,046 * | 4,744 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,645 * |
| 22 | 258,531 * | 488,209 * | 267,984 * | 625,073 * | 135,967 * | 18,545 * | 49,411 * | 4,013 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,645 * |
| 23 | 529,099 * | 1104,557 * | 237,873 * | 948,346 * | 135,967 * | 18,545 * | 49,411 * | 3,352 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,645 * |
| 24 | 577,842 * | 862,888 * | 237,873 * | 509,894 * | 95,974 * | 15,720 * | 37,405 * | 3,352 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 1,117 * |
| 25 | 488,209 * | 752,857 * | 267,984 * | 509,894 * | 78,680 * | 12,896 * | 37,405 * | 3,352 * | 0,645 * | 0,645 * | 18,545 * | 0,944 * |
| 26 | 407,208 * | 576,874 * | 467,481 * | 351,696 * | 78,680 * | 12,896 * | 37,405 * | 3,352 * | 0,645 * | 2,203 * | 18,545 * | 0,409 * |
| 27 | 333,824 * | 576,874 * | 353,584 * | 299,960 * | 60,269 * | 12,896 * | 27,121 * | 3,352 * | 0,645 * | 2,203 * | 18,545 * | 0,409 * |
| 28 | 333,824 * | 673,273 * | 267,984 * | 369,568 * | 63,164 * | 12,896 * | 21,908 * | 3,352 * | 0,645 * | 2,203 * | 18,545 * | 0,409 * |
| 29 | 300,904 * | | 267,984 * | 337,596 * | 56,288 * | 12,896 * | 18,545 * | 3,352 * | 0,645 * | 2,203 * | 18,545 * | 0,150 * |
| 30 | 267,984 * | | 488,209 * | 237,873 * | 56,288 * | 12,896 * | 18,545 * | 3,352 * | 0,645 * | 2,203 * | 18,545 * | 0,150 * |
| 31 | 267,984 * | | 576,874 * | | 49,411 * | | 18,545 * | 3,352 * | | 2,203 * | | 0,150 * |
| Caudal Max. | 724,375 * | 1567,974 * | 889,407 * | 1416,311 * | 1072,125 * | 49,411 * | 115,070 * | 18,545 * | 3,352 * | 2,203 * | 18,545 * | 37,405 * |
| Día | 23 | 16 | 13 | 5 | 3 | 1 | 19 | 2 | vv | vv | vv | vv |
| Hora | 17 | 17 | 7 | 17 | 7 | 7 | 7 | 7 | | | | |
| Caudal Min. | 49,411 * | 209,627 * | 237,873 * | 237,873 * | 49,411 * | 12,896 * | 12,896 * | 3,352 * | 0,645 * | 0,645 * | 2,746 * | 0,000 * |
| Día | 4 | vv | vv | 30 | 30 | vv | vv | vv | vv | vv | vv | vv |
| Hora | 7 | | | 17 | 17 | | | | | | | |
| Caudal Medio | 226,248 | 573,043 | 423,406 | 651,692 | 248,496 | 23,632 | 40,501 | 7,471 | 1,075 | 0,947 | 12,558 | 9,135 |

NOTA: *CALCULADO CON DATOS LIMNIMETRICOS

vv = Evento registrado en varios días

Anexo 5. Caudales medios diarios para el año 2011.

2011

| H0347 | | QUEVEDO EN QUEVEDO | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------|--------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|--|
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | |
| 1 | 42.781 * | 57.981 * | 1169.305 * | 515.608 * | 57.981 * | 90.072 * | 74.463 * | 74.463 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 2 | 42.781 * | 57.981 * | 1169.305 * | 515.608 * | 53.015 * | 90.072 * | 60.561 * | 74.463 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 3 | 42.781 * | 57.981 * | 1169.305 * | 515.608 * | 48.309 * | 82.268 * | 60.561 * | 74.463 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 4 | 42.781 * | 57.981 * | 1098.222 * | 515.608 * | 46.057 * | 74.463 * | 60.561 * | 74.463 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 5 | 39.652 * | 57.981 * | 1027.139 * | 515.608 * | 41.216 * | 74.463 * | 60.561 * | 74.463 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 6 | 39.652 * | 60.561 * | 1027.139 * | 663.568 * | 114.048 * | 74.463 * | 60.561 * | 74.463 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 7 | 39.652 * | 60.561 * | 1027.139 * | 663.568 * | 159.172 * | 74.463 * | 60.561 * | 60.561 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 8 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 719.044 * | 147.685 * | 74.463 * | 60.561 * | 60.561 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 9 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 719.044 * | 147.685 * | 74.463 * | 60.561 * | 60.561 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 10 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 663.568 * | 126.632 * | 74.463 * | 60.561 * | 60.561 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 11 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 663.568 * | 126.632 * | 74.463 * | 60.561 * | 60.561 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 12 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 663.568 * | 148.645 * | 74.463 * | 60.561 * | 60.561 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| 13 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 663.568 * | 126.632 * | 74.463 * | 60.561 * | 60.561 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 21.504 * | |
| 14 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 663.568 * | 126.632 * | 74.463 * | 74.463 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 21.504 * | |
| 15 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 663.568 * | 126.632 * | 74.463 * | 107.443 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 21.504 * | |
| 16 | 39.652 * | 63.207 * | 717.791 * | 845.353 * | 126.632 * | 74.463 * | 107.443 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 21.504 * | |
| 17 | 56.716 * | 57.981 * | 515.608 * | 811.818 * | 126.632 * | 71.548 * | 107.443 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 37.643 * | |
| 18 | 56.716 * | 57.981 * | 515.608 * | 1208.852 * | 126.632 * | 71.548 * | 90.953 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 37.643 * | |
| 19 | 56.716 * | 57.981 * | 515.608 * | 1208.852 * | 126.632 * | 71.548 * | 107.443 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 37.643 * | |
| 20 | 56.716 * | 57.981 * | 515.608 * | 1208.852 * | 126.632 * | 71.548 * | 107.443 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 37.643 * | |
| 21 | 56.716 * | 57.981 * | 515.608 * | 1118.217 * | 126.632 * | 170.659 * | 315.899 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 37.643 * | |
| 22 | 56.716 * | 57.981 * | 515.608 * | 992.966 * | 117.037 * | 74.463 * | 139.051 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 37.643 * | |
| 23 | 56.716 * | 57.981 * | 515.608 * | 916.436 * | 107.443 * | 74.463 * | 107.443 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 42.976 * | |
| 24 | 56.716 * | 60.561 * | 515.608 * | 916.436 * | 107.443 * | 74.463 * | 90.072 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 48.309 * | |
| 25 | 56.716 * | 60.561 * | 515.608 * | 1118.217 * | 107.443 * | 74.463 * | 90.072 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 48.309 * | |
| 26 | 63.207 * | 61.884 * | 515.608 * | 992.966 * | 107.443 * | 74.463 * | 90.072 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 48.309 * | |
| 27 | 63.207 * | 63.207 * | 515.608 * | 992.966 * | 90.072 * | 74.463 * | 82.268 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 54.435 * | |
| 28 | 63.207 * | 63.207 * | 515.608 * | 992.966 * | 90.072 * | 74.463 * | 74.463 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 74.463 * | |
| 29 | 63.207 * | | 515.608 * | 916.436 * | 90.072 * | 60.561 * | 74.463 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 74.463 * | |
| 30 | 63.207 * | | 515.608 * | 916.436 * | 90.072 * | 60.561 * | 74.463 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 74.463 * | |
| 31 | 60.594 * | | 515.608 * | | 90.072 * | | 74.463 * | 48.309 * | | 20.798 * | | 74.463 * | |
| Caudal Max. | 63.207 * | 63.207 * | 1169.305 * | 1754.136 * | 190.452 * | 170.659 * | 315.899 * | 74.463 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 74.463 * | |
| Día | w | w | w | 18 | 6 | 21 | 21 | w | w | w | w | w | |
| Hora | | | | 7 | 17 | 7 | 7 | | | | | | |
| Caudal Min. | 39.652 * | 57.981 * | 515.608 * | 515.608 * | 37.643 * | 60.561 * | 60.561 * | 48.309 * | 48.309 * | 20.798 * | 20.798 * | 20.798 * | |
| Día | w | w | w | w | 6 | w | w | w | w | w | w | w | |
| Hora | | | | | 7 | | | | | | | | |
| Caudal Medio | 49.484 | 60.542 | 705.864 | 816.081 | 108.191 | 77.655 | 87.631 | 56.138 | 48.309 | 20.798 | 20.798 | 35.537 | |

NOTA: *CALCULADO CON DATOS LIMNIMETRICOS

w = Evento registrado en varios días

Anexo 6. Caudales medios diarios en el año 2012.

2012

| H0347 QUEVEDO EN QUEVEDO | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------|------------|------------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | 74.463 * | 717.791 * | 1096.878 * | 47.740 * | 55.465 * | 37.643 * | 35.500 * | 48.309 * | 90.072 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 2 | 74.463 * | 562.513 * | 960.068 * | 49.469 * | 55.465 * | 37.643 * | 35.500 * | 48.309 * | 90.072 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 3 | 74.463 * | 471.074 * | 833.790 * | 50.630 * | 55.465 * | 37.643 * | 34.742 * | 48.309 * | 90.072 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 4 | 71.548 * | 515.608 * | 1027.139 * | 51.822 * | 53.015 * | 37.643 * | 34.742 * | 48.309 * | 90.072 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 5 | 71.548 * | 515.608 * | 2047.977 * | 53.015 * | 53.015 * | 37.643 * | 34.742 * | 48.309 * | 90.072 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 6 | 70.116 * | 428.870 * | 1572.867 * | 53.015 * | 53.015 * | 37.643 * | 33.803 * | 48.309 * | 90.072 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 7 | 70.116 * | 471.074 * | 1403.049 * | 54.240 * | 50.630 * | 37.643 * | 33.803 * | 48.309 * | 74.463 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 8 | 61.877 * | 471.074 * | 1245.835 * | 58.013 * | 50.630 * | 37.643 * | 33.803 * | 48.309 * | 82.268 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 9 | 61.877 * | 471.074 * | 961.382 * | 56.716 * | 50.630 * | 37.643 * | 33.803 * | 48.309 * | 74.463 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 10 | 60.561 * | 428.870 * | 804.155 * | 57.990 * | 54.233 * | 37.643 * | 33.803 * | 48.309 * | 74.463 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 11 | 60.561 * | 471.074 * | 690.680 * | 59.264 * | 52.431 * | 37.643 * | 33.803 * | 48.309 * | 74.463 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 12 | 56.716 * | 562.513 * | 663.568 * | 59.271 * | 49.469 * | 37.643 * | 33.803 * | 48.309 * | 74.463 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 13 | 56.716 * | 1403.049 * | 562.513 * | 57.981 * | 48.309 * | 37.643 * | 33.803 * | 48.309 * | 60.561 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 14 | 54.233 * | 1403.049 * | 562.513 * | 55.465 * | 47.179 * | 37.643 * | 32.882 * | 48.309 * | 60.561 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 15 | 53.015 * | 1403.049 * | 515.608 * | 51.822 * | 46.050 * | 37.643 * | 32.882 * | 48.309 * | 60.561 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 16 | 50.630 * | 1810.422 * | 515.608 * | 48.309 * | 43.855 * | 37.643 * | 32.882 * | 42.976 * | 48.309 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 17 | 48.309 * | 2718.723 * | 515.608 * | 53.015 * | 41.721 * | 37.643 * | 31.975 * | 37.643 * | 48.309 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 18 | 59.296 * | 2597.913 * | 562.513 * | 55.465 * | 41.721 * | 37.643 * | 31.975 * | 37.643 * | 48.309 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 19 | 63.899 * | 2597.913 * | 746.156 * | 58.013 * | 40.686 * | 37.643 * | 31.975 * | 37.643 * | 48.309 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 20 | 73.747 * | 2047.977 * | 663.568 * | 64.564 * | 39.652 * | 36.657 * | 31.975 * | 37.643 * | 42.976 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 21 | 74.463 * | 1572.867 * | 562.513 * | 63.899 * | 40.679 * | 36.657 * | 31.975 * | 37.643 * | 37.643 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 22 | 68.710 * | 1322.365 * | 746.156 * | 57.990 * | 39.652 * | 36.657 * | 31.975 * | 147.685 * | 37.643 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 23 | 63.207 * | 1244.461 * | 775.790 * | 53.024 * | 39.652 * | 36.657 * | 31.975 * | 147.685 * | 37.643 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 24 | 60.561 * | 1096.878 * | 1509.218 * | 49.469 * | 39.652 * | 36.657 * | 31.975 * | 147.685 * | 37.643 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 25 | 57.981 * | 960.068 * | 2487.973 * | 48.309 * | 39.652 * | 36.657 * | 31.975 * | 107.443 * | 37.643 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 26 | 56.716 * | 895.625 * | 1585.748 * | 50.630 * | 37.643 * | 35.595 * | 31.975 * | 107.443 * | 37.643 * | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 27 | 54.233 * | 833.790 * | 961.382 * | 51.822 * | 37.643 * | 35.500 * | 31.975 * | 90.072 * | | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 28 | 54.233 * | 1064.686 * | 835.073 * | 50.630 * | 37.643 * | 35.500 * | 31.975 * | 90.072 * | | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 29 | 51.815 * | | 613.041 * | 49.469 * | 37.643 * | 35.500 * | 31.083 * | 90.072 * | | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 30 | 51.815 * | | 515.608 * | 50.630 * | 37.643 * | 35.500 * | 31.083 * | 90.072 * | | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| 31 | 51.815 * | | 515.608 * | | 37.643 * | | 31.083 * | 90.072 * | | 28.493 * | | 28.493 * |
| Caudal Max. | 75.947 * | | 2717.152 * | 65.922 * | 55.465 * | 37.643 * | 35.500 * | 147.685 * | | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| Dia | 20 | | 25 | 21 | vv | vv | vv | vv | | vv | vv | vv |
| Hora | 17 | | 7 | 7 | | | | | | | | |
| Caudal Min. | 48.309 * | | 515.608 * | 47.170 * | 37.643 * | 35.500 * | 31.083 * | 37.643 * | | 28.493 * | 28.493 * | 28.493 * |
| Dia | 17 | | vv | 1 | vv | vv | vv | vv | | vv | vv | vv |
| Hora | 7 | | | 7 | | | | | | | | |
| Caudal Medio | 61.732 | 1109.285 | 937.406 | 54.056 | 45.412 | 37.092 | 32.943 | 66.585 | 63.030 | 28.493 | 28.493 | 28.493 |

NOTA: * CALCULADO CON DATOS LIMNIMETRICOS

vv = Evento registrado en varios dias

Anexo 7. Caudales medios diarios en el año 2013.

2013

| H0347 QUEVEDO EN QUEVEDO | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----|-----|-----|---------|-----|----------|
| DIA | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1 | | 184.077 * | 316.916 * | 220.754 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | | 8.234 * |
| 2 | 0.684 * | 241.250 * | 283.279 * | 201.678 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | | 8.234 * |
| 3 | 21.396 * | 295.048 * | 317.577 * | 164.624 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | | 8.234 * |
| 4 | 5.934 * | 328.351 * | 389.086 * | 164.624 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | | 8.234 * |
| 5 | 8.234 * | 328.351 * | 452.354 * | 164.624 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | | 8.234 * |
| 6 | 14.204 * | 376.051 * | 621.390 * | 164.624 * | 39.158 * | 14.204 * | | | | | | 8.234 * |
| 7 | 25.584 * | 401.174 * | 591.740 * | 211.037 * | 39.158 * | 14.204 * | | | | | | 8.234 * |
| 8 | 34.455 * | 426.298 * | 506.314 * | 283.613 * | 34.455 * | 14.204 * | | | | | | 8.234 * |
| 9 | 39.158 * | 465.692 * | 364.604 * | 316.916 * | 21.416 * | 14.204 * | | | | | | 8.234 * |
| 10 | 39.158 * | 492.672 * | 283.279 * | 376.051 * | 21.416 * | 14.204 * | | | | | | 8.234 * |
| 11 | 49.571 * | 506.314 * | 283.279 * | 283.279 * | 21.416 * | 14.204 * | | | | | | 8.234 * |
| 12 | 49.571 * | 506.314 * | 283.279 * | 220.754 * | 21.416 * | 14.204 * | | | | | | 8.234 * |
| 13 | 60.936 * | 506.314 * | 283.279 * | 220.754 * | 21.416 * | 8.234 * | | | | | | 8.234 * |
| 14 | 79.807 * | 506.314 * | 283.279 * | 164.624 * | 21.416 * | 8.234 * | | | | 8.234 * | | 8.234 * |
| 15 | 86.394 * | 506.314 * | 283.279 * | 261.745 * | 21.416 * | 8.234 * | | | | 8.234 * | | 8.234 * |
| 16 | 86.394 * | 426.605 * | 283.279 * | 283.613 * | 21.416 * | 8.234 * | | | | 8.234 * | | 8.234 * |
| 17 | 86.394 * | 376.365 * | 305.815 * | 353.168 * | 21.416 * | 8.234 * | | | | 8.234 * | | 8.234 * |
| 18 | 86.394 * | 328.678 * | 452.354 * | 452.354 * | 21.416 * | 3.634 * | | | | 8.234 * | | 8.234 * |
| 19 | 100.417 * | 294.380 * | 400.856 * | 577.796 * | 21.416 * | 3.634 * | | | | 8.234 * | | 8.234 * |
| 20 | 100.417 * | 283.279 * | 351.875 * | 520.258 * | 21.416 * | 3.634 * | | | | 8.234 * | | 14.204 * |
| 21 | 107.849 * | 283.279 * | 305.481 * | 479.334 * | 21.416 * | 3.634 * | | | | 8.234 * | | 14.204 * |
| 22 | 123.114 * | 283.279 * | 283.279 * | 426.605 * | 21.416 * | 3.634 * | | | | 8.234 * | | 14.204 * |
| 23 | 123.114 * | 283.279 * | 272.512 * | 376.365 * | 21.416 * | 0.684 * | | | | 8.234 * | | 14.204 * |
| 24 | 100.417 * | 283.279 * | 261.745 * | 283.613 * | 21.416 * | 0.684 * | | | | 8.234 * | | 14.204 * |
| 25 | 100.417 * | 283.279 * | 261.745 * | 201.678 * | 21.416 * | 0.684 * | | | | 8.234 * | | |
| 26 | 123.114 * | 283.279 * | 402.114 * | 115.682 * | 21.416 * | 0.684 * | | | | 8.234 * | | 0.511 * |
| 27 | 139.174 * | 283.279 * | 493.278 * | 50.047 * | 21.416 * | | | | | 8.234 * | | 2.934 * |
| 28 | 165.001 * | 283.279 * | 621.677 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | 8.234 * | | 8.919 * |
| 29 | 147.400 * | | 429.094 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | 8.234 * | | 25.584 * |
| 30 | 147.400 * | | 317.577 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | 8.234 * | | 34.455 * |
| 31 | 147.400 * | | 252.016 * | | 21.416 * | | | | | | | 39.158 * |
| Caudal Max. | | 506.314 * | 651.614 * | 621.390 * | 39.158 * | | | | | | | |
| Dia | | w | 28 | 1 | w | | | | | | | |
| Hora | | | 17 | 7 | | | | | | | | |
| Caudal Min. | | 147.400 * | 220.754 * | 39.158 * | 21.416 * | | | | | | | |
| Dia | | 1 | 31 | w | w | | | | | | | |
| Hora | | 7 | 17 | | | | | | | | | |
| Caudal Medio | 79.983 | 358.788 | 362.504 | 255.256 | 25.843 | 10.330 | | | | | | 11.301 |

NOTA: *CALCULADO CON DATOS LIMNIMETRICOS

w = Evento registrado en varios dias

Anexo 8. Caudales medios diarios en el año 2014.

Estación: **H0347** **QUEVEDO EN QUEVEDO** Año: **2014**
 Captor: **J-QADN** **CAUDALES DIARIOS DATALOGGER NESDI**
 Latitud (°dec): -1.01886 Altitud aproximada (m): 125
 Longitud (°dec): -79.46467 Superficie Cuenca (km2): 3499

| Día | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | oct | nov | dic |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | | | | | | | | | 316.8 | 314.1 | 314.2 | 283.9 |
| 2 | | | | | | | | | 340.9 | 295.2 | 324.6 | 280.5 |
| 3 | | | | | | | | | 348.1 | 301.3 | 301.1 | 285.8 |
| 4 | | | | | | | | | 333.9 | 295.8 | 307.4 | 286.8 |
| 5 | | | | | | | | | 337.5 | 312.3 | 306.5 | 293.2 |
| 6 | | | | | | | | | 311.6 | 303 | 306.8 | 300.5 |
| 7 | | | | | | | | | 313.4 | 305.4 | 290.3 | 303.4 |
| 8 | | | | | | | | | 321.4 | 306.2 | 303.5 | 302.4 |
| 9 | | | | | | | | | 331.6 | 295.4 | 296.1 | 298 |
| 10 | | | | | | | | | 322.2 | 295 | 331.6 | 292.7 |
| 11 | | | | | | | | | 320.5 | 313 | 354.2 | 289.3 |
| 12 | | | | | | | | | 336.1 | 313.6 | 327.1 | 289.3 |
| 13 | | | | | | | | | 296.3 | 300.2 | 319.1 | 298.1 |
| 14 | | | | | | | | | 295.5 | 305.6 | 309.4 | 309.3 |
| 15 | | | | | | | | | 317.8 | 295.8 | 296.7 | 297.5 |
| 16 | | | | | | | | | 317.2 | 320.5 | 308.6 | 290.6 |
| 17 | | | | | | | | | 341.4 | 319.5 | 310.5 | 290.3 |
| 18 | | | | | | | | | 312.7 | 305.8 | 310.2 | 288.2 |
| 19 | | | | | | | | | 298.4 | 473.5 | 294.8 | 286 |
| 20 | | | | | | | | | 313.6 | 386.4 | 291.3 | 285.3 |
| 21 | | | | | | | | | 336.2 | 340.4 | 294.3 | 289.1 |
| 22 | | | | | | | | | 354.7 | 346.8 | 294.8 | 286.4 |
| 23 | | | | | | | | | 334.3 | 341.3 | 297.9 | 283.3 |
| 24 | | | | | | | | | 324.9 | 336.6 | 300.6 | 281.1 |
| 25 | | | | | | | | | 319.6 | 342.7 | 293.6 | 284.6 |
| 26 | | | | | | | | | 309.3 | 347.4 | 293.4 | 285.6 |
| 27 | | | | | | | | | 314.8 | 333.4 | 301.2 | 284 |
| 28 | | | | | | | | | 316.3 | 321.3 | 273.1 | 287.7 |
| 29 | | | | | | | | 338.8 | 312.7 | 321.6 | 268.3 | 290.8 |
| 30 | | | | | | | | 331.9 | 312.1 | 323.6 | 274 | 292.2 |
| 31 | | | | | | | | 324.4 | | 321.1 | | 304.2 |
| Med | | | | | | | | | 322.1 | 323.7 | 303.2 | 291 |
| Mini | | | | | | | | | 295.5 | 295 | 268.3 | 280.5 |
| Max | | | | | | | | | 354.7 | 473.5 | 354.2 | 309.3 |

Anexo 9. Caudales medios diarios en el año 2015.

Estación: **H0347** **QUEVEDO EN QUEVEDO** Año: **2015**
 Captor: **J-QADN** **CAUDALES DIARIOS DATALOGGER NESDI**
 Latitud (°dec): -1.01886 Altitud aproximada (m): 125
 Longitud (°dec): -79.46467 Superficie Cuenca (km2): 3499

| Día | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | oct | nov | dic |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 306.6 | 479.1 | 913.9 | 622.7 | 560.8 | 430 | 310.4 | 272.6 | 208.7 | 206.9 | 216.9 | 210 |
| 2 | 322.3 | 459.5 | 748.9 | 614.6 | 482 | 518.6 | 304.9 | 266.3 | 207.7 | 205.1 | 212.2 | 233 |
| 3 | 327.4 | 434.9 | 715.7 | 594.2 | 812 | 475.9 | 303.8 | 260.4 | 204.3 | 207 | 205.3 | 258.4 |
| 4 | 328.1 | 514.8 | 662.2 | 579.2 | 885.3 | 437.4 | 295.4 | 254.7 | 204 | 207.3 | 201 | 267.1 |
| 5 | 328.9 | 467.5 | 598.1 | 922.1 | 876.7 | 422.4 | 293.4 | 251.2 | 201.6 | 205.4 | 198 | 373.4 |
| 6 | 330.7 | 482.1 | 695.2 | 775.5 | 595.6 | 431.2 | 289.2 | 248.5 | 204 | 192.1 | 194.5 | 347.7 |
| 7 | 346.3 | 1478 | 611.1 | 704.9 | 785.1 | 455.8 | 347.1 | 245.1 | 202 | 185.1 | 195.1 | 302.2 |
| 8 | 350.5 | 1532 | 564.8 | 597.7 | 701.9 | 423.1 | 303.2 | 244.2 | 202.2 | 180.6 | 198.1 | 279.9 |
| 9 | 351.4 | 1853 | 527.8 | 570.2 | 566.2 | 418.8 | 305.2 | 243.7 | 203 | 180 | 193.7 | 271.9 |
| 10 | 350.2 | 1387 | 506.1 | 572.9 | 517.6 | 422.1 | 297.9 | 251.4 | 199.4 | 180.1 | 190.2 | 271.1 |
| 11 | 352.2 | 1119 | 474.8 | 533.6 | 477.4 | 398.5 | 287.3 | 241.7 | 198.3 | 182 | 187.9 | 308.1 |
| 12 | 348.8 | 884.9 | 458.3 | 575 | 452.2 | 457.1 | 281.5 | 236.8 | 198 | 180.2 | 187.2 | 295.4 |
| 13 | 355.9 | 754.9 | 455.1 | 601.9 | 644 | 403.4 | 281.5 | 233.7 | 200.2 | 177.5 | 186.9 | 284.4 |
| 14 | 356.9 | 758.5 | 479.4 | 589.6 | 606.3 | 472.3 | 336.6 | 231.1 | 197.4 | 179.4 | 212.3 | 309.3 |
| 15 | 395.8 | 712.2 | 526.7 | 747.8 | 485 | 418.4 | 301.1 | 231.1 | 192.9 | 180.8 | 209.8 | 637.3 |
| 16 | 415.1 | 636.6 | 496.4 | 1025 | 442.1 | 406 | 287.7 | 230.5 | 192.4 | 186.2 | 197.2 | 482.2 |
| 17 | 453.7 | 616.4 | 647.5 | 749.4 | 537 | 381 | 282.5 | 228 | 191.1 | 188.2 | 192.8 | 401.2 |
| 18 | 479.3 | 576.4 | 593.2 | 652.1 | 483.1 | 378.1 | 363 | 224.4 | 191.5 | 186.2 | 192.9 | 376.3 |
| 19 | 432.8 | 607.4 | 642.1 | 840.8 | 526.5 | 366.3 | 308.8 | 221.6 | 192.1 | 186.8 | 199.9 | 358.7 |
| 20 | 509.1 | 575.8 | 1656 | 973.4 | 502.2 | 428.6 | 358.4 | 218.6 | 193.6 | 184.4 | 197 | 342.5 |
| 21 | 455.5 | 566.9 | 990.2 | 1039 | 429.3 | 410.9 | 367.9 | 218.3 | 193 | 183.4 | 196.4 | 325.8 |
| 22 | 459.4 | 518.8 | 1184 | 839.2 | 416.1 | 367.6 | 325.3 | 217.3 | 190.8 | 186.3 | 195.4 | 313.5 |
| 23 | 419.8 | 545.4 | 883.1 | 715.6 | 492.2 | 355.8 | 311.1 | 219 | 190.4 | 188.3 | 192.6 | 300.3 |
| 24 | 387.5 | 555.6 | 840.8 | 747.1 | 420.2 | 348.9 | 310.3 | 216.8 | 193.3 | 191 | 224 | 299 |
| 25 | 363 | 515.1 | 741 | 650.5 | 642.6 | 379 | 300.5 | 212.3 | 198.9 | 242 | 206 | 288.4 |
| 26 | 403.7 | 590.1 | 956 | 594.8 | 539.5 | 369.6 | 299.7 | 212.3 | 212.3 | 282.4 | 204.2 | 314.2 |
| 27 | 415.1 | 1146 | 1044 | 579.3 | 501.3 | 345.1 | 290 | 210.4 | 213.7 | 255.1 | 206.9 | 287.9 |
| 28 | 487.2 | 1323 | 968 | 526.5 | 456.5 | 332.4 | 283 | 207.8 | 218 | 309.6 | 203.6 | 302.7 |
| 29 | 477.8 | | 896.5 | 489 | 578.6 | 324 | 278.8 | 208 | 215.4 | 249.1 | 201.6 | 299.6 |
| 30 | 487.4 | | 711.3 | 495.7 | 492.4 | 315.9 | 273.5 | 212.5 | 210 | 238.2 | 204.4 | 291.2 |
| 31 | 514.3 | | 661.8 | | 473.3 | | 278.2 | 209.8 | | 225.2 | | 303.9 |
| Med | 397.2 | 789 | 737.1 | 684 | 560.7 | 403.1 | 305.1 | 231.6 | 200.7 | 204.3 | 200.1 | 320.5 |
| Mini | 306.6 | 434.9 | 455.1 | 489 | 416.1 | 315.9 | 273.5 | 207.8 | 190.4 | 177.5 | 186.9 | 210 |
| Max | 514.3 | 1853 | 1656 | 1039 | 885.3 | 518.6 | 367.9 | 272.6 | 218 | 309.6 | 224 | 637.3 |

Anexo 10. Caudales medios diarios en el año 2016.

Estación: **H0347** **QUEVEDO EN QUEVEDO** Año: **2016**
 Captor: **J-QADN** **CAUDALES DIARIOS DATALOGGER NESDI**
 Latitud (°dec): -1.01886 Altitud aproximada (m): 125
 Longitud (°dec): -79.46467 Superficie Cuenca (km2): 3499

| Día | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | oct | nov | dic |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 309.5 | 653 | 667.6 | 1161 | 980.6 | 320 | 233.6 | 207.1 | 180.4 | 193.3 | 181.7 | 165.1 |
| 2 | 456.6 | 589.9 | 729.1 | 976 | 692.2 | 317.7 | 240.3 | 204.9 | 180.2 | 196.2 | 182.5 | 164.2 |
| 3 | 421.6 | 572.3 | 1083 | 852.5 | 621.8 | 310.9 | 246.5 | 200.6 | 183.1 | 193.6 | 184.2 | 163.2 |
| 4 | 490.5 | 989.3 | 1052 | 766.7 | 562.7 | 303.3 | 232.6 | 199.1 | 188.2 | 190.6 | 181.2 | 167.8 |
| 5 | 1089 | 799.3 | 1127 | 1123 | 594.7 | 300.1 | 227.8 | 197.6 | 185.7 | 192 | 180.4 | 173.5 |
| 6 | 1552 | 620.5 | 1896 | 969.5 | 541.3 | 298.9 | 225.9 | 197.9 | 185.9 | 192.7 | 181.8 | 174.8 |
| 7 | 970.6 | 588.4 | 2080 | 1104 | 489.4 | 299 | 228 | 199.7 | 187.9 | 190.5 | 181.2 | 170.9 |
| 8 | 1046 | 529.2 | 1764 | 912 | 481.6 | 286.9 | 230.9 | 197.1 | 188.2 | 190.9 | 178.4 | 171.9 |
| 9 | 804.6 | 513.2 | 1124 | 791.8 | 502.6 | 278 | 236.5 | 193.1 | 192.8 | 191.9 | 178.7 | 180.2 |
| 10 | 1014 | 510.7 | 1090 | 882 | 592.2 | 272.2 | 242 | 193.9 | 201.1 | 191.6 | 181.8 | 175.2 |
| 11 | 895.2 | 715.8 | 1095 | 998.7 | 607.6 | 274.4 | 235.3 | 191.9 | 200.3 | 188.4 | 180.6 | 176.7 |
| 12 | 882.1 | 582.5 | 1121 | 945.8 | 561.8 | 275.4 | 226.9 | 192.9 | 199.1 | 187.3 | 189.2 | 172.2 |
| 13 | 768.5 | 654.3 | 800 | 2314 | 521.1 | 269.8 | 226.8 | 190.8 | 199.3 | 187.4 | 197.5 | 168.7 |
| 14 | 895.2 | 624.9 | 662.1 | 1607 | 504.4 | 260.4 | 227.6 | 193.2 | 198.2 | 189.9 | 195.5 | 167.6 |
| 15 | 736.3 | 624.6 | 770.8 | 1070 | 461.7 | 265.9 | 224.1 | 190.3 | 195.3 | 190 | 188.5 | 168.2 |
| 16 | 669 | 605 | 674.1 | 903.6 | 595.6 | 257.1 | 223.3 | 187.2 | 197.4 | 190.9 | 186.7 | 169.2 |
| 17 | 739 | 732.2 | 676.4 | 911.5 | 629.3 | 252.3 | 223.8 | 190.4 | 200.3 | 189.5 | 176.3 | 168.7 |
| 18 | 726.5 | 607.4 | 593.4 | 732.1 | 516.3 | 251.4 | 218.7 | 189.1 | 200 | 186 | 168.7 | 171 |
| 19 | 637.1 | 637.6 | 565.6 | 640.4 | 461.7 | 249.6 | 216 | 185.9 | 197.7 | 185.6 | 168.7 | 170.5 |
| 20 | 737 | 708.8 | 784.5 | 572.6 | 428.1 | 243.7 | 216.9 | 186.1 | 195 | 185.7 | 171.5 | 173.3 |
| 21 | 765.7 | 692.6 | 613.3 | 547.6 | 429.4 | 241.7 | 213.8 | 190.6 | 194.7 | 184.6 | 171.1 | 191.7 |
| 22 | 672 | 671.3 | 684.6 | 508.7 | 437.9 | 237.4 | 212.6 | 188 | 196.6 | 185.3 | 167.4 | 182.5 |
| 23 | 600.7 | 628.2 | 586.1 | 495 | 439.1 | 238.6 | 214.4 | 183.8 | 202.8 | 187.3 | 166 | 178.3 |
| 24 | 756 | 765.9 | 533.2 | 516.1 | 437 | 237 | 222.4 | 187.5 | 206.3 | 186 | 165.4 | 174.1 |
| 25 | 2435 | 683.6 | 501.2 | 467.5 | 397.1 | 233.6 | 218.3 | 184.2 | 201.7 | 183.9 | 165.2 | 173.9 |
| 26 | 2533 | 595.5 | 478.3 | 844.4 | 377.7 | 250.4 | 212.9 | 181.9 | 197.7 | 183.4 | 164.8 | 171.9 |
| 27 | 1373 | 623 | 588.9 | 640.5 | 373.9 | 243.9 | 210.8 | 182 | 195.1 | 182.4 | 167 | 169 |
| 28 | 990.7 | 668.7 | 510.2 | 1109 | 356.2 | 235.7 | 208.1 | 186.2 | 192.9 | 183 | 167.4 | 167.9 |
| 29 | 1386 | 607.1 | 560.8 | 767 | 345.4 | 251.9 | 207.2 | 183.8 | 192.3 | 182.3 | 164.5 | 166.8 |
| 30 | 1235 | | 1057 | 1187 | 335.7 | 246.9 | 209.8 | 180.9 | 192.8 | 184 | 164.7 | 172.3 |
| 31 | 885.2 | | 735.1 | | 329.9 | | 210 | 180.8 | | 183.8 | | 189.7 |
| Med | 950.7 | 648.1 | 877.6 | 910.6 | 503.4 | 266.8 | 223.3 | 190.9 | 194.3 | 188.1 | 176.6 | 172.6 |
| Mini | 309.5 | 510.7 | 478.3 | 467.5 | 329.9 | 233.6 | 207.2 | 180.8 | 180.2 | 182.3 | 164.5 | 163.2 |
| Max | 2533 | 989.3 | 2080 | 2314 | 980.6 | 320 | 246.5 | 207.1 | 206.3 | 196.2 | 197.5 | 191.7 |

Anexo 11. Caudales medios diarios en el año 2017.

Estación: **H0347** **QUEVEDO EN QUEVEDO** Año: **2017**
 Captor: **J-QADN** **CAUDALES DIARIOS DATALOGGER NESDI**
 Latitud (°dec): -1.01886 Altitud aproximada (m): 125
 Longitud (°dec): -79.46467 Superficie Cuenca (km2): 3499

| Día | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | sep | oct | nov | dic |
|------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 194 | 424.9 | 832.9 | 1151 | | | | | | | | |
| 2 | 199.5 | 408.6 | 726.8 | 947.8 | | | | | | | | |
| 3 | 197 | 444 | 1197 | 856.1 | | | | | | | | |
| 4 | 224.7 | 412.5 | 985.3 | 984.9 | | | | | | | | |
| 5 | 309.8 | 417.9 | 767.8 | 844.9 | | | | | | | | |
| 6 | 284 | 410.5 | 703.9 | 621.4 | | | | | | | | |
| 7 | 241.1 | 402 | 999.1 | 814.1 | | | | | | | | |
| 8 | 233.3 | 422 | 1253 | 858.5 | | | | | | | | |
| 9 | 594.2 | 448.9 | 974.7 | 818.3 | | | | | | | | |
| 10 | 719.9 | 493.1 | 842.2 | 773.6 | | | | | | | | |
| 11 | 478 | 640.6 | 936.9 | 908 | | | | | | | | |
| 12 | 315.4 | 754.6 | 1077 | 888.4 | | | | | | | | |
| 13 | 334.2 | 1031 | 825.4 | 834.9 | | | | | | | | |
| 14 | 394 | 920.7 | 867.6 | 856.1 | | | | | | | | |
| 15 | 399.1 | 834.2 | 1422 | 855.4 | | | | | | | | |
| 16 | 359.7 | 851.6 | 906.3 | 800.5 | | | | | | | | |
| 17 | 328.1 | 1345 | 811.2 | 689.6 | | | | | | | | |
| 18 | 312.5 | 1099 | 1115 | 893.7 | | | | | | | | |
| 19 | 385.2 | 882.4 | 1087 | 1374 | | | | | | | | |
| 20 | 577 | 781.5 | 988.8 | 1490 | | | | | | | | |
| 21 | 935.6 | 741.2 | 781 | 1002 | | | | | | | | |
| 22 | 857.7 | 2002 | 1539 | 825.6 | | | | | | | | |
| 23 | 578.6 | 1034 | 1342 | 791 | | | | | | | | |
| 24 | 466.7 | 842.7 | 1287 | 732.2 | | | | | | | | |
| 25 | 409.7 | 1003 | 1130 | 1309 | | | | | | | | |
| 26 | 381.7 | 862.7 | 1028 | 1001 | | | | | | | | |
| 27 | 389.6 | 826.8 | 1034 | 885.1 | | | | | | | | |
| 28 | 366.8 | 664.5 | 1008 | 706.1 | | | | | | | | |
| 29 | 371.5 | | 833.6 | 661.1 | | | | | | | | |
| 30 | 424.6 | | 1536 | 708.2 | | | | | | | | |
| 31 | 479.7 | | 1997 | | | | | | | | | |
| Med | 411.1 | 764.4 | 1059 | 896.1 | | | | | | | | |
| Mini | 194 | 402 | 703.9 | 621.4 | | | | | | | | |
| Max | 935.6 | 2002 | 1997 | 1490 | | | | | | | | |

Anexo 12. Tabla de Excel de los caudales promedios y velocidades.

| Caudales en el río Quevedo | | | | | | | | | | | | | Unidad |
|----------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|---------|-----------|-----------|-------------------|
| Año \ Mes | Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | |
| 2007 | 242,73 | 437,85 | 512,98 | 612,7 | 439,86 | 217,48 | 78,6 | 54,61 | 40,41 | 35,53 | 36,75 | 43,26 | m ³ /s |
| 2008 | 476,41 | 978,73 | 801,63 | 601,43 | 351,77 | 120,64 | 83,19 | 70,48 | 56,84 | 47,84 | 51,44 | 62,92 | m ³ /s |
| 2009 | 443,53 | 932,75 | 816,28 | 292,38 | 175,9 | 70,59 | 42,71 | 34,47 | 34,5 | 31,03 | 31,03 | 40,99 | m ³ /s |
| 2010 | 226,24 | 573,04 | 423,4 | 651,69 | 248,42 | 23,63 | 40,5 | 7,47 | 1,07 | 0,94 | 12,55 | 9,13 | m ³ /s |
| 2011 | 49,48 | 60,54 | 705,86 | 816,08 | 108,19 | 77,65 | 87,63 | 56,16 | 48,3 | 20,79 | 20,79 | 35,53 | m ³ /s |
| 2012 | 61,73 | 1109,28 | 937,4 | 54,05 | 45,41 | 37,09 | 32,94 | 66,58 | 63,03 | 28,49 | 28,49 | 28,49 | m ³ /s |
| 2013 | 79,98 | 358,78 | 362,5 | 255,25 | 25,55 | 10,33 | 22,15 | 60,04 | 43,92 | 6,72 | 8,23 | 11,3 | m ³ /s |
| 2014 | 94,47 | 198,68 | 315,69 | 378,43 | 223,10 | 201,67 | 179,29 | 155,32 | 322,1 | 323,7 | 303,2 | 291 | m ³ /s |
| 2015 | 397,2 | 789 | 737,1 | 684 | 560,7 | 403,1 | 305,1 | 231,6 | 200,7 | 204,3 | 200,1 | 320,5 | m ³ /s |
| 2016 | 950,7 | 648,1 | 877,6 | 910,6 | 503,4 | 266,8 | 223,3 | 190,9 | 194,3 | 188,1 | 176,6 | 172,6 | m ³ /s |
| 2017 | 411,1 | 764,4 | 1059 | 896,1 | 495,38 | 262,55 | 219,74 | 187,86 | 191,21 | 185,10 | 173,79 | 169,85 | m ³ /s |
| Promedio | 312,14 | 622,83 | 686,31 | 559,34 | 288,88 | 153,78 | 119,56 | 101,41 | 108,76 | 97,50 | 94,82 | 107,78 | m ³ /s |
| Velocidades | 1,84 | 2,35 | 2,43 | 2,38 | 1,80 | 1,33 | 1,27 | 1,21 | 1,39 | 1,15 | 1,10 | 1,08 | m/s |
| Área transversal | 169,66 | 265,35 | 282,42 | 235,19 | 160,18 | 115,98 | 94,08 | 83,65 | 78,24 | 84,88 | 86,11 | 99,96 | m ² |
| Longitud | 104,32 | m | | | | | | | | | | | |
| Promedio Altura | 1,63 | 2,54 | 2,71 | 2,25 | 1,54 | 1,11 | 0,90 | 0,80 | 0,75 | 0,81 | 0,83 | 0,96 | m |

Anexo 13. Matriz de contingencia de turbinas hidrocínéticas.

| MATRIZ DE CONTINGENCIA DE LAS VARIABLES QUE TIENEN INCIDENCIA EN EL COEFICIENTE DE POTENCIA (Cp) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|--------------|------------|-------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|---|-----------------|------------------|------------------------------|--|--|------|---|---|--|-------------|
| Propósito: Establecer las variables que tienen mayor incidencia en el coeficiente de potencia (Cp) de una turbina hidrocínética de eje vertical. | | | | | | | | Departamento de Ingeniería Mecánica Participantes: Uno | | | | | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | | VARIABLES | | | | | | | | | | DESTACADO | | | | | | |
| Tipo de turbina | Modelo | Diámetro (m) | Altura (m) | Perfil NACA | Número de palas | Ángulo de la curvatura pala | TSR (λ) | Solidez (σ) | Velocidad (RPM) | Potencia (Watts) | Coeficiente de potencia (Cp) | Revista o Tesis | Autores | Año | Variables más influyentes | | | |
| TURBINAS HIDROCINÉTICAS DE EJE VERTICAL | Gorlov | 0.5 | 1.25 | 0020 | 3 | 120° | 2 | 0.134 | 130 | 310 | 0.23 | Revista Science Direct "Investigación experimental de características de turbina de marea helicoidal" | Sathit Pongduang, Chaiwit Kayankannaveeb, Yodchai Tiaple | 2015 | Entre las variables más influyentes para una turbina hidrocínética de eje vertical helicoidal son: diámetro, altura, perfil NACA a usar, longitud de cuerda del álabe, número de palas o álabes que determinan una baja o alta solidez en concordancia con la | | | |
| | | | | 0020 | 3 | 135° | 2.1 | 0.134 | 125 | 290 | 0.22 | | | | | | | |
| | | | | 0020 | 3 | 150° | 2.04 | 0.134 | 130 | 210 | 0.15 | | | | | | | |
| | | 0.6 | 1.25 | 0020 | 3 | 120° | 2.45 | 0.111 | 118 | 265 | 0.20 | | | | | | | |
| | | | | 0020 | 3 | 135° | 2.4 | 0.111 | 110 | 270 | 0.26 | | | | | | | |
| | | | | 0020 | 3 | 150° | 2.25 | 0.111 | 114 | 195 | 0.14 | | | | | | | |
| | | 0.3 | 0.3 | 0020 | 3 | 60° | 1.01 | 0.38 | 52 | - | 0.14 | | | | | Conferencia turbina India "Ensayo en el sitio de una turbina de eje vertical helicoidal para generación de energía" | Parag K. Talukdar, Sarbindu Kumar & Vinayak Kulkarni | 2015 /12/03 |
| | | 3 | 3.6 | 0020 | 3 | 120° | 2.3 | 0.132 | - | - | 0.33 | | | | | | | |
| | | 0.20 | 0.20 | 0018 | 3 | 120° | 1.5 | 0.30 | - | 2.5 | 0.11 | | | | | Universidad de Washington "Estudio experimental" | Adam L. Niblick | 2012 |
| | | 0.172 | 0.234 | 0018 | 4 | 90° | 1.5 | 0.30 | - | 5 | 0.24 | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|-----|-------|------|---|------|------|-------|-----|-----|------|---|---|------------|---|
| | | | | | | | | | | | | ntal y analítico de las turbinas helicoidales de flujo cruzado para un sistema de generación de micro potencia mareomotriz” | | | longitud de la cuerda del álabe y radio de la turbina. Las dimensiones de altura y diámetro en donde esta es afectada en cierta medida por las variaciones de altura que tenga el canal o río, además la solidez de la turbina donde interfiere la longitud de la cuerda del álabe y el número de palas, a mayor solidez esta arrancará fácilmente, pero funcionará a una velocidad |
| | | 1 | 1.32 | 0020 | 3 | 120° | 2.1 | 0.14 | 72 | - | 0.28 | Conferencia internacional de fluidos “Investigación experimental de turbinas hidrocineéticas de eje cruzado helicoidal” | Peter Bachant & Martin Wosnik | 2011/07/29 | |
| | | 0.2 | 0.286 | 0018 | 3 | 120° | 1.95 | 0.117 | 208 | 473 | 0.27 | Revista internacional de investigación científica y tecnológica “Micro turbina: fabricación para una | Rohit Shriyan, Saurabh Sande, Aniket Dolas. | 2014/06 | |

| | | | | | | | | | | | | generación de energía eficiente” | | | de punta más baja; o viceversa, mientras se obtenga una solidez más baja esta funcionara con velocidad de punta más baja; es un factor muy importante al momento de considerar un rango de estudio de la velocidad de punta del álabe. Entre los perfiles que mejores prestaciones se obtienen para la turbina hidrocíntrica son el NACA 0018 y 0020, que son los más |
|--|--|-------|-----|------|---|------|------|-------|-----|-----|-------|--|---|-------------|---|
| | | 0.450 | 0.6 | 0020 | 3 | 120° | 1.6 | 0.16 | 200 | 180 | 0.048 | UNEXP O “Influencia de parámetros dimensionales en potenciales energéticos de turbinas hidrocínticas Gorlov” | Gustavo J. Marturet; Edgar de J. Gutiérrez & Simón A. Caraballo | 2017 /11/09 | |
| | | 0.3 | 0.6 | 0020 | 3 | 120° | 1.1 | 0.238 | 200 | 115 | 0.053 | | | | |
| | | 0.5 | 0.6 | 0020 | 3 | 120° | 1.75 | 0.143 | 200 | 190 | 0.04 | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | recomendados. |
|----------|--|--------------|------------|----------------------|-----------------|---------------------|-------------------|----------------------|-----------------|------------------|------------------------------------|---|--|--------------|---------------------------|
| | | Diámetro (m) | Altura (m) | Longitud de arco (m) | Número de palas | Ángulo arco de pala | TSR (λ) | Solidez (σ) | Velocidad (RPM) | Potencia (Watts) | Coefficiente de potencia (C_p) | Revista o Tesis | Autores | Año | Variables más influyentes |
| Savonius | | 1.08 | 0.8 | 0.701 | 2 | 124° | 0.9 | 0.412 | 25 | 300 | 0.18 | Trabajo de Diploma do "Diseño de una turbina hidrocíné tica tipo Savonius " | Irati Zubialde García | 2016 | |
| | | 0.160 | 0.253 | 0.104 | 2 | 150° | 0.9 | 0.414 | 64 | - | 0.21 | Tesis PhD. "Investig aciones sobre el rendimie nto de una turbina hidrocíné tica Savonius " | Anuj Kumar | 2017 /08 | |
| | | 0.220 | 0.180 | 0.113 | 2 | 130° | 1.26 | 0.359 | 67 | 300 | 0.25 | 5 ^{ta} Conferen cia internaci onal de Ciencia e Ingenierí a | Roshni Deepika Hemrom & Shibayan Sarkar. | 2017 /04/1 6 | |
| | | 0.200 | 0.180 | 0.111 | 2 | 130° | 0.4 | 0.35 | 38 | 140 | 0.16 | "Análisis de rendimie nto de la turbina hidrocíné tica Savonius " | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|---------------------|-------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|--|--|-------------------------------|---|----------------------------------|---------|--|
| | | | | | | | | | | | | | Research Gate Revista Internacional de maquinaria rotativa "Estudio de una turbina de agua Savonius modificada" | T. I. Eldho & S. V. Prabhu | 2012/05 | |
| | 0.260 | 0.170 | 0.140 | 2 | 124° | 0.70 | 0.342 | 58 | - | 0.14 | | | | | | |
| | Diámetro (m) | Altura (m) | Perfil NACA | Número de palas | Longitud cuerda álabes (m) | TSR (λ) | Solidez (σ) | Velocidad (RPM) | Potencia (Watts) | Coefficiente de potencia (C_p) | Revista o Tesis | Autores | Año | Variables más influyentes | | |
| Darrieus | 3.2 | 5 | 0015 | 4 | 0.5 | 6 | 0.198 | 35 | 10000 | 0.40 | Tesis Universidad Austral de Chile "Evaluación de una turbina hidrocineética de tipo Darrieus" | Pablo Walterio Joost Winkler | 2012 | | | |
| | 0.16 | 0.18 | 63018 | 3 | 0.03 | 0.83 | 0.18 | 100 | 30 | 0.54 | Revista Internacional de Ingeniería, Ciencia y Tecnología "Análisis de rendimiento de la Turbina Hidrocineética" | Vipin Kumar & Shibayan Sarkar | 2018/03 | | | |
| | | | 63018 | 4 | 0.03 | 0.83 | 0.24 | 100 | 22 | 0.50 | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|-------|-------|------|---|-----|------|-------|-------|---|-------|---|---|---------|--|
| | | | | | | | | | | | | ética Darrieus” | | | |
| | | 0.250 | 0.150 | 0015 | 3 | 0.1 | 1.05 | 0.382 | 37 | - | 0.15 | Revista Internacional de Energía marina-El Sevier “Investigaciones experimentales sobre la turbina de pala recta Darrieus para la aplicación de la corriente de las mareas” | Vimal Patel, T. I. Eldho & S. V. Prabhu | 2017/06 | |
| | | | | 0018 | 3 | 0.1 | 1.15 | 0.382 | 41 | - | 0.165 | | | | |
| | | | | 4415 | 3 | 0.1 | 1.15 | 0.382 | 41 | - | 0.105 | | | | |
| | | 0.220 | 0.150 | 0015 | 3 | 0.1 | 0.8 | 0.434 | 32 | - | 0.06 | | | | |
| | | | | 0018 | 3 | 0.1 | 0.85 | 0.434 | 34 | - | 0.105 | | | | |
| | | | | 4415 | 3 | 0.1 | 0.75 | 0.434 | 30 | - | 0.04 | | | | |
| | | 0.320 | 0.150 | 0015 | 3 | 0.1 | 1.1 | 0.298 | 30.2 | - | 0.03 | | | | |
| | | | | 0018 | 3 | 0.1 | 1 | 0.298 | 27.45 | - | 0.02 | | | | |
| | | | | 4415 | 3 | 0.1 | 1.25 | 0.298 | 34.3 | - | 0.115 | | | | |

Anexo 14. Coeficientes de sustentación (lift) – NACA 0018.

| α \ Re | 100000 | 150000 | 200000 | 250000 | 300000 | 350000 | 400000 | 450000 | 500000 | 550000 | 600000 | 650000 | 700000 | 750000 | 800000 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| 2 | 0,249 | 0,249 | 0,249 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 3 | 0,372 | 0,373 | 0,373 | 0,373 | 0,373 | 0,373 | 0,374 | 0,374 | 0,374 | 0,374 | 0,374 | 0,374 | 0,374 | 0,374 | 0,374 |
| 4 | 0,494 | 0,495 | 0,495 | 0,496 | 0,496 | 0,496 | 0,496 | 0,496 | 0,496 | 0,496 | 0,497 | 0,497 | 0,497 | 0,497 | 0,497 |
| 5 | 0,614 | 0,615 | 0,616 | 0,616 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,618 | 0,618 | 0,618 | 0,618 | 0,618 | 0,618 |
| 6 | 0,73 | 0,732 | 0,733 | 0,734 | 0,735 | 0,735 | 0,735 | 0,736 | 0,736 | 0,736 | 0,736 | 0,737 | 0,737 | 0,737 | 0,737 |
| 7 | 0,841 | 0,845 | 0,847 | 0,848 | 0,849 | 0,85 | 0,85 | 0,851 | 0,851 | 0,851 | 0,852 | 0,852 | 0,852 | 0,852 | 0,853 |
| 8 | 0,945 | 0,952 | 0,955 | 0,957 | 0,959 | 0,96 | 0,96 | 0,961 | 0,962 | 0,962 | 0,963 | 0,963 | 0,963 | 0,964 | 0,964 |
| 9 | 1,039 | 1,05 | 1,055 | 1,058 | 1,06 | 1,062 | 1,063 | 1,064 | 1,065 | 1,066 | 1,066 | 1,067 | 1,068 | 1,068 | 1,069 |
| 10 | 1,121 | 1,137 | 1,145 | 1,15 | 1,153 | 1,155 | 1,157 | 1,159 | 1,16 | 1,161 | 1,162 | 1,163 | 1,164 | 1,165 | 1,166 |
| 11 | 1,189 | 1,212 | 1,224 | 1,231 | 1,235 | 1,239 | 1,242 | 1,244 | 1,246 | 1,247 | 1,249 | 1,25 | 1,251 | 1,252 | 1,253 |
| 12 | 1,241 | 1,275 | 1,291 | 1,3 | 1,306 | 1,311 | 1,314 | 1,317 | 1,32 | 1,322 | 1,324 | 1,325 | 1,327 | 1,328 | 1,329 |
| 13 | 1,28 | 1,324 | 1,345 | 1,357 | 1,364 | 1,37 | 1,374 | 1,378 | 1,381 | 1,384 | 1,386 | 1,388 | 1,39 | 1,392 | 1,393 |
| 14 | 1,316 | 1,364 | 1,388 | 1,403 | 1,412 | 1,419 | 1,424 | 1,428 | 1,432 | 1,435 | 1,438 | 1,441 | 1,443 | 1,445 | 1,447 |
| 15 | 1,349 | 1,392 | 1,421 | 1,437 | 1,448 | 1,456 | 1,462 | 1,467 | 1,471 | 1,475 | 1,478 | 1,481 | 1,483 | 1,486 | 1,488 |
| 16 | 1,377 | 1,411 | 1,44 | 1,458 | 1,47 | 1,478 | 1,485 | 1,491 | 1,495 | 1,499 | 1,502 | 1,505 | 1,508 | 1,51 | 1,513 |
| 17 | 1,401 | 1,425 | 1,452 | 1,471 | 1,483 | 1,492 | 1,499 | 1,505 | 1,509 | 1,513 | 1,517 | 1,52 | 1,523 | 1,525 | 1,528 |
| 18 | 1,419 | 1,436 | 1,457 | 1,476 | 1,487 | 1,497 | 1,504 | 1,51 | 1,514 | 1,518 | 1,522 | 1,526 | 1,528 | 1,531 | 1,533 |
| 19 | 1,429 | 1,441 | 1,458 | 1,476 | 1,487 | 1,496 | 1,502 | 1,508 | 1,512 | 1,516 | 1,52 | 1,523 | 1,526 | 1,528 | 1,53 |
| 20 | 1,431 | 1,439 | 1,454 | 1,469 | 1,479 | 1,486 | 1,493 | 1,498 | 1,503 | 1,506 | 1,509 | 1,511 | 1,513 | 1,515 | 1,516 |
| 21 | 1,425 | 1,432 | 1,444 | 1,455 | 1,465 | 1,471 | 1,478 | 1,482 | 1,485 | 1,489 | 1,491 | 1,493 | 1,495 | 1,496 | 1,497 |
| 22 | 1,412 | 1,417 | 1,426 | 1,436 | 1,445 | 1,452 | 1,456 | 1,459 | 1,462 | 1,465 | 1,467 | 1,469 | 1,47 | 1,471 | 1,473 |
| 23 | 1,392 | 1,398 | 1,405 | 1,414 | 1,422 | 1,426 | 1,431 | 1,434 | 1,436 | 1,438 | 1,44 | 1,442 | 1,443 | 1,444 | 1,446 |
| 24 | 1,366 | 1,372 | 1,38 | 1,387 | 1,392 | 1,397 | 1,399 | 1,402 | 1,404 | 1,406 | 1,408 | 1,409 | 1,411 | 1,412 | 1,413 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25 | 1,337 | 1,342 | 1,349 | 1,355 | 1,359 | 1,363 | 1,365 | 1,368 | 1,369 | 1,371 | 1,372 | 1,374 | 1,375 | 1,376 | 1,377 |
| 26 | 1,304 | 1,308 | 1,314 | 1,319 | 1,323 | 1,325 | 1,328 | 1,33 | 1,332 | 1,333 | 1,334 | 1,335 | 1,336 | 1,337 | 1,339 |
| 27 | 1,267 | 1,271 | 1,276 | 1,28 | 1,283 | 1,286 | 1,288 | 1,289 | 1,291 | 1,293 | 1,294 | 1,295 | 1,296 | 1,296 | 1,297 |
| 28 | 1,228 | 1,232 | 1,237 | 1,24 | 1,243 | 1,245 | 1,247 | 1,248 | 1,25 | 1,251 | 1,252 | 1,253 | 1,254 | 1,255 | 1,256 |
| 29 | 1,188 | 1,192 | 1,195 | 1,199 | 1,201 | 1,203 | 1,205 | 1,206 | 1,207 | 1,208 | 1,209 | 1,21 | 1,211 | 1,212 | 1,213 |
| 30 | 1,147 | 1,15 | 1,154 | 1,156 | 1,159 | 1,16 | 1,162 | 1,163 | 1,164 | 1,165 | 1,166 | 1,167 | 1,167 | 1,168 | 1,168 |
| 31 | 1,106 | 1,109 | 1,112 | 1,115 | 1,117 | 1,118 | 1,119 | 1,121 | 1,122 | 1,123 | 1,123 | 1,124 | 1,124 | 1,125 | 1,125 |
| 32 | 1,065 | 1,068 | 1,07 | 1,073 | 1,075 | 1,076 | 1,077 | 1,078 | 1,079 | 1,08 | 1,081 | 1,081 | 1,082 | 1,082 | 1,083 |
| 33 | 1,025 | 1,027 | 1,03 | 1,032 | 1,033 | 1,035 | 1,036 | 1,036 | 1,037 | 1,038 | 1,039 | 1,04 | 1,04 | 1,041 | 1,041 |
| 34 | 0,985 | 0,988 | 0,99 | 0,992 | 0,994 | 0,995 | 0,996 | 0,996 | 0,997 | 0,998 | 0,998 | 0,999 | 0,999 | 1 | 1,001 |
| 35 | 0,947 | 0,949 | 0,951 | 0,953 | 0,954 | 0,956 | 0,956 | 0,957 | 0,958 | 0,958 | 0,959 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 0,961 |
| 36 | 0,91 | 0,912 | 0,914 | 0,915 | 0,917 | 0,918 | 0,919 | 0,92 | 0,92 | 0,921 | 0,921 | 0,922 | 0,922 | 0,923 | 0,923 |
| 37 | 0,875 | 0,876 | 0,878 | 0,879 | 0,881 | 0,882 | 0,883 | 0,883 | 0,884 | 0,884 | 0,885 | 0,885 | 0,885 | 0,886 | 0,886 |
| 38 | 0,841 | 0,842 | 0,844 | 0,845 | 0,846 | 0,847 | 0,848 | 0,849 | 0,849 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,851 | 0,851 | 0,851 |
| 39 | 0,808 | 0,809 | 0,811 | 0,812 | 0,813 | 0,814 | 0,815 | 0,816 | 0,816 | 0,817 | 0,817 | 0,817 | 0,817 | 0,818 | 0,818 |
| 40 | 0,777 | 0,778 | 0,78 | 0,781 | 0,782 | 0,783 | 0,783 | 0,784 | 0,785 | 0,785 | 0,785 | 0,786 | 0,786 | 0,786 | 0,786 |
| 41 | 0,748 | 0,749 | 0,75 | 0,751 | 0,752 | 0,753 | 0,753 | 0,754 | 0,755 | 0,755 | 0,755 | 0,756 | 0,756 | 0,756 | 0,756 |
| 42 | 0,719 | 0,721 | 0,722 | 0,723 | 0,724 | 0,724 | 0,725 | 0,726 | 0,726 | 0,727 | 0,727 | 0,727 | 0,727 | 0,728 | 0,728 |
| 43 | 0,693 | 0,694 | 0,695 | 0,696 | 0,697 | 0,698 | 0,698 | 0,699 | 0,699 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,701 | 0,701 |
| 44 | 0,666 | 0,667 | 0,668 | 0,669 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | 0,671 | 0,671 | 0,672 | 0,672 | 0,672 | 0,673 | 0,673 | 0,673 |
| 45 | 0,638 | 0,639 | 0,64 | 0,641 | 0,641 | 0,642 | 0,642 | 0,643 | 0,643 | 0,643 | 0,644 | 0,644 | 0,644 | 0,644 | 0,645 |
| 46 | 0,612 | 0,613 | 0,613 | 0,614 | 0,615 | 0,615 | 0,616 | 0,616 | 0,616 | 0,617 | 0,617 | 0,617 | 0,618 | 0,618 | 0,618 |
| 47 | 0,587 | 0,588 | 0,589 | 0,59 | 0,59 | 0,591 | 0,591 | 0,591 | 0,591 | 0,591 | 0,592 | 0,592 | 0,592 | 0,593 | 0,593 |
| 48 | 0,564 | 0,565 | 0,565 | 0,566 | 0,567 | 0,567 | 0,568 | 0,568 | 0,568 | 0,568 | 0,569 | 0,569 | 0,569 | 0,569 | 0,569 |
| 49 | 0,542 | 0,543 | 0,544 | 0,544 | 0,545 | 0,545 | 0,546 | 0,546 | 0,546 | 0,546 | 0,547 | 0,547 | 0,547 | 0,547 | 0,547 |
| 50 | 0,522 | 0,523 | 0,523 | 0,524 | 0,524 | 0,525 | 0,525 | 0,525 | 0,526 | 0,526 | 0,526 | 0,526 | 0,526 | 0,526 | 0,526 |
| 51 | 0,503 | 0,503 | 0,504 | 0,505 | 0,505 | 0,506 | 0,506 | 0,506 | 0,506 | 0,506 | 0,507 | 0,507 | 0,507 | 0,507 | 0,507 |
| 52 | 0,485 | 0,485 | 0,486 | 0,487 | 0,487 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,488 | 0,489 | 0,489 | 0,489 | 0,489 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 53 | 0,468 | 0,469 | 0,469 | 0,47 | 0,47 | 0,471 | 0,471 | 0,471 | 0,471 | 0,471 | 0,472 | 0,472 | 0,472 | 0,472 | 0,472 |
| 54 | 0,452 | 0,453 | 0,453 | 0,454 | 0,454 | 0,455 | 0,455 | 0,455 | 0,455 | 0,456 | 0,456 | 0,456 | 0,456 | 0,456 | 0,456 |
| 55 | 0,437 | 0,438 | 0,439 | 0,439 | 0,439 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,441 | 0,441 | 0,441 | 0,441 | 0,441 | 0,441 |
| 56 | 0,424 | 0,424 | 0,425 | 0,425 | 0,425 | 0,426 | 0,426 | 0,426 | 0,426 | 0,427 | 0,427 | 0,427 | 0,427 | 0,427 | 0,427 |
| 57 | 0,411 | 0,411 | 0,412 | 0,412 | 0,412 | 0,413 | 0,413 | 0,413 | 0,413 | 0,413 | 0,413 | 0,414 | 0,414 | 0,414 | 0,414 |
| 58 | 0,398 | 0,399 | 0,399 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,401 | 0,401 | 0,401 | 0,401 | 0,401 | 0,401 | 0,401 | 0,401 | 0,401 |
| 59 | 0,387 | 0,387 | 0,388 | 0,388 | 0,388 | 0,389 | 0,389 | 0,389 | 0,389 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 0,39 |
| 60 | 0,376 | 0,377 | 0,377 | 0,377 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,379 | 0,379 | 0,379 | 0,379 | 0,379 | 0,379 | 0,379 | 0,379 |

Anexo 15. Coeficientes de arrastre (drag) – NACA 0018.

| α \ Re | 100000 | 150000 | 200000 | 250000 | 300000 | 350000 | 400000 | 450000 | 500000 | 550000 | 600000 | 650000 | 700000 | 750000 | 800000 |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | 0,02209 | 0,02 | 0,01875 | 0,01158 | 0,01131 | 0,01108 | 0,01086 | 0,01069 | 0,01053 | 0,01039 | 0,01034 | 0,0102 | 0,01016 | 0,01004 | 0,01003 |
| 1 | 0,02222 | 0,01687 | 0,01592 | 0,01529 | 0,0149 | 0,01447 | 0,01086 | 0,01078 | 0,01061 | 0,01047 | 0,01031 | 0,01029 | 0,01016 | 0,01013 | 0,01005 |
| 2 | 0,02254 | 0,01759 | 0,01661 | 0,01599 | 0,01546 | 0,01513 | 0,01565 | 0,01543 | 0,01513 | 0,01496 | 0,01489 | 0,01466 | 0,0146 | 0,01448 | 0,01441 |
| 3 | 0,0233 | 0,01854 | 0,01749 | 0,01757 | 0,01703 | 0,01669 | 0,01633 | 0,01612 | 0,01583 | 0,01566 | 0,0155 | 0,01531 | 0,01517 | 0,01511 | 0,015 |
| 4 | 0,02187 | 0,01977 | 0,01941 | 0,01856 | 0,01806 | 0,0176 | 0,01721 | 0,01698 | 0,01676 | 0,0165 | 0,01633 | 0,01619 | 0,01599 | 0,01588 | 0,01578 |
| 5 | 0,02347 | 0,02189 | 0,02065 | 0,01984 | 0,01921 | 0,01868 | 0,01835 | 0,01801 | 0,01778 | 0,01756 | 0,0173 | 0,01715 | 0,01701 | 0,01685 | 0,01665 |
| 6 | 0,02557 | 0,02369 | 0,0223 | 0,02137 | 0,02075 | 0,02018 | 0,01972 | 0,01939 | 0,01912 | 0,01882 | 0,01862 | 0,01844 | 0,01818 | 0,01801 | 0,01788 |
| 7 | 0,02821 | 0,02595 | 0,02431 | 0,02322 | 0,02248 | 0,02195 | 0,02142 | 0,02101 | 0,02063 | 0,02035 | 0,02011 | 0,01981 | 0,01962 | 0,01945 | 0,01928 |
| 8 | 0,03334 | 0,02865 | 0,02683 | 0,02555 | 0,02459 | 0,02391 | 0,02333 | 0,02282 | 0,02246 | 0,02215 | 0,0218 | 0,02155 | 0,02134 | 0,02113 | 0,02087 |
| 9 | 0,03775 | 0,03215 | 0,02982 | 0,02833 | 0,02727 | 0,02644 | 0,02576 | 0,02523 | 0,02473 | 0,02432 | 0,024 | 0,02364 | 0,02335 | 0,0231 | 0,02288 |
| 10 | 0,04387 | 0,03689 | 0,0339 | 0,03201 | 0,03063 | 0,0296 | 0,02877 | 0,02806 | 0,0275 | 0,02697 | 0,02656 | 0,02621 | 0,0258 | 0,02548 | 0,02519 |
| 11 | 0,05268 | 0,04301 | 0,03932 | 0,03674 | 0,03503 | 0,0337 | 0,03268 | 0,03181 | 0,03107 | 0,03044 | 0,02994 | 0,02942 | 0,02898 | 0,0286 | 0,02831 |
| 12 | 0,06588 | 0,05225 | 0,04683 | 0,0434 | 0,04112 | 0,03933 | 0,03798 | 0,03687 | 0,03595 | 0,03517 | 0,03456 | 0,03395 | 0,03345 | 0,03297 | 0,03254 |
| 13 | 0,08444 | 0,06513 | 0,05727 | 0,05264 | 0,04959 | 0,04727 | 0,04561 | 0,04408 | 0,04291 | 0,04199 | 0,04103 | 0,04024 | 0,03956 | 0,0389 | 0,03835 |
| 14 | 0,10562 | 0,08191 | 0,0711 | 0,06488 | 0,06084 | 0,05771 | 0,0554 | 0,05361 | 0,052 | 0,05063 | 0,04947 | 0,04843 | 0,04756 | 0,04656 | 0,04587 |
| 15 | 0,12741 | 0,10294 | 0,08798 | 0,07976 | 0,07446 | 0,07063 | 0,06759 | 0,06513 | 0,06307 | 0,06135 | 0,05992 | 0,05846 | 0,05733 | 0,05636 | 0,05527 |
| 16 | 0,1477 | 0,12491 | 0,10759 | 0,09743 | 0,09067 | 0,08605 | 0,08224 | 0,07933 | 0,07688 | 0,07446 | 0,07269 | 0,07122 | 0,06958 | 0,06845 | 0,0671 |
| 17 | 0,16832 | 0,1479 | 0,12922 | 0,11729 | 0,10917 | 0,10343 | 0,09888 | 0,09532 | 0,0925 | 0,09005 | 0,08751 | 0,08575 | 0,08384 | 0,08251 | 0,08093 |
| 18 | 0,18874 | 0,17029 | 0,15249 | 0,13911 | 0,13014 | 0,12323 | 0,11832 | 0,1137 | 0,11031 | 0,10711 | 0,10476 | 0,10219 | 0,10034 | 0,09832 | 0,09705 |
| 19 | 0,21106 | 0,19194 | 0,17428 | 0,16049 | 0,15089 | 0,14352 | 0,13759 | 0,13279 | 0,12906 | 0,12563 | 0,12292 | 0,12005 | 0,11743 | 0,11634 | 0,11489 |
| 20 | 0,23404 | 0,21436 | 0,19743 | 0,1833 | 0,17305 | 0,16517 | 0,15879 | 0,15371 | 0,14938 | 0,14601 | 0,14349 | 0,14161 | 0,13954 | 0,13772 | 0,13621 |
| 21 | 0,25705 | 0,23813 | 0,22073 | 0,20636 | 0,19572 | 0,18773 | 0,18067 | 0,17613 | 0,17266 | 0,16876 | 0,16637 | 0,16389 | 0,16172 | 0,16002 | 0,1583 |
| 22 | 0,28484 | 0,2621 | 0,24558 | 0,23188 | 0,21979 | 0,21153 | 0,20591 | 0,20108 | 0,19713 | 0,1936 | 0,19091 | 0,1881 | 0,18592 | 0,18412 | 0,18165 |
| 23 | 0,31326 | 0,28648 | 0,26902 | 0,25414 | 0,24388 | 0,23638 | 0,22945 | 0,22404 | 0,22029 | 0,21618 | 0,21328 | 0,21041 | 0,20828 | 0,20608 | 0,20347 |
| 24 | 0,3427 | 0,31427 | 0,29646 | 0,28219 | 0,27105 | 0,26276 | 0,25606 | 0,25017 | 0,24534 | 0,24207 | 0,23855 | 0,23602 | 0,23244 | 0,23067 | 0,22809 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 25 | 0,3741 | 0,3461 | 0,32236 | 0,30909 | 0,29876 | 0,28983 | 0,28171 | 0,27661 | 0,27208 | 0,26806 | 0,26349 | 0,26133 | 0,25786 | 0,25478 | 0,25263 |
| 26 | 0,40734 | 0,37474 | 0,35222 | 0,33644 | 0,32456 | 0,3166 | 0,30953 | 0,30363 | 0,29808 | 0,29306 | 0,2896 | 0,28561 | 0,28468 | 0,28039 | 0,27779 |
| 27 | 0,44862 | 0,40666 | 0,38588 | 0,36866 | 0,35527 | 0,34683 | 0,33773 | 0,33322 | 0,32621 | 0,32163 | 0,31905 | 0,31395 | 0,31071 | 0,30698 | 0,30468 |
| 28 | 0,48128 | 0,44474 | 0,41909 | 0,4007 | 0,38466 | 0,37497 | 0,36574 | 0,35789 | 0,35242 | 0,34869 | 0,34413 | 0,33922 | 0,3353 | 0,33299 | 0,3302 |
| 29 | 0,52565 | 0,47877 | 0,44873 | 0,43285 | 0,41563 | 0,40443 | 0,39752 | 0,38823 | 0,38231 | 0,37616 | 0,37358 | 0,36662 | 0,36378 | 0,36123 | 0,35783 |
| 30 | 0,5696 | 0,5126 | 0,48857 | 0,46544 | 0,45466 | 0,43952 | 0,4322 | 0,4213 | 0,41522 | 0,40957 | 0,40305 | 0,40103 | 0,39297 | 0,39158 | 0,38785 |
| 31 | 0,60101 | 0,56255 | 0,52777 | 0,50086 | 0,48729 | 0,47159 | 0,462 | 0,4527 | 0,44408 | 0,43953 | 0,433 | 0,43011 | 0,42565 | 0,41898 | 0,41429 |
| 32 | 0,64783 | 0,59271 | 0,55795 | 0,54153 | 0,51876 | 0,50877 | 0,4961 | 0,48968 | 0,47992 | 0,472 | 0,46784 | 0,45934 | 0,45403 | 0,45129 | 0,44685 |
| 33 | 0,696 | 0,63879 | 0,61059 | 0,58171 | 0,55689 | 0,54141 | 0,53221 | 0,52446 | 0,51333 | 0,50612 | 0,49752 | 0,49323 | 0,48686 | 0,48389 | 0,47761 |
| 34 | 0,74716 | 0,6867 | 0,64168 | 0,61664 | 0,60204 | 0,57536 | 0,56552 | 0,55032 | 0,5511 | 0,54113 | 0,53088 | 0,52428 | 0,51748 | 0,51373 | 0,51267 |
| 35 | 0,81894 | 0,72478 | 0,69786 | 0,66288 | 0,63819 | 0,61319 | 0,59969 | 0,5882 | 0,5843 | 0,57838 | 0,56797 | 0,56268 | 0,55464 | 0,55058 | 0,54285 |
| 36 | 0,84663 | 0,77652 | 0,72904 | 0,70511 | 0,6717 | 0,65033 | 0,63339 | 0,62618 | 0,61847 | 0,61227 | 0,60127 | 0,58747 | 0,58437 | 0,5799 | 0,57121 |
| 37 | 0,90558 | 0,82163 | 0,7926 | 0,75668 | 0,71473 | 0,69567 | 0,67892 | 0,66279 | 0,65737 | 0,64899 | 0,63527 | 0,63308 | 0,6252 | 0,61999 | 0,61019 |
| 38 | 0,98544 | 0,89103 | 0,84195 | 0,78588 | 0,7634 | 0,734 | 0,72706 | 0,70391 | 0,69586 | 0,68528 | 0,6713 | 0,66408 | 0,66232 | 0,65079 | 0,65284 |
| 39 | 1,05043 | 0,93536 | 0,88673 | 0,83586 | 0,80672 | 0,78378 | 0,7706 | 0,74226 | 0,74315 | 0,73291 | 0,71599 | 0,70706 | 0,69559 | 0,69928 | 0,69117 |
| 40 | 1,10455 | 0,96516 | 0,93685 | 0,87251 | 0,8382 | 0,83358 | 0,80987 | 0,79435 | 0,77375 | 0,76119 | 0,75932 | 0,75351 | 0,73431 | 0,73772 | 0,72832 |
| 41 | 1,15331 | 1,04188 | 0,97652 | 0,9201 | 0,88658 | 0,86396 | 0,85363 | 0,83707 | 0,82543 | 0,80983 | 0,78893 | 0,77875 | 0,77541 | 0,76016 | 0,76738 |
| 42 | 1,20713 | 1,115 | 1,0193 | 1,00012 | 0,94811 | 0,90637 | 0,90667 | 0,87042 | 0,85556 | 0,85302 | 0,83127 | 0,81919 | 0,81464 | 0,81684 | 0,7958 |
| 43 | 1,28342 | 1,17627 | 1,07203 | 1,01702 | 1,00861 | 0,94931 | 0,9368 | 0,91791 | 0,90989 | 0,8937 | 0,89079 | 0,87638 | 0,85624 | 0,8597 | 0,84737 |
| 44 | 1,3672 | 1,24226 | 1,128 | 1,08943 | 1,03207 | 0,99694 | 1,00259 | 0,96838 | 0,95479 | 0,93589 | 0,93123 | 0,9178 | 0,91387 | 0,89374 | 0,88013 |
| 45 | 1,41019 | 1,29586 | 1,18856 | 1,12619 | 1,09862 | 1,04681 | 1,04791 | 1,0166 | 1,00018 | 0,9783 | 0,96913 | 0,95434 | 0,94887 | 0,92711 | 0,91218 |
| 46 | 1,46614 | 1,35167 | 1,23595 | 1,20662 | 1,15932 | 1,09678 | 1,09246 | 1,05121 | 1,04428 | 1,03511 | 1,00588 | 0,98917 | 0,98208 | 0,9835 | 0,96613 |
| 47 | 1,53743 | 1,40719 | 1,32953 | 1,23775 | 1,22151 | 1,1725 | 1,13097 | 1,08465 | 1,08691 | 1,07245 | 1,06793 | 1,04848 | 1,04021 | 1,02232 | 1,01494 |
| 48 | 1,61694 | 1,46836 | 1,32733 | 1,31517 | 1,23568 | 1,22025 | 1,17106 | 1,16715 | 1,11984 | 1,10984 | 1,10303 | 1,08146 | 1,07571 | 1,0827 | 1,0827 |
| 49 | 1,6713 | 1,56493 | 1,3865 | 1,33707 | 1,28146 | 1,26458 | 1,20786 | 1,20894 | 1,19401 | 1,17342 | 1,13459 | 1,13877 | 1,12802 | 1,13745 | 1,12118 |
| 50 | 1,81457 | 1,603 | 1,48624 | 1,41191 | 1,33375 | 1,30838 | 1,28853 | 1,23402 | 1,21464 | 1,22214 | 1,18447 | 1,18264 | 1,18525 | 1,17975 | 1,19192 |
| 51 | 1,86807 | 1,64137 | 1,5969 | 1,46657 | 1,38624 | 1,35176 | 1,31719 | 1,31513 | 1,29104 | 1,23708 | 1,24954 | 1,2322 | 1,2459 | 1,24714 | 1,23431 |
| 52 | 1,92388 | 1,68063 | 1,6008 | 1,53232 | 1,43907 | 1,4055 | 1,40796 | 1,33628 | 1,3074 | 1,33934 | 1,28311 | 1,32253 | 1,28259 | 1,2861 | 1,27447 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 53 | 2,05645 | 1,85352 | 1,71708 | 1,59905 | 1,49228 | 1,50752 | 1,43316 | 1,42123 | 1,38883 | 1,34386 | 1,37723 | 1,34758 | 1,36528 | 1,36195 | 1,35094 |
| 54 | 2,08369 | 1,86614 | 1,73149 | 1,66688 | 1,56663 | 1,53974 | 1,45801 | 1,43825 | 1,44411 | 1,42459 | 1,38863 | 1,43191 | 1,38171 | 1,38918 | 1,37366 |
| 55 | 2,11229 | 1,88158 | 1,8375 | 1,63519 | 1,60871 | 1,5715 | 1,55252 | 1,52745 | 1,51212 | 1,50168 | 1,46763 | 1,44207 | 1,4348 | 1,44228 | 1,46354 |
| 56 | 2,25367 | 2,01474 | 1,81495 | 1,74796 | 1,65042 | 1,60299 | 1,6274 | 1,58219 | 1,59086 | 1,50146 | 1,55149 | 1,52644 | 1,52158 | 1,53345 | 1,47536 |
| 57 | 2,25034 | 2,02751 | 1,92105 | 1,76633 | 1,76995 | 1,71253 | 1,65939 | 1,63033 | 1,58101 | 1,57666 | 1,5531 | 1,61651 | 1,52844 | 1,58618 | 1,52421 |
| 58 | 2,37817 | 2,17686 | 2,03708 | 1,84005 | 1,81126 | 1,70249 | 1,75175 | 1,69378 | 1,65291 | 1,65524 | 1,60485 | 1,58123 | 1,57681 | 1,5884 | 1,61539 |
| 59 | 2,51228 | 2,15876 | 1,99173 | 1,91672 | 1,85247 | 1,79196 | 1,79968 | 1,75899 | 1,72725 | 1,73731 | 1,68649 | 1,66419 | 1,66279 | 1,63497 | 1,66256 |
| 60 | 2,47876 | 2,28669 | 2,08619 | 1,9972 | 1,90031 | 1,83082 | 1,84952 | 1,82587 | 1,78355 | 1,72267 | 1,77216 | 1,7116 | 1,7091 | 1,72544 | 1,70762 |

Anexo 16. Script de modelación turbina hidrocínética.

```
% Script basado en el programa de Nick Stelzenmuller; adaptada y
% reestructurada su simbología y valores a las condiciones del proyecto...
% Se establecen los parámetros geométricos de la turbina y condiciones del
% fluido para encontrar fuerzas, torque, ángulos de ataque, velocidades y
% representarlos por medio de gráficas para su análisis...
% Perfil NACA-0020 utilizado...
% Los ángulos de ataque varían desde 0 hasta 60 grados...
% Y variación de números de Reynolds desde 10000 hasta 800000 con
% intervalos de 50000...
% Se asume que la turbina rota en el sentido horario...

%% Script de evaluación
clear; close all; clc;

lambdavec=1.0:0.1:2; % Rango de evaluación de velocidad de punta del álabe (TSR)
for l=1:length(lambdavec)

% Definición de las variables de la turbina y del fluido

    lambda=lambdavec(l); % Se escoge el primer valor de la velocidad de punta del álabe
    (TSR)
    vel_flu=2.5; % Velocidad del fluido - agua (m/s)
    R_turb=0.25; % Radio de la turbina (m)
    D_turb=R_turb*2; % Diámetro de la turbina (m)
    H_turb=0.6; % Altura de la turbina (m)
    N=360; % 360 grados alrededor del círculo de la turbina para resolverlos
    C=0.12; % Longitud de la cuerda del álabe (m)
    rho=1000; % Densidad del agua (kg/m^3)
    eta=1.002*10^-3; % Viscosidad dinámica del fluido (Kg/m.s)

    %%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%
    Re=rho*vel_flu*C/eta; % Cálculo del número de Reynolds para las condiciones del
    flujo
    omega=lambda*vel_flu/R_turb; % Cálculo de la velocidad angular (rad/s)
    theta=linspace(pi/180,2*pi,N); % Se genera los puntos de un círculo en coordenadas
    polares

    R=ones(1,length(theta))*R_turb; % Radio de la turbina con diferentes ángulos

    V_t_theta=pi/2+theta; % Genera la componente tangencial del vector velocidad...
    V_t_R=ones(1,length(theta))*R_turb*omega; % en coordenadas polares
    [circX,circY]=pol2cart(theta,R); % Transforma en coordenadas cartesianas los datos en
    polares
    V_inf_U=zeros(1,length(theta)); % Genera los diversos componentes del flujo en
    todos los puntos alrededor de la turbina
```

```

V_inf_V=ones(1,length(theta))*-vel_flu; % Genera un vector en el sentido contrario(en
este caso va en la dirección negativa de Y)...
% del vector de velocidad relativa
[V_t_U,V_t_V]=pol2cart(V_t_theta,V_t_R); % Transforma el vector velocidad
tangencial en coordenadas cartesianas.

% Componente tangencial de la velocidad relativa
V_r_U=V_t_U+V_inf_U;
V_r_V=V_t_V+V_inf_V; % Encuentra la velocidad relativa (vector suma de V_t y
V_inf)....
% y obtiene la graficación de ellos pero fuera del lazo
V_r=sqrt(V_r_U.^2+V_r_V.^2); % Magnitud de la velocidad relativa

% Cálculo de los ángulos
V_r_angle=atan2(V_r_V,V_r_U); % Se encuentra el ángulo de la velocidad relativa con
respecto a theta

for i=1:length(theta) % Evitamos tener ángulos negativos (la función atan2 obtiene
ángulos entre -pi:pi, esto los transforma de 0:pi)
    if V_r_angle(i)<0
        V_r_angle(i:length(theta))=V_r_angle(i:length(theta))+2*pi;
    end
end

alpha=V_t_theta-V_r_angle; % El ángulo de ataque es calculado como el ángulo entre la
línea de cuerda (V_t) y la velocidad relativa (V_r). Es negativa en el lado de aguas arriba
"upstream side"...
% y positiva en el lado aguas abajo "downstream side"

% Coeficientes de sustentación (Lift) y arrastre (Drag)
% Modificación para rango de ángulo de ataque - alpha_table
alpha_table=(0:1:60);

% Modificación para el número de Reynolds - Re_table

Re_table=[10000,50000,100000,150000,200000,250000,300000,350000,400000,450000,5
00000,550000,600000,650000,700000,750000,800000,]; % Se utiliza el JavaFoil para
obtener los valores correspondientes

% Aquí se carga el archivo de Excel de los coeficientes
lift=xlsread('lift0020l.xlsx');
drag=xlsread('drag0020d.xlsx');

% Los coeficientes de sustentación y arrastre están contenidos en los archivos en Excel
lift0020l y drag0020d
Re2=rho.*V_r.*C/eta; % Número de Reynolds 2
Re_vec=ones(1,length(theta)).*Re2; % Código que interpola los coeficientes de
sustentación y...
alpha_vec=abs(alpha)*180/pi; % arrastre de los archivos en Excel

```

```
Cl=interp2(Re_table,alpha_table,lift,Re_vec,alpha_vec);% El Excel de sustentación debe tener el mismo rango de "alpha_table y Re_table", cada columna es un Reynolds
```

```
Cd=interp2(Re_table,alpha_table,drag,Re_vec,alpha_vec); % Código que interpola el coeficiente de arrastre y la fila anterior el de sustentación
```

```
F_l=.5*rho*C*V_r.^2.*Cl; % Calculo de la fuerza de sustentación (N/m)con la ecuación estándar
```

```
F_d=.5*rho*C*V_r.^2.*Cd; % Calculo de la fuerza de arrastre (N/m)con la ecuación estándar
```

```
% Genero los vectores de sustentación (lift) y arrastre (drag) definiéndolos en coordenadas polares
```

```
% El vector de elevación necesitaba algo de manipulación, es decir, ...
```

```
% es hacia adentro en el lado de aguas arriba (upstream) y hacia el ...
```

```
% exterior en el lado de aguas abajo (downstream)
```

```
[F_d_U,F_d_V]=pol2cart(V_r_angle,F_d); % Vector de arrastre (Drag)
```

```
% Vector de fuerza sustentación (Lift)
```

```
% pol2cart construye un vector a diferentes pasos
```

```
[F_l_U_upstream,F_l_V_upstream]=pol2cart(V_r_angle(1:length(theta)/2)-3*pi/2,F_l(1:length(F_l)/2));
```

```
% Se toma los valores de los últimos 180 fuerzas de arrastre (F_d)
```

```
[F_l_U_downstream,F_l_V_downstream]=pol2cart(V_r_angle((length(theta)/2+1):end)-pi/2,F_d(length(F_d)/2+1:end));
```

```
F_l_U=cat(2,F_l_U_upstream,F_l_U_downstream);
```

```
F_l_V=cat(2,F_l_V_upstream,F_l_V_downstream);
```

```
F_l_U_special=cat(2,F_l_U,F_l_U);
```

```
F_d_U_special=cat(2,F_d_U,F_d_U);
```

```
F_l_V_special=cat(2,F_l_V,F_l_V);
```

```
F_d_V_special=cat(2,F_d_V,F_d_V);
```

```
for i=1:360
```

```
F_l_U_sum=sum(F_l_U_special(i:90+i)*H_turb/N); % Este código suma los componentes x,y ...
```

```
F_d_U_sum=sum(F_d_U_special(i:90+i)*H_turb/N); % de las fuerzas de sustentación y arrastre a lo largo de un álabe ...
```

```
F_l_V_sum=sum(F_l_V_special(i:90+i)*H_turb/N); % para todas las posiciones del álabe alrededor del...
```

```
F_d_V_sum=sum(F_d_V_special(i:90+i)*H_turb/N); % círculo de la turbina
```

```
F_U_sum=F_l_U_sum+F_d_U_sum; % Este bloque suma todas las fuerzas en x y en y...
```

```
F_V_sum=F_l_V_sum+F_d_V_sum; % y calcula el vector suma
```

```
F_sum(i)=sqrt(F_U_sum^2+F_V_sum^2); % Resultante o magnitud de la fuerza
```

```
end
```

```

% Calculo de la fuerza, torque y potencia en la turbina

[Largest_force_on_blade,I]=max(F_sum); % Esta es la fuerza más grande en un álabe

Torque=(F_l.*sin(abs(alpha))-F_d.*cos(abs(alpha))).*R_turb; % Calcula el torque

% Cambio introducido lo pongo en la posición 0
hold on
plot(theta*180/pi,Torque,'b')
xlabel('Angulo azimutal\theta alrededor de la turbina')
ylabel('Torque por elemento de pequeña longitud (N-m/m)')
title(['Torque de la turbina a una velocidad de 2.5 m/s, TSR=',num2str(lambda)]) %
Comando num2str(lambda) para identificar a que TSR corresponde
plot([0 360],[0 0],'r')
grid on

Total_torque(l)=sum(abs(Torque*H_turb)/N); % Suma de los torques en todas las
posiciones

Pot= ((Total_torque.*omega).*(0.85)); % Potencia de la turbina

% Coeficiente de potencia
Cp=(((Total_torque.*omega).*(0.85))/(0.5*rho*D_turb*H_turb*(vel_flu).^3)); % Cp =
potencia turbina/potencia del fluido

% Cambio para poner un máximo al rendimiento (límite de Betz)
for i=1:length(Cp) % Evitamos tener rendimientos mayores al 59% límite teórico-
práctico
    if Cp(i)>=0.59
        Cp(i:length(Cp))=0.59;
    end
end
end
end

%% Gráficas
fluido=(0.5*rho*D_turb*H_turb*(vel_flu)^3)

% posición 0
figure; % Gráfica de vectores velocidad relativa, tangencial y velocidad del fluido
plot(circX,circY)
title(['Velocidad relativa, tangencial, velocidad con vector 2.5 m/s y
TSR=',num2str(lambda)])
set(gca, 'DataAspectRatio',[1 1 1])% gráfica de vectores aspecto de radio
hold on
quiver(circX,circY,V_t_U,V_t_V,.4)
hold on
quiver(circX,circY,V_inf_U,V_inf_V,.4/lambda)
hold on
quiver(circX,circY,V_r_U,V_r_V,.45)
legend('Cirulo turbina','Componente tangencial','Componente velocidad','Velocidad
relativa','Location','BestOutside')

```

```

figure; % Gráfica de los vectores Fuerzas de sustentación y arrastre alrededor de los 360°
de la turbina
plot(circX,circY)
title(['Vectores Fuerzas Sustentación y Arrastre, trazados con la velocidad del fluido 2.5
m/s, Velocidad punta de álabes TSR=',num2str(lambda)])
set(gca,'DataAspectRatio',[1 1 1])
hold on
quiver(circX(1:10:end),circY(1:10:end),F_d_U(1:10:end),F_d_V(1:10:end),0.5)
hold on
quiver(circX(1:10:end),circY(1:10:end),F_l_U(1:10:end),F_l_V(1:10:end),0.5)
hold on
quiver(circX(1:10:end),circY(1:10:end),V_r_U(1:10:end),V_r_V(1:10:end),0.5)
legend('Círculo de la Turbina','Vector fuerza Arrastre','Vector fuerza
Sustentación','Velocidad Relativa','Location','BestOutside')

```

```

figure; % Gráfica de los coeficientes de sustentación y arrastre que se producen al rotar la
turbina
hold on
plot(theta*180/pi,Cl,theta*180/pi,Cd)
title('Coeficientes de sustentación y arrastre')
legend('CL','CD')
xlabel('Angulo azimutal \theta alrededor de la turbina')
ylabel('Coeficientes sustentación (lift) y arrastre (drag)')

```

```

figure; % Gráfica del ángulo de ataque que se produce alrededor de los 360° de la turbina
hold on
plot(theta*180/pi,alpha*180/pi)
legend('Angulo de ataque')
xlabel('Angulo azimutal \theta alrededor de la turbina')
ylabel('Angulo de ataque (grados)referencia de la cuerda del álabes')
title(['Angulo de ataque para velocidades de ratio de 1.1 ha ',num2str(lambda)])

```

```

figure; % Gráfica del Torque de la turbina Vs Lambda
hold on
plot(lambdavec,Total_torque)
xlabel('\lambda')
ylabel('Torque (N-m)')
grid on
title('Torque de la turbina Vs \lambda')

```

```

figure; % Gráfica del TSR Vs coeficiente de potencia
hold on
plot(lambdavec,Cp)
xlabel '\lambda'
ylabel 'Cp'
grid on
title('Coeficiente de potencia VS \lambda')

```

```
figure; % Potencia extraída de la turbina con respecto a lambda
hold on
plot(lambdavec,Pot)
xlabel('\lambda')
ylabel('Potencia turbina [W]')
grid on
title('Potencia de la turbina Vs \lambda')
```

Anexo 17. Coeficientes de sustentación – NACA 0020.

| Re \ α° | 10000 | 50000 | 100000 | 150000 | 200000 | 250000 | 300000 | 350000 | 400000 | 450000 | 500000 | 550000 | 600000 | 650000 | 700000 | 750000 | 800000 |
|---------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,118 | 0,125 | 0,126 | 0,126 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 | 0,127 |
| 2 | 0,232 | 0,25 | 0,252 | 0,252 | 0,252 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 | 0,253 |
| 3 | 0,342 | 0,372 | 0,376 | 0,377 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,378 | 0,379 | 0,379 |
| 4 | 0,449 | 0,493 | 0,499 | 0,501 | 0,501 | 0,502 | 0,502 | 0,502 | 0,502 | 0,502 | 0,502 | 0,503 | 0,503 | 0,503 | 0,503 | 0,503 | 0,503 |
| 5 | 0,552 | 0,61 | 0,62 | 0,622 | 0,623 | 0,623 | 0,624 | 0,624 | 0,624 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,626 | 0,626 |
| 6 | 0,651 | 0,723 | 0,737 | 0,74 | 0,742 | 0,743 | 0,744 | 0,744 | 0,744 | 0,745 | 0,745 | 0,745 | 0,745 | 0,746 | 0,746 | 0,746 | 0,746 |
| 7 | 0,745 | 0,83 | 0,85 | 0,855 | 0,857 | 0,858 | 0,859 | 0,86 | 0,861 | 0,861 | 0,862 | 0,862 | 0,862 | 0,863 | 0,863 | 0,863 | 0,863 |
| 8 | 0,835 | 0,928 | 0,956 | 0,963 | 0,967 | 0,969 | 0,971 | 0,972 | 0,972 | 0,973 | 0,974 | 0,975 | 0,975 | 0,976 | 0,976 | 0,976 | 0,976 |
| 9 | 0,921 | 1,019 | 1,055 | 1,066 | 1,071 | 1,074 | 1,076 | 1,078 | 1,079 | 1,08 | 1,081 | 1,082 | 1,082 | 1,083 | 1,084 | 1,084 | 1,085 |
| 10 | 1,006 | 1,1 | 1,145 | 1,16 | 1,167 | 1,171 | 1,174 | 1,177 | 1,179 | 1,18 | 1,181 | 1,182 | 1,183 | 1,184 | 1,185 | 1,185 | 1,186 |
| 11 | 1,086 | 1,167 | 1,224 | 1,243 | 1,253 | 1,258 | 1,263 | 1,265 | 1,268 | 1,27 | 1,272 | 1,273 | 1,274 | 1,276 | 1,276 | 1,277 | 1,278 |
| 12 | 1,163 | 1,225 | 1,293 | 1,317 | 1,328 | 1,336 | 1,341 | 1,345 | 1,348 | 1,35 | 1,353 | 1,355 | 1,356 | 1,358 | 1,359 | 1,361 | 1,362 |
| 13 | 1,235 | 1,279 | 1,352 | 1,381 | 1,395 | 1,404 | 1,41 | 1,415 | 1,419 | 1,422 | 1,424 | 1,427 | 1,429 | 1,431 | 1,433 | 1,434 | 1,435 |
| 14 | 1,303 | 1,331 | 1,403 | 1,436 | 1,453 | 1,463 | 1,47 | 1,476 | 1,48 | 1,484 | 1,487 | 1,49 | 1,491 | 1,493 | 1,495 | 1,496 | 1,497 |
| 15 | 1,364 | 1,381 | 1,443 | 1,482 | 1,502 | 1,514 | 1,522 | 1,528 | 1,532 | 1,536 | 1,539 | 1,541 | 1,544 | 1,546 | 1,548 | 1,549 | 1,551 |
| 16 | 1,419 | 1,433 | 1,48 | 1,521 | 1,543 | 1,556 | 1,564 | 1,57 | 1,575 | 1,579 | 1,582 | 1,585 | 1,588 | 1,59 | 1,592 | 1,594 | 1,596 |
| 17 | 1,467 | 1,477 | 1,513 | 1,553 | 1,577 | 1,59 | 1,598 | 1,605 | 1,61 | 1,615 | 1,618 | 1,621 | 1,624 | 1,626 | 1,628 | 1,631 | 1,633 |
| 18 | 1,508 | 1,517 | 1,543 | 1,578 | 1,603 | 1,616 | 1,625 | 1,632 | 1,638 | 1,642 | 1,646 | 1,649 | 1,652 | 1,655 | 1,657 | 1,659 | 1,661 |
| 19 | 1,537 | 1,545 | 1,567 | 1,596 | 1,618 | 1,632 | 1,642 | 1,649 | 1,654 | 1,658 | 1,663 | 1,666 | 1,669 | 1,671 | 1,674 | 1,676 | 1,678 |
| 20 | 1,554 | 1,561 | 1,578 | 1,603 | 1,625 | 1,638 | 1,648 | 1,654 | 1,66 | 1,664 | 1,669 | 1,672 | 1,674 | 1,677 | 1,679 | 1,682 | 1,684 |
| 21 | 1,563 | 1,568 | 1,582 | 1,602 | 1,622 | 1,634 | 1,644 | 1,65 | 1,656 | 1,661 | 1,664 | 1,667 | 1,671 | 1,673 | 1,676 | 1,678 | 1,68 |
| 22 | 1,563 | 1,569 | 1,58 | 1,598 | 1,615 | 1,626 | 1,634 | 1,642 | 1,647 | 1,651 | 1,655 | 1,658 | 1,661 | 1,663 | 1,665 | 1,668 | 1,67 |
| 23 | 1,556 | 1,56 | 1,569 | 1,584 | 1,598 | 1,61 | 1,618 | 1,624 | 1,629 | 1,633 | 1,637 | 1,64 | 1,642 | 1,645 | 1,646 | 1,647 | 1,648 |
| 24 | 1,542 | 1,546 | 1,553 | 1,567 | 1,579 | 1,59 | 1,597 | 1,603 | 1,607 | 1,611 | 1,614 | 1,617 | 1,619 | 1,62 | 1,621 | 1,623 | 1,623 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25 | 1,523 | 1,526 | 1,532 | 1,543 | 1,555 | 1,563 | 1,571 | 1,576 | 1,58 | 1,584 | 1,587 | 1,589 | 1,59 | 1,591 | 1,592 | 1,594 | 1,595 |
| 26 | 1,497 | 1,5 | 1,505 | 1,515 | 1,525 | 1,533 | 1,539 | 1,545 | 1,548 | 1,551 | 1,553 | 1,555 | 1,557 | 1,558 | 1,559 | 1,561 | 1,562 |
| 27 | 1,468 | 1,47 | 1,475 | 1,483 | 1,493 | 1,5 | 1,506 | 1,51 | 1,514 | 1,516 | 1,518 | 1,519 | 1,52 | 1,521 | 1,523 | 1,524 | 1,525 |
| 28 | 1,435 | 1,437 | 1,442 | 1,449 | 1,458 | 1,464 | 1,47 | 1,473 | 1,476 | 1,478 | 1,48 | 1,481 | 1,483 | 1,484 | 1,485 | 1,486 | 1,486 |
| 29 | 1,399 | 1,401 | 1,405 | 1,411 | 1,42 | 1,426 | 1,43 | 1,434 | 1,436 | 1,437 | 1,439 | 1,441 | 1,442 | 1,443 | 1,444 | 1,445 | 1,446 |
| 30 | 1,361 | 1,363 | 1,366 | 1,374 | 1,381 | 1,386 | 1,389 | 1,393 | 1,395 | 1,396 | 1,398 | 1,398 | 1,4 | 1,401 | 1,402 | 1,403 | 1,404 |
| 31 | 1,322 | 1,323 | 1,327 | 1,334 | 1,34 | 1,345 | 1,348 | 1,35 | 1,352 | 1,354 | 1,355 | 1,356 | 1,357 | 1,358 | 1,359 | 1,359 | 1,36 |
| 32 | 1,281 | 1,283 | 1,287 | 1,293 | 1,298 | 1,302 | 1,305 | 1,307 | 1,309 | 1,31 | 1,312 | 1,313 | 1,314 | 1,314 | 1,315 | 1,316 | 1,316 |
| 33 | 1,241 | 1,243 | 1,247 | 1,252 | 1,256 | 1,26 | 1,263 | 1,264 | 1,266 | 1,267 | 1,268 | 1,27 | 1,271 | 1,271 | 1,272 | 1,273 | 1,273 |
| 34 | 1,2 | 1,202 | 1,206 | 1,21 | 1,215 | 1,218 | 1,22 | 1,222 | 1,223 | 1,224 | 1,225 | 1,226 | 1,227 | 1,228 | 1,229 | 1,229 | 1,23 |
| 35 | 1,16 | 1,162 | 1,165 | 1,17 | 1,174 | 1,176 | 1,178 | 1,18 | 1,181 | 1,182 | 1,183 | 1,184 | 1,185 | 1,185 | 1,186 | 1,187 | 1,187 |
| 36 | 1,121 | 1,122 | 1,126 | 1,13 | 1,133 | 1,135 | 1,138 | 1,139 | 1,14 | 1,141 | 1,142 | 1,143 | 1,143 | 1,144 | 1,145 | 1,145 | 1,146 |
| 37 | 1,082 | 1,084 | 1,087 | 1,09 | 1,094 | 1,096 | 1,098 | 1,099 | 1,1 | 1,101 | 1,102 | 1,103 | 1,103 | 1,104 | 1,104 | 1,105 | 1,105 |
| 38 | 1,045 | 1,046 | 1,049 | 1,052 | 1,056 | 1,058 | 1,059 | 1,06 | 1,062 | 1,063 | 1,063 | 1,064 | 1,064 | 1,065 | 1,065 | 1,066 | 1,066 |
| 39 | 1,008 | 1,01 | 1,012 | 1,016 | 1,018 | 1,021 | 1,022 | 1,023 | 1,024 | 1,025 | 1,026 | 1,026 | 1,027 | 1,027 | 1,028 | 1,028 | 1,028 |
| 40 | 0,973 | 0,975 | 0,977 | 0,98 | 0,983 | 0,985 | 0,986 | 0,987 | 0,988 | 0,989 | 0,99 | 0,99 | 0,991 | 0,991 | 0,991 | 0,992 | 0,992 |
| 41 | 0,94 | 0,941 | 0,944 | 0,946 | 0,949 | 0,951 | 0,952 | 0,953 | 0,953 | 0,954 | 0,955 | 0,956 | 0,956 | 0,957 | 0,957 | 0,957 | 0,958 |
| 42 | 0,908 | 0,909 | 0,911 | 0,914 | 0,916 | 0,918 | 0,919 | 0,92 | 0,92 | 0,921 | 0,922 | 0,922 | 0,923 | 0,923 | 0,923 | 0,924 | 0,924 |
| 43 | 0,877 | 0,878 | 0,88 | 0,883 | 0,885 | 0,886 | 0,888 | 0,888 | 0,889 | 0,889 | 0,89 | 0,891 | 0,891 | 0,892 | 0,892 | 0,892 | 0,893 |
| 44 | 0,848 | 0,849 | 0,851 | 0,853 | 0,855 | 0,856 | 0,857 | 0,858 | 0,859 | 0,859 | 0,86 | 0,86 | 0,861 | 0,861 | 0,861 | 0,862 | 0,862 |
| 45 | 0,82 | 0,821 | 0,823 | 0,825 | 0,826 | 0,828 | 0,829 | 0,83 | 0,83 | 0,831 | 0,831 | 0,832 | 0,832 | 0,832 | 0,833 | 0,833 | 0,833 |
| 46 | 0,793 | 0,794 | 0,796 | 0,798 | 0,799 | 0,801 | 0,802 | 0,802 | 0,803 | 0,804 | 0,804 | 0,804 | 0,804 | 0,805 | 0,805 | 0,806 | 0,806 |
| 47 | 0,768 | 0,769 | 0,771 | 0,772 | 0,774 | 0,775 | 0,776 | 0,777 | 0,777 | 0,778 | 0,778 | 0,778 | 0,779 | 0,779 | 0,779 | 0,78 | 0,78 |
| 48 | 0,744 | 0,745 | 0,746 | 0,748 | 0,75 | 0,751 | 0,752 | 0,752 | 0,753 | 0,753 | 0,754 | 0,754 | 0,754 | 0,754 | 0,755 | 0,755 | 0,755 |
| 49 | 0,721 | 0,722 | 0,723 | 0,725 | 0,727 | 0,727 | 0,728 | 0,729 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 0,731 | 0,731 | 0,731 | 0,731 | 0,732 | 0,732 |
| 50 | 0,7 | 0,7 | 0,702 | 0,703 | 0,705 | 0,706 | 0,706 | 0,707 | 0,708 | 0,708 | 0,708 | 0,709 | 0,709 | 0,709 | 0,709 | 0,71 | 0,71 |
| 51 | 0,679 | 0,68 | 0,681 | 0,683 | 0,684 | 0,685 | 0,686 | 0,686 | 0,687 | 0,687 | 0,688 | 0,688 | 0,688 | 0,689 | 0,689 | 0,689 | 0,689 |
| 52 | 0,657 | 0,658 | 0,659 | 0,66 | 0,662 | 0,662 | 0,663 | 0,664 | 0,664 | 0,665 | 0,665 | 0,665 | 0,666 | 0,666 | 0,666 | 0,666 | 0,666 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 53 | 0,635 | 0,636 | 0,637 | 0,639 | 0,64 | 0,641 | 0,641 | 0,642 | 0,642 | 0,643 | 0,643 | 0,643 | 0,644 | 0,644 | 0,644 | 0,644 | 0,644 |
| 54 | 0,615 | 0,616 | 0,617 | 0,618 | 0,619 | 0,62 | 0,62 | 0,621 | 0,622 | 0,622 | 0,622 | 0,623 | 0,623 | 0,623 | 0,623 | 0,623 | 0,623 |
| 55 | 0,596 | 0,597 | 0,598 | 0,599 | 0,6 | 0,601 | 0,601 | 0,602 | 0,602 | 0,602 | 0,603 | 0,603 | 0,603 | 0,603 | 0,603 | 0,603 | 0,604 |
| 56 | 0,578 | 0,578 | 0,58 | 0,581 | 0,582 | 0,582 | 0,583 | 0,583 | 0,584 | 0,584 | 0,584 | 0,585 | 0,585 | 0,585 | 0,585 | 0,585 | 0,585 |
| 57 | 0,561 | 0,562 | 0,563 | 0,564 | 0,565 | 0,565 | 0,566 | 0,566 | 0,566 | 0,567 | 0,567 | 0,567 | 0,567 | 0,568 | 0,568 | 0,568 | 0,568 |
| 58 | 0,545 | 0,545 | 0,547 | 0,547 | 0,548 | 0,549 | 0,549 | 0,55 | 0,55 | 0,551 | 0,551 | 0,551 | 0,551 | 0,551 | 0,551 | 0,551 | 0,551 |
| 59 | 0,53 | 0,53 | 0,531 | 0,532 | 0,533 | 0,534 | 0,534 | 0,535 | 0,535 | 0,535 | 0,536 | 0,536 | 0,536 | 0,536 | 0,536 | 0,536 | 0,536 |
| 60 | 0,516 | 0,516 | 0,517 | 0,518 | 0,519 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,521 | 0,521 | 0,521 | 0,521 | 0,521 | 0,522 | 0,522 | 0,522 |

Anexo 18. Coeficientes de arrastre – NACA 0020.

| Re α° | 10000 | 50000 | 100000 | 150000 | 200000 | 250000 | 300000 | 350000 | 400000 | 450000 | 500000 | 550000 | 600000 | 650000 | 700000 | 750000 | 800000 |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0 | 0,0570 | 0,0292 | 0,0233 | 0,0210 | 0,0197 | 0,0189 | 0,0184 | 0,0179 | 0,0175 | 0,0173 | 0,0171 | 0,0168 | 0,0167 | 0,0165 | 0,0164 | 0,0162 | 0,0161 |
| 1 | 0,0609 | 0,0295 | 0,0234 | 0,0212 | 0,0199 | 0,0191 | 0,0185 | 0,0180 | 0,0177 | 0,0144 | 0,0143 | 0,0141 | 0,0139 | 0,0138 | 0,0137 | 0,0136 | 0,0135 |
| 2 | 0,0631 | 0,0301 | 0,0239 | 0,0215 | 0,0203 | 0,0194 | 0,0159 | 0,0156 | 0,0153 | 0,0150 | 0,0148 | 0,0146 | 0,0145 | 0,0143 | 0,0142 | 0,0140 | 0,0140 |
| 3 | 0,0662 | 0,0311 | 0,0245 | 0,0221 | 0,0181 | 0,0174 | 0,0168 | 0,0164 | 0,0161 | 0,0158 | 0,0156 | 0,0154 | 0,0152 | 0,0151 | 0,0149 | 0,0148 | 0,0147 |
| 4 | 0,0705 | 0,0325 | 0,0256 | 0,0205 | 0,0193 | 0,0185 | 0,0179 | 0,0175 | 0,0171 | 0,0168 | 0,0166 | 0,0163 | 0,0162 | 0,0167 | 0,0165 | 0,0164 | 0,0163 |
| 5 | 0,0760 | 0,0345 | 0,0270 | 0,0220 | 0,0207 | 0,0198 | 0,0192 | 0,0187 | 0,0189 | 0,0186 | 0,0184 | 0,0181 | 0,0179 | 0,0177 | 0,0176 | 0,0173 | 0,0173 |
| 6 | 0,0831 | 0,0372 | 0,0290 | 0,0239 | 0,0224 | 0,0215 | 0,0214 | 0,0208 | 0,0204 | 0,0200 | 0,0197 | 0,0195 | 0,0192 | 0,0190 | 0,0188 | 0,0186 | 0,0184 |
| 7 | 0,0918 | 0,0409 | 0,0314 | 0,0262 | 0,0246 | 0,0240 | 0,0232 | 0,0226 | 0,0220 | 0,0217 | 0,0213 | 0,0210 | 0,0207 | 0,0205 | 0,0203 | 0,0201 | 0,0199 |
| 8 | 0,1024 | 0,0460 | 0,0346 | 0,0291 | 0,0277 | 0,0263 | 0,0254 | 0,0247 | 0,0242 | 0,0236 | 0,0232 | 0,0229 | 0,0226 | 0,0223 | 0,0220 | 0,0218 | 0,0216 |
| 9 | 0,1147 | 0,0528 | 0,0387 | 0,0325 | 0,0308 | 0,0292 | 0,0281 | 0,0272 | 0,0265 | 0,0260 | 0,0255 | 0,0250 | 0,0247 | 0,0244 | 0,0241 | 0,0238 | 0,0236 |
| 10 | 0,1285 | 0,0620 | 0,0445 | 0,0371 | 0,0347 | 0,0328 | 0,0314 | 0,0304 | 0,0296 | 0,0289 | 0,0284 | 0,0279 | 0,0275 | 0,0271 | 0,0267 | 0,0264 | 0,0262 |
| 11 | 0,1444 | 0,0749 | 0,0520 | 0,0431 | 0,0398 | 0,0375 | 0,0358 | 0,0346 | 0,0335 | 0,0328 | 0,0320 | 0,0314 | 0,0309 | 0,0305 | 0,0300 | 0,0296 | 0,0293 |
| 12 | 0,1626 | 0,0912 | 0,0619 | 0,0510 | 0,0466 | 0,0436 | 0,0415 | 0,0399 | 0,0386 | 0,0376 | 0,0367 | 0,0359 | 0,0352 | 0,0346 | 0,0341 | 0,0336 | 0,0332 |
| 13 | 0,1828 | 0,1097 | 0,0745 | 0,0608 | 0,0551 | 0,0513 | 0,0486 | 0,0466 | 0,0450 | 0,0437 | 0,0426 | 0,0416 | 0,0408 | 0,0400 | 0,0393 | 0,0387 | 0,0382 |
| 14 | 0,2056 | 0,1286 | 0,0901 | 0,0740 | 0,0653 | 0,0609 | 0,0574 | 0,0550 | 0,0531 | 0,0513 | 0,0500 | 0,0488 | 0,0480 | 0,0472 | 0,0465 | 0,0458 | 0,0452 |
| 15 | 0,2315 | 0,1482 | 0,1092 | 0,0889 | 0,0780 | 0,0723 | 0,0682 | 0,0651 | 0,0629 | 0,0612 | 0,0596 | 0,0583 | 0,0572 | 0,0561 | 0,0553 | 0,0544 | 0,0536 |
| 16 | 0,2598 | 0,1669 | 0,1297 | 0,1059 | 0,0930 | 0,0861 | 0,0815 | 0,0778 | 0,0752 | 0,0731 | 0,0710 | 0,0695 | 0,0680 | 0,0667 | 0,0655 | 0,0646 | 0,0636 |
| 17 | 0,2896 | 0,1873 | 0,1514 | 0,1254 | 0,1103 | 0,1021 | 0,0967 | 0,0924 | 0,0892 | 0,0864 | 0,0844 | 0,0823 | 0,0806 | 0,0790 | 0,0777 | 0,0762 | 0,0753 |
| 18 | 0,3258 | 0,2093 | 0,1736 | 0,1470 | 0,1300 | 0,1204 | 0,1138 | 0,1089 | 0,1052 | 0,1020 | 0,0993 | 0,0969 | 0,0950 | 0,0929 | 0,0913 | 0,0901 | 0,0885 |
| 19 | 0,3634 | 0,2319 | 0,1957 | 0,1693 | 0,1513 | 0,1399 | 0,1326 | 0,1266 | 0,1221 | 0,1189 | 0,1153 | 0,1127 | 0,1105 | 0,1085 | 0,1066 | 0,1051 | 0,1033 |
| 20 | 0,4049 | 0,2574 | 0,2184 | 0,1915 | 0,1727 | 0,1599 | 0,1515 | 0,1455 | 0,1405 | 0,1364 | 0,1325 | 0,1296 | 0,1272 | 0,1247 | 0,1227 | 0,1205 | 0,1191 |
| 21 | 0,4460 | 0,2842 | 0,2435 | 0,2171 | 0,1967 | 0,1831 | 0,1737 | 0,1668 | 0,1610 | 0,1560 | 0,1522 | 0,1492 | 0,1460 | 0,1435 | 0,1408 | 0,1389 | 0,1369 |
| 22 | 0,4933 | 0,3126 | 0,2683 | 0,2403 | 0,2200 | 0,2055 | 0,1955 | 0,1874 | 0,1814 | 0,1767 | 0,1724 | 0,1681 | 0,1652 | 0,1620 | 0,1599 | 0,1575 | 0,1551 |
| 23 | 0,5571 | 0,3454 | 0,2955 | 0,2681 | 0,2471 | 0,2315 | 0,2201 | 0,2121 | 0,2054 | 0,1994 | 0,1949 | 0,1914 | 0,1875 | 0,1842 | 0,1825 | 0,1809 | 0,1798 |
| 24 | 0,6015 | 0,3785 | 0,3233 | 0,2929 | 0,2715 | 0,2559 | 0,2439 | 0,2350 | 0,2275 | 0,2220 | 0,2167 | 0,2140 | 0,2112 | 0,2090 | 0,2071 | 0,2047 | 0,2035 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 25 | 0,6682 | 0,4137 | 0,3529 | 0,3217 | 0,2976 | 0,2827 | 0,2685 | 0,2591 | 0,2514 | 0,2464 | 0,2420 | 0,2387 | 0,2354 | 0,2325 | 0,2308 | 0,2289 | 0,2264 |
| 26 | 0,7448 | 0,4516 | 0,3850 | 0,3498 | 0,3266 | 0,3101 | 0,2970 | 0,2858 | 0,2790 | 0,2739 | 0,2694 | 0,2658 | 0,2625 | 0,2592 | 0,2573 | 0,2540 | 0,2524 |
| 27 | 0,8078 | 0,4888 | 0,4179 | 0,3812 | 0,3565 | 0,3367 | 0,3247 | 0,3142 | 0,3085 | 0,3017 | 0,2962 | 0,2923 | 0,2895 | 0,2861 | 0,2837 | 0,2798 | 0,2781 |
| 28 | 0,8646 | 0,5330 | 0,4466 | 0,4104 | 0,3850 | 0,3657 | 0,3517 | 0,3429 | 0,3355 | 0,3281 | 0,3228 | 0,3195 | 0,3150 | 0,3110 | 0,3072 | 0,3049 | 0,3038 |
| 29 | 0,9628 | 0,5737 | 0,4840 | 0,4441 | 0,4152 | 0,3992 | 0,3820 | 0,3730 | 0,3645 | 0,3586 | 0,3522 | 0,3469 | 0,3433 | 0,3386 | 0,3361 | 0,3313 | 0,3299 |
| 30 | 1,0288 | 0,6240 | 0,5263 | 0,4792 | 0,4492 | 0,4303 | 0,4136 | 0,4043 | 0,3933 | 0,3887 | 0,3830 | 0,3763 | 0,3710 | 0,3677 | 0,3629 | 0,3594 | 0,3579 |
| 31 | 1,1454 | 0,6673 | 0,5653 | 0,5123 | 0,4864 | 0,4616 | 0,4499 | 0,4373 | 0,4261 | 0,4189 | 0,4124 | 0,4081 | 0,4004 | 0,3967 | 0,3940 | 0,3890 | 0,3865 |
| 32 | 1,2047 | 0,7131 | 0,6011 | 0,5516 | 0,5233 | 0,4984 | 0,4803 | 0,4672 | 0,4607 | 0,4518 | 0,4441 | 0,4388 | 0,4334 | 0,4290 | 0,4222 | 0,4193 | 0,4163 |
| 33 | 1,3090 | 0,7753 | 0,6469 | 0,5944 | 0,5560 | 0,5311 | 0,5171 | 0,5024 | 0,4933 | 0,4840 | 0,4757 | 0,4693 | 0,4643 | 0,4578 | 0,4522 | 0,4469 | 0,4458 |
| 34 | 1,4067 | 0,8330 | 0,6901 | 0,6357 | 0,5936 | 0,5710 | 0,5496 | 0,5371 | 0,5261 | 0,5162 | 0,5087 | 0,5011 | 0,4952 | 0,4877 | 0,4831 | 0,4792 | 0,4751 |
| 35 | 1,5254 | 0,8819 | 0,7339 | 0,6745 | 0,6375 | 0,6073 | 0,5855 | 0,5704 | 0,5646 | 0,5529 | 0,5410 | 0,5369 | 0,5290 | 0,5221 | 0,5170 | 0,5099 | 0,5079 |
| 36 | 1,6224 | 0,9314 | 0,7876 | 0,7240 | 0,6789 | 0,6483 | 0,6236 | 0,6094 | 0,5951 | 0,5815 | 0,5806 | 0,5674 | 0,5585 | 0,5570 | 0,5491 | 0,5467 | 0,5418 |
| 37 | 1,7597 | 1,0113 | 0,8323 | 0,7713 | 0,7222 | 0,6885 | 0,6640 | 0,6443 | 0,6357 | 0,6207 | 0,6148 | 0,6053 | 0,5970 | 0,5924 | 0,5848 | 0,5764 | 0,5742 |
| 38 | 1,8921 | 1,0878 | 0,8877 | 0,8122 | 0,7602 | 0,7247 | 0,7065 | 0,6905 | 0,6723 | 0,6625 | 0,6502 | 0,6431 | 0,6312 | 0,6273 | 0,6185 | 0,6131 | 0,6108 |
| 39 | 2,0206 | 1,1218 | 0,9389 | 0,8596 | 0,8127 | 0,7749 | 0,7399 | 0,7248 | 0,7118 | 0,7023 | 0,6842 | 0,6720 | 0,6713 | 0,6567 | 0,6556 | 0,6497 | 0,6375 |
| 40 | 2,1371 | 1,2259 | 1,0045 | 0,9072 | 0,8593 | 0,8077 | 0,7972 | 0,7733 | 0,7548 | 0,7320 | 0,7268 | 0,7178 | 0,7057 | 0,6980 | 0,6873 | 0,6806 | 0,6776 |
| 41 | 2,2642 | 1,2542 | 1,0503 | 0,9515 | 0,8970 | 0,8642 | 0,8357 | 0,7991 | 0,7851 | 0,7724 | 0,7629 | 0,7412 | 0,7354 | 0,7294 | 0,7175 | 0,7207 | 0,7062 |
| 42 | 2,3501 | 1,3242 | 1,1226 | 1,0017 | 0,9483 | 0,9013 | 0,8827 | 0,8506 | 0,8250 | 0,8166 | 0,8051 | 0,7871 | 0,7851 | 0,7754 | 0,7629 | 0,7548 | 0,7505 |
| 43 | 2,4662 | 1,3964 | 1,1724 | 1,0473 | 0,9940 | 0,9505 | 0,9127 | 0,8908 | 0,8778 | 0,8510 | 0,8414 | 0,8294 | 0,8223 | 0,8025 | 0,8013 | 0,7924 | 0,7878 |
| 44 | 2,6739 | 1,4738 | 1,2444 | 1,1023 | 1,0472 | 0,9940 | 0,9658 | 0,9481 | 0,9165 | 0,9107 | 0,8807 | 0,8723 | 0,8627 | 0,8544 | 0,8388 | 0,8278 | 0,8226 |
| 45 | 2,7783 | 1,5442 | 1,2938 | 1,1523 | 1,0758 | 1,0421 | 0,9940 | 0,9660 | 0,9468 | 0,9420 | 0,9090 | 0,9074 | 0,8897 | 0,8801 | 0,8747 | 0,8644 | 0,8586 |
| 46 | 2,9627 | 1,6338 | 1,3410 | 1,2436 | 1,1359 | 1,0862 | 1,0524 | 1,0196 | 0,9946 | 0,9871 | 0,9778 | 0,9588 | 0,9274 | 0,9331 | 0,9160 | 0,9047 | 0,8981 |
| 47 | 3,0443 | 1,7292 | 1,4531 | 1,3081 | 1,2153 | 1,1529 | 1,1064 | 1,0750 | 1,0617 | 1,0208 | 1,0098 | 0,9885 | 0,9884 | 0,9653 | 0,9533 | 0,9569 | 0,9489 |
| 48 | 3,1966 | 1,8465 | 1,4691 | 1,3234 | 1,2510 | 1,1914 | 1,1613 | 1,1193 | 1,1014 | 1,0826 | 1,0404 | 1,0499 | 1,0138 | 1,0159 | 0,9988 | 0,9897 | 0,9829 |
| 49 | 3,4148 | 1,8618 | 1,5586 | 1,3826 | 1,3333 | 1,2576 | 1,2079 | 1,1652 | 1,1279 | 1,1165 | 1,1005 | 1,0766 | 1,0667 | 1,0390 | 1,0332 | 1,0234 | 1,0158 |
| 50 | 3,5998 | 2,0192 | 1,6545 | 1,4391 | 1,3561 | 1,2737 | 1,2582 | 1,2127 | 1,1942 | 1,1472 | 1,1265 | 1,1309 | 1,1192 | 1,0991 | 1,0801 | 1,0688 | 1,0639 |
| 51 | 3,7269 | 2,0264 | 1,6500 | 1,5304 | 1,4294 | 1,3614 | 1,3078 | 1,2511 | 1,2275 | 1,1998 | 1,1822 | 1,1523 | 1,1461 | 1,1480 | 1,1267 | 1,1139 | 1,1139 |
| 52 | 3,9274 | 2,2030 | 1,7285 | 1,5766 | 1,4465 | 1,4135 | 1,3375 | 1,3242 | 1,2741 | 1,2599 | 1,2389 | 1,2080 | 1,1955 | 1,1621 | 1,1728 | 1,1604 | 1,1544 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 53 | 4,0912 | 2,2583 | 1,7923 | 1,6239 | 1,5219 | 1,4664 | 1,4183 | 1,3604 | 1,3391 | 1,2830 | 1,2553 | 1,2594 | 1,2447 | 1,2078 | 1,2148 | 1,1964 | 1,2226 |
| 54 | 4,1742 | 2,3336 | 1,8553 | 1,6957 | 1,5720 | 1,4832 | 1,4252 | 1,3912 | 1,3642 | 1,3419 | 1,3075 | 1,3106 | 1,2557 | 1,2806 | 1,2827 | 1,2601 | 1,2767 |
| 55 | 4,3520 | 2,3972 | 1,9101 | 1,7285 | 1,6411 | 1,5271 | 1,5239 | 1,4602 | 1,4283 | 1,3839 | 1,3596 | 1,3207 | 1,3205 | 1,3428 | 1,3308 | 1,3109 | 1,3023 |
| 56 | 4,4774 | 2,5485 | 2,0622 | 1,8273 | 1,7127 | 1,6414 | 1,5459 | 1,4870 | 1,4596 | 1,4397 | 1,4116 | 1,3682 | 1,3968 | 1,3863 | 1,3786 | 1,3755 | 1,3537 |
| 57 | 4,7725 | 2,5885 | 2,1081 | 1,8776 | 1,7419 | 1,6866 | 1,5711 | 1,5424 | 1,5193 | 1,4957 | 1,4634 | 1,4318 | 1,4322 | 1,4296 | 1,4258 | 1,3958 | 1,4181 |
| 58 | 4,9039 | 2,6281 | 2,1387 | 1,9697 | 1,8034 | 1,7319 | 1,6694 | 1,5704 | 1,5325 | 1,5041 | 1,5022 | 1,5207 | 1,4684 | 1,4921 | 1,4756 | 1,4579 | 1,4837 |
| 59 | 5,0346 | 2,7003 | 2,2925 | 2,0420 | 1,8662 | 1,7845 | 1,6918 | 1,6535 | 1,5894 | 1,5780 | 1,5581 | 1,5284 | 1,5526 | 1,5332 | 1,5386 | 1,5207 | 1,5135 |
| 60 | 5,1156 | 2,8540 | 2,3167 | 2,0467 | 1,9310 | 1,8196 | 1,7144 | 1,6597 | 1,6321 | 1,6110 | 1,6207 | 1,6051 | 1,6126 | 1,5940 | 1,5487 | 1,5838 | 1,5254 |

Anexo 19. Matriz de modelación de parámetros de la turbina hidrocínética.

| MATRIZ DE PARÁMETROS DEL MODELAMIENTO DE LA TURBINA HIDROCINÉTICA | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|---|-----------------|-------------|-------------------|-------------------------------|--------------|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|--|
| Propósito: Determinar el mejor coeficiente de potencia a partir de la modelación interactuando con las configuraciones de la turbina | | | | | | | | | | Departamento de Ingeniería Mecánica | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | CONDICIONES DEL FLUÍDO | | | VARIABLES | | | | | | RESULTADOS | | | | DESTACADO | | |
| Tipo de turbina | Densidad [kg/ m ³] | Viscosidad dinámica 20° [N.s/m ²] | Velocidad [m/s] | Perfil Naca | TSR (λ) | Longitud de cuerda álabes [m] | Diámetro [m] | Altura [m] | Omega [rad/s] | Torque [N.m] | Potencia del fluido [Watts] | Potencia turbina [Watts] | Coefficiente de potencia (Cp) | Variables más influyentes | | |
| TURBINA HIDROCINÉTICA DE EJE VERTICAL | 1000 | 1,002 E-03 | 1.05 | 0018 | 2 | 0.10 | 0.3 | 0.5 | - | - | - | - | - | | | |
| | | | 1.4 | | 1.8 | 0.12 | 0.3 | 0.5 | 16.8 | 7.26 | 205.8 | 108.5 | 0.52 | | | |
| | | | 1.9 | | 1.5 | 0.15 | 0.3 | 0.5 | 19 | 12.93 | 262.1 | 514.42 | 0.50 | | | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.3 | 0.5 | - | - | - | - | - | | | |
| | | | 1.05 | | 1.6 | 0.16 | 0.3 | 0.5 | 11.2 | 4.4 | 86.82 | 48.52 | 0.55 | | | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.3 | 0.5 | 26.66 | 19.39 | 1171 | 517 | 0.44 | | | |
| | | | 1.05 | 0018 | 2 | 0.10 | 0.5 | 0.6 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 11.2 | 19 | 411.6 | 170 | 0.41 | | | |
| | | | 1.9 | | 1.8 | 0.15 | 0.5 | 0.6 | 13.68 | 36.7 | 1028 | 446.3 | 0.43 | | | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.5 | 0.6 | - | - | - | - | - | - | | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 8.4 | 10.15 | 173.64 | 72.44 | 0.41 | | | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 16 | 38.78 | 2343 | 659.2 | 0.28 | | | |
| | | | 1.05 | 0018 | 2 | 0.10 | 0.6 | 0.7 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.6 | 0.7 | 9.33 | 26.59 | 576.24 | 211 | 0.36 | | | |
| | | | 1.9 | | 1.8 | 0.15 | 0.6 | 0.7 | 12.66 | 51.38 | 1440.4 | 553.2 | 0.38 | | | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.6 | 0.7 | - | - | - | - | - | - | | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.15 | 0.6 | 0.7 | 7 | 18.5 | 243.1 | 110.1 | 0.45 | | | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.6 | 0.7 | 13.33 | 54.29 | 3281.3 | 769.1 | 0.23 | | | |
| | | | 1.05 | 0018 | 2 | 0.10 | 0.8 | 0.8 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.8 | 0.8 | 7 | 40.52 | 878.08 | 241.1 | 0.27 | | | |
| 1.9 | 1.8 | 0.15 | 0.8 | | 0.8 | 8.55 | 78.3 | 2194.9 | 632.3 | 0.29 | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------------|------|------|-----|------|-----|-----|-------|-------|--------|-------|------|--|
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.8 | 0.8 | - | - | - | - | - | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.15 | 0.8 | 0.8 | 5.25 | 28.19 | 370.44 | 125.8 | 0.34 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.8 | 0.8 | 10 | 82.72 | 5000 | 878.9 | 0.18 | |
| TURBINA HIDROCINÉTICA DE EJE VERTICAL | 1000 | 1,002 E-03 | 1.05 | 0020 | 2 | 0.10 | 0.3 | 0.5 | 14 | 5.23 | 86.82 | 62.29 | 0.58 | |
| | | | 1.4 | | 1.6 | 0.12 | 0.3 | 0.5 | 14.93 | 7.33 | 205.8 | 110 | 0.53 | |
| | | | 1.9 | | 1.4 | 0.15 | 0.3 | 0.5 | 17.73 | 23.83 | 514.42 | 2891 | 0.56 | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.3 | 0.5 | - | - | - | - | - | |
| | | | 1.05 | | 1.6 | 0.12 | 0.3 | 0.5 | 11.2 | 3.98 | 86.82 | 46.48 | 0.53 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.3 | 0.5 | 26.66 | 25.67 | 1171 | 684.6 | 0.58 | |
| | | | 1.05 | 0020 | 2 | 0.10 | 0.5 | 0.6 | 8.4 | 10.47 | 173.64 | 74.75 | 0.43 | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 11.2 | 23.98 | 411.6 | 214.8 | 0.52 | |
| | | | 1.9 | | 1.8 | 0.15 | 0.5 | 0.6 | 13.68 | 47 | 1028 | 615.8 | 0.58 | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.5 | 0.6 | - | - | - | - | - | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 8.4 | 12.95 | 173.64 | 92.47 | 0.53 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 16 | 51.34 | 2343 | 872.8 | 0.37 | |
| | | | 1.05 | 0020 | 2 | 0.10 | 0.6 | 0.7 | 7 | 14.66 | 243.10 | 87.21 | 0.35 | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.6 | 0.7 | 9.33 | 33.57 | 576.24 | 266.3 | 0.46 | |
| | | | 1.9 | | 1.8 | 0.15 | 0.6 | 0.7 | 12.66 | 66.73 | 1440.4 | 718.5 | 0.49 | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.6 | 0.7 | - | - | - | - | - | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.15 | 0.6 | 0.7 | 7 | 18.13 | 243.1 | 107.9 | 0.44 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.6 | 0.7 | 13.33 | 71.88 | 3281.3 | 1018 | 0.31 | |
| | | | 1.05 | 0020 | 2 | 0.10 | 0.8 | 0.8 | 5.25 | 22.33 | 370.44 | 99.67 | 0.27 | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.8 | 0.8 | 7 | 51.15 | 878.08 | 304.3 | 0.34 | |
| | | | 1.9 | | 1.8 | 0.15 | 0.8 | 0.8 | 8.55 | 101.7 | 2194.9 | 821.1 | 0.37 | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.8 | 0.8 | - | - | - | - | - | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.15 | 0.8 | 0.8 | 5.25 | 35.67 | 370.44 | 159.2 | 0.42 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.8 | 0.8 | 10 | 109.5 | 5000 | 1164 | 0.23 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------------|------|--------|-----|------|-----|-----|-------|--------|-------|-------|------|--|
| TURBINA HIDROCINÉTICA DE EJE VERTICAL | 1000 | 1,002 E-03 | 1.05 | 63-020 | 2 | 0.10 | 0.3 | 0.5 | 14 | | | | | |
| | | | 1.4 | | 1.6 | 0.12 | 0.3 | 0.5 | 14.93 | | | | | |
| | | | 1.9 | | 1.4 | 0.15 | 0.3 | 0.5 | 17.73 | | | | | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.3 | 0.5 | - | | | | | |
| | | | 1.05 | | 1.6 | 0.12 | 0.3 | 0.5 | 11.2 | 86.82 | 3.11 | 37.07 | 0.42 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.3 | 0.5 | 26.66 | 1171.9 | 18.03 | 510 | 0.43 | |
| | | | 1.05 | 63-020 | 2 | 0.10 | 0.5 | 0.6 | 8.4 | | | | | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 11.2 | | | | | |
| | | | 1.9 | | 1.8 | 0.15 | 0.5 | 0.6 | 13.68 | | | | | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.5 | 0.6 | - | | | | | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 8.4 | 173.64 | 7.75 | 55.34 | 0.31 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.5 | 0.6 | 16 | 2343.8 | 36.05 | 612.9 | 0.26 | |
| | | | 1.05 | 63-020 | 2 | 0.10 | 0.6 | 0.7 | 7 | | | | | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.6 | 0.7 | 9.33 | | | | | |
| | | | 1.9 | | 1.8 | 0.15 | 0.6 | 0.7 | 12.66 | | | | | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.6 | 0.7 | - | | | | | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.15 | 0.6 | 0.7 | 7 | 243.10 | 10.85 | 64.57 | 0.26 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.6 | 0.7 | 13.33 | 3281.3 | 50.47 | 715 | 0.21 | |
| | | | 1.05 | 63-020 | 2 | 0.10 | 0.8 | 0.8 | 5.25 | | | | | |
| | | | 1.4 | | 2 | 0.12 | 0.8 | 0.8 | 7 | | | | | |
| | | | 1.9 | | 1.8 | 0.15 | 0.8 | 0.8 | 8.55 | | | | | |
| | | | 2.5 | | 2 | 0.18 | 0.8 | 0.8 | - | | | | | |
| | | | 1.05 | | 2 | 0.15 | 0.8 | 0.8 | 5.25 | 324.13 | 14.47 | 64.47 | 0.20 | |
| | | | 2.5 | | 1.6 | 0.12 | 0.8 | 0.8 | 10 | 5000 | 76.91 | 817.2 | 0.16 | |

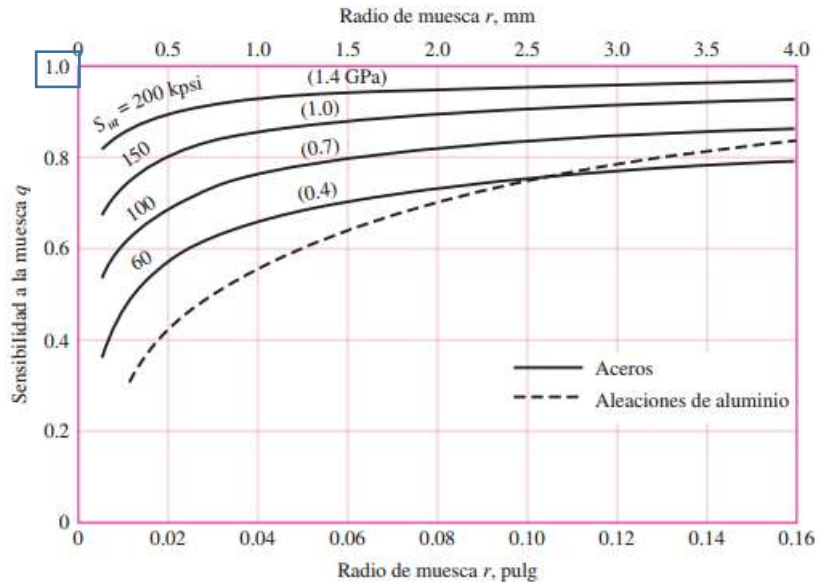
Anexo 20. Propiedades del acero SAE-1020.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|-------------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| UNS núm. | SAE y/o AISI núm. | Procesamiento | Resistencia a la tensión, MPa (kpsi) | Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi) | Elongación en 2 pulg, % | Reducción en área, % | Dureza Brinell |
| G10060 | 1006 | HR | 300 (43) | 170 (24) | 30 | 55 | 86 |
| | | CD | 330 (48) | 280 (41) | 20 | 45 | 95 |
| G10100 | 1010 | HR | 320 (47) | 180 (26) | 28 | 50 | 95 |
| | | CD | 370 (53) | 300 (44) | 20 | 40 | 105 |
| G10150 | 1015 | HR | 340 (50) | 190 (27.5) | 28 | 50 | 101 |
| | | CD | 390 (56) | 320 (47) | 18 | 40 | 111 |
| G10180 | 1018 | HR | 400 (58) | 220 (32) | 25 | 50 | 116 |
| | | CD | 440 (64) | 370 (54) | 15 | 40 | 126 |
| G10200 | 1020 | HR | 380 (55) | 210 (30) | 25 | 50 | 111 |
| | | CD | 470 (68) | 390 (57) | 15 | 40 | 131 |
| G10300 | 1030 | HR | 470 (68) | 260 (37.5) | 20 | 42 | 137 |
| | | CD | 520 (76) | 440 (64) | 12 | 35 | 149 |
| G10350 | 1035 | HR | 500 (72) | 270 (39.5) | 18 | 40 | 143 |
| | | CD | 550 (80) | 460 (67) | 12 | 35 | 163 |
| G10400 | 1040 | HR | 520 (76) | 290 (42) | 18 | 40 | 149 |
| | | CD | 590 (85) | 490 (71) | 12 | 35 | 170 |
| G10450 | 1045 | HR | 570 (82) | 310 (45) | 16 | 40 | 163 |
| | | CD | 630 (91) | 530 (77) | 12 | 35 | 179 |
| G10500 | 1050 | HR | 620 (90) | 340 (49.5) | 15 | 35 | 179 |
| | | CD | 690 (100) | 580 (84) | 10 | 30 | 197 |
| G10600 | 1060 | HR | 680 (98) | 370 (54) | 12 | 30 | 201 |
| G10800 | 1080 | HR | 770 (112) | 420 (61.5) | 10 | 25 | 229 |
| G10950 | 1095 | HR | 830 (120) | 460 (66) | 10 | 25 | 248 |

Anexo 21. Gráfica de factores de sensibilidad a la muesca.

$$K_f = 1 + q(k_t - 1)$$

$$q = 0 \rightarrow K_f = 1$$



$$K_{fs} = 1 + q_{cortante}(k_{ts} - 1)$$

$$q_{cortante} = 0 \rightarrow K_{fs} = 1$$

